

IDE242

VERVAARDIGEN 2

Prof.ir. P. de Ruwe

met medewerking van:

R.C.A.J. Dings
ir. T.J.A. Haan
ir. R.P. Koster
A.W.A. Smit
ir. M.J. Veefkind

technische verzorging:

M.C. Grabijn

Vakgroep Constructie
Faculteit van het Industrieel Ontwerpen
Technische Universiteit Delft

herziene druk oktober 1998

VOORWOORD

In ieder project dat zich richt op de ontwikkeling van een fysiek produkt komen vragen aan de orde betreffende de te kiezen wijze van vervaardigen en de daarmee verbonden kosten. Onaangename verrassingen in het 'maaktraject' zijn slechts te voorkomen door deze vragen gedurende de ontwikkeling van een produkt in een zo vroeg mogelijk stadium aan de orde te stellen en door fabricage-overwegingen voortdurend mee in beschouwing te nemen. Ontwerpbeslissingen, die worden genomen vóór en tijdens de conceptontwikkeling van een produkt, bepalen tot 80% van de kosten die in fabricage zullen ontstaan! Correcties van foutieve keuzes in de vroege fases van het ontwikkelproces zijn later alleen nog tegen extreem hoge kosten uit te voeren. In de praktijk zijn zulke correcties, juist door de hoge kosten, veelal geheel onmogelijk. Een eenmaal in gang gezette trein is bijna niet te stoppen. Kennis van het fabricagetraject en het gebruik van deze kennis in de vroegste fases van de produktontwikkeling zijn hierdoor voor industrieel ontwerpers onmisbaar.

Het beheersen van deze kennis is geen eenvoudige opgave. Samen met de grote diversiteit aan materialen, geometrieën en seriegroottes die voorkomen in het werkgebied van de industrieel ontwerper, zijn in de afgelopen honderd jaar duizenden vervaardigingstechnieken tot ontwikkeling gekomen. Een aantal dat overigens nog steeds snel groeit. Sommige van deze technieken zijn specifiek voor slechts één produktfamilie, zoals bijvoorbeeld het slijpen van lenzen of het wikkelen van gloeidraden. Andere technieken, zoals spuitgieten, hebben een heel brede toepassing gevonden. Geen enkel boek of dictaat beschrijft alle vervaardigingstechnieken. Telkens weer hebben auteurs een keuze moeten maken uit de enorme verzameling om de beschikbare kennis overdraagbaar te maken. Er bestaat dan ook een flink aantal naslagwerken, die telkens weer een andere doorsnijding van het gehele gebied van de vervaardigingstechnieken behandelen.

In onze eigen faculteit hebben in het verleden de hoogleraren Anemaat, Doorschot en Hermans de voor de industrieel ontwerper meest relevante vervaardigingstechnieken in dictaatvorm vastgelegd. Voor het tweedejaars vak *IDE 242 Vervaardigen 2*, dat in het cursusjaar '94-'95 voor het eerst wordt gegeven, is uit dit bestaande lesmateriaal een nieuwe compilatie gemaakt, die is aangevuld met materiaal uit andere bronnen. Hiermee zijn de meest gebruikelijke technieken voor serie- en massafabricage nu in één vak samengebracht. Belangrijke overweging bij het bepalen van de inhoud van dit nieuwe vak is geweest de kennis, die noodzakelijk wordt geacht voor het uitvoeren van de tweede- en derdejaars ontwerp oefeningen. Vooral wat dit laatste betreft verwacht ik een flinke verbetering ten opzichte van het oude vierjarige curriculum van onze faculteit.

Velen hebben een bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van dit vak. Hierbij denk ik in de eerste plaats aan de reeds genoemde oud-hoogleraren, die hun kennis in een overdraagbare vorm hebben achtergelaten, maar zeker ook aan diegenen die het omvangrijke zoek-, type- en tekenwerk hebben verzet dat nodig was om bestaand lesmateriaal een nieuwe vorm te geven. Ik hoop dat dit werk zijn weerslag zal vinden in goede studie-resultaten en dank een ieder voor zijn bijdrage.

Prof. ir. P. de Ruwe
Hoogleraar Industrieel Ontwerpen

Bij de tweede druk

Deze tweede druk van het dictaat IDE 242 wijkt slechts weinig af van de eerste versie. De wijzigingen zijn beperkt gebleven tot het corrigeren van onduidelijkheden en typefouten, die bij het gebruik in de cursus 1994-1995 naar voren zijn gekomen. Verder is gekozen in dit dictaat geen hoofdstuk over kostprijsberekeningen op te nemen, maar in plaats daarvan lesmateriaal van de faculteit Werktuigbouwkunde te gebruiken. Hopelijk komt deze verbeterde versie van het dictaat ten goede aan de kwaliteit en de studieresultaten van het vak Vervaardigen 2.

Bij de derde druk

De derde druk van dit dictaat wijkt, *met uitzondering van hoofdstuk 4*, slechts weinig af van de tweede druk. Het Hoofdstuk 4 "Spuitsieten van kunststoffen" is herschreven met het doel de leerstof toegankelijker te maken. Verder zijn taalkundige veranderingen aangebracht en de figuren 24.3 en 26.7 zijn verbeterd. De twee dictaten kunnen in het cursusjaar '96/'97 in principe door elkaar gebruikt worden, doch men wordt geadviseerd het hoofdstuk 4 van de derde druk te gebruiken. Gedurende het cursusjaar '96/'97 zal een hoofdstuk over kosten beschikbaar komen. Dit zal of bij de dictatenverkoop van IO worden aan geboden, of tijdens het college worden uitgereikt, en tot de verplichte tentamenstof behoren.

Bij de vierde druk (1998)

De vierde druk van dit dictaat wijkt vooral af van de vorige drukken doordat het hoofdstuk 27 "Kosten" is opgenomen.

REACTIES

Het vak *Vervaardigen 2* is naar aanleiding van het nieuwe curriculum ingrijpend veranderd.

Vandaar dat wij zeer benieuwd zijn naar opmerkingen van jou over de begrijpelijkheid van dictaat en colleges. Op dit blad kun je je reacties op de kwaliteit en kwantiteit van het vak *Vervaardigen 2* geven. Het blad kan worden ingeleverd bij de secretaresse van de vakgroep Constructie (kamer 21.20), maar ook na afloop van een college.

Bij voorbaat dank!

INHOUDSOPGAVE

Hoofdstuk 1: Inleiding	1.1
Hoofdstuk 2: Inleiding giettechniek	
2.1 GIETEN	2.1
2.2 CONSTRUCTIEREGELS	2.3
Hoofdstuk 3: Spuitgieten van metalen	
3.1 INLEIDING	3.1
3.2 SPUITGIETMACHINES	3.2
3.3 SPUITGIETMARIJZEN	3.6
3.4 VULLING VAN DE MATRIJS	3.9
3.5 PROCESVARIABLEN	3.10
3.6 SPUITGIETMATERIALEN	3.12
3.7 FOUTEN BIJ HET SPUITGIETEN	3.14
3.8 ONTWERPRICHTLIJNEN	3.16
Hoofdstuk 4: Spuitgieten van kunststoffen	
4.1 INLEIDING	4.1
4.2 HET SPUITGIETPROCES	4.1
4.3 PROCESVARIABLEN	4.5
4.4 DE SPUITGIETMACHINE	4.19
4.5 DE SPUITGIETMARIJS	4.26
4.6 PROCESVARIANTEN	4.30
Hoofdstuk 5: Schuimen	
5.1 INLEIDING	5.1
5.2 LAGEDRUKPROCES	5.3
5.3 GASTEGENDRUKPROCES	5.3
5.4 CINPRESS-PROCES	5.5
5.5 TWEECOMPONENTEN-SPUITGIETPROCES	5.6
Hoofdstuk 6: Coquillegieten	
6.1 INLEIDING	6.1
6.2 MATRIJS	6.2
6.3 HET GIETPROCES	6.5
6.4 ONTWERPRICHTLIJNEN	6.9
Hoofdstuk 7: Lage-druk-gieten	
7.1 INLEIDING	7.1
7.2 HET GIETPROCES	7.1
7.3 GEREEDSCHAP	7.3
7.4 ONTWERPRICHTLIJNEN	7.3
7.5 KOSTPRIJS	7.4
Hoofdstuk 8: Verloren-was-gieten	
8.1 INLEIDING	8.1
8.2 PROCES	8.2
8.3 HET BEREIDEN VAN DE WAS	8.3
8.4 HET MAKEN VAN EEN WASMODEL	8.5
8.5 HET MAKEN VAN DE GIETVORM	8.7
8.6 HET GIETEN VAN HET METAAL	8.9
8.7 ONTWERPRICHTLIJNEN	8.9

Hoofdstuk 9: Sinteren

9.1 INLEIDING	9.1
9.2 HET PERS/SINTERPROCES IN STAPPEN	9.3
9.3 NABEWERKING	9.12
9.4 MATERIAALEIGENSCHAPPEN	9.13
9.5 VOOR- EN NADELEN	9.14
9.6 ONTWERPRICHTLIJNEN	9.14
9.7 AFGELEIDE TECHNIEKEN	9.15

Hoofdstuk 10: Extruderen van metalen

10.1 INLEIDING	10.1
10.2 HET EXTRUSIEPROCES	10.2
10.3 WARM-EXTRUSIE	10.5
10.4 KOUD-EXTRUSIE	10.8
10.5 EXTRUSIEGIETEN	10.11
10.6 FOUTEN BIJ EXTRUSIE	10.12
10.7 EXTRUSIEMACHINE	10.13
10.8 ONTWERPRICHTLIJNEN	10.14

Hoofdstuk 11: Extruderen van kunststoffen

11.1 INLEIDING	11.1
11.2 HET EXTRUSIEPROCES	11.1
11.3 DE EXTRUSIESCHROEF	11.3
11.4 TOEPASSINGEN	11.14
11.5 VOOR- EN NADELEN	11.35
11.6 ONTWERPRICHTLIJNEN	11.35
11.7 KOSTEN	11.35

Hoofdstuk 12: Blaasvormen

12.1 INLEIDING	12.1
12.2 EXTRUSIEBLAZEN	12.2
12.3 COEXTRUSIE	12.14
12.4 SPUITGIETBLAZEN	12.17
12.5 STREKBLAZEN	12.19

Hoofdstuk 13: Rotatiegieten

13.1 INLEIDING	13.1
13.2 HET ROTATIEGIETPROCES	13.1
13.3 ROTATIEGIETMACHINES	13.4
13.4 MATRIJZEN	13.6
13.5 MATERIALEN	13.8
13.6 ONTWERPRICHTLIJNEN	13.9
13.7 VOOR- EN NADELEN	13.10
13.8 KOSTEN	13.11

Hoofdstuk 14: Thermovormen

14.1 INLEIDING	14.1
14.2 HET VERWARMEN	14.1
14.3 HET THERMOVORMPROCES	14.5
14.4 SPECIFIEKE PROCESSEN EN PRODUCTEN	14.13
14.5 NABEWERKEN VAN HET GEVORMDE PRODUCT	14.18
14.6 THERMOVORMMACHINES	14.19
14.7 THERMOVORMMATRIJZEN	14.22
14.8 VOOR- EN NADELEN	14.23
14.9 ONTWERPRICHTLIJNEN	14.23
14.10 KOSTEN	14.23

Hoofdstuk 15: Vlakstampen

15.1	INLEIDING	15.1
15.2	HET PROCES	15.2
15.3	PROCESVARIABLEN	15.4
15.4	VERSCHEIJNINGSVORMEN	15.8
15.5	VOOR- EN NADELEN	15.11
15.6	ONTWERPRICHTLIJNEN	15.12

Hoofdstuk 16: Lasersnijden

16.1	INLEIDING	16.1
16.2	HET PROCES	16.2
16.3	PROCESVARIABLEN	16.7
16.4	VOOR- EN NADELEN	16.10
16.5	ONTWERPRICHTLIJNEN	16.10
16.6	KOSTEN	16.11

Hoofdstuk 17: Fotochemische bewerkingen

17.1	INLEIDING	17.1
17.2	HET PROCES	17.2
17.3	VOOR- EN NADELEN	17.10
17.4	ONTWERPRICHTLIJNEN	17.11
17.5	KOSTPRIJS	17.13

Hoofdstuk 18: Buigen van plaat

18.1	INLEIDING	18.1
18.2	HET BUIGPROCES	18.2
18.3	BUIGMETHODEN	18.10
18.4	HET GEREEDSCHAP	18.12
18.5	VOOR- EN NADELEN	18.15
18.6	ONTWERPRICHTLIJNEN	18.15

Hoofdstuk 19: Dieptrekken

19.1	INLEIDING	19.1
19.2	HET DIEPTREKPROCES	19.1
19.3	PROCESVARIABLEN	19.8
19.4	BEREKENINGEN AAN DIEPTREKPRODUKTEN	19.13
19.5	ANDERE VORMEN VAN DIEPTREKKEN	19.18
19.6	BIJKOMENDE BEWERKINGEN	19.20
19.7	VOOR- EN NADELEN	19.22
19.8	ONTWERPRICHTLIJNEN	19.22

Hoofdstuk 20: Kraagtrekken

20.1	INLEIDING	20.1
20.2	HET PROCES	20.1
20.3	VOOR- EN NADELEN	20.6
20.3	ONTWERPRICHTLIJNEN	20.6

Hoofdstuk 21: Kralen

21.1	INLEIDING	22.1
21.2	HET KRAALPROCES	22.1
21.3	PROCESVARIABLEN	22.3
21.4	ONTWERPRICHTLIJNEN	22.6

Hoofdstuk 22: Pletten

22.1	INLEIDING	22.1
22.2	HET PLETPROCES	22.1

22.3 PROCESVARIABLEN	22.1
22.4 VOOR- EN NADELEN	22.6
22.5 ONTWERPRICHTLIJNEN	22.7
22.6 KOSTPRIJS	22.7

Hoofdstuk 23: Persen

23.1 INLEIDING	23.1
23.2 BOUWWIJZE	23.1
23.3 AANDRIJFMECHANISME	23.2
23.4 RICHTLIJNEN VOOR DE KEUZE	23.5

Hoofdstuk 24: Gereedschappen

24.1 INLEIDING	24.1
24.2 ENKELVOUDIG GEREEDSCHAP	24.1
24.3 COMPLEETSTEMPELS	24.2
24.4 VOLGSTEMPELS	24.3
24.5 STROOKINDELING	24.8
24.6 POSITIONERING	24.10
24.7 OPZETMECHANISMEN	24.12

Hoofdstuk 25: Gereedschapmaken

25.1 INLEIDING	25.1
25.2 CNC-BEWERKEN	25.2
25.3 ZINKVONKEN	25.2
25.4 DRAADVONKEN	25.5
25.5 GALVANOTECHNIEK	25.6
25.6 METAALSPUITEN	25.8
25.7 GIETEN	25.9
25.8 GEDEELD SLIJPEN	25.10

Hoofdstuk 26: Technologiekeuze

26.1 INLEIDING	26.1
26.2 MATERIAALKEUZE	26.2
26.3 TECHNOLOGIEKEUZE	26.3
26.4 VERGELIJKING VAN TECHNIEKEN	26.6
26.5 VOORBEELD TECHNOLOGIEKEUZE	26.11

Hoofdstuk 27: Kostprijsberekening

27.1 INLEIDING	27.1
27.2 UITGAVE, KOSTEN & PRIJS	27.2
27.3 KOSTENBEREKENING (COSTING)	27.4
27.4 HET VOORSPELLEN VAM KOSTEN	27.8
27.5 VOORBEELDEN	27.14
27.6 COMPUTERONDERSTEUNING	27.17
27.7 INFORMATIEBRONNEN	27.17
27.8 LITERATUUR	27.18

Hoofdstuk 1:

INLEIDING

Dit vak *IDE 242 Vervaardigen 2* bouwt voort op de kennis uit het vak *Vervaardigen 1* en richt zich vooral op vervaardigingstechnieken, die in de massafabricage worden toegepast voor het produceren van onderdelen. Voorafgaande aan de behandeling van deze technieken zal in deze inleiding worden ingegaan op het begrip massafabricage.

Veelal wordt massafabricage gedefinieerd als een industriële produktiewijze met een aantal bijzondere karakteristieken. Daarbij is industriële produktie een zeer ruim begrip waarin bijvoorbeeld past het verzagen van grote aantallen bomen of het produceren van een groot volume dieselolie. Deze voorbeelden behoren echter niet tot het typische gebied van de massafabricage. De massafabricage onderscheidt zich door een aantal kenmerken, te weten:

- de vervaardiging van discrete, veelal samengestelde produkten;
- de volledig uitwisselbaarheid van onderdelen;
- de vergaande taakdeling van de directe arbeid;
- de inzet van automaten voor eenvoudige deeltaken.

Korte historie

De industriële produktiewijze is in de eerste helft van de vorige eeuw ontstaan. Voor tal van bewerkingen zoals zagen, malen of weven was de beschikbaarheid van mechanische energie van vitaal belang. Met de komst van de stoommachine als goedkope en betrouwbare energiebron vond concentratie van bewerkingscapaciteit plaats rond deze machines. Steeds krachtiger stoommachines en steeds efficiëntere grootschalige produktie markeren het begin van de industriële revolutie. De typische massaproductie liet echter nog op zich wachten tot aan het einde van de negentiende eeuw.

Tot dat moment berustte de voortbrenging van discrete produkten geheel op ambachtelijke werkwijzen. Produkten werden veelal geheel door één ambachtsmans vervaardigd. Hij koos zijn materialen op basis van eigen ervaring. De onderdelen voor zijn produkt werden door hemzelf aangemaakt en pas bij montage maakte hij onderdelen passend op elkaar om te komen tot een werkende samenstelling. Op deze wijze werd ieder produkt een uniek werkstuk. De eigenschappen van een produkt waren sterk afhankelijk van het vakmanschap van de maker. Deze negentiende-eeuwse produktiemethode beperkte zich zeker niet uitsluitend tot kleine aantallen produkten. Wapens, klokken, rijwielen etc. werden al bij tienduizenden of zelfs honderdduizenden aangemaakt, echter zonder dat werd voldaan aan de kenmerken van de huidige massafabricage.

Het concept van de uitwisselbaarheid van onderdelen is ongeveer honderd jaar geleden ontstaan in de wapenindustrie in Noord-Amerika. Met de toename van het aantal wapens waren een aantal voordelen van dit concept duidelijk herkenbaar zoals:

- logistieke ontkoppeling van onderdelen aanmaak en montage;
- snelle en goedkope montage door het wegvallen van het pasmaken;
- eenvoudige vervanging van onderdelen bij reparatie in het veld.

Tegelijk was echter voor het realiseren van dit concept een voor die tijd extreme beheersing noodzakelijk van de spreiding in onderdeelmaten.

Verbetering van vervaardigingstechnieken *en* meetmiddelen hebben de doorslag gegeven en het pasmaken werd vervangen door stelsels van regels en afspraken, zoals wij die nu kennen in bijvoorbeeld het ISO passingsstelsels. Het kan niet genoeg worden benadrukt dat massafabricage zonder deze stelsels niet kan bestaan.

Henry Ford heeft als eerste het concept van uitwisselbaarheid tot in zijn uiterste consequenties toegepast bij de fabricage van het hoog complexe produkt 'automobiel'. Tot ruim na de Eerste Wereldoorlog werden alle auto's ambachtelijk vervaardigd. Reparaties of aanmaak van een reserveonderdeel konden vaak slechts door de oorspronkelijke bouwer van het voertuig worden uitgevoerd. Voor de door Ford nagestreefde wijde verspreiding van de automobiel was uitwisselbaarheid bij reparatie een eerste vereiste.

Hij ging echter veel verder dan dat en gebruikte het concept van volledige uitwisselbaarheid tot op het niveau van deelbewerkingen in de fabriek. Hiermee legde hij de basis voor een vergaande arbeidsdeling. Arbeiders werden getraind op het snel opeenvolgend en reproduceerbaar uitvoeren van grote aantallen identieke deelbewerkingen, waardoor een enorme efficiency-verbetering werd bereikt. Tevens viel hierdoor de noodzaak weg tot het inzetten van vakmanschap voor directe produktietaken wat resulteerde in een aanzienlijke besparing op loonkosten.

De vakman ging zich bezighouden met het structureren van deeltaken. Vooral de naam van Taylor is onlosmakelijk verbonden met de technieken van arbeidsanalyse en efficiency-verbetering in massafabricage. Al snel werden vele deeltaken zo ver vereenvoudigd dat ze konden worden gemechaniseerd.

Produktie-ingenieurs ontwikkelden de technieken om het vakmanschap, dat oorspronkelijk nodig was om produkten te vervaardigen, te bevriezen in machines en gereedschappen.

Huidige stand

De mechanisatie van deelbewerkingen heeft een zeer belangrijke rol gespeeld bij de verdere uitbouw van de massafabricage, waarbij vooral tijdens en kort na de Tweede Wereldoorlog de techniek met sprongen vooruit is gegaan. Nieuwe gereedschapsmaterialen en machineconstructies worden geïntroduceerd en tot het uiterste belast bij het streven naar grotere produktie-aantallen in steeds kortere tijd. Deze trend is echter in vele industrieën tussen 1970 en nu tot staan gekomen. Verdere verlaging van kostprijzen werd steeds minder eenvoudig, maar belangrijker nog dan dat was het feit dat de markt zijn interesse begon te verliezen in de grote aantallen laaggeprijsde identieke produkten. Er ontstond ruimte voor diversiteit en kwaliteit.

Voor de massafabricage betekent dit een geheel nieuwe uitdaging, die vooral tot uitdrukking komt in drie eisen, die snel in belang zijn toegenomen. Deze zijn:

- Het voorkomen dat fabricagefouten doordringen tot bij de klant;
- Het produceren van vele varianten van een produkt gelijktijdig en in kleine series met behoud van efficiency;
- Het in korte tijd inrichten voor en aanlopen van nieuwe produkten.

Onder invloed van deze veranderde eisen heeft de massafabricage zich moeten aanpassen. Hierbij treden een tweetal aanpassingen nadrukkelijk op de voorgrond, te weten:

1. Het vervangen van vele tussentijdse inspecties en keuringen in de produktie door beheersing van de fabricageprocessen zelf tot het zogenaamde 'zero defect' niveau. Vanzelfsprekend zijn hierdoor in

veel gevallen de nauwkeurigheid aan materialen, machines en gereedschappen sterk verhoogd, maar ook is hiermee een deel van het vakmanschap teruggekeerd op de produktievloer.

2. De invoering van meer flexibele, vaak computergestuurde bewerkingsmachines, die sneller omstelbaar zijn dan de eerdere generaties en die de vervaardiging toelaten van onderdelen in kleine series bij niet of slechts weinig hogere fabricagekosten.

Over dit vak

Het behandelen van alle vervaardigingstechnieken uit de massafabricage in een dictaat of zelfs in een opleiding is een onmogelijke opgave. Voor dit vak *Vervaardigen 2* is gekozen die technieken te behandelen, die in de massafabricage een wijde verbreiding hebben gevonden voor het produceren van onderdelen en waarbij de vorm van het onderdeel in hoge mate wordt bepaald door de vorm van het gereedschap. De groep technieken vormt de basis voor de fabricage in zeer vele op massafabricage gerichte bedrijven. Daarnaast is in overweging genomen dat juist deze technieken met grote regelmaat een rol spelen in de ontwerp oefeningen in de hogere studie jaren. Getracht is vergelijkbare technieken voor metaal, kunststof en soms zelfs keramiek in samenhang te behandelen zonder overigens de specifieke kenmerken van ieder van deze materialen uit het oog te verliezen. Er is vanuit gegaan dat deze aanpak het kiezen van de juiste materiaal/technologie-combinatie vereenvoudigd.

Over de vele onderwerpen, die in dit dictaat niet aan de orde komen tenslotte nog het volgende:

- Bij ieder van de behandelde vervaardigingstechnieken is een literatuurlijst opgenomen, die toegang geeft tot aanvullende informatie.
- Computersturing en CAD/CAM worden in dit dictaat niet of slechts zeer terloops behandeld. Andere vakken in het curriculum gaan nader in op deze materie.
- In het lesprogramma komen nog de vakken *Vervaardigen 3* en voor de PO-richting *Materialiseren*. In *Vervaardigen 3* zal de aandacht vooral worden gericht op de methoden en techniek, die worden ingezet om te komen van onderdelen tot een afgeleverd eindprodukt. *Materialiseren* zal aanvullend zijn op *Vervaardigen 2* omdat bewerkingen zullen worden behandeld, die in het tweede jaar noodzakelijk achterwege moesten blijven.

*
verh. type

Hoofdstuk 2: INLEIDING GIETTECHNIEK

2.1 GIETEN

Bij het gieten wordt een vloeibaar materiaal gegoten in een vormholte die de negatieve vorm van het produkt heeft. De vorm die het vloeibare materiaal aanneemt, wordt vastgelegd wanneer het materiaal stolt. Als het produkt voldoende gestold is, wordt het produkt uit de vormholte verwijderd en kan het worden afgewerkt. Gieten is het oudst bekende proces voor het vervaardigen van metalen onderdelen. De stappen zoals die net genoemd zijn, gelden echter ook voor gietmethoden van kunststoffen en van sommige keramische materialen. In principe stelt het gietproces geen beperkingen aan de afmetingen van het produkt. Deze beperkingen worden wel gesteld door de keuze van het te verwerken materiaal, de smelttemperatuur en het matrijsmateriaal. Het gieten is een belangrijke en veelgebruikte vervaardigingstechniek, die het mogelijk maakt om zeer ingewikkelde produkten te maken van veel verschillende materialen, met goede toleranties en oppervlakte- en materiaaleigenschappen. Het grootste voordeel ten opzichte van andere vervaardigingstechnieken, is dat er vaak nauwelijks gebruik hoeft te worden gemaakt van dure nabewerkingsmethoden.

De gietprocessen worden meestal ingedeeld op basis van het type matrijs dat gebruikt wordt of op basis van de manier waarop er wordt gegoten. Een overzicht van de belangrijkste gietprocessen staat in figuur 2.1.

Vormtype	Materiaal van de vorm	Giet-principe	Procesnaam
Eenmalig	Zand	Zwaartekracht	Zandgieten
	Keramiek	Zwaartekracht of lage druk	Verloren-wasgieten
Permanent Stationair	Metaal (voor kunststoffen soms ook gevulde epoxies)	Hoge druk	Spuitgieten
		Lage druk	Lage-druk-gieten
		Zwaartekracht	Coquillegieten
Permanent Roterend	Metaal (voor kunststoffen soms ook gevulde epoxies)	Centrifugaal	Centrifugaal gieten
		Zwaartekracht	Rotatiegieten

Figuur 2.1: Indeling van de gietprocessen

Het zandgieten is al uitgebreid behandeld in het vak *Vervaardigen 1 (WB5181)*. Het centrifugaal gieten van metalen wordt alleen toegepast voor het vervaardigen van grote buizen. In dit dictaat zullen daarom alleen de andere gietprocessen aan de orde komen.

Net als bij andere productieprocessen zijn er bij het gieten veel aspecten van invloed op de kwaliteit van het gietprodukt. Bovendien moet de ontwerper een goed inzicht hebben in de functie die het produkt moet vervullen. De ontwerper moet zich er van bewust zijn dat ieder gietproces, zelfs de meest kostbare, beperkingen aan het ontwerp stelt. Het is daarom belangrijk om voldoende kennis te hebben van de mogelijkheden en beperkingen van de diverse gietprocessen. In dit hoofdstuk zal worden aangegeven met welke aspecten rekening zal moeten worden gehouden.

Het gietproces

Het vervaardigen van een foutloos gietstuk is afhankelijk van veel factoren. Een belangrijke factor is de manier waarop het materiaal in de matrijs wordt gegoten of gespoten en afgekoeld. Het gietproces kan worden beschreven aan de hand van de gietdruk en het gietsysteem (de kanalen waardoor het materiaal naar de vormholte stroomt).

De gietdruk kan worden verdeeld in druk door zwaartekracht ($<0,1$ MPa), lage druk (0,12 tot 0,30 MPa) en hoge druk (2 tot 15 MPa). Het hoge-druk-gieten wordt ook spuitgieten genoemd. Het geeft de mogelijkheid om produkten te gieten met een kleinere wanddikte en van een hogere kwaliteit, maar er worden hogere eisen gesteld aan de sterkte van het matrijsmateriaal.

De belangrijkste functie van het gietsysteem is om het gesmolten materiaal met de juiste snelheid en temperatuur in de vormholte te brengen. Een slecht ontworpen gietsysteem kan grote uitval veroorzaken door onvolledige vulling van de holte en de materiaalstructuur kan ongewild veranderen. Hoe het gietsysteem moet worden ontworpen, hangt af van het gietproces dat men gebruikt en het materiaal dat men gaat gieten en van de vorm van het te gieten produkt.

Een standaard systeem voor het gieten van metaal onder invloed van de zwaartekracht bestaat uit een giectrechter, een gietkanaal en een gietaansijding. Door een giectrechter te gebruiken, wordt voorkomen dat het gietkanaal te snel slijt en dat er slakken worden meegegoten. Bij het spuitgieten zit een deel van het gietsysteem in de spuitgietmachine. In de matrijs vindt men slechts het gietkanaal en de aansijding op het produkt, die meestal aanspuiting wordt genoemd. Soms is het nodig om een werkstuk op meer plaatsen tegelijk aan te snijden (méér gietopeningen). Het gietkanaal wordt gesplitst zodat alle openingen bereikt worden.

Stolling, krimp en slink

Het materiaal stolt tijdens het afkoelen naar kamertemperatuur. De stolling van het materiaal is afhankelijk van het ontwerp van het produkt, van het matrijsmateriaal en van de gebruikte koeling. Het stollen bij het zandgieten en het verloren-was-gieten gebeurt relatief langzaam, maar wanneer er gebruik wordt gemaakt van permanente metalen matrijzen zoals bij het spuitgieten kan het stollen al beginnen voordat de matrijs helemaal is gevuld. Dit betekent dat de dünnere delen al gestold kunnen zijn voordat de dükkere delen helemaal gevuld zijn. Dit geeft aan dat het belangrijk is om de wanddikte van het produkt zo gelijkmatig mogelijk te laten verlopen.

Volumevermindering treedt op over het totale temperatuurtraject van vloeibaar materiaal naar afgekoeld eindprodukt. Behalve in de vloeibare en in de vaste fase treedt ook volumeverandering op bij de meeste fase-overgangen. Zo treedt bij het stollen van metalen en van deëlkristallijne kunststoffen altijd volumevermindering op door kristallisatie.

Bij afkoelen in de vaste fase kunnen ook fase-overgangen optreden, waarbij het volume verandert (meestal krimp, soms uitzetting). Voorbeelden zijn de overgangen van austeniet naar ferriet bij koolstofstaal en van rubberfase naar glasfase bij kunststoffen. Volumevermindering tijdens de vloeibare fase is te beperken door zoveel mogelijk materiaal na te vullen of na te drukken. De resterende volumevermindering moet worden ingecalculeerd bij de vervaardiging van gietvorm of matrijs. Bij metalen varieert de volume-afname van ongeveer 2,5% bij koolstofstaal tot ruim 6% bij zink- en aluminiumlegeringen. Bij kunststoffen moet worden gerekend op een volume-afname van 5 à 10%; vooral bij deeltkristallijne kunststoffen is de krimp groot tengevolge van bijkomende kristallisatie. Al deze waarden gelden voor de normale situatie dat voldoende materiaal wordt nagevuld. De volumevermindering van een product manifesteert zich als krimp of als slink. Krimp is het geheel samentrekken tijdens afkoelen en resulteert in maatveranderingen. Bij metaallegeringen blijft vaak de afgekoelde huid redelijk vormvast terwijl een aanzienlijke volumevermindering binnenin resulteert in z.g. slinkholten. Slink ontstaat vooral tijdens fase-overgangen in gietstukken. Kunststoffen slinken niet: het flexibele materiaal trekt altijd samen. Wel kan er, evenals bij metalen, een poreuze structuur ontstaan.

Opkomers

Zonder extra maatregelen zal in het binnenste gedeelte van het werkstuk slink optreden waardoor porositeit kan ontstaan. Om dit te voorkomen, kan bij het gieten van metaal met behulp van zwaartekracht gebruik worden gemaakt van opkomers. Opkomers worden niet gebruikt bij het spuitgieten van metaal en kunststof. Daar wordt, nadat de matrijsholte is gevuld, met hoge druk nagespoten om voor de volumevermindering te compenseren. Door het gietstuk aan te passen kan een stolling zo worden beïnvloed dat deze plaats heeft in de richting van de opkomers. De opkomers zijn alleen van belang in de eerste twee fasen van de volumevermindering. Om de derde fase te compenseren, wordt de vormholte vaak iets groter gemaakt dan het produkt moet worden. De opkomers vormen tijdens het gieten een reservoir van gesmolten metaal. Wanneer het gietstuk tijdens het proces slinkt, wordt er uit dit reservoir metaal toegevoegd, zodat de vorming van holten in het gietstuk beperkt wordt. In het ideale geval begint het stollen van het gietstuk in de delen die het verste van de opkomers zijn verwijderd en zijn de opkomers de laatste delen van het gietstuk die stollen en slinken. Dit ideale geval wordt het best benaderd wanneer de wanddikte in het gietstuk zo gelijkmatig mogelijk verloopt. De grootte van de opkomers is afhankelijk van het gietstuk. Hoe langer het duurt voordat het gietstuk gestold is, hoe groter de opkomers moeten zijn. In het algemeen worden de opkomers bovenop of aan één zijkant van het gietstuk geplaatst. Ze worden later van het gietstuk verwijderd.

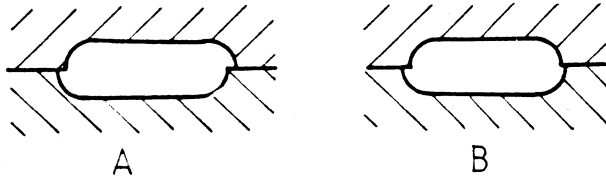
2.2 CONSTRUCTIEREGELS

Deelvlakken

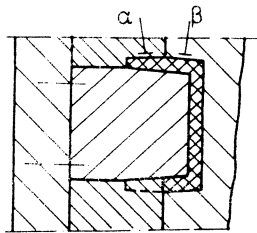
Bij het gieten in een permanente vorm (matrijs) wordt het produkt, net als bij sinteren en bij de omvormtechnieken smeden en warmpersen, gevormd in de holte in een matrijs. Een deelvlak verdeelt de matrijs in twee delen zodanig dat het gevormde produkt zonder beschadigingen uit de beide delen van de matrijs verwijderd kan worden. Het deelvlak moet de holte perfect afsluiten om braamvorming aan het produkt te voorkomen. De vorm van het deelvlak hangt af van de vorm van het produkt en van de constructie van de matrijs. Men kan zeggen dat het deelvlak in de matrijs over de grootste afmetingen van het produkt, loodrecht op de lossingsrichting van het produkt moet liggen.

Het meest eenvoudige deelvlak van een matrijs is vlak. De moeilijkheidsgraad neemt toe als het deelvlak bestaat uit platte vlakken die elkaar onder een hoek snijden, of als het bestaat uit een gebogen vlak.

Het is vaak onaanvaardbaar wanneer de deelnaad over een zichtvlak van het produkt loopt. Het verwijderen van de deelnaad door een nabewerking is duur en meestal onmogelijk, doordat de vlakken aan weerszijden van de deelnaad iets ten opzichte van elkaar verschoven zijn (figuur 2.2). Bovendien loopt de lossingsschuinte tegengesteld. Na het verwijderen van de deelnaad is het oppervlak niet meer strak en niet glad. Daarom legt men bij voorkeur de deelnaad op de rand van het produkt.



Figuur 2.2: Verschoven vlakken aan weerszijden van het deelvlak

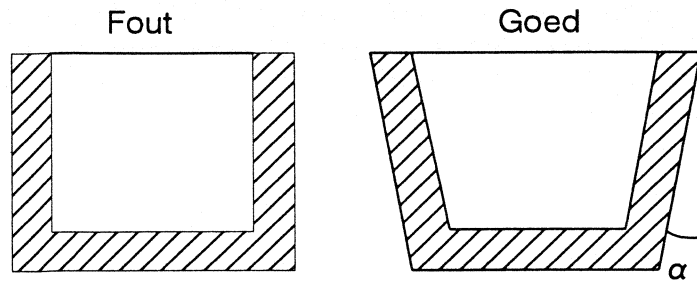


Figuur 2.3: Tegengestelde lossingsschuinte aan weerszijden van het deelvlak

Lossingshoek

Een matrijs voor het gieten bestaat meestal uit twee matrijshelften: een vaste plaat en een bewegende plaat. Wanneer de matrijs wordt geopend, moet het gietstuk uit de matrijs worden verwijderd. Om te zorgen dat het gietstuk niet in de matrijs blijft steken, moeten de wanden een kleine lossingshoek hebben. Dit betekent dat de vlakken die evenwijdig aan de lossingsrichting zijn onder een kleine hoek staan. Deze lossingshoek is meestal 1 tot 2°. Omdat de krimp van een werkstuk altijd naar het midden toe is gericht, zal de lossingshoek op vlakken aan de binnenkant van het produkt groter moeten zijn dan die op vlakken aan de buitenkant.

In veel gevallen is het werkstuk hol of zitten er niet-lossende gaten in, zodat gebruik moet worden gemaakt van schuiven of kernen, die apart van de matrijsdelen kunnen worden bewogen. Ook deze moeten een kleine lossingshoek hebben.



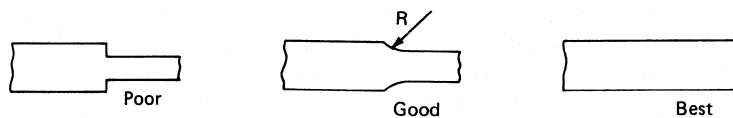
Figuur 2.4: Een verbetering van het ontwerp door het aanbrengen van een lossingshoek

Wanddikte

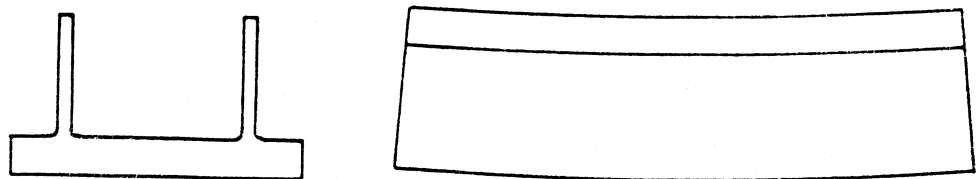
Doordat het materiaal in de dünnere delen eerder stolt, kan het zijn dat de verder van de aanspuiting gelegen delen niet voldoende bereikt worden. De dünnere delen moeten daarom zo mogelijk dichter bij de aanspuiting geplaatst zijn of van een extra aanspuiting worden voorzien.

Doordat de delen met een kleinere wanddikte sneller afkoelen en samentrekken dan de dükkere delen, kunnen er in metalen grote spanningen ontstaan tijdens het afkoelen van het produkt. Bij het spuitgieten van kunststoffen zal dit ertoe leiden dat het werkstuk krom trekt.

Materialen zoals staal kunnen tijdens het opwarmen en afkoelen grote structuurveranderingen ondergaan, waardoor de afmetingen nog verder veranderen. Hetzelfde geldt voor kristalliserende kunststoffen. De spanningen die hierdoor ontstaan, komen bovenop de spanningen die door wanddikteverschillen ontstaan. Omdat de spanningen in het produkt zo hoog kunnen oplopen dat er scheuren in het produkt ontstaan, is het van belang om extreme wanddiktevariatie zoveel mogelijk te beperken.



Figuur 2.5: Wanddikte-overgangen



Figuur 2.6: Vervormingen die kunnen ontstaan door een verschil in wanddikte

Een andere overweging met betrekking tot de wanddikte is welke minimum wanddikte er nog goed kan worden gegoten. Hier zijn geen eenduidige regels voor, maar enkele richtlijnen voor het gieten van metalen zijn aangegeven in figuur 2.7. Bij het spuitgieten van kunststoffen kan in het algemeen worden aangehouden dat de wanddikte het beste tussen de 2 en 3 mm kan liggen.

Gietproces	Minimum wanddikte (mm)
Zandgieten	2,5
Coquillegieten	3,2
Spuitgieten (metaal)	0,8
Verloren-was gieten	1,6

Figuur 2.7: Minimale wanddikte voor verschillende metaalgietprocessen

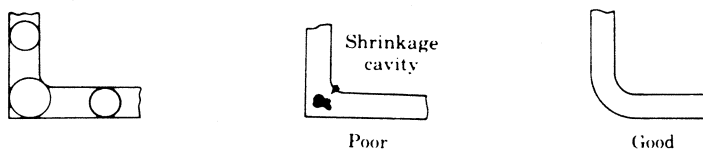
Om de stijfheid of sterkte van een onderdeel te verbeteren, kunnen beter ribben aangebracht worden in plaats van de wanddikte te vergroten.

Kruispunten en bochten

De plaatsen in het produkt waar de verschillende delen bij elkaar komen, moeten met zorg worden ontworpen. Hier ligt namelijk een mogelijke bron van poreusheid.

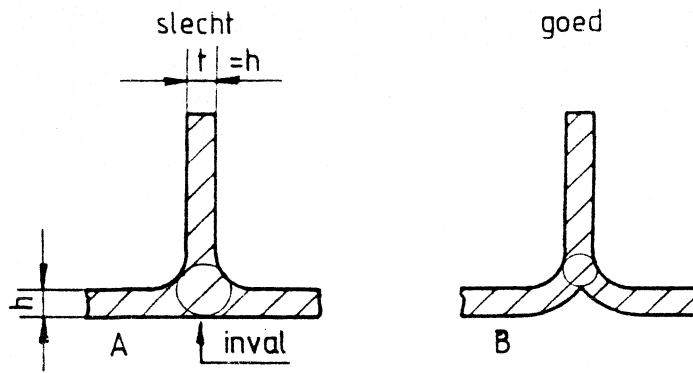
We bekijken het geval waarin twee onderdelen van gelijke doorsnede die samenkomen onder een rechte hoek (figuur 2.8). Aan de cirkels die binnen de wanddikte zijn getekend, is te zien dat de wanddikte op het kruispunt relatief groot is. Hierdoor stolt het materiaal op deze plaats langzamer dan in de directe omgeving, zodat poreusheid kan ontstaan. Bovendien wordt bij een scherpe hoek de afkoeling aan de buitenzijde versneld, terwijl de hoek aan de binnenkant langzamer afkoelt. Hierdoor kunnen er aan de binnenkant restspanningen ontstaan en kunnen er scheuren in het produkt komen. Dit probleem kan worden opgelost door de overgang af te ronden en er voor te zorgen dat de verbinding een constante wanddikte heeft.

Een extra probleem bij thermoplastische kunststoffen is dat er in een vloei-naad ontstaat op plaatsen waar twee materiaalstromen samenkomen.



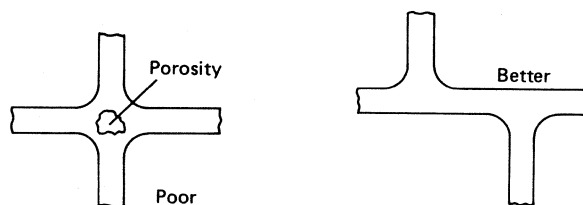
Figuur 2.8: Wanddikteverschil bij een snijpunt van twee onderdelen

Wanneer de aansluiting niet een L-vorm maar een T-vorm heeft, wordt het probleem nog groter. Omdat de materiaal massa van de verbinding is toegenomen, zal eerder slink en poreusheid ontstaan (figuur 2.9). Mogelijke oplossingen voor dit probleem zijn het laten invallen van het oppervlak, het gebruiken van een kern of door afkoelen het stollen op de plaats van de verbinding te versnellen.



Figuur 2.9: Een T-verbinding

Wanneer de aansluiting een X-vorm heeft, is de materiaalmassa in de verbinding nog groter. Er kan gebruik worden gemaakt van een kern om de materiaalmassa te verminderen of de X-verbinding kan worden vervangen door twee T-verbindingen.



Figuur 2.10: Een X-verbinding

Kernen

Gaten in gietstukken die niet in de lossingsrichting zitten, kunnen worden gemaakt met behulp van kernen. De kernen mogen niet te klein zijn, omdat ze dan gemakkelijk kunnen breken. Gaten in een gebied met veel spanningen veroorzaken een spanningsconcentratie.

Kernen kunnen ook gebruikt worden om te zorgen dat er geen poreusheid in het produkt ontstaat. Door op de plaats van een materiaalophoping, zoals bij een kruispunt, een kern te gebruiken, verloopt de wanddikte gelijkmatiger en zal er minder poreusheid ontstaan.

Op plaatsen waar het materiaal geen functie heeft, kan met behulp van kernen materiaal bespaard worden.



Figuur 2.11: Voorbeelden van de toepassing van kernen om materiaal-opeenhoping te verminderen.

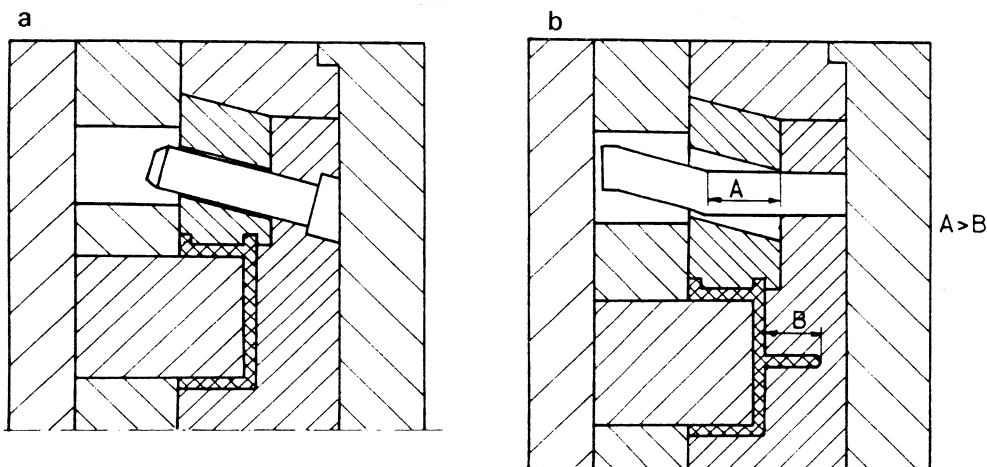
Om de levensduur van de kernen te vergroten, moet de lengte/diameter-verhouding klein gehouden worden. Normaal gesproken kunnen blinde gaten die met een kern worden gemaakt een diepte hebben van drie tot vijf keer de

diameter van het gat. Er moet wel op gelet worden dat er tussen de bodem van het gat en de wand voldoende materiaal aanwezig is om uitknikken van dit deel te voorkomen.

Van sommige gaten moet het oppervlak worden nabewerkt, omdat er nauwe toleranties gehaald moeten worden of omdat er schroefdraad moet worden aangebracht. Deze gaten worden met een kern gemaakt en vervolgens geboord tot de juiste diameter. Dit is meestal goedkoper dan het gat te boren. De lossingshoek die gaten moeten hebben in verband met de lossing van de kern, kan tijdens het nabewerken worden verwijderd. Bij het spuitgieten van kunststoffen wordt schroefdraad soms direct via de matrijs vormgegeven.

Schuiven

Wanneer er op een werkstuk uitwendige anti-lossingen voorkomen, maakt men gebruik van schuiven in de matrijs. Dit is een los matrijsdeel dat in een andere richting kan bewegen dan de openlooprichting van de matrijs. Een schuif kan bewogen worden met schieffstaande pennen (figuur 2.12a), schenen (figuur 2.12b), persluchtcilinders of hydraulische cilinders.



Figuur 2.12: Toepassing van schuiven met schieffstaande pennen (a) en met schenen (b)

Als de matrijs gesloten is, moet de druk in de holte op de schuif opgevangen worden door het andere matrijsdeel. De pennen of schenen zijn te zwak om de hoge kracht op te vangen. Net als bij perslucht- en hydraulische cilinders moet de kracht door het andere matrijsdeel worden opgevangen.

De schuiven in een matrijs zijn hoogbelaste onderdelen. Meestal worden deze niet gesmeerd, omdat het vet in de vormholte kan komen. Om toch een lange levensduur te krijgen met weinig slijtage worden de glijdende delen gehard. Het harden en de daaropvolgende nabewerking maken de schuiven duur. Voor zeer grote productieseries vormen de matrijskosten slechts een klein deel van de kostprijs van het produkt, zodat gecompliceerde zijschuiven kunnen worden toegepast met slechts een beperkte consequentie voor deze kostprijs. Voor kleinere series zijn de matrijskosten de grootste post in de calculatie. Daarom is het voor kleinere series verstandig om anti-lossingen als het enigszins mogelijk is te vermijden.

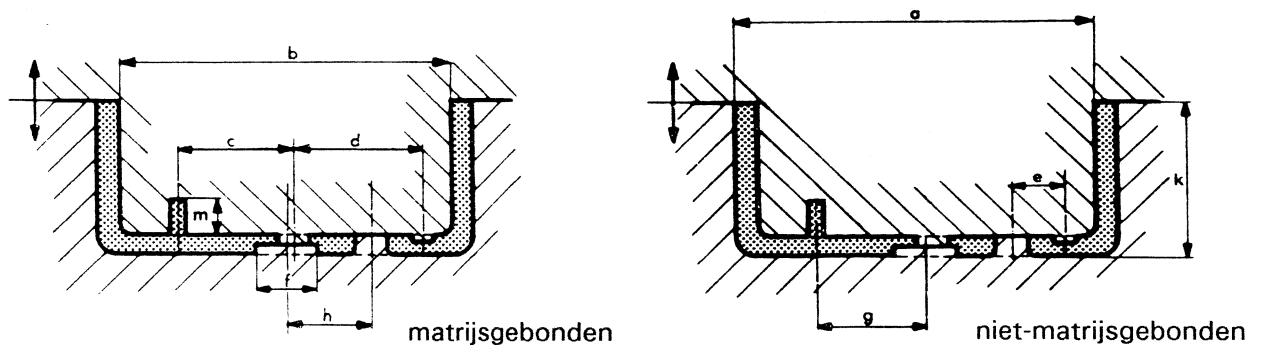
Bij zeer grote series dunwandige produkten, die weinig of geen lossing op de zijwanden hebben, kan het toch zinvol zijn om schuiven toe te passen. In zo'n geval kan men met een kortere koeltijd zonder beschadigingen of vervormingen uitstoten.

Toleranties

De nauwkeurigheid waarmee een gietstuk kan worden gemaakt hangt af van de plaats in de matrijs van de maatbepalende elementen. De maat die een onderdeel uiteindelijk krijgt, hangt af van de nauwkeurigheid waarmee de matrijs is gemaakt, de precisie waarmee de verschillende matrijsdelen en kernen ten opzichte van elkaar worden gepositioneerd en de temperatuurvariatie van de matrijs gedurende de spuitgietscyclus.

Schommelingen in de temperatuur hebben een grote invloed op de afmetingen van het gietstuk, omdat de matrijs uitzet wanneer de temperatuur hoger wordt en dan worden dus ook de afmetingen van de vormholte groter.

Bij het bepalen van de toleranties is het belangrijk om onderscheid te maken tussen afmetingen die in één matrijs helft liggen (de *matrijsgebonden maten*) en de afmetingen die over de matrijsdeling heenlopen (*niet-matrijsgebonden maten*) (zie figuur 2.13). Door de reeds genoemde factoren (vooral door de onderlinge positionering) zijn de toleranties van de niet-matrijsgebonden maten ruimer dan die van de matrijsgebonden maten.



Figuur 2.13: Matrijsgebonden en niet-matrijsgebonden maten

Ook veroudering van het matrijsmateriaal heeft invloed op de afmetingen van het gietstuk. Pas na enkele maanden heeft het zijn definitieve afmetingen gekregen. Deze maatverandering door veroudering is echter zo klein dat het alleen voor zeer nauwkeurige produkten van belang is.

Bewerkingstoeslag

Op de oppervlakken van het werkstuk die nog verspanend moeten worden nabewerkt, moet rekening worden gehouden met een kleine toeslag op het materiaal. Op deze manier kan bij het nabewerken precies de juiste maat aan het produkt worden gegeven. Deze bewerkingstoeslag is afhankelijk van de wanddikte en de gevraagde toleranties. De toeslag ligt meestal tussen de 0,25mm voor kleine en nauwkeurige gietstukken en 10mm voor grote gietijzeren werkstukken.

LITERATUUR

- Alting, L.
Manufacturing engineering processes (2nd edition)
Marcel Dekker, 1994.
- Anemaat, A.
Konstrueren in kunststoffen
Collegediktaat io82
Technische Universiteit Delft, 1992.
- Bradley, E.F.
High performance castings - A technical guide
ASM International, 1989.
- Clegg, A.J.
Precision casting processes
Pergamon press, 1991.
- Kalpakjian, S.
Manufacturing engineering and technology (2nd edition)
Addison-Wesley Publishing company, 1992.
- Trucks, H.E.
Designing for economical production
Society of manufacturing engineers, 1974.

Hoofdstuk 3: SPUITGIETEN VAN METALEN

3.1 INLEIDING

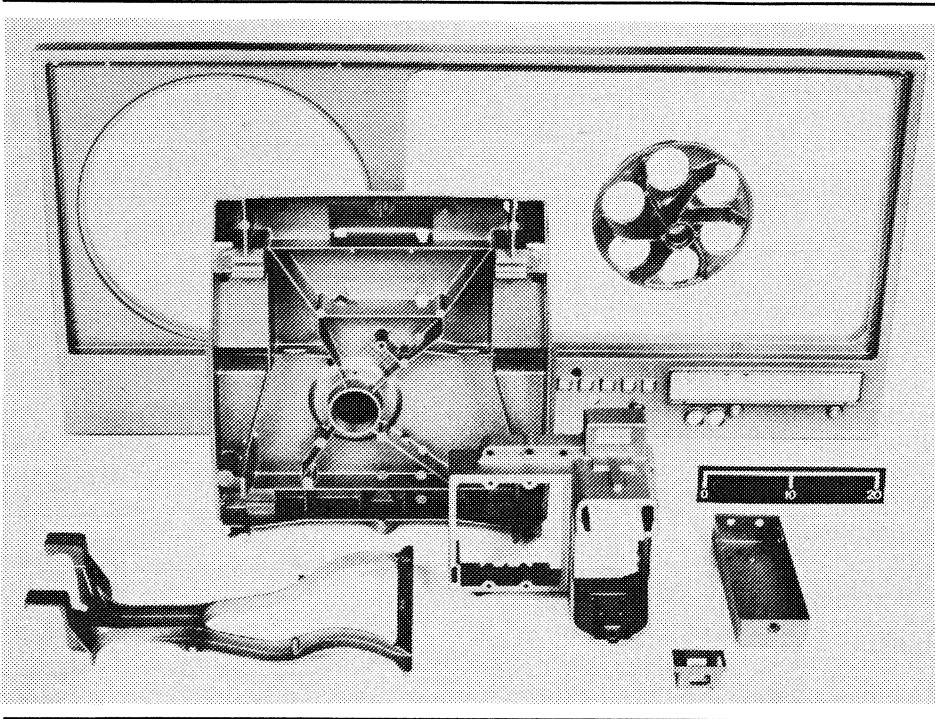
Bij het spuitgieten wordt vloeibaar metaal onder hoge druk (0,7 tot 70 MPa) en met grote snelheid in een matrijs met één of meer vormholtes gebracht. Doordat er met hoge gietdrukken wordt gewerkt, wordt de matrijs tot in alle hoeken gevuld en worden alle randen en uitsparingen nauwkeurig gevormd. De werkstukken, die met behulp van het spuitgieten worden gemaakt, hebben daarom een mooi afgewerkt oppervlak en ze kunnen met kleine toleranties gemaakt worden. Bovendien hebben ze relatief weinig nabewerking nodig. Door de genoemde voordelen wordt het spuitgieten op veel plaatsen toegepast.

Het spuitgieten behoort net als het coquilliegieten en het lage-druk-gieten, tot de groep van gietprocessen waarbij een permanente matrijs wordt gebruikt. De stalen matrijs, die voor het spuitgieten gebruikt wordt, is meestal duurder dan de matrijsen voor de andere gietprocessen. Omdat de matrijs erg duur is en ook de spuitgietmachines duur zijn, is het proces niet geschikt voor de vervaardiging van kleine series produkten.

De snelheid waarmee gewerkt kan worden hangt af van de snelheid waarmee het materiaal in de vormholte kan worden gespoten, kan afkoelen en uit kan worden gestoten, het werkstuk kan worden verwijderd en de matrijs kan worden klaargemaakt voor de volgende cyclus.

Het spuitgieten is het snelste van alle gietprocessen. Ondanks de hoge matrijskosten is het bij hoge totaalseries ook vaak het goedkoopste proces. In het algemeen kan worden gezegd dat het spuitgieten in de volgende gevallen voordeel biedt.

- Wanneer er grote hoeveelheden moeten worden gemaakt, bijvoorbeeld meer dan 5000 stuks, kan men voor het spuitgieten kiezen. Door de hoge productiesnelheid is het proces namelijk zeer geschikt voor de fabricage van grote series.
- Doordat spuitgietprodukten relatief weinig nabewerking nodig hebben, kan er op de gereedschap- en loonkosten voor nabewerking worden bespaard. Hierdoor wordt het proces ook toegepast, wanneer het produkt anders te duur zou worden door de hoge nabewerkingskosten.
- Wanneer werkstukken gemaakt worden, waarbij veel onderdelen samengevoegd moeten worden, is het verstandig om aan spuitgieten te denken omdat het hierbij mogelijk is complexe produkten te vervaardigen met een hoge mate van onderdelenintegratie.
- Omdat met behulp van het spuitgieten andere bewerkingen overbodig worden, kunnen de productiecapaciteit en het vloeroppervlak in de fabriek voor andere toepassingen gebruikt worden.



Figuur 3.1: Voorbeelden van spuitgietprodukten

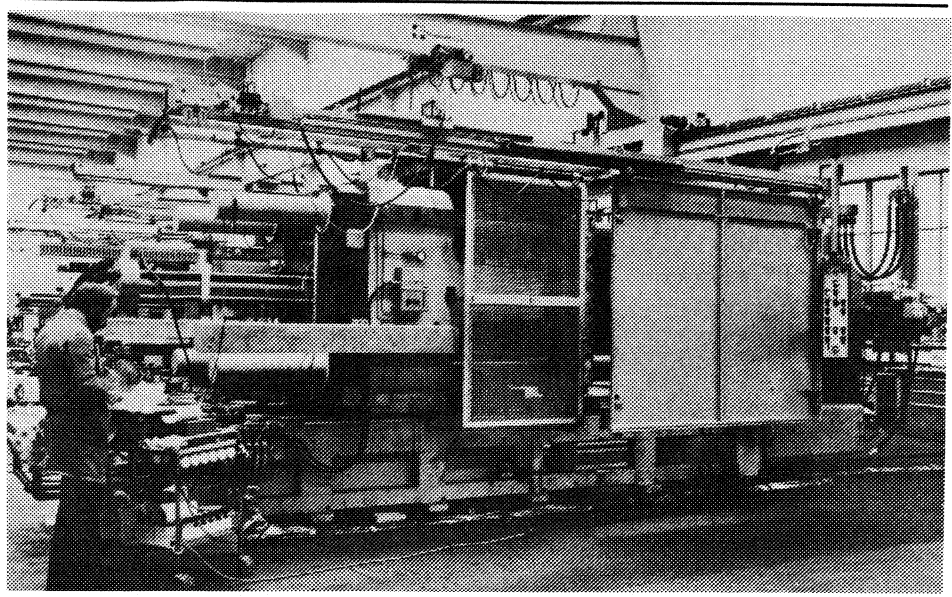
Toepassingen

Het is onduidelijk wanneer het spuitgieten voor het eerst werd toegepast, maar waarschijnlijk is dit bij de produktie van drukletters in het begin van de negentiende eeuw. Er werd al snel duidelijk dat het spuitgietproces zeer geschikt is voor de vervaardiging van grote aantallen identieke onderdelen. Daarom wordt het spuitgietproces veel toegepast voor de vervaardiging van onderdelen van consumentenprodukten. Vooral de automobiellindustrie is een groot toepassingsgebied. Motorblokken, cilinderkoppen en behuizingen voor carburateurs en waterpompen worden gemaakt door spuitgieten. Maar ook deurklinken, printerframes, strijkijzerzolen en handgereedschappen worden op deze manier gemaakt. De meeste spuitgietprodukten hebben een gewicht tussen de 90 gram en de 25 kilogram.

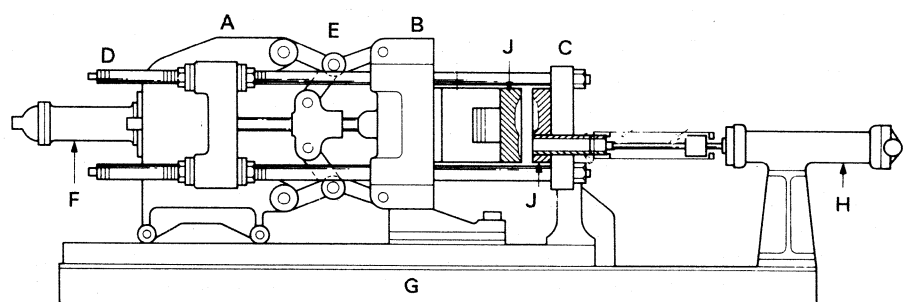
3.2 SPUITGIETMACHINES

Een spuitgietmachine is een complex geheel van mechanische, elektrische, hydraulische en pneumatische onderdelen. Doordat er in de loop der jaren veel aan de basismachine is toegevoegd en veranderd lijkt de machine een ingewikkeld geheel van leidingen, kleppen en knoppen (figuur 3.2).

De moderne spuitgietmachine is het beste te begrijpen wanneer wordt uitgegaan van het basisonwerp, zoals dat in figuur 3.3 is weergegeven. De vele machines kunnen onderling verschillen vertonen, maar in deze figuur is de basis aangegeven.



Figuur 3.2: Een spuitgietmachine



Figuur 3.3: Het basisontwerp van een spuitgietmachine

Iedere machine is gebouwd op een grondplaat (G). Daarop zijn de vaste voorplaat (C) en de drukplaat (A) geplaatst. Aan de voorplaat zit het spuitsysteem (H) en aan de drukplaat zit de hydraulische vergrendelingsplunjer (F). Tussen de voor- en de drukplaat zit een beweegbare plaat (B) die glijdt over de vier koppelstaven (D). Deze koppelstaven zorgen voor de geleiding van de platen en ze nemen ook een groot deel van de krachten op. De beweegbare plaat is aan de drukplaat bevestigd via twee kniehefboommechanismen (E), die ervoor zorgen dat de beweegbare plaat bewogen kan worden. De matrijshelften (J) zitten op de beweegbare en de voorplaat. Door de beweegbare plaat tegen de vaste plaat te drukken kan de matrijs worden gesloten. De vergrendelingsplunjer en de drukplaat kunnen versteld worden zodat de machine geschikt is om te gebruiken voor matrijzen van verschillende afmetingen. De belasting op de matrijs wordt via de voor- en de drukplaat overgebracht op de vier koppelstaven.

Nadat de matrijs is gesloten, kan het spuitsysteem het materiaal in de vormholte spuiten. Als het materiaal gestold is, wordt de bewegende plaat door het hefboommechanisme achteruit bewogen en kan het product worden uitgeworpen met behulp van een uitstotersysteem. Er zijn dus eigenlijk maar twee hydraulische of pneumatische systemen nodig bij het spuitgieten,

namelijk voor het openen en sluiten van de matrijs en voor het spuiten. Daarnaast zijn echter vaak nog veel andere systemen die als gevolg hebben dat de machine er veel complexer uitziet.

Aan de basismachine kunnen de volgende systemen nog worden toegevoegd:

- Een smeersysteem, voor smering van de contactvlakken van de hefboomen, de koppelstaven en de platen.
- Een hydraulisch of pneumatisch uitstoter-systeem, waarmee het gietstuk automatisch uit de matrijs gestoten kan worden.
- Een systeem waarmee het uitgestoten produkt wordt uitgenomen en buiten de matrijs wordt geplaatst;
- Een hydraulisch of pneumatisch systeem, waarmee bij ingewikkelde matrijzen automatisch kernen en schuiven bewogen kunnen worden.
- Een veiligheidssysteem, om te voorkomen dat de bewegende delen tijdens het proces bereikbaar zijn en dat er heet materiaal uit de machine kan spuiten.

Spuitsysteem

De werking van het spuitsysteem is van groot belang voor de kwaliteit van de gietstukken, omdat dit de druk van het gietmateriaal tijdens en na het spuiten bepaalt, evenals de hoeveelheid materiaal die wordt gespoten en de vulsnelheid.

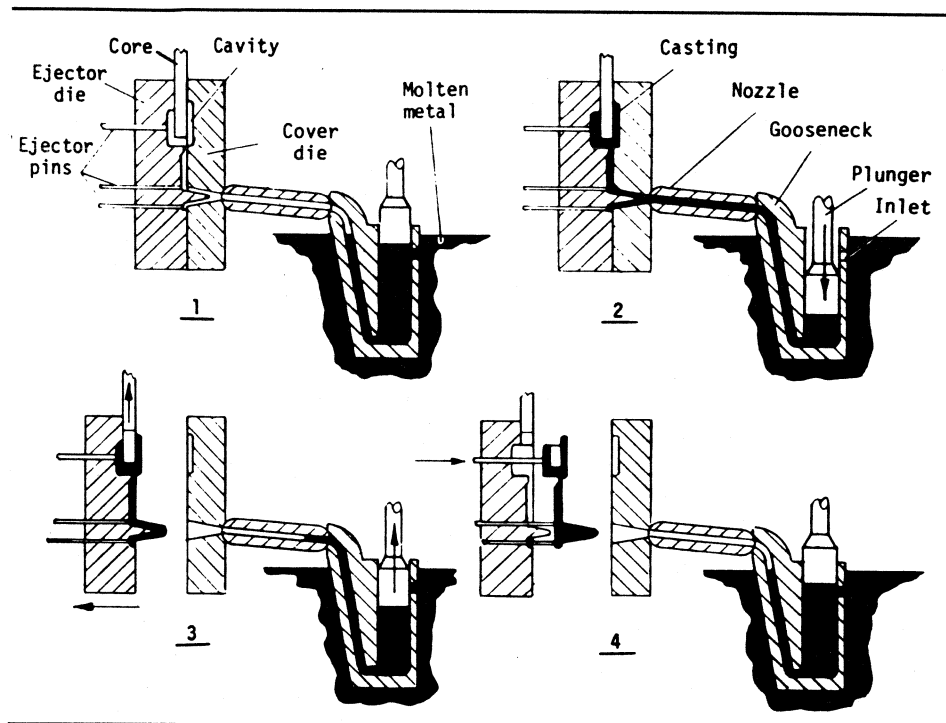
De onderdelen van een spuitgietmachine en het spuitsysteem worden gemaakt van gietijzer en staal, dat kan worden aangetast door het contact met het gesmolten gietmateriaal. Dit probleem neemt toe naarmate het gietmateriaal een hogere smeltemperatuur heeft. Vooral gesmolten aluminium heeft de vervelende eigenschap de constructiedelen van het inspuitsysteem snel aan te tasten. Dit heeft er toe geleid dat er een tweedeling is ontstaan in de machines die worden gebruikt. Naast elkaar bestaan de z.g. "warmportaal" en "koudportaal" machines. De "warmportaal" machine pompt het gesmolten metaal uit een reservoir en is hierdoor eenvoudig en efficiënt. Door het langdurig contact van het spuitsysteem met het gesmolten materiaal is dit machinetype echter ongeschikt voor hoge giettemperaturen. Hiervoor moet de "koudportaal" machine worden ingezet, waarbij voor iedere spuitcyclus een afgemeten hoeveelheid materiaal met een lepel wordt toegevoegd.

Warm-portaal-machine

Deze manier van spuitgieten wordt vooral toegepast voor de verwerking van zink en zinklegeringen, maar niet voor aluminium en andere materialen met een hogere smeltemperatuur. Deze machine wordt in het algemeen toegepast bij materialen die een smeltpunt hebben dat lager is dan 450°C.

Bij de warm-portaal-machine wordt het gesmolten materiaal in een reservoir boven de smeltemperatuur gehouden. In dit reservoir hangt een onderdeel dat de zwanehals wordt genoemd. Aan de ene kant van deze zwanehals zit de vaste plaat van de matrijs en aan de andere kant

zit de plunjer. Het materiaal kan door een inlaat in de zwanehals stromen. Wanneer de plunjer naar beneden beweegt, wordt de inlaat afgedicht en de matrijs gevuld. Nadat het materiaal in de matrijs is gestold, wordt de matrijs weer geopend en het gietstuk verwijderd. De plunjer beweegt zich nu terug naar zijn uitgangspositie. Hierbij wordt het warme materiaal dat nog in de aanspuitkanalen zit terug in het reservoir gezogen. Bovendien wordt de inlaat weer geopend, zodat er nieuw materiaal in de zwanehals kan stromen. Een voorbeeld van het warm-portaal-proces staat in figuur 3.4.



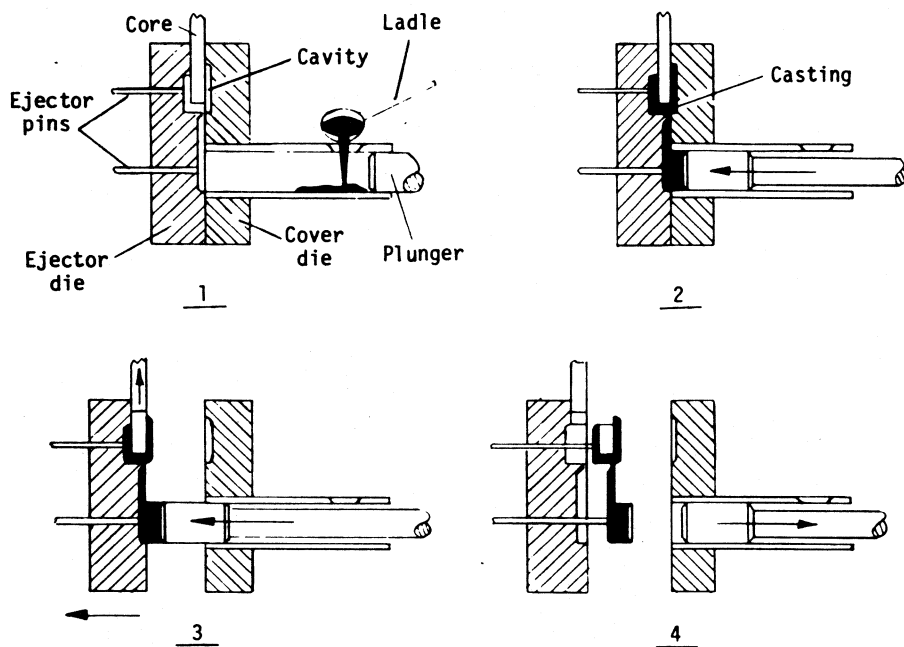
Figuur 3.4: Een voorbeeld van een warm-portaal-spuitspuitsgietproces

Tijdens het spuitgieten beweegt de plunjer niet met een constante snelheid. In de eerste fase beweegt de plunjer langzaam naar voren, waarbij het materiaal door de zwanehals en een deel van het gietkanaal in de matrijs wordt gedruwd. Op dat moment begint de tweede fase waarin de plunjer met grote snelheid beweegt, zodat de matrijs snel wordt gevuld en er een gietstuk van hoge kwaliteit ontstaat.

Koud-portaal-machine

Materialen met een smeltpunt hoger dan 450°C worden verwerkt met behulp van een koud-portaal-machine.

Bij de koud-portaal-machine is een cilinder bevestigd op de vaste plaat van de spuitgietmatrijs. Aan de ene kant komt de cilinder uit in het gietkanaal van de matrijs. Aan de andere kant van de cilinder zit de opening, waar iedere keer een bepaalde hoeveelheid materiaal in wordt gegoten. Dit materiaal wordt door een plunjer in de matrijsholte gespoten. Nadat het materiaal is gestold, wordt de matrijs geopend en het gietstuk uitgenomen. De plunjer keert nu terug naar zijn uitgangspositie.



Figuur 3.5: Een voorbeeld van een koud-portaal-spuitsietmachine

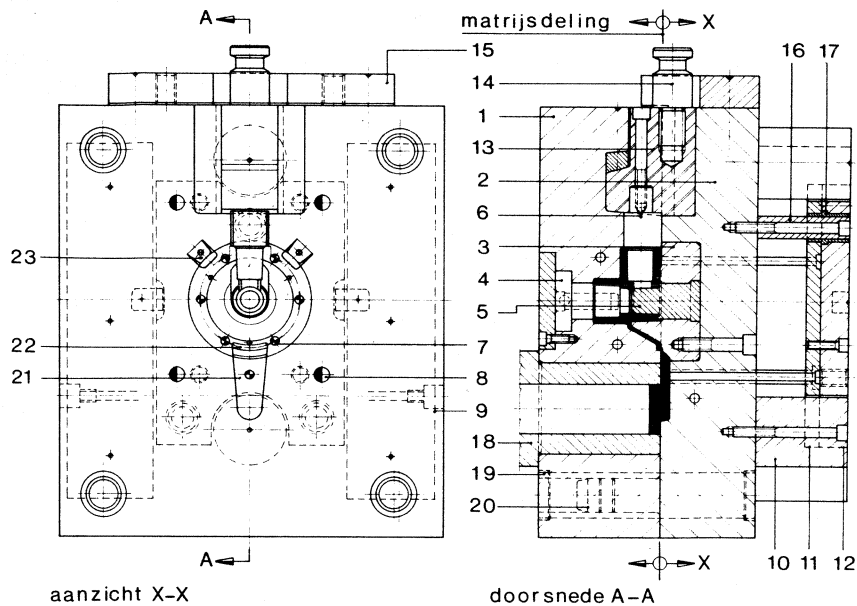
Omdat dit hele proces maar een paar seconden duurt, kunnen er nauwelijks aantasting van de constructiedelen optreden. Omdat bij het spuitgieten met behulp van een koud-portaal-machine met een hogere druk wordt gewerkt, is het mogelijk om bij iets lagere temperaturen en met dikvloeibaarder materiaal te werken. Er zullen minder snel luchtinsluitels ontstaan dan bij het warm-portaal-gieten.

Op de spuitgietmachine kunnen verschillende cilinders worden gemonteerd, zodat gietstukken met een verschillende massa kunnen worden gespuitsiet. De plunjer beweegt tijdens het proces niet met constante snelheid, maar de beweging is te onderscheiden in drie fasen. In de eerste fase beweegt de plunjer langzaam naar voren om wervelingen in het materiaal te voorkomen en om de lucht uit het materiaal te verdrijven. De cilinder wordt meestal maar voor $\pm 60\%$ met materiaal gevuld. De rest bestaat uit lucht en dit kan, wanneer het niet wordt verwijderd, in het gietstuk ingesloten worden. Als het materiaal de opening in de matrijs bereikt, begint de tweede fase. Het materiaal wordt met hoge snelheid in de matrijs gespoten, tot deze helemaal gevuld is. Wanneer de vormholte gevuld is en het materiaal gedeeltelijk gestold is, zodat de buitenkant van het gietstuk al hard is, begint de derde fase. Deze fase wordt de verdichtingsfase genoemd. In deze fase wordt een hoge druk op het gietstuk aangebracht tijdens de laatste fase van de stolling. Tijdens deze fase beweegt de plunjer nauwelijks, maar net genoeg om de slink te compenseren en de poreusheid te verminderen. De derde fase wordt niet op alle spuitgietmachines toegepast.

3.3 SPUITGIETMATRIJZEN

De matrijzen voor het spuitgieten zijn meestal complexe samenstellingen van onderdelen die zeer nauwkeurig worden gemaakt uit hittebestendig staal. De kwaliteit, de maatvastheid en de oppervlaktegesteldheid van een spuitgietstuk worden in belangrijke mate door de matrijs bepaald. De vervaardiging van de matrijs vraagt dan ook veel ervaring en bekwame gereedschapmakers. Omdat de matrijzen gehard worden, zijn gietstukwijzigingen achteraf moeilijk of nauwelijks realiseerbaar.

In de matrijs moeten naast de vormholte ook voorzieningen zijn aangebracht voor de aanspuiting, de leipennen (die dienen voor de geleiding van de bewegende matrijsheft), kernen, uitstoters, ontluchting en koeling.



1. Voorplaat; 2. Achterplaat; 3. Inzetstuk in achterplaat; 4. Inzetstuk in voorplaat; 5. Uitwisselbare kern in inzetstuk; 6. Zijkern; 7. Uitstoters; 8. Afstandpennen; 9. Koelkanalen; 10. Onderlijst uitstootmatrijsheft; 11. Uitstootplaat; 12. Uitstootdekplaat; 13. Zijschuif; 14. Verbindingsstuk met kerntrekcilinder; 15. Bevestigingsplaat kerntrekcilinder; 16. Uitstootplaatgeleiding; 17. Lagerbus; 18. Koude-kamer of injectiecilinder; 19. Lagerbus van vangstift; 20. Vangstiften; 21. Gietloop; 22. Aansnijding; 23. Overlopen.

Figuur 3.6: De opbouw van een spuitgietmatrijs met één zijkern

Ontluchting

Om te voorkomen dat er lucht in het gietstuk wordt ingesloten, moet er zo min mogelijk lucht uit de injectiecilinder in de matrijs komen. De lucht die zich in de matrijs bevindt moet kunnen ontwijken. Daartoe moeten er ontluchtingskanalen in de matrijs worden aangebracht. Deze zijn zo dun (0,05 tot 0,15 mm) dat het gietmetaal er niet door kan spuiten. Ook vaste kernen, die met een speling van 0,03 tot 0,05 mm worden ingebouwd, kunnen als ontluchtingskanaal dienen.

Uitstotersysteem

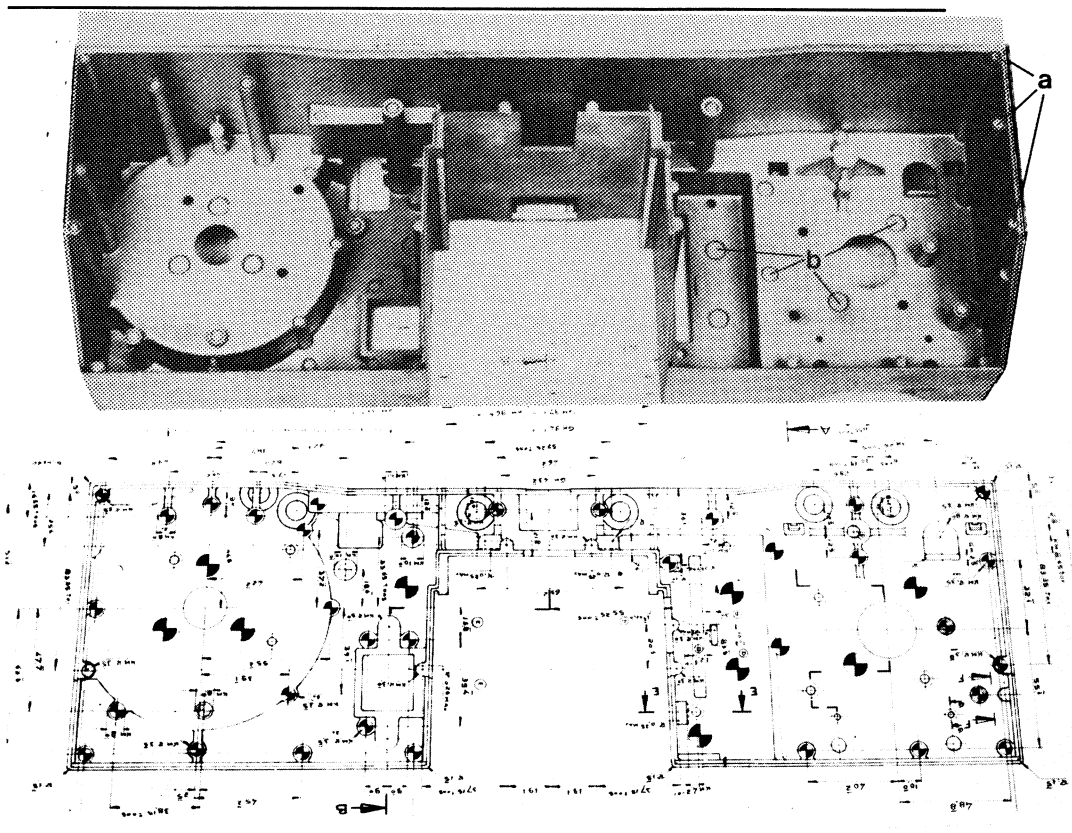
Om een spuitgietstuk uit de bewegende matrijsheft te stoten zijn er uitstoters nodig. Het aantal, de afmetingen en de plaatsing ervan zijn bepalend voor het probleemloos, vlak en zonder beschadigingen uitstoten van het spuitgietstuk. Daarom moeten de uitstoters altijd daar geplaatst worden waar in de matrijs de grootste krimpkrachten optreden.

Bij gietstukken met diepe wanden, lange nokken en ribben of met diepe uitsparingen, die sterk de neiging hebben vast te krimpen op de matrijs, bestaat het gevaar van beschadiging door doordrukken van de uitstoters.

De uitstoterafmetingen moeten daarom zo groot gekozen worden dat indrukken van het produkt voorkomen wordt. De diameter van de uitstoters moet dan liggen tussen de 4 en de 12 mm.

Omdat spuitgietwerk dunwandig is moet men, vooral bij hoge gietstukken, vaak zelfs speciale nokken op het produkt aanbrengen om voldoende uitstootmogelijkheden aan het gietstuk te hebben.

In figuur 3.7 is een voorbeeld gegeven van uitstootnokken en uitstootmarkeringen. De speciale nokken a zijn naast de dunne wand aangebracht om voldoende uitstootkracht op het produkt te kunnen uitoefenen. De uitstoters b staan gewoon op het vlak.



Figuur 3.7: Voorbeelden van uitstootnokken en uitstootmarkeringen

Uitstoters zijn bewegende matrijsdelen die met het gietstuk in aanraking komen. Hierbij laten ze een afdruk op het gietstuk achter. Deze afdraken worden uitstootmarkeringen genoemd. De markeringen kunnen 0,2 tot 0,4 mm verdiept of opliggend zijn, afhankelijk van de functie van het vlak waar ze op staan. Op vlakken die nog moeten worden nabewerkt, laat men de uitstootmarkeringen uiteraard opliggend aanbrengen.

De uitstoterpenen zijn aan slijtage onderhevig en moeten gemakkelijk te vervaardigen en uitwisselbaar zijn. Daarom wordt aan ronde uitstoters de voorkeur gegeven. Iedere andere vorm, zoals rechthoekig, maakt de matrijs duur.

Doordat de matrijs uit meer delen bestaat, is het mogelijk om de delen die het snelst slijten eerder te vervangen, zonder dat de hele matrijs moet worden vervangen. De factor die de grootste invloed heeft op de levensduur van de matrijs is de temperatuur van het vloeibare materiaal. De matrijzen kunnen onbruikbaar worden door thermische vermoeiing, die het resultaat is van het vaak na elkaar opwarmen en weer afkoelen. In figuur 3.8 is voor enkele legeringen de relatie tussen de levensduur van de matrijs en de spuittemperatuur aangegeven. De matrijs blijkt sneller te slijten, wanneer er bij hogere temperaturen wordt gewerkt.

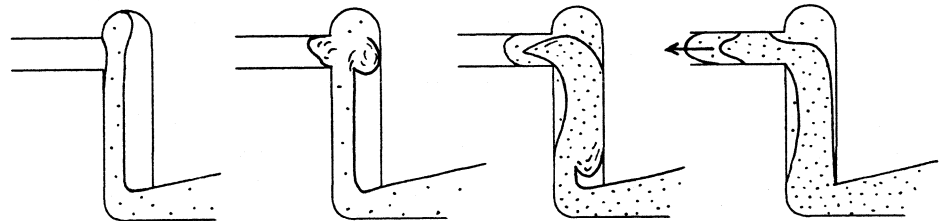
Legering	Levensduur (aantal shots)	Spuittemperatuur (°C)
Aluminium	100.000	700
Zink	1.000.000	420
Messing	20.000	950
Magnesium	300.000	670

Figuur 3.8: De relatie tussen de levensduur van de matrijs en de spuittemperatuur

3.4 VULLING VAN DE MATRIJS

Met behulp van een hoge gietdruk en snelle matrijsvulling is in principe iedere vorm met spuitgieten te maken. Om heel dunwandige, gecompliceerde gietstukken te fabriceren, die van een hoge kwaliteit zijn, is het nodig inzicht te hebben in de wijze waarop de matrijs wordt gevuld.

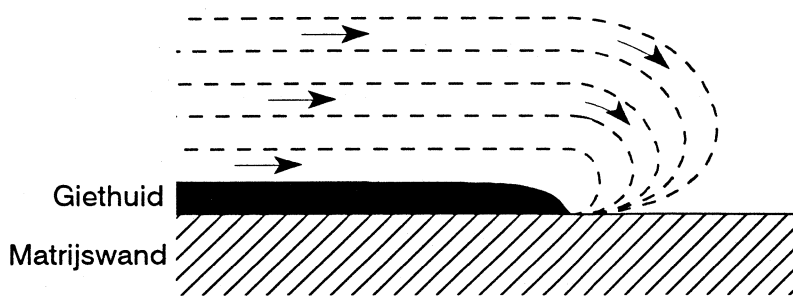
In het ideale geval, met verwaarlozing van de in- en uitwendige wrijving, verloopt de matrijsvulling als een continue stroming, waarbij de matrijs vanaf het vlak tegenover de aansnijding wordt gevuld. Door afkoeling en stolling van het materiaal is er echter snel sprake van een grote inwendige wrijving. Door de remmende werking ontstaan wervelingen. Een richtingverandering kan aanleiding geven tot vertraagde matrijsvulling. Voor de bocht blijft het vloeibare materiaal steken en vormt een prop, die pas bij een voldoende gietdruk wordt doorgedrukt.



Figuur 3.9: Materiaalstroom in de matrijs bij richtingverandering

Bij zeer dunwandig spuitgietwerk is het materiaal steeds in contact met de matrijswanden en is er geen sprake van de bovenbeschreven propvorming. Door de hoge schuifkrachten wordt een deel van de kinetische energie van de gietstroom omgezet in warmte. Hierdoor wordt stolling voorkomen en blijft de gietweg open.

Het vloeibare materiaal dat in aanraking komt met de koudere matrijswand stolt het eerst, waardoor het materiaal zich als het ware afrolt over de matrijswand.



Figuur 3.10: Vorming van de giethuid door afrollen langs de matrijswand

3.5 PROCESVARIABLEN

De belangrijkste variabelen die tijdens het spuitgieten beheerst moeten worden, zijn de matrijstemperatuur, de temperatuur van het materiaal, de spuitdruk, de spuitsnelheid en de sluitkracht.

Matrijstemperatuur

De matrijstemperatuur heeft directe invloed op de oppervlaktekwaliteit, de maatnauwkeurigheid en de mechanische eigenschappen. De juiste matrijstemperatuur wordt meestal experimenteel bepaald. De gevonden waarde wordt door één of meer regelaars zo goed mogelijk constant gehouden. Zolang de installatie continu in bedrijf is, zal zich na enige tijd een stabiele temperatuursverdeling instellen, maar onderbrekingen zorgen er voor dat de temperatuur iets fluctueert en daarmee wordt de kwaliteit van het gietstuk nadelig beïnvloed.

Spuittemperatuur

Variaties in de spuittemperatuur hebben directe invloed op de cyclustijd en zullen daarmee de evenwichtsituatie verstoren. Bij een te hoge spuittemperatuur zal het gietstuk ontoelaatbaar slinken en zal de levensduur van de matrijs korter worden. Wanneer de spuittemperatuur te laag wordt gekozen, zal de kans op onvolledige gietstukken toenemen, omdat sommige delen te vroeg stollen. Het is dus belangrijk om de spuittemperatuur nauwkeurig te regelen.

De temperatuur die gekozen wordt, is ook afhankelijk van het te verwerken materiaal.

Spuitdruk

Het vullen van de vormholte gebeurt in twee of drie stappen. Tijdens iedere stap zal de plunjer met een andere snelheid bewegen. In de eerste fase, de aanlooffase, beweegt de plunjer langzaam naar voor om te zorgen dat de lucht uit het materiaal in de shot-cilinder ontsnapt. Dit moet gebeuren om te zorgen dat er zo weinig mogelijk lucht in het gietstuk wordt ingesloten. In de tweede fase wordt het vloeibare materiaal zo snel mogelijk in de vormholte wordt gespoten om te zorgen

dat de hele holte wordt gevuld. Soms is er nog sprake van een derde fase. Deze begint wanneer de holte vol is gespoten. De druk loopt dan op tot zijn hoogste niveau. Door de verhoging van de druk, worden de slink en de hoeveelheid gasinsluitels beperkt. In deze fase kan de druk oplopen tot 50 à 70 MPa.

Spuitsnelheid

De invloed van de stroomsnelheid op het matrijsvullingsverloop is erg groot. Druk, snelheid en soortelijke massa van het vloeibare materiaal hangen samen volgens de vergelijking:

$$v = \sqrt{2 \frac{p}{\rho}}$$

Waarin: v : Snelheid (m/s)
 p : Druk (N/m²) (1 bar = 10⁵ N/m²)
 ρ : Soortelijke massa van het materiaal (kg/m³)

De snelheden nemen dus toe bij afnemende soortelijke massa van het metaal en zijn verder alleen door de druk te veranderen.

De vultijden bij het spuitgieten van metalen liggen meestal tussen de 0,05 en de 0,15 seconden. Het is niet mogelijk om de meest ideale vultijd aan te geven, omdat er altijd een compromis moet worden gesloten. De vultijd moet enerzijds zo groot mogelijk zijn om een mooi oppervlak te krijgen en anderzijds is een zo laag mogelijke snelheid nodig om luchtinsluitels te minimaliseren. Als richtlijn kan een spuitsnelheid van maximaal 40 m/s worden aangehouden.

Sluitkracht

Doordat de spuitdruk zo hoog is, is een grote kracht nodig om de matrijshelften op elkaar gedrukt te houden. De benodigde sluitkracht is afhankelijk van de spuitdruk en het geprojecteerde oppervlak van het gietstuk in de richting van de aanspuiting. Voor de opdrukkracht van het materiaal geldt:

$$F_{op} = A_p \cdot p_g$$

Waarin: F_{op} : Opdrukkracht van het metaal (N)
 A_p : Geprojecteerd oppervlak van het gietstuk in de richting van de aanspuiting (mm²)
 p_g : Gietdruk (N/mm²)

Wanneer een veiligheidsfactor wordt aangehouden van 20% is de benodigde sluitkracht F_s gelijk aan 1,2 maal F_{op} .

Spuitgietmachines worden meestal ingedeeld aan de hand van de maximale sluitkracht. Een veel voorkomende sluitkracht is 30 MN.

Wanneer er een te hoge sluitkracht wordt aangehouden, zullen de machine en het gereedschap onnodig slijten.

Wanneer de sluitkracht te laag is, kan het gesmolten materiaal tussen de beide matrijshelften vloeien, waardoor bramen aan het gietstuk ontstaan. Deze moeten later worden verwijderd.

3.6 SPUITGIETMATERIALEN

Vroeger werd er bij het spuitgieten vooral gebruik gemaakt van laagsmeltende materialen zoals lood en tin, omdat deze het constructiemateriaal van de spuitgietsmachines niet aantastten. Tegenwoordig wordt voor de meeste toepassingen gebruik gemaakt van legeringen van zink, aluminium, magnesium en messing, maar ook staal wordt soms wel toegepast. De vier meest gebruikte materialen zullen hier worden behandeld.

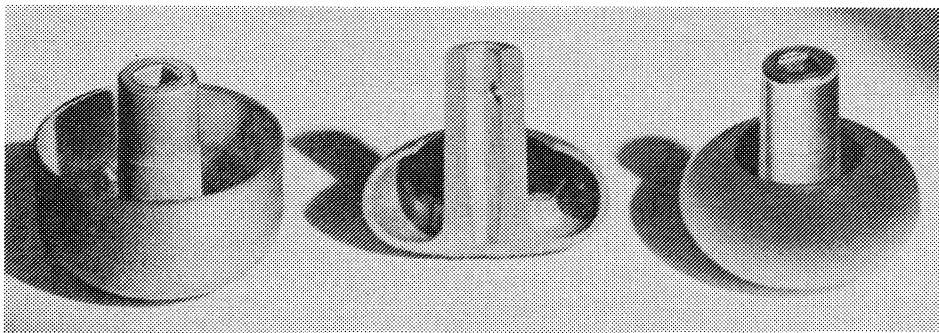
Zink

Het voordeel van de zinklegeringen is de lage temperatuur waarmee deze in de matrijs kunnen worden gespoten. Deze temperatuur ligt meestal tussen de 400 en de 415°C. Dit heeft als gevolg dat de matrijs een langere levensduur heeft. De gemiddelde levensduur van een matrijs waarmee zinken gietstukken gemaakt worden is 3 tot 5 keer groter dan die waarmee aluminium gietstukken worden gemaakt. De gereedschapkosten per gietstuk zijn dezelfde factor goedkoper. Bovendien zijn de gereedschappen voor het spuitgieten van zinklegeringen vaak ook goedkoper, omdat de constructie eenvoudiger is doordat er met een lagere druk gewerkt wordt.

Omdat zink geen agressief materiaal is en het de stalen matrijs niet aantast, kan het met behulp van de warm-portaal-methode worden gegoten.

Bij het spuitgieten van zinklegeringen zijn een goede nauwkeurigheid en een fijne detaillering mogelijk. Omdat de slijtage van de matrijs minder is, geldt dit ook voor een langere tijd.

Doordat zink zo'n taai materiaal is, kunnen de gietstukken nog koudvervormd worden zonder de sterkte te beïnvloeden. Hierdoor is het vaak mogelijk om producten te maken die met behulp van alleen spuitgieten niet of heel moeilijk gemaakt hadden kunnen worden. Een voorbeeld hiervan is de deurknop in figuur 3.11. Deze wordt eerst gegoten en vervolgens geforceerd tot de uiteindelijke vorm is bereikt.



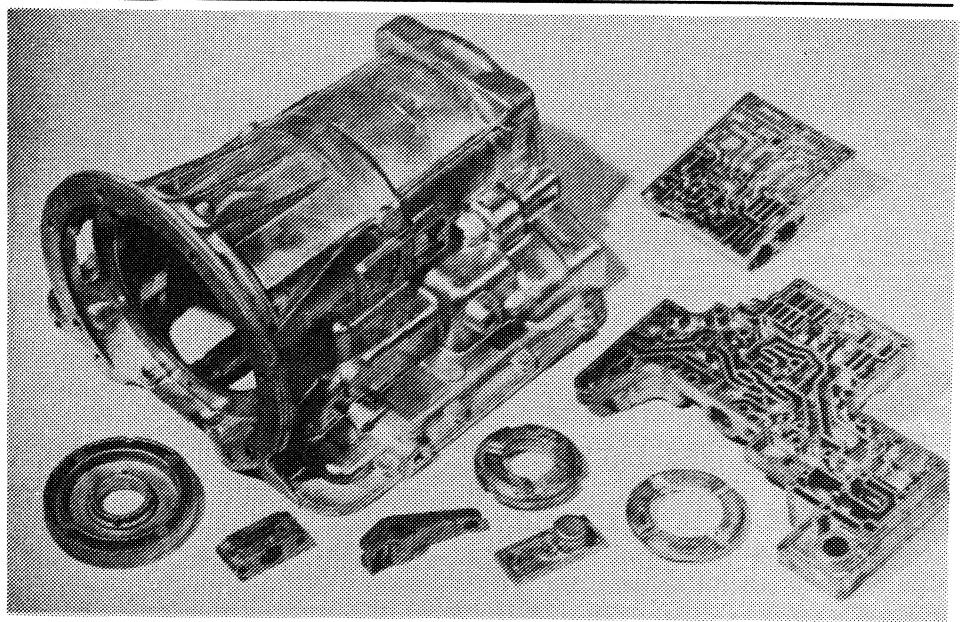
Figuur 3.11: Zinken deurknop die wordt vervaardigd door het gietstuk koud te vervormen

Aluminium

Omdat aluminium het staal van de matrijs en de machine sneller aantast dan zink, wordt het gegoten volgens de koud-portaal-methode. Deze werkt iets langzamer dan de warm-portaal-methode.

In het algemeen kan worden gezegd dat de gietstukken die uit aluminium worden gemaakt weinig verschillen van die uit zink. De toleranties waarmee gewerkt kan worden liggen in de buurt van die van gietstukken

uit zink, maar zijn iets ruimer. Daarom is vaak een extra nabewerking nodig wanneer het om kritische maten gaat. Aluminium wordt door zijn gunstige eigenschappen vaak toegepast voor lichte, hoogbelaste onderdelen.



Figuur 3.12: Voorbeelden van aluminium spuitgietprodukten

Magnesium

Magnesiumlegeringen hebben een hogere sterkte/gewicht-verhouding dan de andere lichte legeringen, maar ze worden voor het spuitgieten veel minder toegepast. De reden hiervoor is dat gesmolten magnesium met grote zorg moet worden behandeld en dat kleine stukjes magnesium licht ontvlambaar zijn. Het kleine kostenvoordeel dat magnesium biedt, weegt hier meestal niet tegen op.

Een groot deel van de magnesiumlegeringen die gespuitsgiet worden, wordt toegepast op plaatsen waar het lichte gewicht een groot voordeel biedt, zoals bij fotocamera's, dictafoons en verder in de vliegtuig- en autoindustrie.

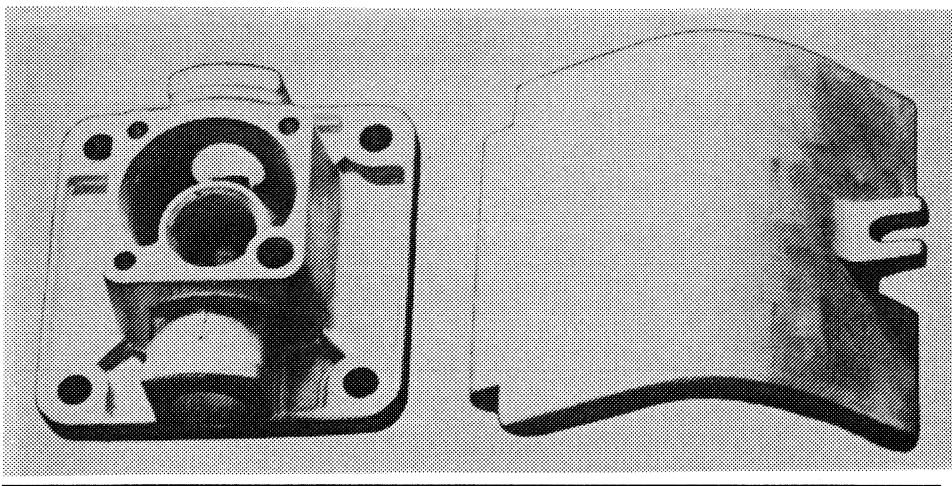
De grootste beperking die magnesium voor de ontwerper heeft, is dat het oppervlak nooit erg glanzend zal worden, zoals bij aluminium wel het geval is, en dat het oppervlak ook niet door polijsten of verchromen verfraaid kan worden.

Messing

Messing wordt niet zo heel veel toegepast, hoewel het aantal toepassingen wel toeneemt. De belangrijkste toepassing van messing is voor de productie van koppelstukken voor waterleidingen. De reden hiervoor is dat nog steeds veel leidingen van messing zijn gemaakt en het belangrijk is dat deze met behulp van de koppelstukken goed aan elkaar bevestigd kunnen worden door te solderen.

Messing is redelijk goed te spuitgieten. Er kan een goede detaillering worden bereikt en er kunnen gemakkelijk dunne doorsneden worden gemaakt. Door het gietstuk dunwandig te houden kan de warmteoverdracht naar de matrijs worden beperkt, waardoor de levensduur van de matrijs toeneemt en er minder poreusheid optreedt in het gietstuk.

Een nadeel van messing is dat de temperatuur waarbij het gegoten wordt erg hoog is, namelijk $\pm 950^{\circ}\text{C}$. Hierdoor is de slijtage van de matrijs groot en heeft deze dus maar een korte levensduur. Speciaal voor het spuitgieten van messing zijn daarom slijtvaste matrijsmaterialen ontwikkeld, die gebaseerd zijn op wolfram en molybdeen.



Figuur 3.13: Voorbeelden van messing spuitgietprodukten

3.7 FOUTEN BIJ HET SPUITGIETEN

Bij het spuitgieten kunnen veel fouten voorkomen die problemen voor de ontwerper veroorzaken. Hier zullen slechts drie van deze fouten worden behandeld, omdat deze van speciaal belang zijn voor de ontwerper. Deze fouten zijn *poreusheid*, *koude vloeinaden*, en *blisters*.

Poreusheid

In ieder gietstuk komt wel wat poreusheid voor, onafhankelijk van het materiaal waarmee gespoten wordt. De poreusheid ontstaat door gasinluitsels en door slink van het materiaal. Het is moeilijk om aan te geven in welke verhouding deze twee soorten poreusheid optreden.

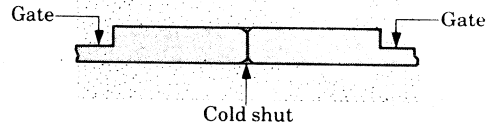
Gasporeusheid ontstaat doordat het materiaal zich mengt met het gas in de gietkanalen. Het gas wordt ingesloten doordat er slechte ontluchting van de matrijs is en ook omdat het materiaal niet in één keer wordt gespoten, maar pulserend, zodat zich tussen de materiaal massa's nog lucht bevindt. Wanneer er langzaam wordt gespoten heeft het gas nog de mogelijkheid om langs het materiaal te ontsnappen. Toch zal er altijd wat gas ingesloten worden.

Slinkporeusheid ontstaat door de volume-afname van het materiaal tijdens het afkoelen. Een spuitgietstuk begint de stollen aan de buitenkant, omdat het daar in contact staat met de koude matrijs. Omdat het centrum van het gietstuk het laatst stolt, zal daar de meeste poreusheid ontstaan. De dikkere delen in het produkt zullen eerder slinkporeusheid vertonen, niet alleen omdat hier relatief meer slink plaats vindt, maar ook omdat de dunnere delen vanuit de dikke delen worden gevuld.

Zware delen op het produkt moeten dus zoveel mogelijk worden voorkomen, om de poreusheid te beperken. Ook moet de hoeveelheid verspanende nabewerkingen worden beperkt, om ervoor te zorgen dat er hierbij geen poreusheid aan de oppervlakte zichtbaar wordt.

Koude vloeinaden

Koude vloeinaden zijn oppervlaktefouten die ontstaan doordat verschillende metaalstromen niet voldoende mengen, omdat ze al te ver zijn afgekoeld. De cold shuts ontstaan wanneer de matrijs te langzaam wordt gevuld, wanneer de matrijs te koud is of wanneer de plaats van de aanspuitingen verkeerd is gekozen. In het laatste geval moeten de metaalstromen uit de verschillende aanspuitingen te ver stromen voordat ze bij elkaar komen. Ze zijn dan al te veel afgekoeld en zullen niet meer goed hechten (figuur 3.14).



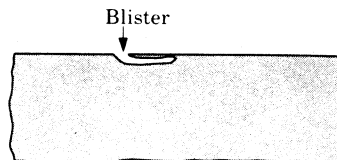
Figuur 3.14: Het ontstaan van koude vloeinaden

Koude vloeinaden kunnen niet eenvoudig uit het oppervlak van het gietstuk worden verwijderd, zodat ze voor hoogwaardig gietwerk ontoelaatbaar zijn. Gietstukken waarbij de oppervlaktekwaliteit van minder belang is worden wel vaak met koude vloeinaden gemaakt. Er kunnen namelijk hogere produktiesnelheden worden gehaald, wanneer de matrijstemperatuur lager is.

Blisters

Blisters zijn een oppervlaktefout die veel voorkomt bij het spuitgieten. Het zijn kleine bobbeltjes op het oppervlak van het gietstuk, die ontstaan door het uitzetten van het gas dat net onder het oppervlak is ingesloten. Soms is het mogelijk om blisters te voorkomen door het gietstuk iets langer in de matrijs te laten afkoelen, zodat het sterker is en het de druk van het uitzettende gas kan weerstaan. Hiermee neemt de produktiesnelheid natuurlijk wel af.

Blisters ontstaan meestal door slechte ontluchting of door te veel smering. Slechte ontluchting wordt niet alleen veroorzaakt door een gebrek aan ontluchtingskanalen, maar ook door slechte plaatsing van deze kanalen. Het kan bijvoorbeeld gebeuren dat de kanalen door gesmolten materiaal worden afgedekt, zodat er lucht in de matrijs achterblijft. Wanneer er teveel smeermiddelen worden gebruikt, worden alle kleine openingen in de matrijs hierdoor afgesloten, zodat de gassen niet meer uit de gesloten matrijs kunnen ontsnappen.



Figuur 3.15: Blisters

3.8 ONTWERPRICHTLIJNEN

In deze paragraaf zullen enkele onderwerpen worden behandeld die van belang zijn bij het ontwerpen van metalen produkten die vervaardigd zullen worden met behulp van het spuitgietproces.

Lossingshoek

In figuur 3.16 is voor de belangrijkste materialen de lossingshoek aangegeven bij verschillende wandhoogtes. De aangegeven waarden gelden voor de binnenkant van het gietstuk, dat om de matrijs heen zal krimpen en dus moeilijker van de matrijs te nemen zal zijn dan de buitenkant van het produkt, die van de matrijs af krimpt. Aan de buitenkant kan de helft van de gegeven waarde aangehouden worden. De benodigde lossingshoek is afhankelijk van het materiaal waarmee gespoten wordt. Bij hoogsmeltende materialen is een grotere lossingshoek nodig.

Wand- hoogte (mm)	Lossingshoek (°)			
	Zink	Aluminium	Magnesium	Messing
1	6	9½	8	11½
2	4	6½	5½	8
3	3½	5½	4½	6½
4	3	5	4	6
5	2½	4	3½	5
10	2	3	3¾	4
15	1½	2½	2½	3
20	1	2	2	2½
25	1	1½	1½	2
>25	1	1	1	1½

Figuur 3.16: De minimaal aanbevolen lossingshoek bij verschillende wandhoogtes

Wanneer er echt een rechte wand aan het produkt moet zitten, kan dit worden bereikt door het produkt na het gieten nog na te bewerken. Hierbij moet op het produkt een bewerkingstoeslag worden aangehouden. Hierop wordt nader ingegaan op bladzijde 3.23. Soms is het ook mogelijk om een werkstuk na het spuitgieten nog te vervormen, zoals in figuur 3.11 al getoond werd.

Deelvlak

De plaatsing van de deelvlak is heel belangrijk. Deze moet altijd zo vlak mogelijk zijn. Vaak is er sprake van gekromde of versprongen deellijnen, maar hierdoor wordt de matrijs minder nauwkeurig en duurder. Vlakke matrijsdelingen maken een goede aanspuiting mogelijk en eventuele bramen die op de deling ontstaan, kunnen achteraf eenvoudig verwijderd worden. Bij de plaatsing van de deellijn moet er ook op gelet worden welk deel van het gietstuk bij het uiteindelijke produkt in het zicht komt te liggen.

In figuur 3.17 worden ongunstige matrijsdelingen getoond met daarnaast een alternatieve constructie met een meer gunstige deellijn.

Kernen

Het gebruik van kernen met een hele kleine diameter moet vermeden worden, vooral wanneer er messinglegeringen gespuitsgiet worden. De gaten die met behulp van een kern gemaakt worden moeten een kleine lossingshoek hebben, zodat de kern nog verwijderd kan worden. De benodigde lossingshoek is afhankelijk van de lengte van de kern die gebruikt wordt en van het materiaal dat wordt gegoten. Bij korte kernen en bij hoogsmeltende metalen is een grotere lossingshoek nodig. In figuur 3.18 is de aanbevolen lossing op de kernen gegeven.

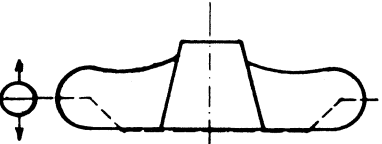
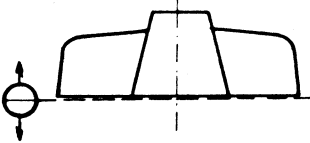

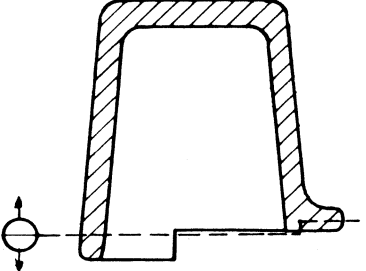
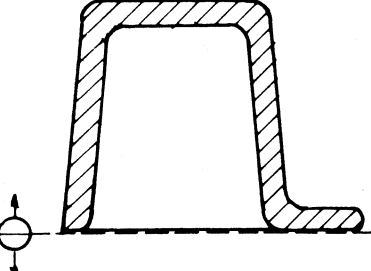
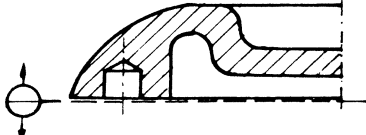
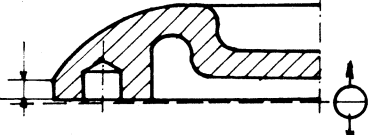
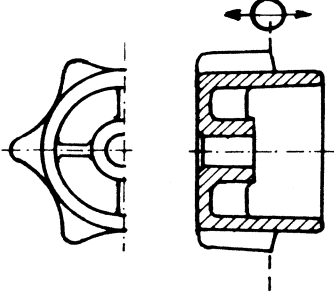
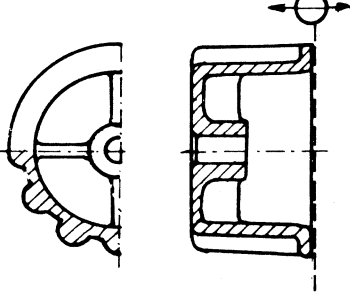
Kernlengte (mm)	Lossingshoek (°)			
	Zink	Aluminium	Magnesium	Messing
5	4	6½	5½	7
10	3	4½	4	5½
20	2	3½	3	4
50	1½	2½	2	2½
100	1	1½	1½	2
150	1	1½	1½	2

Figuur 3.18: Aanbevolen lossingshoek bij verschillende kernlengtes

In figuur 3.19 staat voor enkele gatdiameters aangegeven welke maximale diepte van het gat nog eenvoudig gemaakt kan worden. Het is wel mogelijk om diepere gaten te maken, maar dat brengt veel extra kosten met zich mee.

Gatdiameter (mm)	Maximale gatdiepte (mm)			
	Zink	Aluminium	Magnesium	Messing
3	9	8	8	-
4	15	12	12	-
5	20	15	15	-
6	25	25	25	12
9	40	40	40	25
12	50	50	50	30
15	80	80	80	50
20	120	120	120	90
25	150	150	150	125

Figuur 3.19: Maximale gatdiepte bij verschillende diameters

ongunstig	beter	opmerkingen
		<p>  = matrijsdeling </p> <p>In het ongunstige geval moet de radius in beide matrijschelften worden gemaakt. Op het produkt zijn deelnaaden en 'overzettingen' niet te voorkomen.</p>
		<p>Versprongen deling en deelnaad op wand en radius wordt voorkomen bij vlakhouden van onderzijde van het produkt.</p>
		<p>Buitencontouren van een produkt met een radius of met een scherpe kant moeten vermeden worden. I.v.m. aansnijding, overlopen en ontbramen moet men een rechte kant van minstens 1,5 mm toestaan.</p>
		<p>De matrijsdeling is ongunstig en geeft moeilijkheden bij het ontbramen. Bovendien is de vormgeving moeilijk en duur bij de aanmaak van de matrijs. Het rechter handwiel kan door afdraaien van de buitenrand ontbraamd worden.</p>

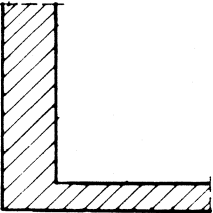
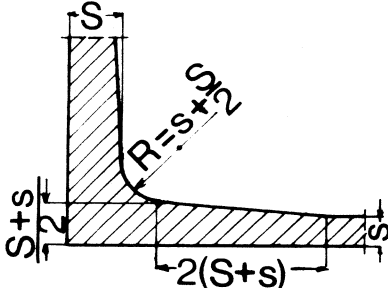
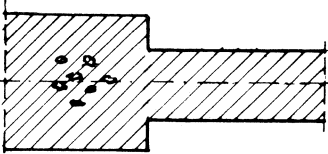
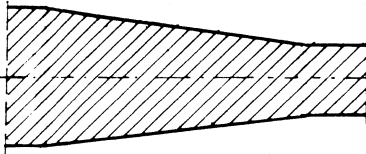
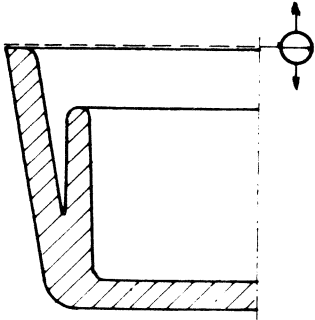
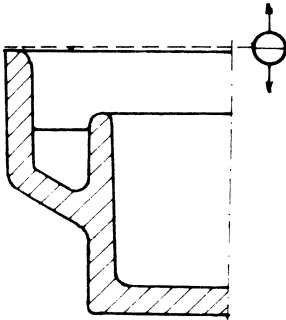
Figuur 3.17: Voorbeelden van mogelijkheden om versprongen deellijnen te voorkomen

Wanddikte

De gemiddelde wanddikte die bij het ontwerpen van gietprodukten moet worden aangehouden is voor zink 1,5 mm, voor aluminium 2 mm en voor messing 2,5 mm. De wanddikte die het materiaal minimaal moet hebben is 0,5 mm voor zink, 0,8 mm voor aluminium en 1,5 millimeter voor messing. Om gewicht en kosten te besparen moet altijd een zo klein mogelijke wanddikte worden genomen.

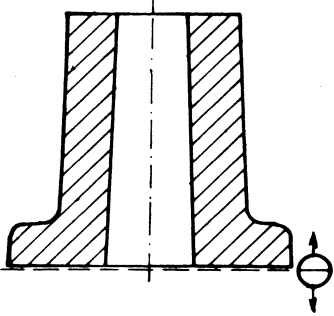
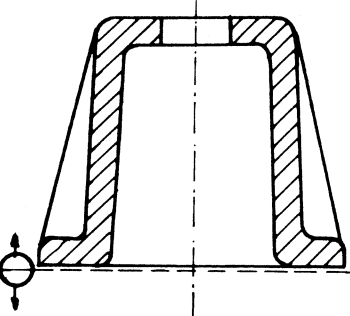
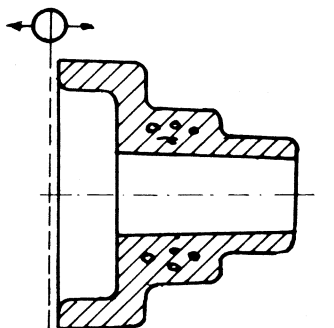
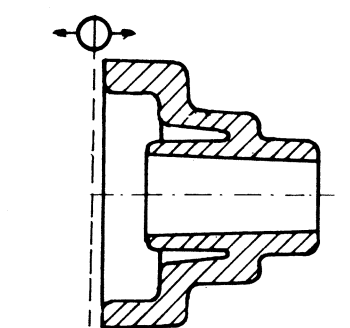
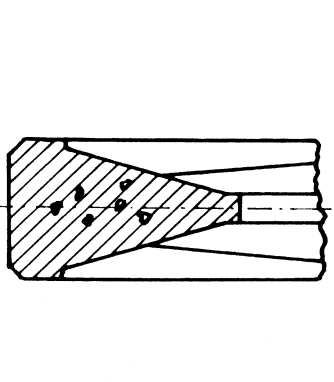
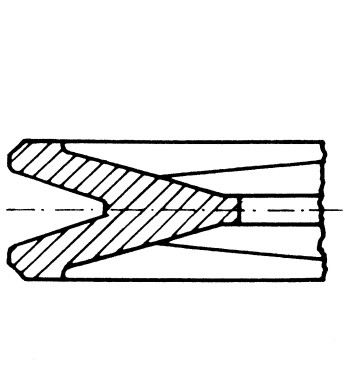
Er moet naar gestreefd worden om de wanddikte zo gelijkmatig mogelijk te houden, zodat er weinig dikkere delen zijn waar poreusheid en oppervlaktefouten kunnen ontstaan. Wanneer er met verschillende wanddikten wordt gewerkt, mogen deze wanden de verhouding 1 : 1,5 niet overschrijden.

Wanddikten boven de 8 mm, materiaalopeenhopeningen of scherpe overgangen van ongelijke wanddikten neigen tot poreusheid en moeten vermeden worden.

ongunstig	beter	opmerkingen
		<p>Scherpe hoeken en grote veranderingen in wanddikten geven spanningsscheuren in het gietstuk. Er moet een geleidelijk verloop aangebracht worden.</p>
		<p>Scherpe overgangen geven poreusiteit en spanningsscheuren. Ook hier is een geleidelijk verloop beter, zowel voor wanden als voor nokken.</p>
		<p>Wanden, die met een scherpe hoek op elkaar aansluiten moeten vermeden worden. De messcherpe kant in de matrijs zal spoedig bezwijken. Bovendien zal deze staalpunt te heet worden waardoor er wegzakkingen in het produkt optreden.</p>

Figuur 3.20: Richtlijnen met betrekking tot de wanddikten

Een gelijkmatige wanddikte garandeert een spanningsvrij gietstuk zonder poreusheid. Door middel van mee te gieten uitsparingen kunnen opeenhopingen van materiaal vermeden worden. Wanneer de uitsparingen loodrecht op de matrijsdeling staan is de gewichtsbesparing eenvoudig, in andere gevallen zullen zijschuiven gebruikt moeten worden.

ongunstig	beter	opmerkingen
		<p>Wanneer gewicht wordt bespaard kan door aanbrengen van versterkingsribben toch een bepaalde stijfheid en sterkte behouden blijven.</p>
		<p>Overgangen van dikke naar dunne wanden moeten vermeden worden. De naaf is door een uitsparing gelijkmatiger van wand te krijgen. Eventueel kunnen verbindingsruggen naar het middenstuk gemaakt worden.</p>
		<p>Door de materiaalopeenhoping ontstaat poreusiteit, bovendien grote bewerkingskosten voor het insteken van de V-groef. In dit geval is het gunstiger de groef voor te gieten.</p>

Figuur 3.21: Voorkomen van materiaalopeenhopingen

Afrondingen

Op plaatsen waar vlakken bij elkaar komen moeten afrondingen gebruikt worden om hoge spanningsconcentraties in het gietstuk te voorkomen. De afrondingen moeten echter niet te groot gekozen worden omdat er dan onevenredig dikke delen kunnen ontstaan. De minimale afrondingsstraal is even groot als de wanddikte van het materiaal.

Soms moet een produkt toch ergens een rechte hoek hebben, omdat het daarmee beter zijn functie kan vervullen. Rechte hoeken zorgen voor een verzwakking van het gietstuk en de matrijs. In dat geval is het beter om een kleine afronding van 0,5 mm aan het gietstuk te geven.

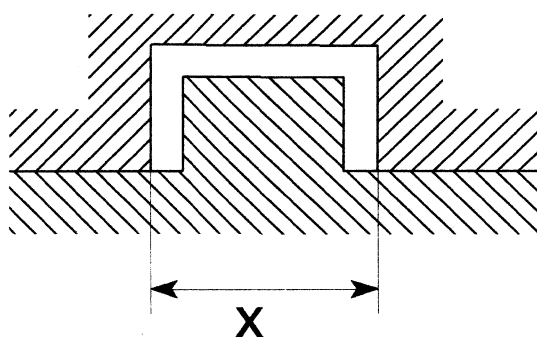
Toleranties

In de figuren 3.22 tot en met 3.24 zijn voor verschillende situaties de lineaire toleranties gegeven die onder normale productie-omstandigheden haalbaar zijn. Het is mogelijk om meer nauwkeurige spuitgietstukken te vervaardigen, maar deze worden dan ook duurder.

In figuur 3.22 zijn de toleranties gegeven voor kritische maten die maar van één matrijshelft afhankelijk zijn, de zogenaamde matrijsgebonden maten.

In figuur 3.23 is aangegeven welke waarden hierbij moeten worden opgeteld wanneer er sprake is van niet-matrijsgebonden maten. Dit zijn maten die afhankelijk zijn van twee matrijshelften.

In figuur 3.24 zijn de toleranties gegeven die bij de toleranties uit figuur 3.22 moeten worden opgeteld, wanneer de maat bepaald wordt door een matrijshelft en een zijschuif. Hierbij zijn de toleranties afhankelijk van het geprojecteerde oppervlak van de schuif loodrecht op zijn bewegingsrichting.

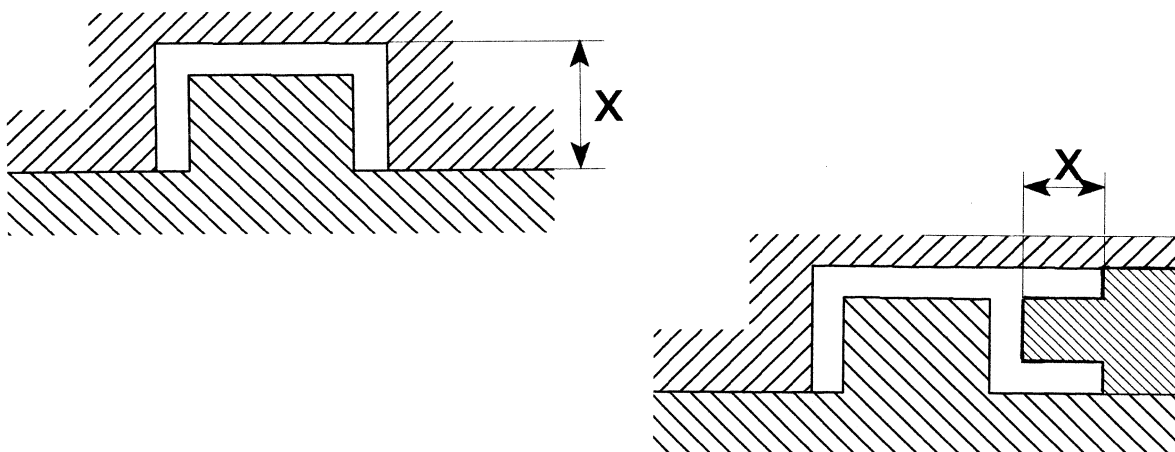


Maat X (mm)		Tolerantie (mm)			
		Gietlegering			
		Zink	Alumi- nium	Magne- sium	Messing
0 - 25		±0,08	±0,10	±0,10	±0,18
Extra tole- rantie voor iedere extra mm	25 - 250	±0,01	±0,015	±0,015	±0,02
	> 250	±0,01	±0,01	±0,01	-

Figuur 3.22: Toleranties voor matrijsgebonden maten

Geprojecteerd oppervlak van het gietstuk (cm ²)	Extra tolerantie (mm)			
	Gietlegering			
	Zink	Aluminium	Magnesium	Messing
< 300	±0,10	±0,13	±0,13	±0,13
300 - 600	±0,15	±0,20	±0,20	-
600 - 1200	±0,20	±0,30	±0,30	-
1200 - 1800	±0,30	±0,40	±0,40	-

Figuur 3.23: Extra toleranties voor niet-matrijsgebonden maten



Geprojecteerd oppervlak van de schuif (cm ²)	Extra tolerantie (mm)			
	Gietlegering			
	Zink	Aluminium	Magnesium	Messing
< 60	±0,10	±0,13	±0,13	±0,25
60 - 120	±0,15	±0,20	±0,20	-
120 - 300	±0,20	±0,30	±0,30	-
300 - 600	±0,30	±0,40	±0,40	-

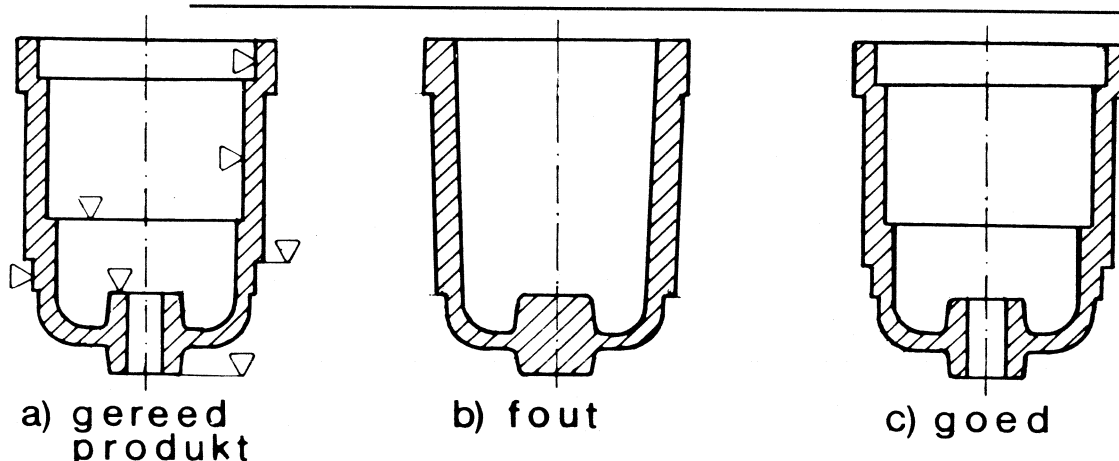
Figuur 3.24: Extra toleranties op niet-matrijsgebonden maten bij gebruik van zijschuiven

De toleranties voor de vlakheid van een oppervlak van het gietstuk zijn voor alle legeringen gelijk. Voor afmetingen kleiner dan 7,5 centimeter is de tolerantie 0,2 mm. Voor ieder centimeter die de maat groter is, moet hier 0,003 mm bij worden opgeteld.

Bewerkingstoeslag

Wanneer een spuitgietstuk naderhand nog bewerkt moet worden, moet er met een kleine bewerkingstoeslag rekening gehouden worden. Deze toeslag moet altijd zo klein mogelijk gehouden worden. Een toeslag van 0,25 mm is gezien de nauwkeurigheid van het spuitgieten meestal wel genoeg. In ieder geval is het af te raden om een toeslag te kiezen die groter is dan 0,8 mm. Te grote bewerkingstoeslagen zullen onnodige materiaalopeenhopingen geven, waardoor de kans dat poreusheid ontstaat weer groter wordt.

Bij hoge gietstukken kan door de noodzakelijke lossing een zodanige opeenhoping van materiaal plaatsvinden, dat er plaatselijk 2 mm bewerkingstoeslag ontstaat. Dit is niet gewenst en moet dan ook vermeden worden. In figuur 3.25 is hiervan een voorbeeld gegeven. Figuur a. toont het gereed produkt na de bewerkingen. Figuur b. toont een gietstuk waaruit a. gemaakt kan worden, maar met teveel bewerkingstoeslag. Figuur c. toont het juiste onbewerkte gietstuk, met op ieder te bewerken vlak een beperkte toeslag.



Figuur 3.25: De juiste hantering van de bewerkingstoeslag

Inserts

Een groot voordeel bij het spuitgieten is de mogelijkheid van het toepassen van inserts. Dit zijn onderdelen zoals bussen, bouten, pennen of moeren uit staal of een niet-ijzer-metaal. Ze worden in het gietstuk meegegoten ter verkrijging van betere eigenschappen, zoals voor een grotere oppervlaktehardheid, ter versteviging of ter verbetering van de loopeigenschappen. Enkele voorbeelden van de toepassing van inserts bij het spuitgieten van metalen zijn de verwarmingsspiraal in een aluminium strijkijzerzool, gesinterde bussen in glijlagers en gietijzeren voeringen bij remtrommels.

De inserts moeten tijdens het spuitgietproces voor elk shot in de matrijs aangebracht worden. Dit houdt in dat het gedeelte van de insert, die later uit het produkt moet steken, zodanig in de matrijs geplaatst moet kunnen worden dat dit gedeelte volledig voor het vloeibare materiaal is afgesloten. Op de insert zitten dus zeer nauwkeurige toleranties.

Aan het gedeelte van de insert dat in het materiaal wordt gegoten, moet een speciale vorm worden gegeven om te voorkomen dat de insert later, bij het

gebruik van het gietstuk, kan ronddraaien of uit het gietstuk kan worden getrokken. Voorbeelden hiervan worden gegeven in figuur 3..

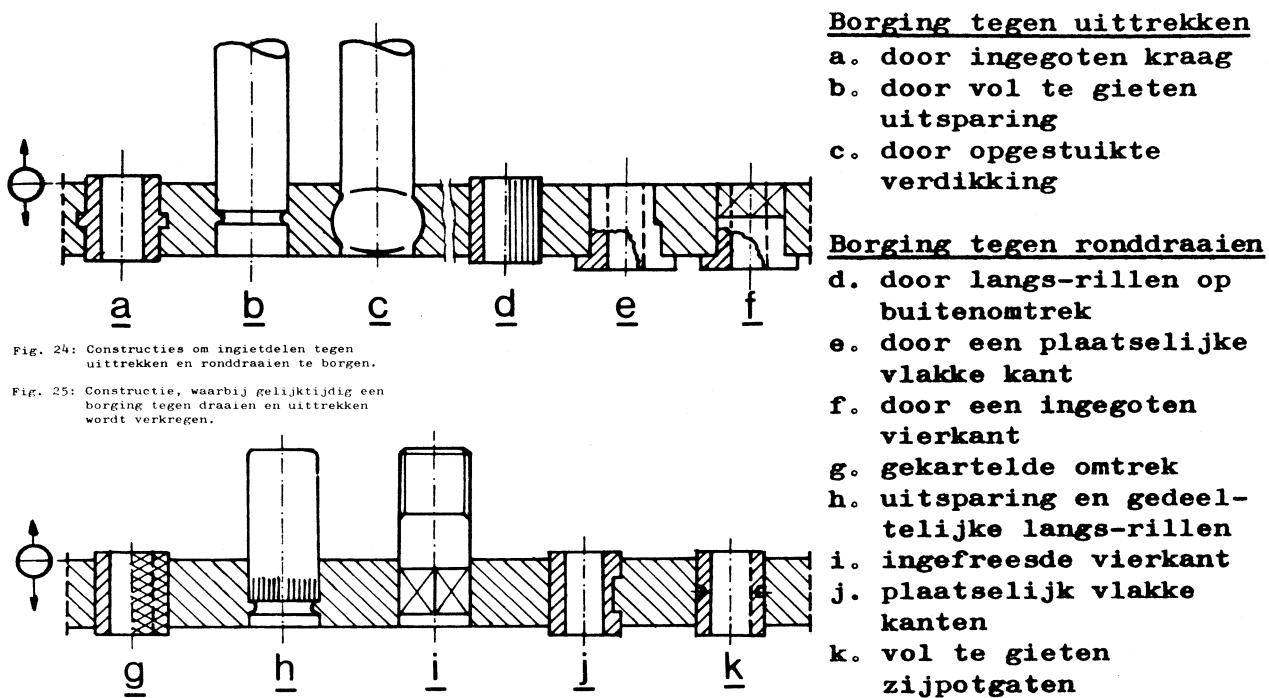
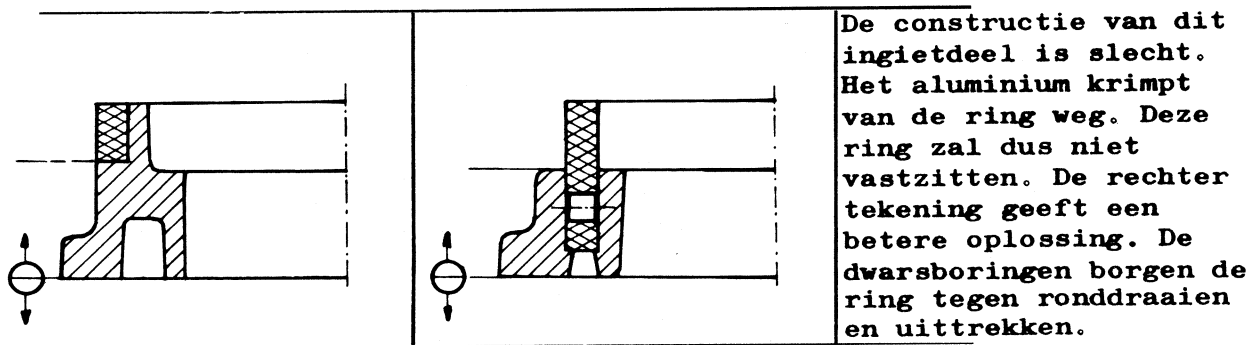


Fig. 24: Constructies om ingietdelen tegen uittrekken en ronddraaien te borgen.

Fig. 25: Constructie, waarbij gelijktijdig een borging tegen draaien en uittrekken wordt verkregen.

Figuur 3.26: Voorbeelden voor borging van de insert tegen uittrekken of ronddraaien

Wanneer het materiaal niet in de richting van de insert krimpt, zal deze niet vast komen te zitten. Er moet dus bij het construeren op gelet worden, dat het materiaal op de insert kan krimpen. In figuur 3. is een voorbeeld gegeven van een slechte constructie. In dit geval zal het materiaal van de insert wegkrimpen. Deze ring zal dus niet vast komen te zitten. De rechter tekening geeft een betere oplossing. De dwarsboringen borgen hier de ring tegen ronddraaien en uittrekken.



Figuur 3.27: Voorbeeld van een constructie met een insert waarbij rekening wordt gehouden met de krimprichting

LITERATUUR

- * Allsop, D.F. en D. Kennedy
Pressure diecasting - part 2
The technology of the casting and the die
Pergamon press, 1983.
- * Barton, H.K.
Product design for die casting
The Society of Die Casting Engineers, 1974.
- Bradley, E.F.
High performance castings - A technical guide
ASM International, 1989.
- Brunhuber, E.
Praxis der Druckgussfertigung
Schiele & Schön, 1980.
- Kaye, A. en A. Street
Die casting metallurgy
Butterworths & Co., 1982.
- Leyder Havenstroom, F.R.
Technische richtlijnen voor het construeren van aluminium spuitgietswerk
1974.
- * Upton, B.
Pressure diecasting - part 1
Metals - Machines - Furnaces
Pergamon press, 1982.

* = speciaal aanbevolen

Hoofdstuk 4: SPUITGIETEN VAN KUNSTSTOFFEN

4.1 INLEIDING

Ter inleiding op dit hoofdstuk wordt uit het dictaat *ide140 Konstruktieleer 1* het hoofdstuk '*Kunststofkrat*' bekend verondersteld (ook voor het tentamen!). In dat hoofdstuk kwamen de verwerking van thermoplastische kunststoffen en konstruktierregels voor spuitgietprodukten aan de orde. Het spuitgietprodukt wordt in één proces van grondstofkorrel tot eindprodukt verwerkt. Bij dit verwerkingsproces is de grondstof van belang maar daarnaast spelen de - meestal universele - machine en de matrijs een grote rol. Het produktvormende deel van de matrijs is uiteraard produktafhankelijk. De overige matrijsdelen, tezamen ook de ombouw genoemd, zijn meestal universeel.

Spuitgieten is het meest toegepaste proces voor massafabricage van eindprodukten uit thermoplastische kunststoffen. Er bestaan varianten van het spuitgietproces voor de verwerking van thermoharders en rubbers. Het belang van spuitgieten ligt in de grote vrijheid van vormgeving van het eindprodukt en in het doorgaans ontbreken van de noodzaak tot nabewerking, mits produkt en matrijs goed ontworpen zijn. Dankzij de vrijheid van vormgeving kunnen verschillende functies (waaronder die ten behoeve van montage) in één onderdeel worden geïntegreerd.

Wegens het grote aantal onderdelen van de precisiematrijzen is spuitgieten een dure techniek voor kleine seriegrootten. Niettemin worden kleine series produkten soms toch gespuitspuitgiet, bijvoorbeeld omdat dit de enige methode is om de vereiste maat- en vormnauwkeurigheid te halen.

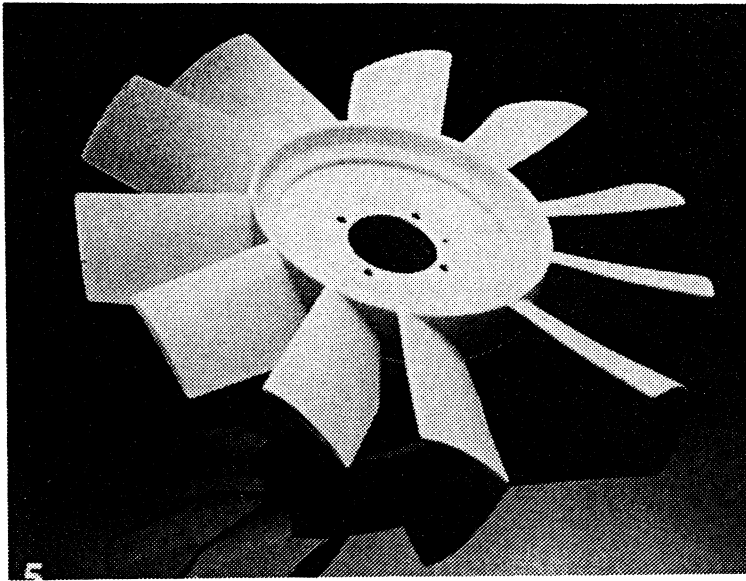
Het produkt kan desgewenst ná het spuitgieten worden gedecoreerd door middel van lakken, bedrukken of andere methoden. In toenemende mate worden dergelijke nabewerkingen echter geïntegreerd in het spuitgietproces, vooral bij grote produktséries.

Spuitgietprodukten kunnen sterk in grootte variëren, bijvoorbeeld van kleine moertjes tot autobumpers (zie bijvoorbeeld figuur 4.1).

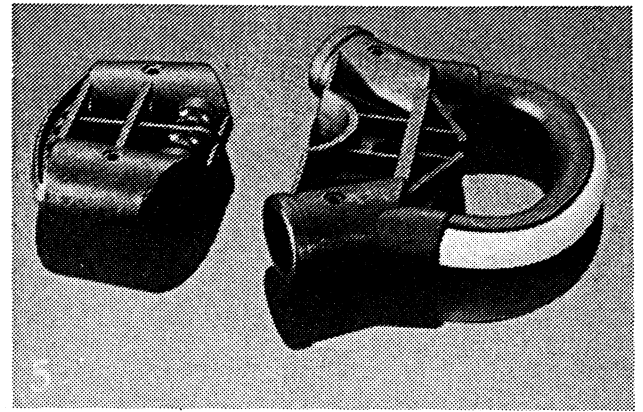
4.2 HET SPUITGIETPROCES

In figuur 4.2 zijn de belangrijkste stappen in een spuitgietyklus tegen een tijdas uitgezet. Het koelen van het produkt in de matrijs neemt de meeste tijd in beslag, gewoonlijk ruim $\frac{2}{3}$ van de totale cyclustijd. Het koelen begint al bij het inspuiten van de grondstof in de matrijs. Bij het nadrukken vloeit nog steeds grondstof in de matrijs terwijl het afkoelen van het produkt vanaf de buitenzijde doorgaat. Als de aanspuiting dichtgevroren (gestold) is gaat de spuiteenheid terug en start het doseren, het aanmaken van geplastificeerde (gesmolten) grondstof. Het koelen van het produkt in de matrijs gaat ondertussen nog steeds door.

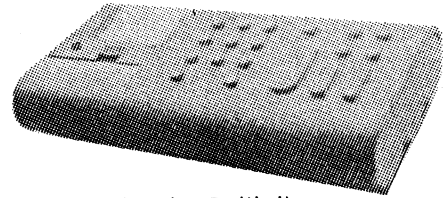
Figuur 4.3 toont drie belangrijke momentopnamen van een spuitgietyklus. Aan de rechterzijden is de vultrechter te zien, alsmede de plastificeereenheid of spuiteenheid die bestaat uit een cilinder met een extrusieschroef. Aan de linkerzijden is de sluiteenheid met matrijs getoond.



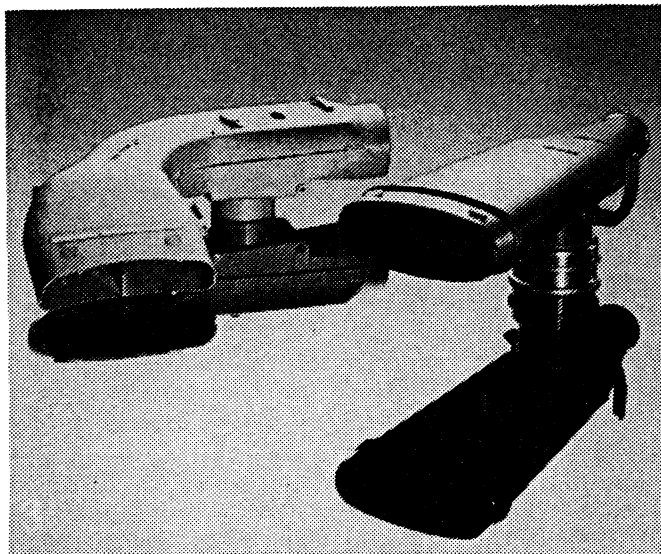
propeller voor radiator



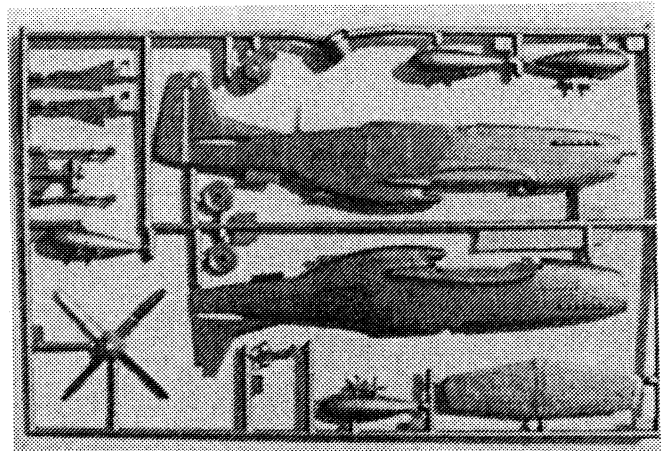
onderdelen surfplank



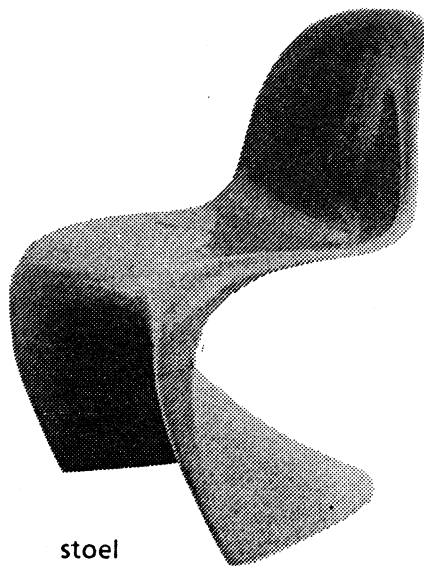
Olivetti rekenmachine (M. Bellini)



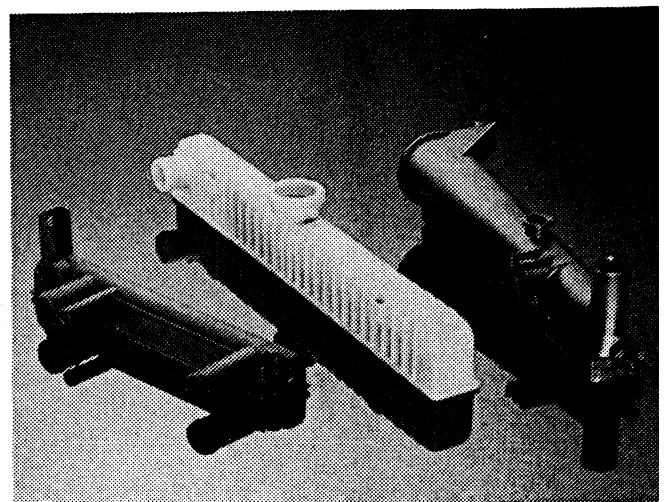
luchtinlaten verbrandingsmotor



bouwpakket

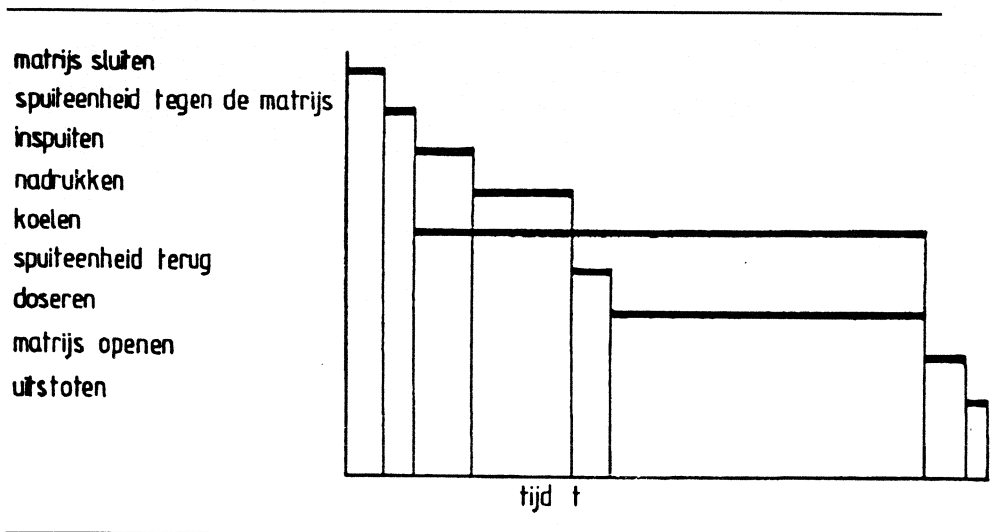


stoel



onderdelen radiator

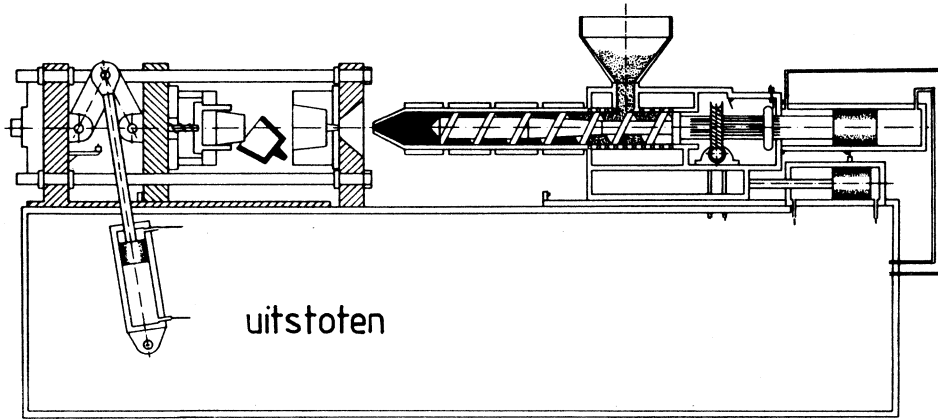
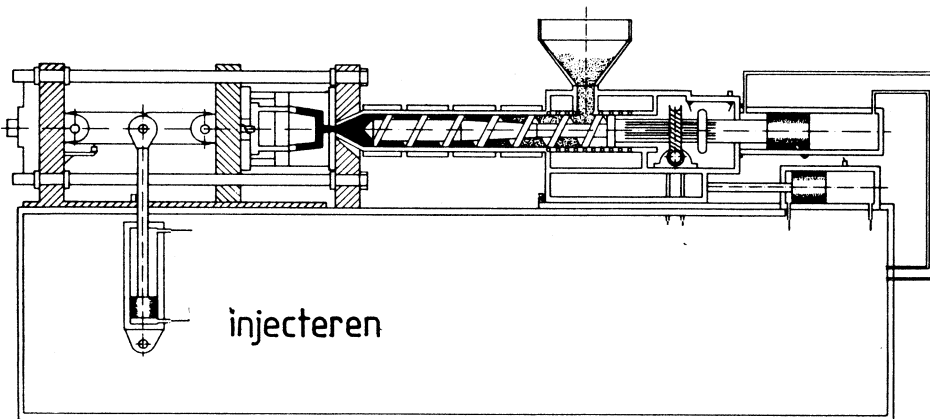
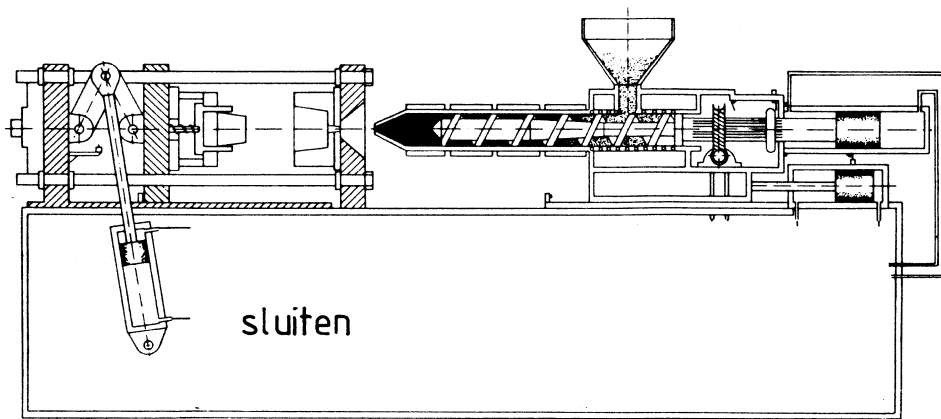
Figuur 4.1: Diverse voorbeelden van kunststof spuitgietproducten



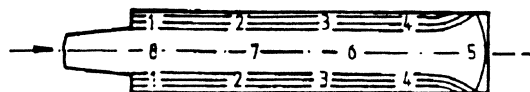
Figuur 4.2: Spuitgietscyclus

De spuitgietscyclus begint met het sluiten van de matrijs. Vervolgens wordt de spuiteenheid tegen de matrijs gedrukt. De volgende stap is het inspuiten van de geplastificeerde kunststof in de matrijs. De schroef draait niet tijdens het inspuiten van de grondstof in de matrijs. Een axiale beweging van de schroef zorgt voor het vullen van de matrijs (plunjerwerking). Als de matrijs vol is wordt gesmolten kunststof in de matrijs nagedrukt om de krimp van het materiaal in de matrijs zoveel mogelijk te compenseren.

Als de aanspuitopening dichtgevroren is moet het produkt nog verder in de matrijs afkoelen. De stolling in het produkt begint doorgaans aan het einde van de vloeiweg en loopt vandaar naar voren naar de plaats van de aanspuiting (figuur 4.4). De spuiteenheid wordt teruggetrokken en het plastificeren van de grondstof begint. De schroef draait en pompt hierdoor het materiaal naar voren. Het zich opéénhopende geplastificeerde materiaal vóór de spuitkop duwt de schroef naar achteren (naar rechts in figuur 4.3). Op het gesmolten materiaal blijft een bepaalde druk staan, de zogenaamde plastificeerdruk of stuwdruk. Is er voldoende materiaal geplastificeerd en is het produkt voldoende afgekoeld dan opent de sluiteenheid de matrijs. Het gedeeltelijk afgekoelde produkt wordt uitgestoten. De spuitgietscyclus begint dan weer met het sluiten van de matrijs.



Figuur 4.3: Drie belangrijke momenten in een spuitgietscyclus



- 1 begin van de injectiefase
- 8 einde van de injectiefase
- 5 het eerste vast
- 8 het laatste vast

Figuur 4.4: Stolpatroon in een spuitgietsmatrijs

4.3 DE SPUITGIETMACHINE

Aan een kunststofspuitgietmachine zijn drie functionele delen te onderscheiden:

- de spuiteenheid of plastificeereenheid;
- de sluiteenheid;
- de besturingseenheid.

De grondstof wordt toegevoerd via de trechter en gesmolten in de spuitgietcilinder. De sluiteenheid van de spuitgietmachine dient voor het opspannen van de matrijs en voor het op de juiste tijd openen en sluiten. De besturing van de machine zorgt voor de juiste volgorde van de stappen van het spuitgietproces en voor het toevoeren van de energie.

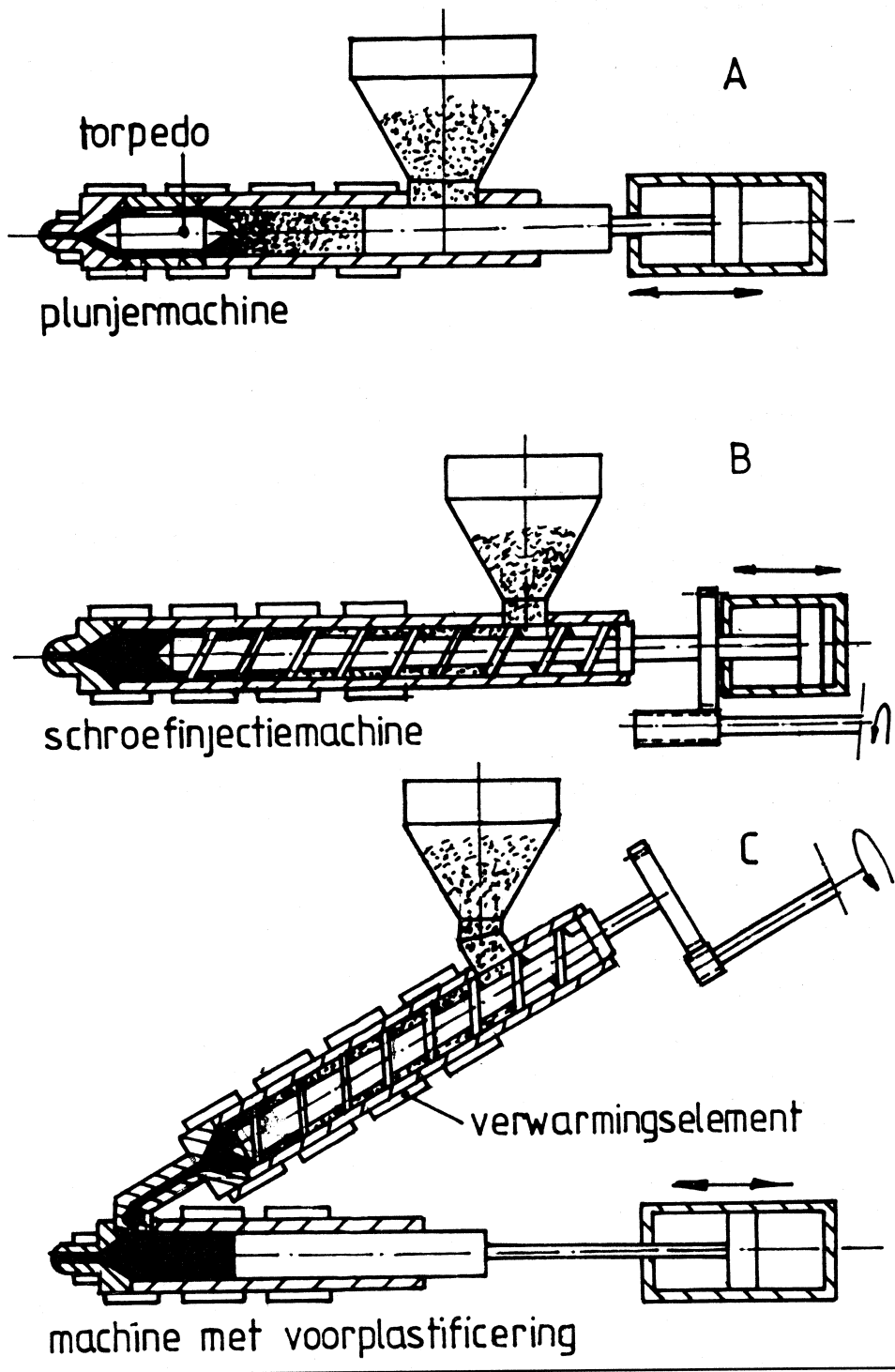
De spuiteenheid

Moderne kunststofspuitgietmachines bevatten een schroefcilinder analoog aan een kunststofextruder (zie hoofdstuk 11). Dit type spuiteenheid is getoond in figuur 4.5B. Kleine spuitgietmachines met een cilinderdiameter tot 20 mm zijn soms voorzien van een cilinder en plunjer als plastificeereenheid, zoals tot in de vijftiger jaren ook op grotere machines werd toegepast (figuur 4.5A). Het voordeel van de schroefcilinder ten opzichte van de cilinder met plunjer is dat de slecht geleidende kunststof niet alleen wordt verwarmd via de verwarmingselementen aan de buitenzijde van de cilinder maar ook door visceuze wrijving in het materiaal.

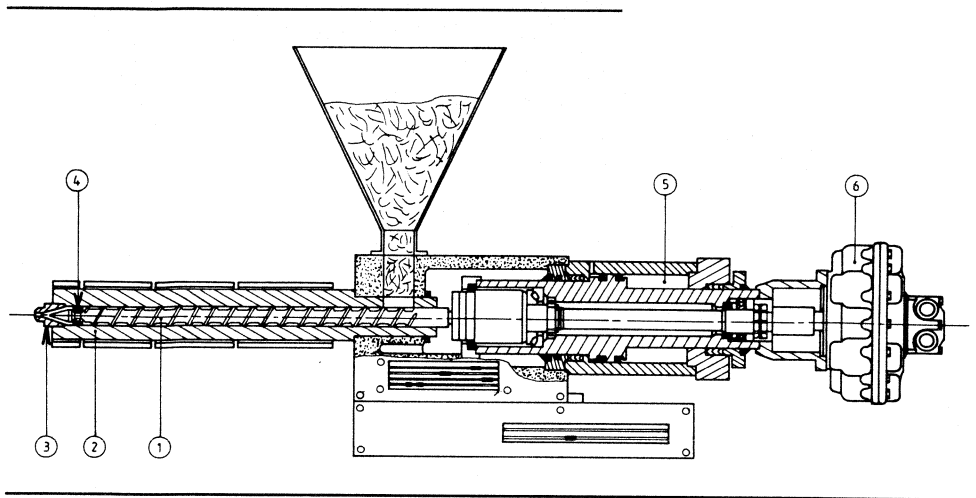
Spuitgietmachines met vóórplastificering en een spuitplunjer (figuur 4.5C) worden toegepast voor bijzondere doeleinden, bijvoorbeeld indien hoge eisen worden gesteld aan het plastificeervermogen of aan het inspuitsvolume. Ook voor het verwerken van thermoplastisch schuim en van rubber wordt dit type machine toegepast. Een kleine schroef is bij vóórplastificering voldoende vanwege de extra lange koeltijd. Een andere toepassing van een dergelijke machine is fabricage van dunwandige produkten zoals verpakkingen; de schroef blijft dan draaien tijdens het inspuiten zodat doorlopend voldoende geplastificeerd materiaal wordt aangemaakt.

Figuur 4.6 toont de doorsnede van een spuiteenheid met schroefplastificering. Voor de uitvoeringen en het functioneren van de schroef wordt verwezen naar hoofdstuk 11 *Extrusie van kunststoffen*. De standaardschroef die voor de meeste materialen wordt toegepast heeft een lengte van twintig maal de diameter. Voor hard-PVC past men meestal een afwijkende schroef toe. Voor het spuitgieten van materialen zoals PMMA, CA, CAB en ABS past men ook wel cilinders en schroeven toe met een ontgassingsconstructie zoals bij extruders (zie hoofdstuk 11).

In figuur 4.6 is te zien dat het roteren van de schroef en de axiale verplaatsing tijdens het inspuiten gescheiden zijn. De spuitplunjer 5 zorgt namelijk voor de axiale beweging van de schroef tijdens het inspuiten. De hydraulische motor 6 zorgt voor de rotatie van de schroef tijdens het plastificeren. Tijdens het plastificeren wordt de kunststof naar de kop van de cilinder getransporteerd. De schroef krijgt tegelijk een axiale beweging in de richting van de motor tegen de op plunjer 5 aangebrachte plastificeerdruk. De schroef gaat naar rechts totdat zich vóór de schroef voldoende geplastificeerd materiaal heeft gevormd voor de volgende cyclus. Vervolgens stopt de schroef met draaien tot ná het dichtvriezen van de aanspuiting. Daarna gaat de schroef weer draaien om materiaal voor de volgende cyclus te smelten.



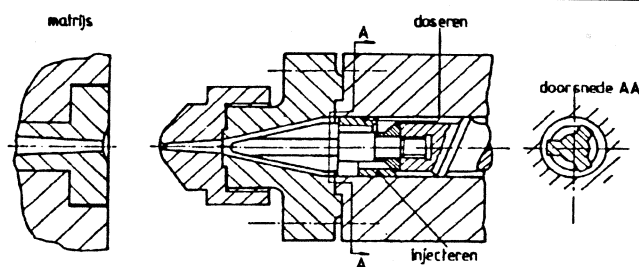
Figuur 4.5: Plastificeereenheden



Figuur 4.6: Spuiteenheid

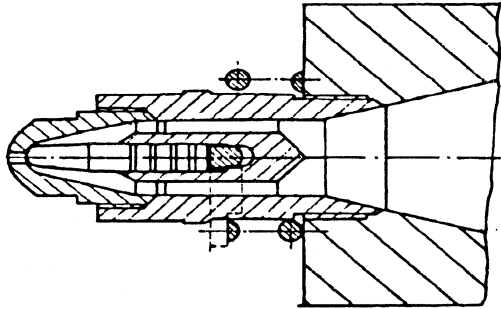
Aan het einde van de schroefcilinder is de spuitneus gemonteerd die de doorgang vormt naar de aanspuitopening in de matrij (zie figuren 4.6 en 4.7). Aan het einde van de cilinder is een afsluiting ingebouwd om te voorkómen dat kunststof terugstroomt tijdens het inspuiten. Aan de punt van de schroef is een zogenaamde sperring gemonteerd. Tijdens het inspuiten wordt de ring door de druk op de kunststof op de zitting van de schroef gedrukt. De schroefgang wordt dan geheel afgesloten. Tijdens het plastificeren van de schroef schuift de sperring voorwaarts naar de punt van de schroef. De sperring steunt nu op drie of vier vleugels die op de punt van de schroef zijn aangebracht. De gesmolten grondstof stroomt door de kanalen in de schroefgang naar de voorzijde van de cilinder.

De neus wordt vóór het inspuiten tegen de spuitbus van de matrij gedrukt. De neus en de spuitbus hebben een grote radius ter voorkóming van lekken en van slijtage van de aanlegvlakken. De neus op de cilinder heeft een conisch spuitkanaal met aan het einde de kleinste diameter. Het meest toegepaste type neus is een korte open neus (figuur 4.7).

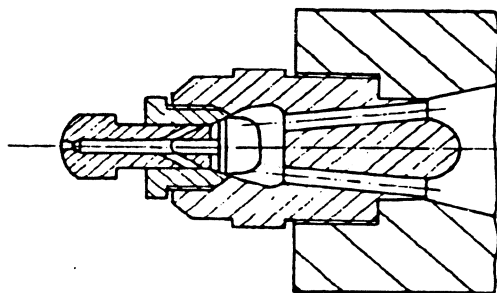


Figuur 4.7: Open spuitneus

Afsluitbare neuzen zijn soms nodig ter vermindering van dradentrekken of druipen van kunststof uit de neus. Twee veel toegepaste soorten afsluitbare neuzen zijn getoond in de figuren 4.8 en 4.9. De in figuur 4.8 getoonde neus wordt geopend door de aanlegkracht tegen de matrij. Bij het terugdrukken van de cilinder wordt de opening door de druk op de smelt gesloten. Figuur 4.9 toont een neus met naaldafsluiter: deze treedt in werking als de druk op de gesmolten kunststof een bepaalde grens bereikt.



Figuur 4.8: Spuitneus met schuifafsluiter



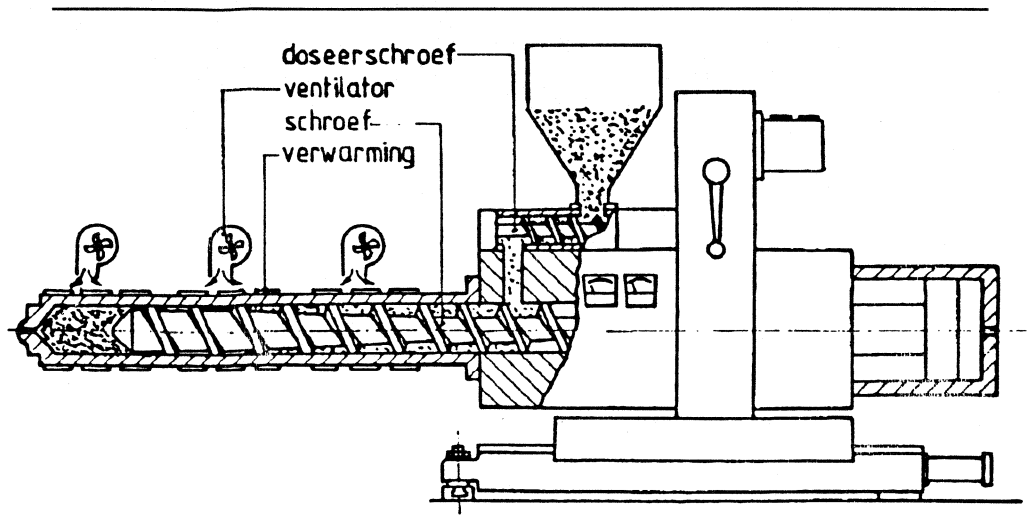
Figuur 4.9: Spuitneus met naaldafsluiter

Aan het einde van de tachtiger jaren introduceerde een Japanse firma een plastificeereenheid met een opmerkelijke geometrie, de dynameltor (figuur 4.10). De transportzone van de schroef heeft een lengte van achtmaal de diameter en de kern loopt parallel. De compressiezone heeft ook een lengte van achtmaal de diameter. De compressieverhouding bij een schroef van 40 mm diameter is gemiddeld 3,8:1 (bij conventionele machines 2,8:1). De compressieverhouding is bovendien variabel dankzij de aanwezigheid van een doseerschroef waarmee de vullingsgraad van de schroef kan worden beïnvloed. Het toerental van de doseerschroef kan onafhankelijk worden ingesteld van het toerental van de schroef in de spuitpot. De doseer- of pompzone van de plastificeerschroef heeft een lengte van tweemaal de diameter. De diepte van de schroef is hier 1,3 mm tegen 3 mm in een normale schroef van 40 mm.

Door de lage warmtegeleiding van de kunststof is er bij een conventionele spuitgietmachine een lange tijd nodig om de kunststof op temperatuur te brengen. Daarom moet het plastificeren bijtijds beginnen en bevindt zich in de cilinder continu een hoeveelheid kunststof die overeenkomt met 8 à 10 cycli. De dynameltor stapt gedeeltelijk van deze wijze van verwarming af en brengt een groot deel van de benodigde warmte door de doseerarbeid in de massa. De voorraad kunststof in de cilinder komt gemiddeld overeen met hooguit twee cycli.

Samengevat zijn de voordelen van de dynameltor:

- homogene smelt;
- snelle optimalisering van de massatemperatuur;
- korte aanlooptijden van productieseries;
- korte verblijftijd van het materiaal in de cilinder.



Figuur 4.10: Dynameltor

Bij dunwandige producten of bij temperatuurgevoelige materialen kan men dus zonder gevaar voor oververhitting met hogere materiaaltemperaturen inspuiten.

De sluiteenheid

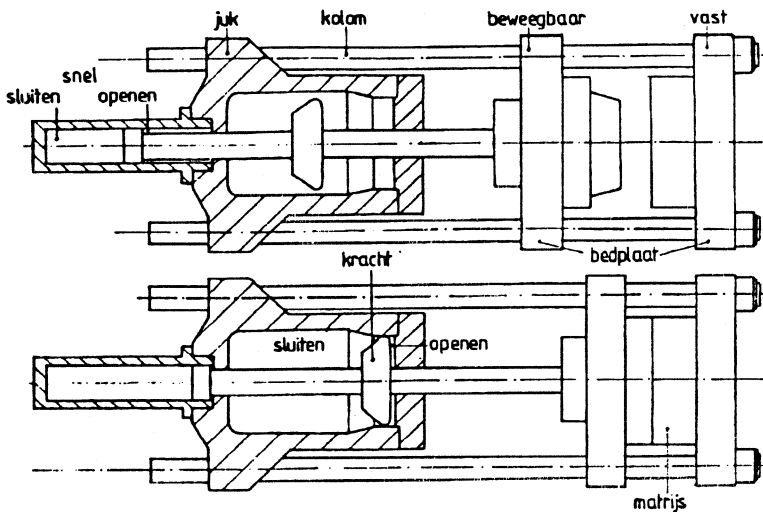
De matrijs wordt op de bedplaten van de sluiteenheid gemonteerd. De functie van de sluiteenheid is het sluiten van de matrijs, het dichthouden van de matrijs met voldoende sluitkracht en het openen van de matrijs. Het sluitmechanisme bestaat uit twee vaste platen verbonden door twee of vier kolommen en een beweegbare bedplaat. Eén van de vaste platen is de vaste bedplaat.

Er bestaan drie verschillende soorten sluitmechanismen:

- mechanische sluiteenheid;
- hydraulische sluiteenheid;
- mechanisch-hydraulische sluiteenheid.

Voor kleinere machines met een sluitkracht tot 1300 kN worden uit kostenoverwegingen hoofdzakelijk mechanische sluiteenheden met kniehefboom toegepast. Voor eenzelfde sluitkracht vergt een hydraulische sluiteenheid namelijk 10 tot 20 % méér vermogen. In figuur 4.3 is een sluiteenheid met kniehefboom weergegeven.

Bij een hydraulische sluiting (figuur 4.11) duwt een hydraulische cilinder de centrale hefboom naar rechts. De sluiteenheid bestaat uit twee vaste platen en één beweegbare, verbonden door twee of vier kolommen. Bij het sluiten loopt de matrijs aanvankelijk met hoge snelheid dicht om de cyclustijd zo kort mogelijk te houden. Naarmate de matrijshelften elkaar dichter naderen neemt de snelheid af: dit is gunstig voor de levensduur van de matrijs. De sluitkracht neemt toe totdat de knie net even door het labiele evenwichtspunt gaat. Bij het openlopen van de matrijs is een grote kracht nodig voor het eerste gedeelte van de slag.



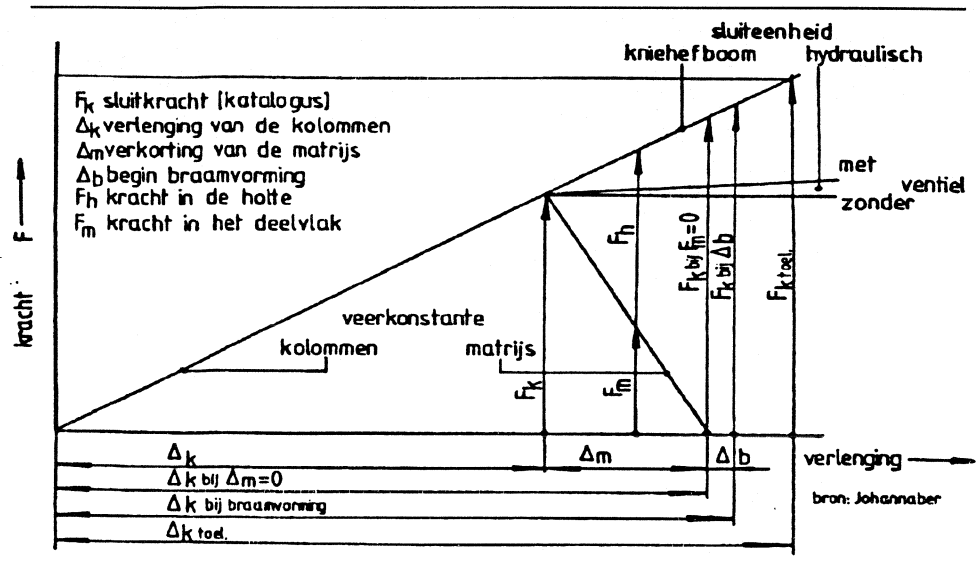
Figuur 4.11: Hydraulische sluiteenheid

Het snel open- en dichtlopen van de matrijs wordt gerealiseerd door een kleine hydraulische cilinder aan het einde van de bedplaat. Als de hoofdzuiger nauwkeurig past in de cilinder wordt bij het naar rechts bewegen de hydraulische druk op de grote zuiger gezet; de sluitkracht op de matrijs is dan hoog. Voor het openen van de matrijs gebeurt het omgekeerde. Achter de grote zuiger wordt druk toegevoerd en als de matrijs voldoende is opengelopen neemt de snelsluitcilinder de taak over.

Bij een mechanisch-hydraulische sluiteenheid wordt het openen en sluiten door een kniehefboom gedaan. De sluitkracht wordt op de matrijs gezet via een hydraulisch kussen.

In figuur 4.12 is een diagram getekend dat het verband aangeeft tussen de verlenging van de kolommen en de sluitkracht. Bij de nominale sluitkracht van de machine behoort een verlenging Δk van de kolommen en een indrukking Δm van de matrijs. De kracht F_k in de kolommen is dezelfde als de kracht op het deelvlak van de matrijs. Tijdens het inspuiten van de kunststof in de matrijs neemt de kracht F_m op het deelvlak af en de spuitkracht F_n in de holte van de matrijs neemt toe. Als F_m juist nul is, is de vervorming in het deelvlak van de matrijs ook nul. Bij een kniehefboommechanisme is de kracht in de kolommen groter dan de sluitkracht F_k . Men kan de spuitkracht F_n nog iets opvoeren totdat bij Δb ($\approx 0,05$ à $0,1$ mm) braamvorming optreedt.

In het diagram is ook de karakteristiek van een hydraulische machine opgenomen. Tot een kracht F_k en een verlenging van de kolommen Δk verandert er niets in het diagram. De matrijs wordt op dezelfde wijze ingedrukt als bij een kniehefboommechanisme. Tijdens het inspuiten van de kunststof blijft de verlenging van de kolom Δk en de sluitkracht F_k . De verlenging of terugvering van de matrijs echter wordt volledig door het oliekussen opgenomen en er treedt geen overbelasting op.



Figuur 4.12: Sluitkracht-deformatiediagram

4.4 DE SPUITGIETMATRIJS

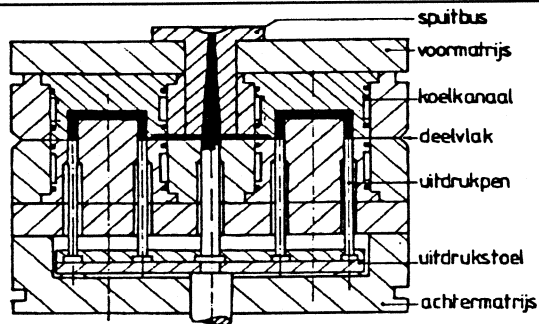
De spuitgietmatrijs wordt gemonteerd op de bedplaten van de machine. De voormatrijs zet men vast op de vaste bedplaat en de achtermatrijs op de beweegbare bedplaat.

De meest eenvoudige matrijsconstructie is een zogenaamde tweeplatenmatrijs met een vaste stangaanspuiting (figuur 4.13). De grondstof komt via de spuitbus in de matrijsholte. Na de koeltijd en het openlopen van de matrijs wordt het produkt uit de matrijs gedrukt met behulp van uitdrukpenen die op een uitdrukstoel zijn gemonteerd. De uitdrukstoel wordt bewogen door een hydraulisch systeem aan de beweegbare bedplaat. Ten behoeve van een vlotte warmteafvoer en een gelijkmatige temperatuur van het afkoelende produkt zijn in de matrijs koelkanalen aangebracht waardoor koelwater of olie wordt rondgepompt.

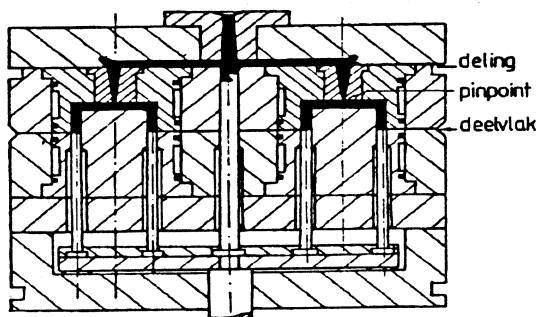
Bij een drieplatenmatrijs (figuur 4.14) wordt door middel van één of méér beweegbare platen de aanspuiting losgetrokken van het produkt. De aanspuiting is voorzien van een zogenaamde pinpoint-aansnijding, een vernauwing waar de aanspuiting gemakkelijk kan afbreken.

De geometrie van de aanspuiting(en) en de aanspuitplaats(en) bepalen de drukval over de aanspuiting en daardoor de minimaal benodigde inspuitedruk. De inspuitedruk beïnvloedt de vultijd en het stromingspatroon. Het stromingspatroon bepaalt grotendeels de structuur van het produkt en daardoor de produktkwaliteit. De plaatsen van eventuele vloeinaden, een ander belangrijk kwaliteitsaspect, hangen deels af van de aanspuitplaats(en).

De benodigde nadruktijd wordt bepaald door de aanspuitopening(en) in combinatie met de wanddikte(n) van het produkt. Een grotere aanspuitopening vriest later dicht: daardoor kan er langer worden nagedrukt zodat de krimp in de matrijs wordt verminderd. Hiertegenover staat een verlenging van de cyclustijd. De tijd benodigd voor het verwijderen van de aanspuiting(en) kan eveneens de cyclustijd verlengen. Voor het beheersen van het stromingspatroon en het verwijderen van de aanspuiting kan men kiezen uit verschillende soorten aanspuitingsystemen (figuur 4.15).



Figuur 4.13: Tweeplatenmatrijs

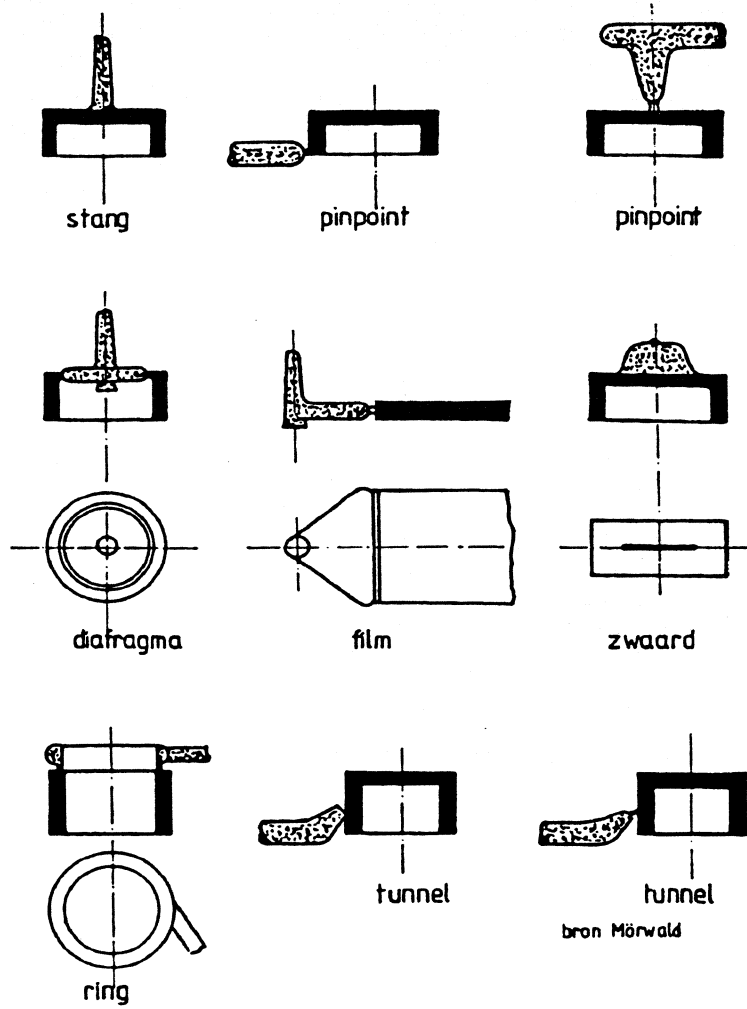


Figuur 4.14: Drieplatenmatrijs

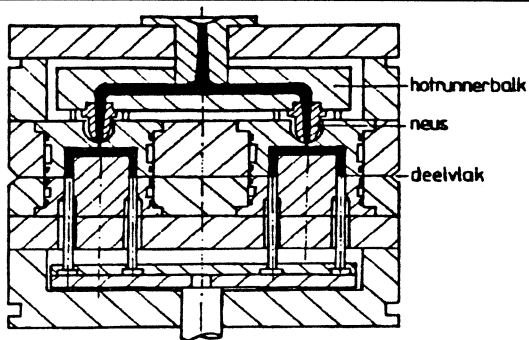
Het eenvoudigste aanspuitsysteem is de reeds genoemde vaste stangaanspuiting direct op het produkt. Deze geeft echter hoge kosten voor het verwijderen van de stang en een grote zichtbare beschadiging op het oppervlak. De pinpoint-aanspuiting geeft ook een beschadiging maar die is veel kleiner en het verwijderen van de aanspuiting gebeurt bij een drieplatenmatrijs automatisch. Voor het automatisch afsnijden van de aanspuiting bij het openlopen van de matrijs kan men ook gebruik maken van een tunnel- of duikbootaanspuiting.

Vertoont het materiaal grote krimpverschillen tussen de stromingsrichting en loodrecht daarop dan kan men vervorming van het produkt sterk verminderen door een filmaanspuiting of een zwaardaanspuiting toe te passen. Het stroomfront in de matrijs is dan bij benadering evenwijdig. Als bij buisvormige produkten geen vloeinaden zijn toegestaan, kan men een diafragmaanspuiting of een ringaanspuiting toepassen.

Bij dunwandige produkten kan het gebeuren dat het produkt reeds voldoende is afgekoeld terwijl de aanspuiting nog niet is dichtgevroren. Ook bij moeilijk te vullen matrijsholten, waarvoor een dikke aanspuitstang nodig kan zijn, treedt dit probleem op. In die situaties wordt bij voorkeur een hotrunner toegepast. Vanwege de extra ingewikkelde matrijskonstruktie is een hotrunner pas lonend bij grote series of indien met een stangaanspuiting niet het gewenste resultaat wordt verkregen. Bij hotrunners wordt de kunststof in de aanspuiting vloeibaar gehouden tot dichtbij het produkt. Er bestaan vele uitvoeringen. In figuur 4.16 is een hotrunner getekend die direct op het produkt aanspuit. Een belangrijk voordeel als men direct op het produkt aanspuit is de materiaalbesparing: er hoeft immers géén aanspuiting te worden verwijderd.

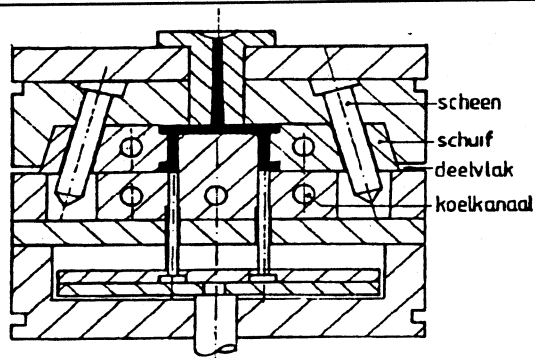


Figuur 4.15: Aanspuitvormen



Figuur 4.16: Hotrunnermatrijs

In de voorbeelden van figuur 4.13, 4.14 en 4.16 is het produkt lossend: de matrijs kan openlopen en het produkt kan zonder beschadiging met één eenvoudige beweging uit de matrijs worden gestoten. Als het produkt niet lossend is moet men in de matrijs voorzieningen aanbrengen om het produkt bij het uitstoten niet te beschadigen. Men past dan schuiven of zijlossers toe. Deze schuiven moeten vóór, tijdens of ná het openlopen van de matrijs worden bediend; daarna kan het produkt worden uitgestoten. In figuur 4.17 gebeurt het bedienen van de schuiven mechanisch door schenen tijdens het openlopen van de matrijs. De schuiven kunnen ook hydraulisch of pneumatisch worden bewogen.



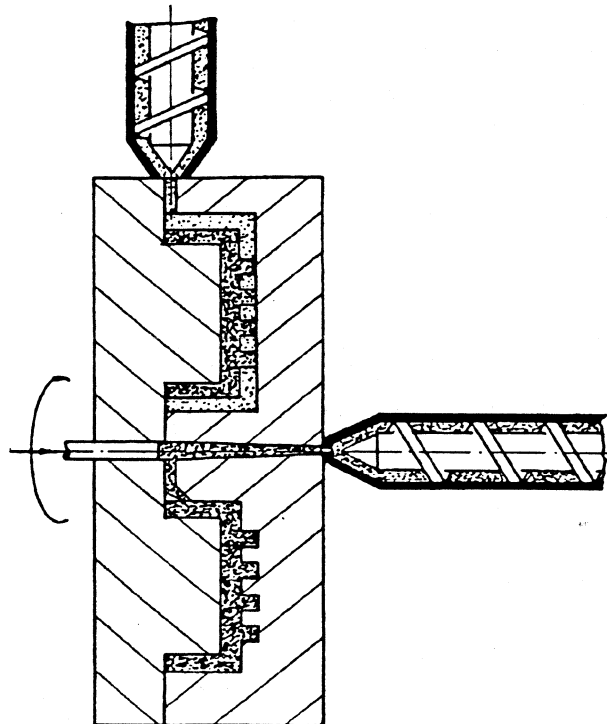
Figuur 4.17: Smitgietmatrijs met schuiven

4.5 PROCESVARIANTEN

Méercomponentenspuitgieten

De meest voorkomende variant van méercomponentenspuitgieten is het tweekleurenspuitgieten met één type materiaal. Het is ook mogelijk verschillende materialen te verwerken. De verschillende kunststoffen moeten goed aan elkaar hechten; als ze slecht hechten moet het ene materiaal het andere gedeeltelijk omhullen. Het méercomponentenspuitgieten wordt bijvoorbeeld toegepast voor het spuitgieten van toetsen met tekens en voor achterlichten van auto's.

De spuitgietmachine moet evenveel spuitgietcilinders hebben als het aantal componenten dat moeten worden gespoten. Een tweecomponentenmatrijs bestaat meestal uit een achtermatrijs en een voormatrijs met holten die in volume verschillen (figuur 4.18). Eerst wordt materiaal 1 in de matrijsholte gespoten. Na koelen en openlopen wordt het produkt niet uitgestoten. Men draait de achtermatrijs in dit geval over een hoek van 180° en de andere matrijsholte loopt dicht. De bovenste matrijsholte is groter dan de onderste en er is ruimte gekomen naast het in de eerste stap van materiaal 1 gespoten produkt. Deze ruimte wordt volgespoten met materiaal 2 en tegelijkertijd wordt de onderste holte gevuld met materiaal 1. Bij de volgende cyclus wordt het complete produkt uitgestoten.

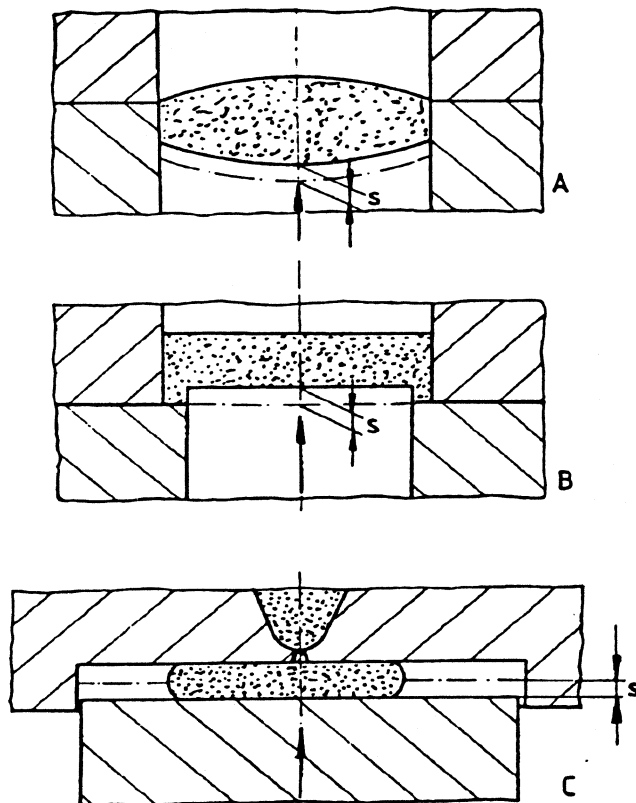


Figuur 4.18: Tweecomponentenspuitgieten

Spuitpersen

Bij het spuitpersen wordt eerst op de normale wijze de kunststof in de matrijs gespoten. Direct na het inspuiten echter wordt de matrijsholte verkleind en begint de perscyclus. De wand van een matrijsdeel wordt naar binnen gedrukt over een afstand S (figuur 4.19A en B). Vanwege deze extra processtap is een aangepaste besturingseenheid van de spuitgietmachine nodig.

Het spuitpersen wordt voornamelijk toegepast voor optische componenten met als doel de oppervlaktekwaliteit en de maatnauwkeurigheid te verbeteren. Deze verbeteringen zijn mogelijk doordat persen méér compensatie voor de krimp geeft dan het normale nadrukken door de spuiteenheid van de machine. Met spuitpersen is in het algemeen ook een hogere verhouding vloeiweg: wanddikte mogelijk dan met het normale spuitgieten.



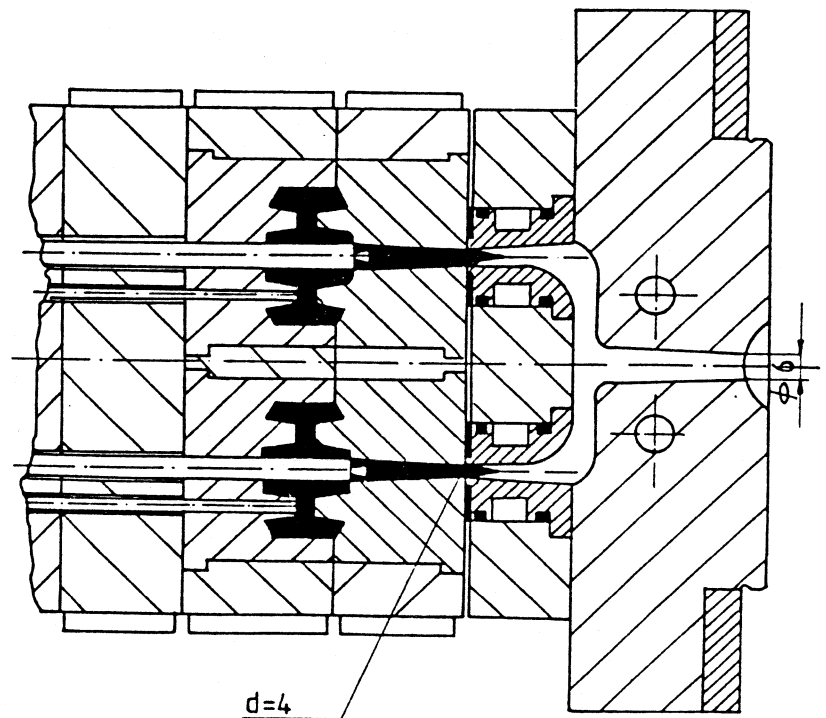
Figuur 4.19: Spuitpersen

Vormafwijkingen treden vaak op bij het normale spuitgieten van platte vlakken met dunne wanden. De vormverandering wordt veroorzaakt door inwendige spanningen tijdens het spuitgieten en het afkoelen. Bij deze vormveranderingen speelt de ingevroren oriëntatie van de molecuulketens een belangrijke rol. Bij het spuitgieten treedt molecuuloriëntatie op in de inspuifase en in de nadrukfase, vooral rondom de aanspuiting. Het spuitpersproces kan deze oriëntatie verminderen. In figuur 4.19C is de matrijs niet gesloten: de holte wordt niet geheel gevuld tijdens de inspuifase. De afschuifsnelheid aan het oppervlak is minder dan bij een produkt dat geheel gevuld wordt. De oriëntatie is hierdoor minder. Men laat nu de matrijs over de afstand S dichtlopen om het produkt zijn definitieve vorm te geven.

Spuitgieten van thermoharders

Bij de verwerking van thermohardende kunststoffen vindt de uithardingsreactie plaats in de matrix. Thermoharders kunnen worden verwerkt door persen, spuitpersen of spuitgieten. Het persen van thermoharders is een oude techniek die nog steeds wordt toegepast. Het principe van spuitpersen, bij thermoharders ook transferpersen genoemd, is hierboven besproken.

De moderne manier van verwerken van thermoharders is het spuitgieten. De machines zijn identiek aan die voor het spuitgieten van thermoplasten. Het belangrijkste verschil is de cilinder: deze wordt verwarmd tot ongeveer 100 °C. Tijdens het inspuiten wordt zoveel arbeid uitgeoefend dat de temperatuur van de grondstof oploopt tot boven 100 °C. De matrijskonstructie is ongeveer hetzelfde als voor thermoplasten. Voor thermoharders worden de matrijzen echter niet gekoeld maar verwarmd, tot 160 à 180 °C. Figuur 4.20 toont een spuitgietmatrijs voor thermoharders. Om materiaal te besparen en om centraal te kunnen aanspuiten is deze matrijs uitgevoerd als 'coldrunner'. In het aanspuitblok blijft de temperatuur beneden 100 °C. De uithardingsreactie begint pas vlak voor de produktholte(n).



Figuur 4.20: Semi-coldrunnematris voor spuitgieten van thermoharders

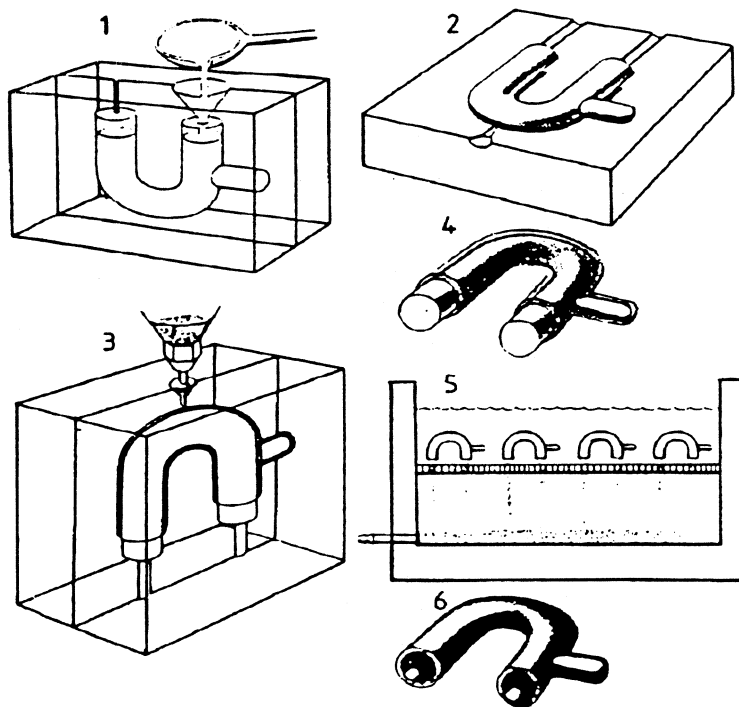
Smeltkernproces

Het idee achter het smeltkernproces is hetzelfde als voor het verloren-wasgieten. Met behulp van het smeltkernproces kunnen kunststofprodukten worden gespuitsgiet met holle ruimten die niet lossend zijn en die ook niet met bewegende matrijskernen kunnen worden gemaakt.

De kern die het inwendige van het produkt moet vormen wordt gemaakt van een tin-bismuthlegering. Dit materiaal heeft een laag smeltpunt of smelttraject, tussen 70 en 250°C. De matrijs voor de kern wordt gemaakt van een giethars of een siliconenrubber. Voor elk kunststofprodukt wordt een kern gegoten. De kern wordt bij iedere cyclus als een los inzetstuk in de matrijs geplaatst. De matrijskonstruktie moet zódanig zijn dat de kern voldoende wordt ondersteund tijdens het inspuiten van de kunststof. Na het spuitgieten smelt men de kern uit het produkt.

Het proces omvat de volgende stappen (zie figuur 4.21):

1. De kern wordt gegoten.
2. De kern wordt in de spuitgietmatrijs geplaatst.
3. De kunststof wordt in de spuitgietmatrijs gespoten.
4. Het produkt met kern wordt na voldoende afkoeling uitgestoten.
5. De kern wordt uitgesmolten in een water- of oliebad of door inductieve verwarming. De legering kan men weer opnieuw gebruiken.
6. Na het uitsmelten van de kern is het produkt gereed.



Figuur 4.21: Smeltkernproces

Outserttechniek (Hoechst)

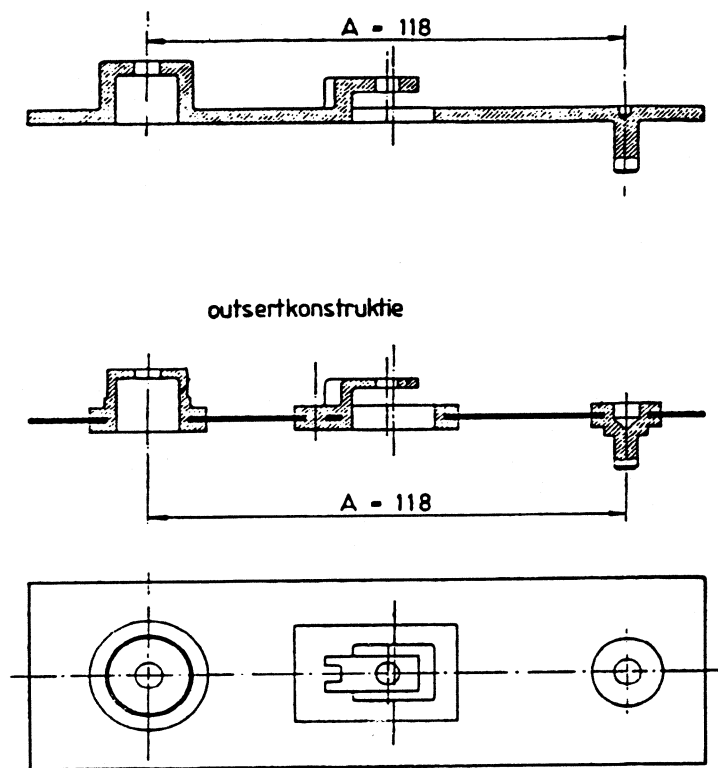
Bij de outserttechniek wordt tussen de beide matrijshelften een metalen plaat gelegd. De metalen plaat is van diverse gaten voorzien. Een deel van deze gaten dient voor het continu doorvoeren van de metalen plaat. De rest van de plaat dient voor het verankeren van de kunststofonderdelen. De matrijs is op diverse plaatsen van verschillende holten voorzien. De toegepaste kunststof in de outserttechniek is POM. Na de spuitgietyclus zitten de kunststof onderdelen vast aan de metalen plaat (figuur 4.22). In figuur 4.23 is de matrijsopbouw voor outserttechniek te zien.

Voordelen van outserttechniek:

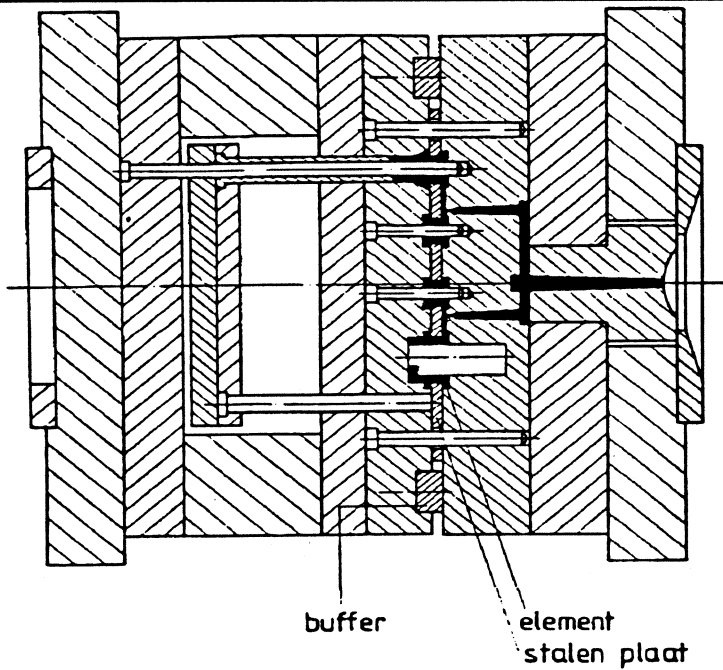
- Verschillende functie-elementen kunnen in één keer vast of beweegbaar op de metalen plaat worden gespuits. Dit is goedkoper dan het afzonderlijk monteren van de elementen op de plaat.
- De tolerantie op de afstandsmaten tussen de verschillende functie-elementen is bij de outserttechniek beter dan voor een kunststofprodukt. De maat A in figuur 4.22 bijvoorbeeld wordt bij outserttechniek bepaald door de vaste steekmaat in de matrijs. Bij een kunststofprodukt is de tolerantie slechter door de grote krimp.
- Een verandering van de omgevingstemperatuur veroorzaakt bij het outsertprodukt kleinere maatveranderingen dan bij een kunststofprodukt (de lineaire warmte-uitzettingcoëfficiënt van kunststoffen is immers ongeveer het tienvoudige van die van metalen).
- De kunststof producten kunnen ook op voorgestampte metalen band gespoten worden (figuur 4.24). Na elke spuitgietyclus trekt men de band verder door de matrijs. Na het spuitgieten wordt de band toegevoerd aan een montagemachine. Tijdens of na de montage wordt het metalen deel met outserts geheel uit de band gestampt. Het voordeel van deze techniek is dat de produkten in de juiste stand en op de juiste steek worden aangevoerd.

Nadeel van outserttechniek:

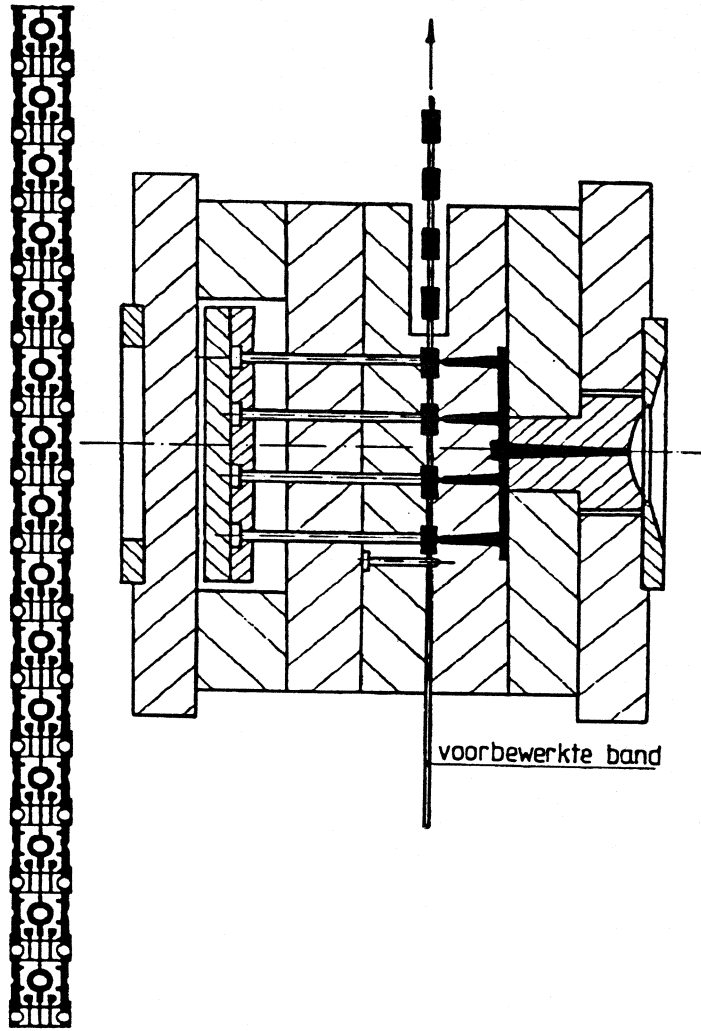
- Een groot nadeel van outserttechniek is de slechte scheidbaarheid van de materialen na afdanken van de produkten.



Figuur 4.22: Outsertkonstrukties



Figuur 4.23: Matrijs voor outserttechniek

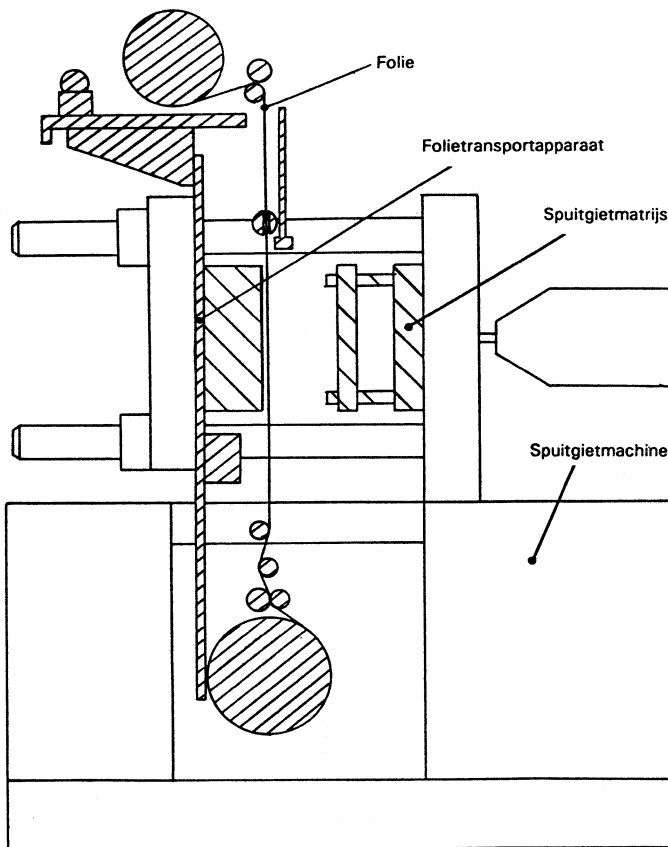


Figuur 4.24: Outserttechniek op voorgestampte metalen band

Decoreren

Het oppervlak van spuitgietprodukten moet soms worden gedecoreerd. Er kan bijvoorbeeld een metaal-, houtnerf- of natuursteeneffect vereist zijn of er moet een bedrukking of codering worden aangebracht. Er zijn diverse processen om dit te realiseren. Foliebedrukken kan men achteraf in een tweede produktiestap doen; het kan ook tijdens het spuitgieten gebeuren.

Bij in-mould decoration (figuur 4.25) wordt een folie door de matrijs gevoerd. Tijdens het inspuiten van de kunststof in de matrijs komt de decoratie los van de polyesterdrager en hecht zich aan het oppervlak van het produkt. Op de spuitgietmachine bevindt zich een doorvoerapparaat voor het transporteren van de folie. Gedurende het transport mag de folie niet tegen de matrijs komen om beschadiging van de folie te voorkomen. De aanspuiting moet tegenover de folie zitten, zodat tijdens het inspuiten de folie tegen de matrijswand wordt gedrukt.

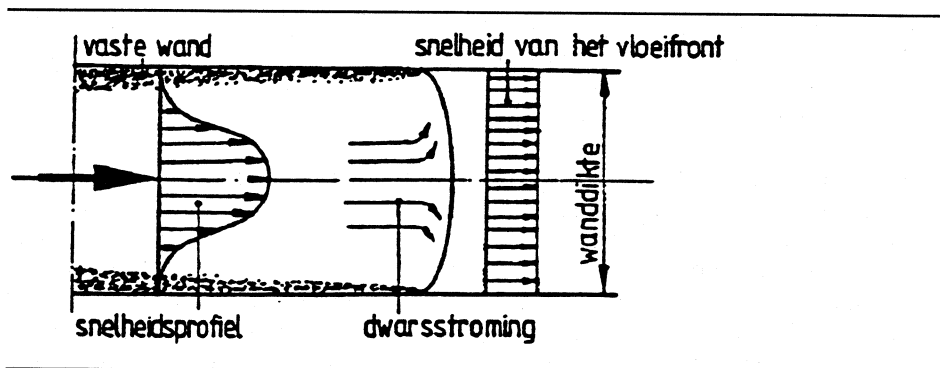


Figuur 4.25: In-mould decorating

4.6 FYSISCHE GRONDSLAGEN

De eigenschappen van een kunststofproduct worden in belangrijke mate bepaald door de vorm van het produkt en de materiaaleigenschappen. De materiaaleigenschappen zijn echter géén constanten maar worden op hun beurt sterk beïnvloed door de materiaalstructuur die door het vervaardigingsproces is gevormd. Belangrijke structuurkenmerken zijn moleculaire oriëntatie en - voor deeltkristallijne materialen - kristallisatie. Verder wordt een belangrijke invloed op de eigenschappen van het eindprodukt uitgeoefend door inwendige spanningen: deze hangen af van de materiaalstructuur, het afkoelgedrag in de matrijs en de vorm van het produkt.

Moleculaire oriëntatie die ontstaat door de verwerking wordt door afkoelen van het produkt ingevroren. Bij kunststofverwerking en met name bij spuitgieten ontstaan verschillen in moleculaire oriëntatie door verschillen in stroomsnelheid van de kunststof over de wanddikte van het produkt. Aan de gekoelde matrijs wanden stolt het produkt direct en is er bijna géén oriëntatie. De volgende zone is een gebied met grote snelheidsverschillen en daardoor een hoge oriëntatiegraad (figuur 4.26). De krimp in de oriëntatierichting is hoger dan de krimp loodrecht op deze richting. Hierdoor ontstaan extra krimpspanningen en vormafwijkingen. De oriëntatie in de stromingsrichting is het sterkst bij de aanspuiting en neemt af langs de vloeiweg.



Figuur 4.26: Stromingspatroon in een spuitgietmatrijs

Bij deeltkristallijne kunststoffen heeft kristallisatie tijdens afkoelen grote invloed op de structuur die wordt gevormd. Belangrijke factoren zijn de kristallisatiesnelheid van het materiaal en de afkoelsnelheid in een temperatuurgebied van enkele graden tot enkele tientallen graden beneden de stoltemperatuur. De kristallisatiesnelheid is bijvoorbeeld extreem hoog voor PE en laag voor PET. Een hoge afkoelsnelheid kan bij langzaam kristalliserende materialen de kristallisatie sterk verminderen en soms zelfs geheel onderdrukken. De kristallijne structuurbestanddelen hebben andere eigenschappen dan de amorf. Kristallijne structuren worden ondermeer gekenmerkt door een hogere dichtheid, hogere sterkte, lagere taaiheid en minder kruipgevoeligheid.

Hierna komen de volgende onderwerpen aan de orde:

- invloed spuitgietvariabelen;
- compressibiliteit;
- stroming;
- warmte-overdracht;
- invloed viscositeitskarakteristiek van het materiaal.

Voor de onderdelen stroming en warmte-overdracht wordt voortgebouwd op hetgeen over deze onderwerpen is behandeld in het college *Technische Fysica*.

Invloed spuitgietsvariabelen

Belangrijke procesvariabelen van het spuitgietsen zijn:

- de smelttemperatuur;
- de matrijstemperatuur;
- de vultijd;
- de nadruk.

Met smelttemperatuur wordt bedoeld de gemiddelde temperatuur van de kunststofsmelt die uit de spuitneus komt. De smelttemperatuur wordt beïnvloed door de verwarmingselementen in de schroefcilinder, het schroeftoerental en het drukverloop tijdens het plastificeren. Een hogere smelttemperatuur geeft een grotere krimp van het materiaal in het eindproduct en een minder sterke moleculaire oriëntatie in de stromingsrichting. De verminderde oriëntatie leidt tot een hogere slagsterkte loodrecht op de stromingsrichting en een lagere slagsterkte evenwijdig aan de stromingsrichting.

Met matrijstemperatuur wordt bedoeld de gemiddelde wandtemperatuur van de matrijsholte. Deze temperatuur verschilt van de thermostaattemperatuur die men instelt voor de koelvloeistof. Een hogere matrijstemperatuur geeft een dunnere ingevroren materiaallaag aan het begin van de matrijsvulling en minder moleculaire oriëntatie. De koeltijd van het proces neemt echter sterk toe met hogere matrijstemperatuur. Een hogere matrijstemperatuur veroorzaakt ook een grotere krimp na uitstoten en vergroot daarmee de kans op kromtrekken en krimpspanningen.

De vultijd van de matrijs wordt bepaald door de inspuitnelheid. Hoe hoger de inspuitnelheid, des te dunner de ingevroren laag aan de matrijswand. Een hogere inspuitnelheid geeft vaak een sterkere moleculaire oriëntatie vlak onder de ingevroren lagen. Er is echter ook een tegengesteld effect. Bij hogere inspuitnelheid is er méér visceuze wrijving en dus extra opwarming in het materiaal. De extra warmte houdt het materiaal langer op een hogere temperatuur. Hierdoor kan de moleculaire oriëntatie méér relaxeren alvorens te worden ingevroren. Dit laatste effect kan voor diverse materialen domineren.

De vultijd beïnvloedt ook de benodigde vuldruk. Bij korte vultijden neemt de vuldruk toe met de inspuitnelheid. Bij lange vultijden neemt de vuldruk echter toe met afnemende inspuitnelheid omdat door de dikkere ingevroren laag aan de wand de resterende vloeibare laag dunner is en een hogere stromingsweerstand heeft.

De nadruk is meestal lager dan de inspuitdruk. Bij grote en/of dikwandige produkten moet de nadruk soms hoger zijn dan de inspuitdruk opdat de krimp aanvaardbaar blijft. Door de lagere temperaturen tijdens het nadrukken kan er méér afschuifvorming van het materiaal plaatsvinden dan tijdens het inspuiten. Verhoging van de nadruk geeft dan ook hogere ingevroren spanningen in het produkt. Een ander effect van nadruk is ingevroren moleculaire oriëntatie in de binnenste lagen in het produkt.

De aanspuiting moet zó zijn gedimensioneerd dat de aanspuitopening bijtijds dichtvriest: dit is van economisch belang vanwege de cyclustijd maar ook om inwendige spanningen te minimaliseren. Te hoge en vooral te lang aangehouden nadruk kan namelijk leiden tot te grote temperatuurverschillen in het afkoelende produkt. Dit komt doordat er via de aanspuiting extra warm materiaal wordt toegevoerd terwijl stroomafwaarts in het produkt de koelere gestolde laag steeds dikker wordt. Grotere temperatuurverschillen in het afkoelende produkt verhogen uiteraard de ingevroren spanningen.

Compressibiliteit

De compressibiliteit van kunststoffen heeft een grote invloed op het krimpgedrag tijdens het vervaardigingsproces en op de resulterende produkteigenschappen. Het effect van compressie bij spuitgieten is het grootst in de nadrukfase. Weliswaar wordt tijdens de inspuifase meestal de hoogste druk uitgeoefend door de machine; de drukval over de aanspuiting is echter groot en ook in de matrijsholte neemt stroomafwaarts de druk sterk af. Bij het nadrukken is daarentegen de matrijs geheel gevuld en de krachten ten gevolge van de vulduk worden geheel opgenomen door het nog vloeibare materiaal in de holte. In de volgende voorbeelden wordt ter vereenvoudiging gewerkt met de gemiddelden van temperatuur en druk in het afkoelende produkt.

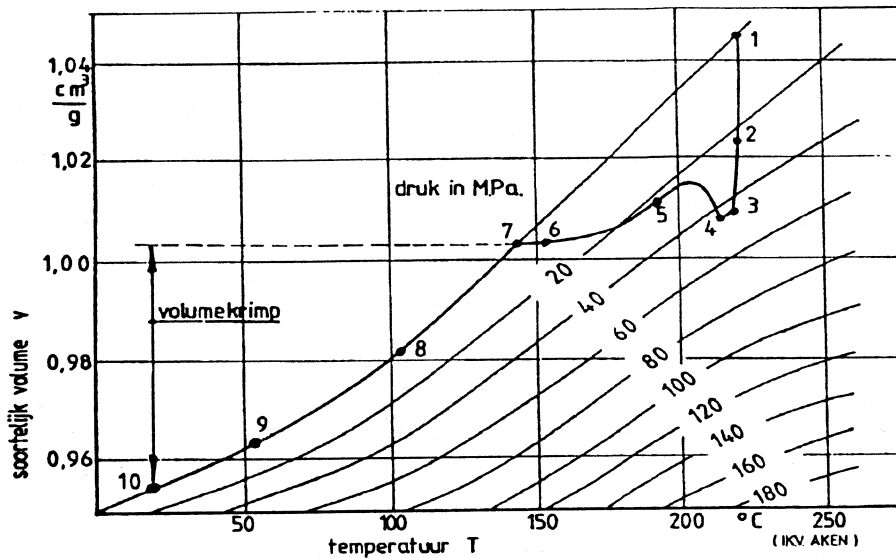
De compressie van een thermoplastische kunststof tijdens het spuitgieten kan men weergeven in een toestandsdiagram of p v T -diagram (figuur 4.27). In dit diagram is het soortelijk volume v van een kunststof weergegeven als functie van de temperatuur T met als parameter de druk p . Het soortelijk volume is de inverse van de soortelijke massa. De druk en de temperatuur in een matrijsholte gedurende de cyclustijd zijn weergegeven in figuur 4.28. Het verloop van de gebeurtenissen in de matrijs kan worden beschreven met de punten 1 tot en met 9 in de figuren 4.27 en 4.28.

- punt 1: smelt bereikt drukopnemer in de matrijs;
- punt 2: matrijs is volumetrisch gevuld; druk neemt nog toe;
- punt 3: maximale druk wordt bereikt en gehandhaafd;
- punt 4: machine schakelt over op nadruk (lager dan inspuifdruk); een geringe hoeveelheid kunststof loopt terug uit de matrijsholte (te zien aan de waarde van v : deze neemt aanvankelijk toe bij gelijk volume);
- punt 5: nadrukniveau is bereikt; v neemt af door de nadruk omdat bij gelijkblijvend volume de massa toeneemt;
- punt 6: aanspuitopening vriest dicht; v blijft constant totdat de druk in de matrijs de atmosferische druk bereikt;
- punt 7: atmosferische druk in matrijs bereikt; v begint af te nemen;
- punt 8: voortgaande koeling in matrijs; produkt krimpt op steeds meer plaatsen los van de wand (minder effectieve koeling);
- punt 9: produkt is voldoende vormvast en wordt uit de matrijs gestoten

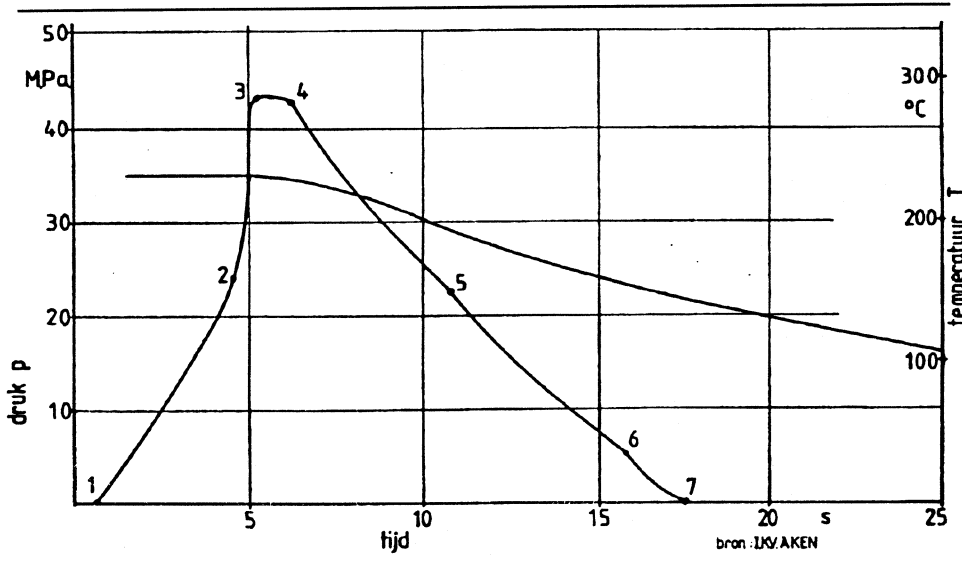
Bij punt 10 is het produkt volledig afgekoeld. Het verschil tussen punt 7 en punt 10 in figuur 4.27 geeft de totale volumekrimp van het produkt weer. Naarmate punt 7 lager ligt, dus bij een hogere inspuifdruk en/of nadruk, neemt de krimp af. Bij een lagere inspuifdruk, lagere nadruk en/of als de aanspuiting eerder dichtvriest neemt de krimp toe. Toename van de krimp leidt tot slechtere maatnauwkeurigheid een minder fraai oppervlak.

~~Een ander voorbeeld van een p v T -diagram is gegeven in figuur 4.29. In dit geval betreft het een deukristallijne kunststof. In vergelijking met figuur 4.27 vertoont figuur 4.29 een extra overgangsgebied ongeveer tussen 100 °C en 130 °C (drukafhankelijk!). In dit gebied treedt ~~kristallisatie~~ op bij afkoelen. De kristallisatie gaat zoals te zien gepaard met extra krimp.~~

Aan de hand van het p v T -diagram in figuur 4.29 wordt nu een schatting gemaakt van de krimp en het effect van nadruk. Een dikwandig produkt wordt gespuifgiet uit een HDPE. De temperatuur van de plastificeercilinder is 250 °C. Op het moment dat op nadruk wordt overgeschakeld is de gemiddelde temperatuur van het produkt 245 °C en de gemiddelde druk in de matrijsholte 30 MPa. De nadruk wordt zó ingesteld dat in de matrijsholte een maximale druk van 60 MPa wordt bereikt op het moment dat het produkt is afgekoeld tot gemiddeld 210 °C. De aanspuiting vriest dicht bij 130 °C; de druk in de matrijsholte is dan nog 30 MPa.



Figuur 4.27: pvT-diagram van een PS



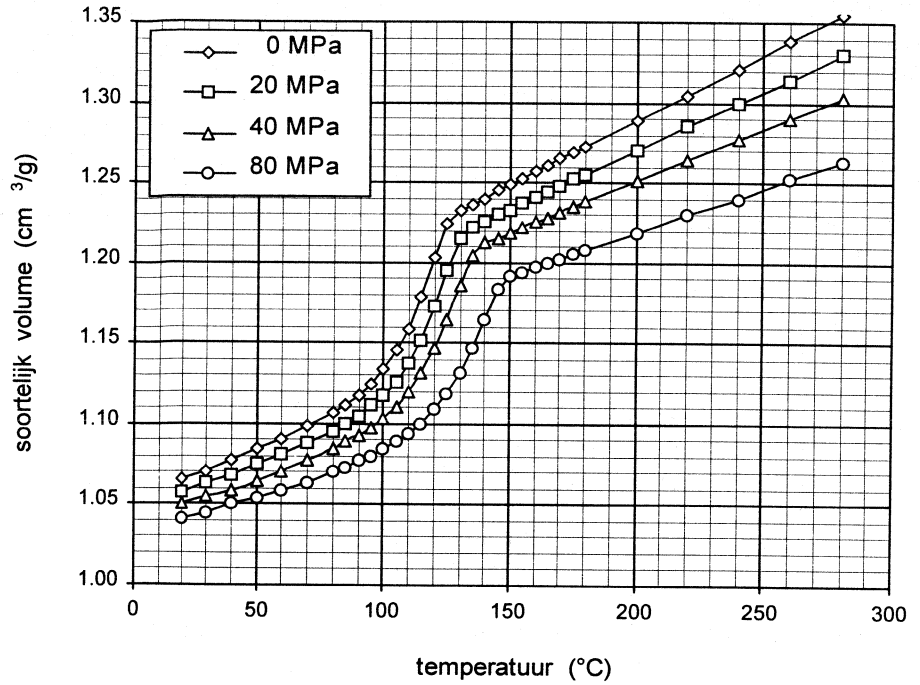
Figuur 4.28: Verloop van druk en temperatuur in een spuitgietmatrijs

De volgende punten liggen dan vast (figuur 4.30):

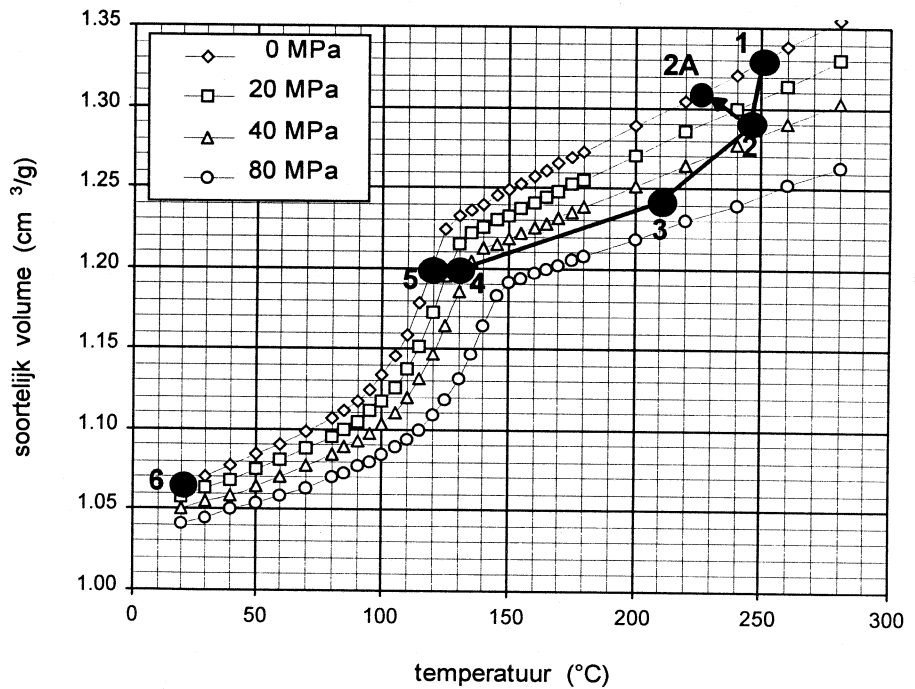
- | | | | |
|---|---|--|---|
| 1 | begin inspuiten: | $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$; | $p = 0 \text{ MPa}$ |
| 2 | begin nadrukken: | $T = 245 \text{ }^\circ\text{C}$; | $p = 30 \text{ MPa}$ |
| 3 | maximale druk: | $T = 210 \text{ }^\circ\text{C}$; | $p = 60 \text{ MPa}$ |
| 4 | einde nadruk: | $T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ en | $p = 30 \text{ MPa} \Rightarrow v \approx 1,2 \text{ cm}^3/\text{g}$ |
| 5 | druk gelijk aan nul en v blijft $\approx 1,2 \text{ cm}^3/\text{g}$ | $\Rightarrow T \approx 118 \text{ }^\circ\text{C}$ | |
| 6 | afkoeling voltooid: | $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ en | $p = 0 \text{ MPa} \Rightarrow v \approx 1,065 \text{ cm}^3/\text{g}$. |

De volumekrimp, te berekenen vanaf het moment dat de aanspuiting dichtvriest (einde nadruk), bedraagt ongeveer $\frac{1,2 - 1,065}{1,2} \times 100 \% \approx 11,3 \%$.

Stel dat men géén nadruk zou toepassen. In dat geval zou vanaf punt 2 de druk in de matrijsholte enigszins afnemen terwijl het product enigszins zou afkoelen: dit is in figuur 4.30 aangegeven met de pijl van punt 2 naar punt 2A.



Figuur 4.29: pvT-diagram van een HDPE



Figuur 4.30: Koeltraject aangegeven in het pvT-diagram van Figuur 4.29

Het soortelijk volume neemt vervolgens af van ongeveer 1,31 cm³/g (punt 2A) tot 1,065 cm³/g. De volumekrimp is dan $\frac{1,31 - 1,065}{1,31} \times 100 \% \approx 18,7 \%$. Hierbij is géén rekening gehouden met terugstroom van materiaal uit de matrijs.

Stroming

Vanwege de hoge viscositeiten van thermoplastische kunststofsmelt zijn hoge drukken vereist tijdens het vullen en nadrukken van materiaal in een spuitgietmatrijs. De stroming van thermoplastische smelt bij het spuitgieten is dan ook drukgestuurd. De opbrengst (volumestroom) van een drukstroming is in het college *Technische Fysica* afgeleid voor niet-compressibele vloeistoffen. Deze volumestroom bedraagt voor een kanaal met spleetvormige rechthoekige doorsnede:

$$\Phi_V = \frac{B \cdot H^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{-\Delta p}{L} \quad (1)$$

waarin Φ_V = volumestroom [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
B = breedte van het kanaal [m]
H = hoogte (wanddikte) van het kanaal [m]
 η = viscositeit van de vloeistof [Pa·s]
 $-\Delta p$ = drukval over de vloeiweg [Pa]
L = lengte (vloeiweg) van het kanaal [m]

Voor een kanaal met cirkelvormige doorsnede is de volumestroom:

$$\Phi_V = \frac{R^4}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{-\Delta p}{L} \quad (2)$$

waarin R = straal van de kanaaldoorsnede [m]

De formules (1) en (2) gelden voor de situatie dat L aanmerkelijk groter is dan B of R. Verder is verondersteld dat B aanmerkelijk groter is dan H. De drukgradiënt over de vloeiweg is lineair verondersteld en wordt gevonden door de drukval ($-\Delta p$) over de vloeiweg te delen door de lengte (L) van de vloeiweg. Merk op dat Δp een negatief getal is omdat de druk stroomafwaarts afneemt.

De doorsnede van het kanaal heeft een grote invloed op de volumestroom en dus op de stromingsweerstand. Beschouw bijvoorbeeld een vlakke strip met wanddikte (H) 3 mm, breedte (B) 20 mm en lengte (L) 100 mm. Stel dat de viscositeit (η) gemiddeld 10^4 Pa·s bedraagt. Indien men de matrijsholte in 1 s wil vullen, volgt uit formule (1):

$$\frac{100 \times 20 \times 3}{1} = \frac{20 \times 3^3}{12 \times 10^4} \times \frac{-\Delta p}{100} \Rightarrow -\Delta p = 133 \times 10^6 \text{ Pa}$$

De spuitgietmachine moet volgens deze berekening voor de ingang van de matrijs een druk opbrengen van 133 MPa (1330 bar). Verkleint men nu de wanddikte (H) tot 2 mm, dan vindt men dat 300 MPa nodig is om de matrijs in 1 s te vullen (reken dit na!). Zou men bij een wanddikte van 2 mm de druk van 133 MPa toepassen dan wordt de matrijs in 2,25 s gevuld (reken dit na!).

Wanneer het drukverloop in de matrijs bekend is, kan men ook de benodigde sluitkracht schatten die door de spuitgietmachine moet worden opgebracht. In bovenstaand voorbeeld van de 2 mm dikke strip die in 1 s wordt gevuld verloopt de druk in de matrijs van 300 MPa aan het begin van de vloeiweg (ingang matrijs) tot nul aan het einde van de vloeiweg. Omdat de drukgradiënt lineair is verondersteld, is de gemiddelde druk in de matrijs dus $\frac{1}{2} \times 300 \text{ MPa} = 150 \text{ MPa}$. In de richting van de sluitkracht op de matrijshelften wordt deze gemiddelde druk van 150 MPa uitgeoefend op een oppervlakte van 100 mm x 20 mm (0,1 m x 0,02 m). De minimaal vereiste sluitkracht tijdens het vullen is dus $150 \times 10^6 \times 0,1 \times 0,02 \text{ N} = 300 \text{ kN}$ (ongeveer 30 ton).

Stel nu dat in ditzelfde voorbeeld 200 MPa nadruk wordt toegepast. Zolang het grootste deel van het materiaal in de matrijsholte nog vloeibaar is, mag worden verondersteld dat de druk van 200 MPa heerst in de gehele holte (compressibiliteit wordt verwaarloosd). De minimaal vereiste sluitkracht tijdens het nadrukken is dan $200 \times 10^6 \times 0,1 \times 0,02 \text{ N} = 400 \text{ kN}$ (ongeveer 40 ton). In de praktijk zou men voor deze situatie waarschijnlijk een 50-tons spuitgietmachine kiezen. Een vuistregel is namelijk dat de maximale sluitkracht van de machine ongeveer 20% hoger moet zijn dan de minimaal vereiste kracht. Met deze veiligheidsmarge kan men voorkómen dat er vliesvorming optreedt op de deelnaad van het produkt ten gevolge van smelt tussen de matrijسدelen.

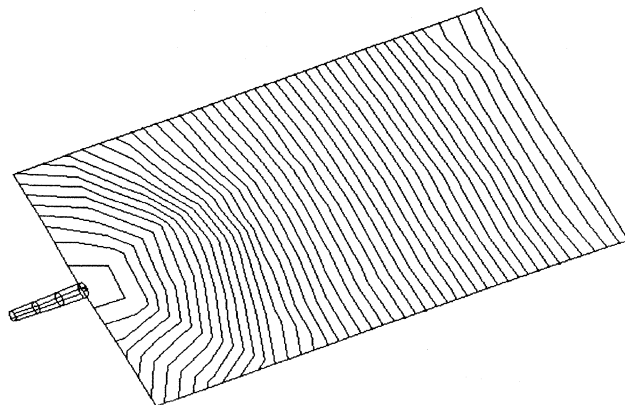
Hoewel in het zojuist besproken voorbeeld de door de machine geleverde nadruk lager is dan de geleverde inspuitedruk, is de vereiste sluitkracht het hoogst tijdens het nadrukken. Dit is typisch voor de meeste spuitgietprocessen voor thermoplastische kunststof.

De formules op bladzijde 4.28 zijn bruikbaar om de vulfase van een spuitgietproces globaal door te rekenen, bijvoorbeeld in een vroeg stadium van het ontwerp van een produkt. Bij de interpretatie van resultaten moet men echter bedenken dat er vereenvoudigingen zijn gemaakt:

- de lengte van de vloeiweg is niet geheel nauwkeurig geschat;
- de drukgradiënt over de vloeiweg is niet altijd lineair;
- de gestolde laag aan de matrijswand is verwaarloosd;
- de smelt is niet-compressibel beschouwd;
- de viscositeit van de smelt is constant genomen;
- de aanwezigheid van een aanspuiting is verwaarloosd.

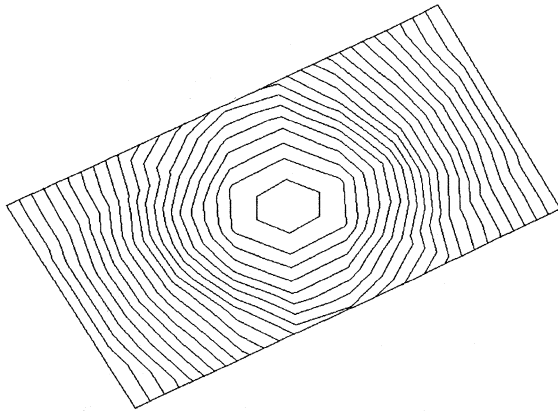
Deze vereenvoudigingen zullen nu worden toegelicht.

De lengte van de vloeiweg kan realistisch worden geschat wanneer men het stromingspatroon kent. In de voorbeelden op bladzijde 4.28 zou de maximale vloeiweg méér dan 100 mm bedragen indien aan de zijkant wordt aangespoten. Voor een dergelijke situatie is in figuur 4.31 het verloop van het stromingsfront weergegeven zoals bepaald met numerieke simulatie van de matrijsvulling. De vloeiwegen staan uiteraard loodrecht op de lijnen van het stromingsfront. Uit het vulbeeld is af te leiden dat er vooral aan de randen vloeiwegen zullen zijn die langer zijn dan de lengte van de strip. In dit geval is de afwijking gering; bij complexe geometrieën moet men de maximale vloeiweg zorgvuldiger schatten.



Figuur 4.31: Vulbeeld voor zijdelings aangespoten strip

Men kan de maximale vloeiweg verkorten door aan weerszijden aan te spuiten: dit heeft als nadeel dat er een vloeinaad wordt gevormd. Een andere mogelijkheid is centraal aanspuiten (figuur 4.32). Centraal aanspuiten zoals in figuur 4.32 getoond leidt onvermijdelijk tot kromtrekken van het produkt na koelen vanwege het verloop van moleculaire oriëntatie langs de vloeiwegen. Zidelings aanspuiten zoals in figuur 4.31 geeft in een groot deel van de strip een bijna evenwijdig stromingsfront en daardoor minder problemen met kromtrekken. Men moet echter bij de optimalisatie aandacht besteden aan het gebied rondom de aanspuiting: hier is het stromingsfront niet evenwijdig en is bovendien de moleculaire oriëntatie in de stromingsrichting het hoogst.



Figuur 4.32: Vulbeeld voor centraal aangespoten strip (aanspuiting niet getoond)

De tweede vereenvoudiging in de voorbeelden op bladzijde 4.28 is de aanname van een lineaire drukgradiënt. Dit is een goede benadering bij eenvoudige produktvormen met géén of geringe wanddikteverschillen. In geval van grote verschillen in wanddikten en lengten van de vloeiwegen in het produkt zal de stromingsweerstand en daardoor de drukgradiënt tijdens vullen en nadrukken van plaats tot plaats verschillen. Er is dan kans op verschillen in moleculaire oriëntatie en ongelijkmatige krimp. De keuze en dimensionering van het aanspuitsysteem is in zo'n situatie van groot belang voor de optimalisatie van de produktkwaliteit.

De derde vereenvoudiging in de voorbeelden op bladzijde 4.28 is het verwaarlozen van de gestolde laag aan de matrijswand tijdens het vullen van de matrijs. Uit formule (1) is af te leiden dat de invloed van de wanddikte (H) op de stromingsweerstand aanzienlijk is. Men streeft in de praktijk naar een snelle vulling van de matrijs zodat de gestolde laag dun zal zijn.

Als vierde vereenvoudiging is in de voorbeelden op bladzijde 4.28 de smelt als niet-compressibel beschouwd. Zoals hiervóór besproken is de invloed van compressibiliteit vooral van belang voor de nadrukfase.

De viscositeit van de smelt is in de voorbeelden op bladzijde 4.28 constant genomen. In werkelijkheid is de viscositeit van een thermoplastische smelt boven een bepaalde afschuifsnelheid sterk afhankelijk van de afschuifsnelheid in het materiaal. Dit is reeds besproken in het hoofdstuk 'Kunststofkrat' in het dictaat *ide140 Konstruktieleer 1*. De afschuifsnelheden tijdens het vullen van een spuitgietmatrijs verschillen sterk van plaats tot plaats en vooral over de dikte. Bij de bespreking van de invloed van de viscositeitskarakteristiek wordt hierop verder ingegaan.

In de voorbeelden op bladzijde 4.28 is tenslotte géén rekening gehouden met de aanwezigheid van een aanspuiting. Aanspuitingen hebben vrijwel altijd een aanzienlijk hogere stromingsweerstand dan de matrijsholte. De drukval is het grootst in de aanspuiting. Dit resulteert in grote snelheidsverschillen over de dikte. De maximale afschuifsnelheden kunnen daardoor in de aanspuiting één tot twee grootte-orden hoger zijn dan in de matrijsholte. De hoge afschuifsnelheden veroorzaken een aanzienlijke verlaging van de viscositeit van enkele grootte-orden. Aan deze lagere viscositeiten is het te danken dat met spuitgieten van kunststoffen fijne vormdetails kunnen worden gerealiseerd.

Warmte-overdracht

De energie die in een matrijsholte wordt gebracht door de verwarmde en gesmolten kunststof moet uit economische overwegingen zo snel mogelijk worden afgevoerd. Naast een minimale koeltijd is vooral een gelijkmatige temperatuurverdeling over het afkoelende produkt gewenst. Met gelijkmatige koeling wordt bereikt dat vormafwijkingen en inwendige spanningen in het eindprodukt minimaal zijn. Met name voor vormholten met ingewikkelde geometrieën, wanddikteverschillen of materiaalophopingen is de plaatsing van de koelkanalen in de matrijs een kritieke kwaliteitsbepalende factor.

Om te rekenen aan de warmtehuishouding tijdens een proces moet men alle warmtestromen in een energiebalans opnemen. Voor het spuitgieten van thermoplastische kunststoffen zijn de volgende drie warmtestromen het meest significant:

- warmtetransport door convectie ten gevolge van de stromende warme smelt, met name in de stromingsrichting;
- opwarming van het materiaal door inwendige visceuze wrijving (dissipatie), op plaatsen waar hoge afschuifsnelheden optreden;
- afkoeling door warmtegeleiding ten gevolge van de gekoelde matrijswanden, met name in de dikterichting.

Stelt men met deze drie warmtestromen een volledige energiebalans op, dan is deze niet analytisch op te lossen. Men moet dan iteratieve berekeningen uitvoeren. Voor bepaalde situaties zijn echter vereenvoudigingen verantwoord. Zo wordt voor het handmatig rekenen aan de afkoeling de dissipatie verwaarloosd omdat hoge afschuifsnelheden vaak slechts in een klein deel van het produkt optreden. Overigens moet men bedenken dat dissipatie van groot belang is voor de produktkwaliteit vanwege plaatselijk hoge moleculaire oriëntatie of juist méér relaxatie van de oriëntatie, en eventueel thermische degradatie.

De combinatie van convectie en warmtegeleiding in de energiebalans geeft een zogenaamd niet-stationair warmteprobleem, zoals besproken in het college *Technische Fysica*. In termen van praktische materiaal- en procesparameters vindt men voor de koeltijd:

$$t_k = \frac{H^2}{\pi^2 \cdot a} \cdot \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{T_c - T_{m,gem}}{T_u - T_{m,gem}} \right) \quad (3)$$

waarin H = wanddikte [m]
a = temperatuurvereffeningscoëfficiënt [$m^2 \cdot s^{-1}$]
 T_c = temperatuur plastificeercilinder [°C]
 $T_{m,gem}$ = gemiddelde temperatuur matrijswand [°C]
 T_u = uitstoottemperatuur van het produkt [°C]

De temperatuurvereffeningscoëfficiënt a hangt af van thermische materiaaleigenschappen:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4)$$

waarin λ = warmtegeleidingscoëfficiënt van de kunststof [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 ρ = soortelijke massa van de kunststof [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 c = soortelijke warmte van de kunststof [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Deze materiaaleigenschappen zijn géén constanten maar variëren ondermeer met de temperatuur. In handmatige berekeningen kan worden gewerkt met gemiddelde waarden, mits men het temperatuurverloop van het proces realistisch inschat.

Economisch belangrijk is de hoogst mogelijke temperatuur waarbij het produkt kan worden uitgestoten. Deze uitstoottemperatuur hangt ondermeer af van het type kunststof. De produktgeometrie bepaalt mede de uitstoottemperatuur: produkten met wanddikten vanaf ongeveer 2 mm kunnen worden uitgestoten zodra een voldoende dikke afgekoelde laag aan de buitenzijde aanwezig is waarop kan worden uitgedrukt. In plaats van de maximale temperatuur van de kunststof tijdens uitstoten, T_u in vergelijking (3), kan dan de gemiddelde temperatuur $T_{u,gem}$ over de wanddikte van het produkt worden gebruikt.

Voor het bepalen van $T_{u,gem}$ wordt uitgegaan van een sinusvormig temperatuurprofiel zoals in figuur 4.33 aangegeven. Het sinusvormig temperatuurprofiel is af te leiden uit de energiebalans waarin, zoals vermeld, dissipatie verwaarloosd is. De minimumtemperaturen aan de matrijswanden in figuur 4.33 bedragen $T_{m,gem}$. De maximumtemperatuur in het midden komt overeen met T_u in vergelijking (3). Voor het sinusvormig profiel wordt de gemiddelde temperatuur $T_{u,gem}$ van de produktwand op het moment van uitstoten gegeven door

$T_u - T_{m,gem} = \frac{1}{2}\pi \cdot (T_{u,gem} - T_{m,gem})$. Hiermee is (3) te schrijven als:

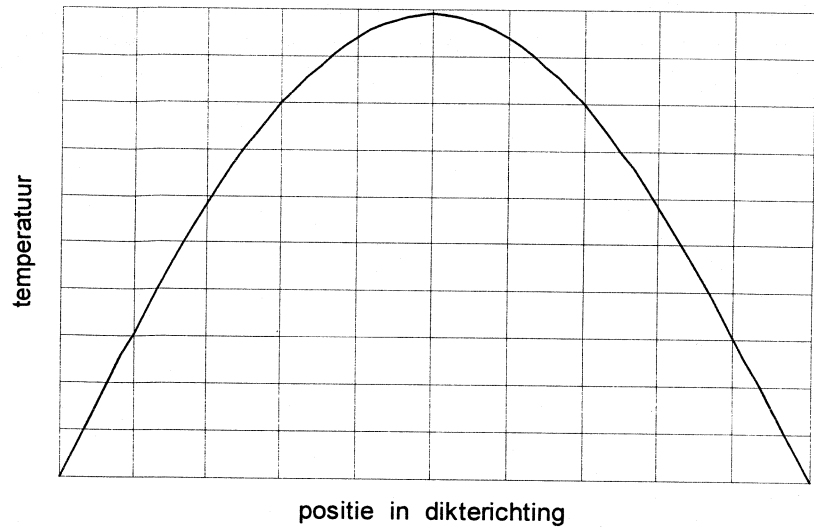
$$t_k = \frac{H^2}{\pi^2 \cdot a} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_c - T_{m,gem}}{T_{u,gem} - T_{m,gem}} \right) \quad (5)$$

In vergelijking met (3) berekent men met (5) onder gebruikelijke omstandigheden een 20 à 40 % kortere koeltijd. Dit is geïllustreerd in figuur 4.34 voor een wanddikte van 3 mm en $a = 0,13 \text{ mm}^2/\text{s}$.

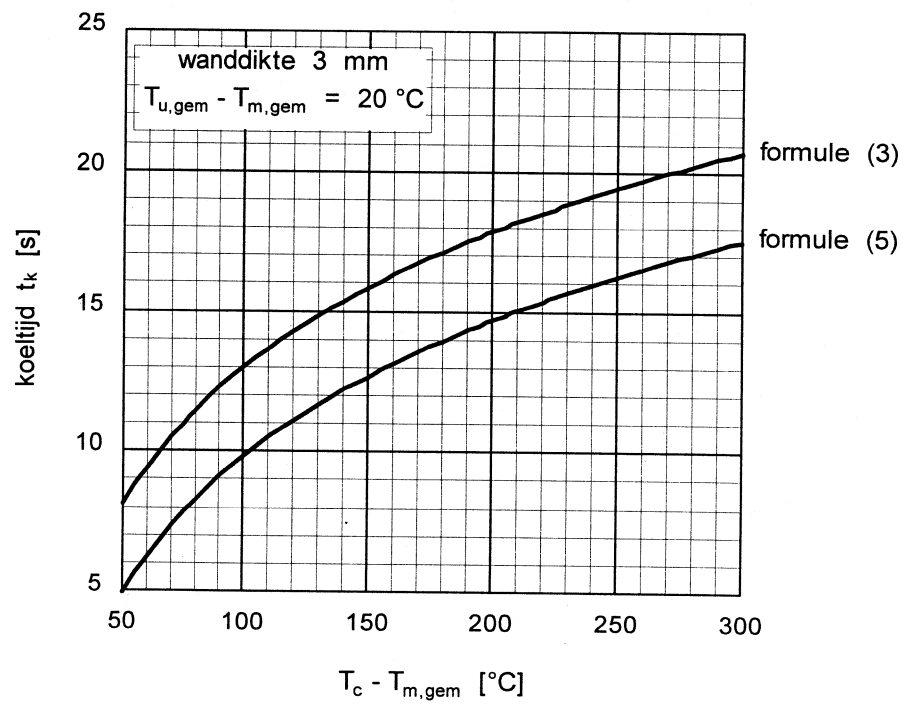
Figuur 4.35 toont de invloed van $T_c - T_{m,gem}$ voor verschillende waarden van $T_{u,gem} - T_{m,gem}$.

Figuur 4.36 toont de invloed van $T_{u,gem} - T_{m,gem}$ voor verschillende waarden van $T_c - T_{m,gem}$.

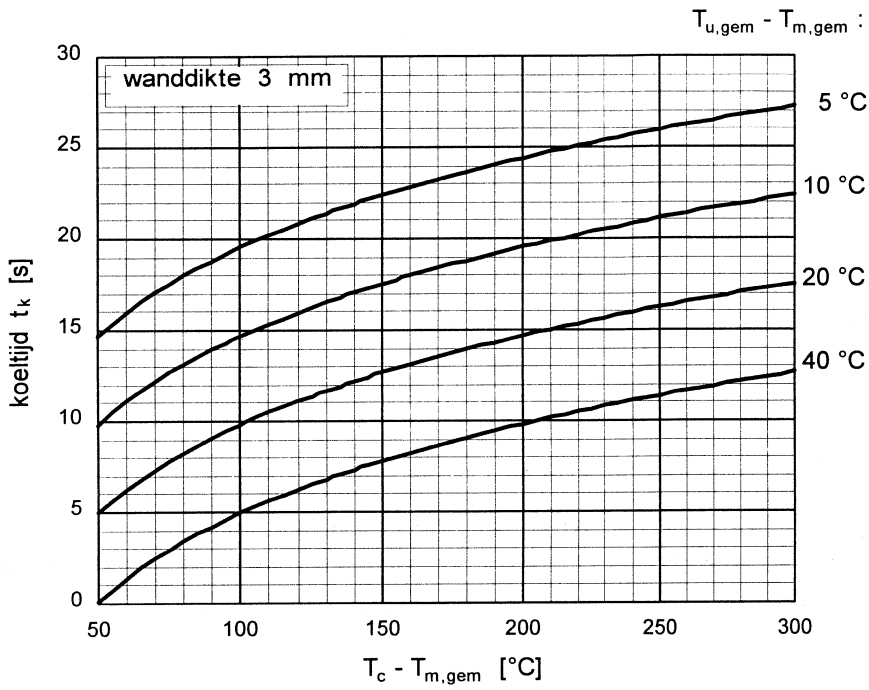
Figuur 4.37 tenslotte toont de invloed van de wanddikte.



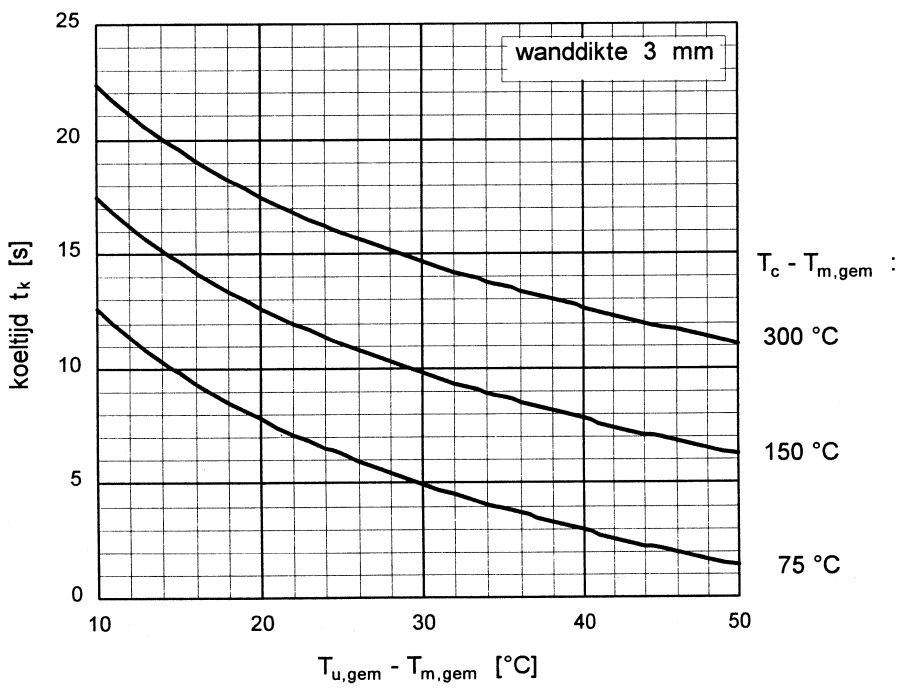
Figuur 4.33: Sinusvormig temperatuurprofiel over de wanddikte



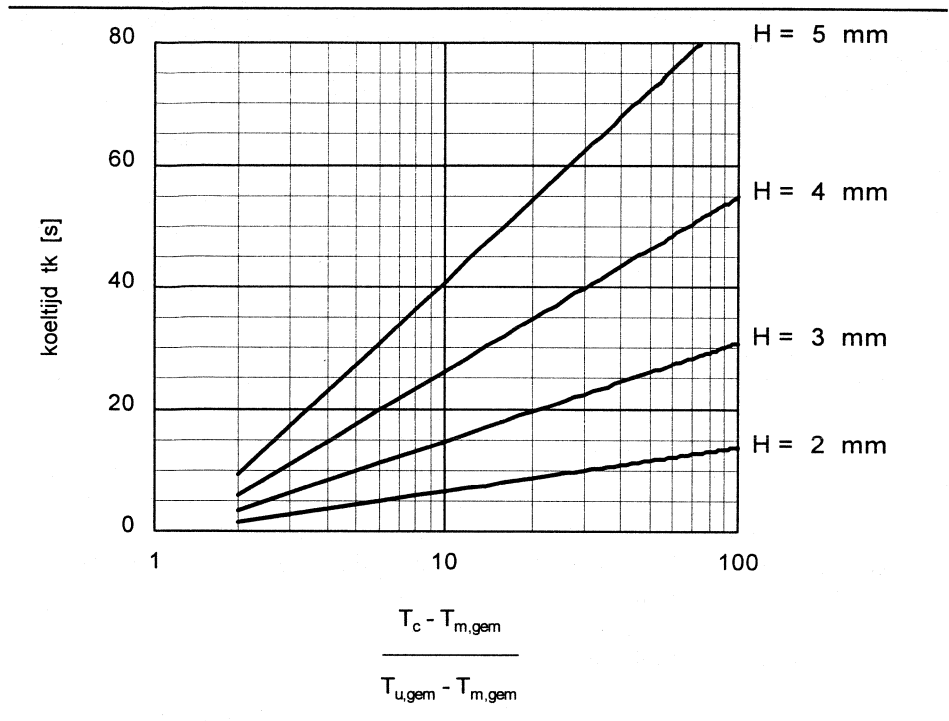
Figuur 4.34: Vergelijking van de formules (3) en (5) voor de koeltijd



Figuur 4.35: Invloed van de cilindertemperatuur T_c op de koeltijd



Figuur 4.36: Invloed van de uitstoottemperatuur $T_{u,gem}$ op de koeltijd



Figuur 4.37: Invloed van de wanddikte op de koeltijd

Invloed van de viscositeitskarakteristiek van het materiaal

Het stromingspatroon van kunststofsmelt in een matris heeft invloed op de haalbare vultijd en op de koelmogelijkheden. In het dictaat *Technische Fysica* zijn voor een vloeistof met constante viscositeit, een zogenaamde newtonse vloeistof, uitdrukkingen afgeleid voor de snelheidsverdeling over de dikte bij stroming door kanalen met cirkelvormige doorsnede en met spleetvormige rechthoekige doorsnede. De snelheidsverdeling over de dikte wordt voor een spleetvormige rechthoekige doorsnede gegeven door:

$$u(z) = \frac{z^2 - (\frac{1}{2}H)^2}{2\eta} \cdot \frac{-\Delta p}{L} \quad (6)$$

waarin z = plaatscoördinaat in dikterichting [m] (nul in het midden)
 $u(z)$ = snelheid als functie van z -coördinaat [$m \cdot s^{-1}$]
 H = (wand)dikte van de spleet [m]
 η = viscositeit van de vloeistof [$Pa \cdot s$]
 $-\Delta p$ = drukval over de vloeiweg [Pa]
 L = lengte (vloeiweg) van de spleet [m]

Voor een kanaal met cirkelvormige doorsnede is de snelheidsverdeling:

$$u(r) = \frac{r^2 - R^2}{4\eta} \cdot \frac{-\Delta p}{L} \quad (7)$$

waarin r = radiale plaatscoördinaat [m]
 $u(r)$ = snelheid als functie van r -coördinaat [$m \cdot s^{-1}$]
 R = radius van de kanaaldoorsnede [m]

De vergelijkingen (1) en (2) op bladzijde 4.28 voor de volumestroom zijn gevonden door integratie van bovenstaande vergelijkingen (6) en (7) over de doorsnede.

Tot dusver is de viscositeit steeds constant genomen. In werkelijkheid neemt de viscositeit boven een bepaalde afschuifsnelheid in het materiaal sterk af met de afschuifsnelheid. Deze karakteristiek heet in het Engels "shear thinning", dat wil zeggen verdunning bij toenemende afschuiving. Uit vergelijkingen (6) en (7) is af te leiden dat de stroomsnelheden en dus de volumestroom zullen toenemen met afnemende viscositeit. Dit is op zichzelf een gunstig effect.

Een ander effect is de zogenaamde inherente instabiliteit van de stroming. Doordat de viscositeit lager wordt met toenemende afschuifsnelheid, nemen namelijk niet alleen de snelheden toe volgens vergelijkingen (6) en (7), maar ook de snelheidsverschillen over de dikte en dus de afschuifsnelheden. Grotere afschuifsnelheden veroorzaken echter weer een lagere viscositeit. Er is aldus sprake van een zichzelf versterkend effect. Een gevaar is nu dat er ontoelaatbaar hoge afschuifsnelheden optreden voordat de matrijs gevuld is. Bij extreem hoge afschuifsnelheden kan door dissipatie de temperatuur van de smelt plaatselijk zó hoog worden dat degradatie of verbranding optreedt. De temperatuur die de smelt reeds heeft bij het verlaten van de spuitneus is in dit verband uiteraard ook van belang.

Het rekenen aan een stroming met "shear thinning" en inherente instabiliteit, waarbij de viscositeit bovendien afhangt van de temperatuur, is in de meeste gevallen slechts mogelijk met iteratieve methoden, zoals bij numerieke simulatie. Analytische berekeningen zijn echter nog mogelijk indien de viscositeitskarakteristiek wordt weergegeven met een zogenaamde "power law". In dit model hangt de viscositeit af van de afschuifsnelheid volgens:

$$\eta = \eta_0 \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (8)$$

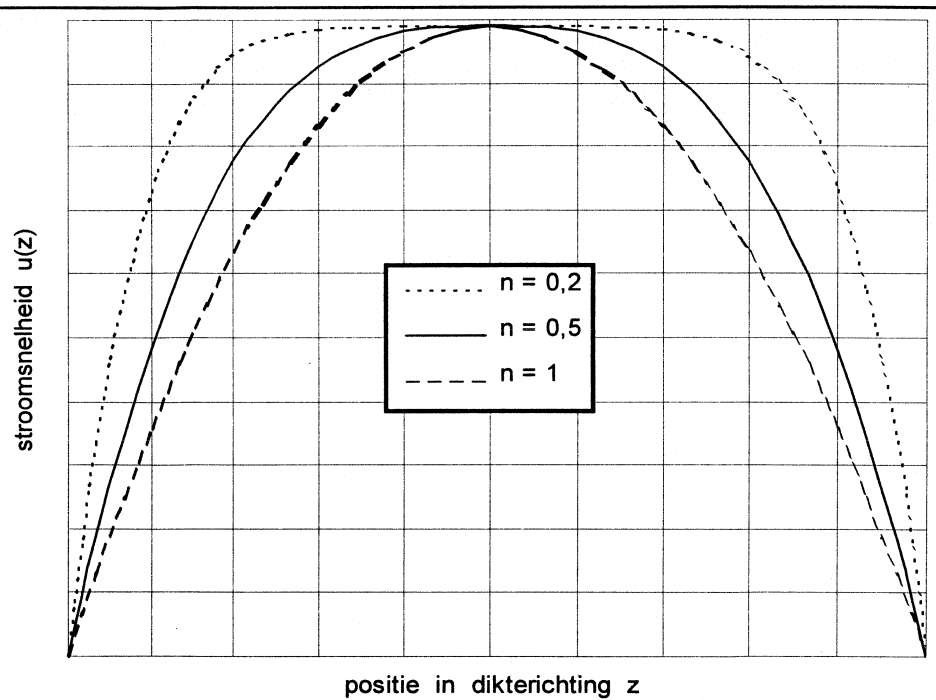
waarin η = viscositeit
 η_0 = viscositeit bij afschuifsnelheid nul
 $\dot{\gamma}$ = afschuifsnelheid
 n = power law-exponent ($0,2 \leq n \leq 1$)

Een realistischer model is een constante viscositeit (η_0) beneden een bepaalde afschuifsnelheid en een power law boven een bepaalde afschuifsnelheid, met ertussen een overgangsgebied. De power law is echter een redelijke benadering voor de bij het vullen van een spuitgietmatrijs gebruikelijke afschuifsnelheden.

De snelheidsverdeling over de dikte wordt voor stroming van een power law-vloeistof door een spleetvormige rechthoekige doorsnede gegeven door:

$$u(z) = \frac{n}{n+1} \cdot \left[z^{\frac{n+1}{n}} - \left(\frac{1}{2}H\right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \cdot \left(\frac{-\Delta p}{\eta_0 \cdot L} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

Merk op dat $n = 1$ een newtonse vloeistof beschrijft met constante viscositeit η_0 . Voor $n = 1$ gaat vergelijking (9) namelijk over in (6) (reken dit na!). Stroomsnelheidsprofielen volgens (9) zijn voor een aantal waarden van n getoond in figuur 4.38. Voor een newtonse vloeistof verloopt de snelheid parabolisch met de diktecoördinaat z . Naarmate n kleiner wordt, is het snelheidsprofiel in het midden van de stroom vlakker. Vooral voor lage waarden van n is het gebied met grote snelheidsverschillen (en dus grote afschuifsnelheden) geconcentreerd in de dunne lagen vlak onder het oppervlak.



Figuur 4.38: Stroomsnelheidsprofielen van power law-vloeistoffen

De viscositeitskarakteristiek blijkt ook invloed te hebben op de verdeling van de temperatuur over de dikte. Een temperatuurprofiel kan worden berekend indien rekening wordt gehouden met visceuze wrijving (dissipatie) in het materiaal. Indien men voorts het warmtetransport door convectie (materiaaltransport) verwaarloost, is een analytische oplossing mogelijk. Voor stroming van een newtonse vloeistof door een spleetvormige rechthoekige doorsnede wordt dan de temperatuurverdeling over de dikte gegeven door:

$$T(z) = T_m + \frac{1}{12\eta \cdot \lambda} \cdot [z^4 - (\frac{1}{2}H)^4] \cdot \left(\frac{-\Delta p}{L} \right)^2 \quad (10)$$

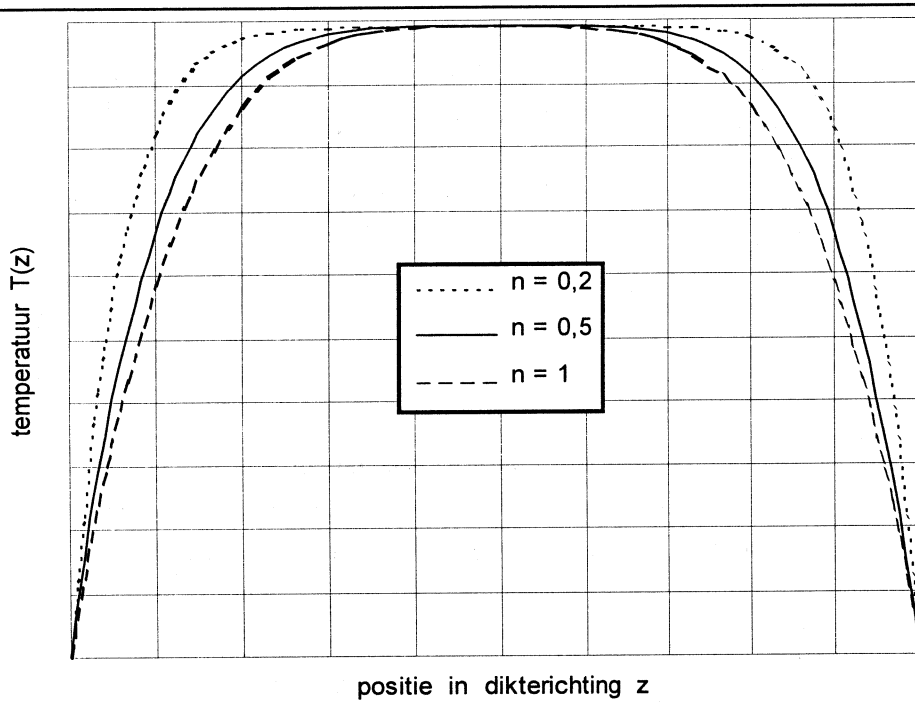
waarin T_m = temperatuur matrijswand
 λ = warmtegeleidingscoëfficiënt van de kunststof

Merk op dat de temperatuur $T(z)$ evenredig is met z^4 terwijl de snelheid $u(z)$ volgens vergelijking (6) varieert met z^2 . Anders geformuleerd: $T(z)$ is twee machten hoger in z dan $u(z)$. Dit laatste is ook het geval voor power law-vloeistoffen. De algemene versie van vergelijking (10) voor een power law-vloeistof is:

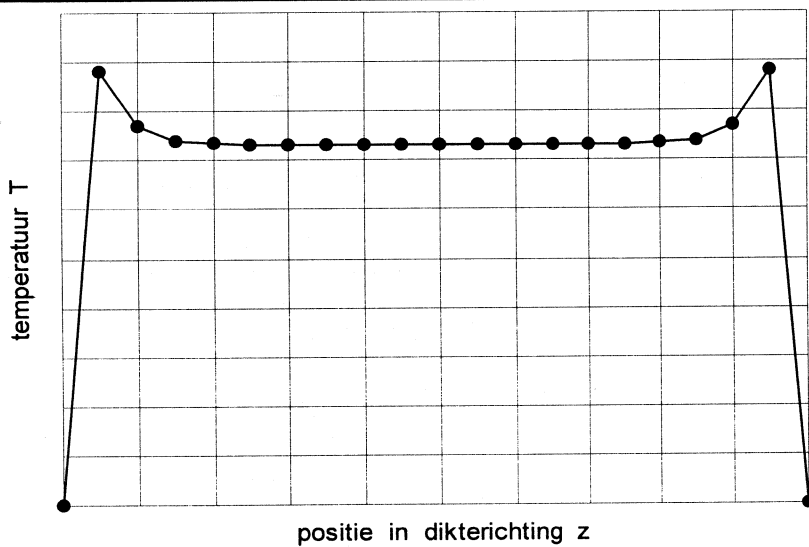
$$T(z) = T_m + \frac{n^2}{(2n+1) \cdot (3n+1) \cdot \eta_0^{1/n} \cdot \lambda} \cdot [z^{\frac{3n+1}{n}} - (\frac{1}{2}H)^{\frac{3n+1}{n}}] \cdot \left(\frac{-\Delta p}{L} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (11)$$

De temperatuurprofielen volgens vergelijking (11) zijn voor een aantal waarden van n getoond in figuur 4.39. Naarmate n lager is, is het temperatuurverloop in het midden van de stroom vlakker en aan de wanden steiler. De temperatuurprofielen in figuur 4.39 zijn, zoals vermeld, berekend onder verwaarlozing van het warmtetransport door convectie.

Het in rekening brengen van convectie kan alleen bij iteratieve berekeningen. Een typisch resultaat is getoond in figuur 4.40. Voor de berekening van het temperatuurprofiel in figuur 4.40 is bovendien rekening gehouden met de temperatuurafhankelijkheid van de viscositeit.



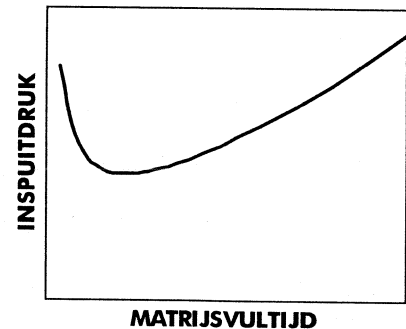
Figuur 4.39: Temperatuurprofielen van stromende power-law-vloeistoffen



Figuur 4.40: Temperatuurprofiel berekend met numerieke simulatie

VRAGEN

- 1) *bij § 4.4:* Waarom moet er bij een hotrunnermatrijs een goede isolatie zijn tussen hotrunner en matrijsholte? Waar is deze isolatie in *Figuur 4.16* te zien?
- 2) *bij § 4.4:* Schets in tenminste drie stappen het openlopen van de matrijs en het uitstoten van het produkt in *Figuur 4.17*.
- 3) *bij § 4.4:* Schets in tenminste drie stappen het openlopen van de matrijs en het uitstoten van het produkt in *Figuur 4.14*.
- 4) *bij §§ 4.1 t/m 4.4 (zie ook hoofdstuk 3):* Noem 4 overeenkomsten en 4 verschillen tussen spuitgieten van metalen en van thermoplastische kunststoffen.
- 5) *bij § 4.4:* Waarom is er bij het meercomponentenspuitgieten een groot contactoppervlak vereist tussen de verschillende componenten?
- 6) *bij § 4.5:* Waarom is er bij het spuitgieten van thermoharders een goede isolatie gewenst tussen coldrunner en matrijsholte?
- 7) *bij § 4.5 (zie ook hoofdstuk 8):* Wat is het meest wezenlijke verschil tussen het procesverloop bij het smeltkernproces en het verloren-wasgieten?
- 8) *bij § 4.5:* Hoe komt het dat bij het smeltkernproces tijdens het spuitgieten van de gesmolten kunststof de kern niet smelt, terwijl bij het uitsmelten van de kern het kunststofprodukt niet smelt?
- 9) *bij § 4.6:* In nevenstaande figuur is voor een bepaalde situatie de benodigde vuldruk weergegeven als functie van de matrijsvultijd (de totale tijd waarin de matrijsholte wordt gevuld).
 - (a) Verklaar het verloop van de vuldruk met de vultijd.
 - (b) Welke factoren hebben invloed op de inwendige spanningen ten gevolge van het spuitgieten? Leg uit hoe deze invloedsfactoren afhangen van de matrijsvultijd.
- 10) *bij § 4.6:* Een vlakke strip met afmetingen 150 mm x 15 mm x 2 mm moet worden gespuitspuitgiet. Er wordt materiaal van 220°C ingespoten. De matrijskoeling wordt zó ingesteld dat de wandtemperatuur 40°C is. Het produkt mag worden uitgestoten bij een gemiddelde temperatuur van 80°C. Bij de verwerkingstemperaturen zijn de gemiddelden van de materiaaleigenschappen: soortelijke massa 800 kg·m⁻³, viscositeit 2000 Pa·s, warmtegeleidingscoëfficiënt 0,13 W·m⁻¹·K⁻¹, soortelijke warmte 2000 J·kg⁻¹·K⁻¹. De matrijsholte wordt in 1 s gevuld. Vervolgens wordt een nadruk van 220 MPa toegepast. Er zijn spuitgietmachines beschikbaar met sluitkrachten van 400, 500, 650 en 800 kN. Het openen en sluiten van de matrijs kost 2,5 s.
 - (a) Hoeveel druk moet door de spuitgietmachine worden opgebracht tijdens het vullen van de matrijs?
 - (b) Wat is de vereiste sluitkracht van de spuitgietmachine?
 - (c) Welke spuitgietmachine wordt bij voorkeur toegepast en waarom?
 - (d) Wat is de cyclustijd van het spuitgietproces?



LITERATUUR

- Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch 1: Spritzgießen*; Uitg. Basf, 1970
- Spritzgietmatrijzen voor thermoplastische kunststoffen*; Uitg. DSM
- Meercomponenten- en meerkleurenspritzgietmachines*: Kunststof en Rubber (1985)1, blz. 1
- Procestechologie I - Kunststoffen*: collegedictaat mk48, TU Delft
- Anemaat, A. †, *Konstrueren en vormgevingstechnieken*; module cursusdictaat GRCIK, Stichting Opleiding Rubber- en Kunststoffen (SORK)
- Dam, J. van, *Kunststofverwerking*; collegedictaat mk57, TU Delft
- Eckhardt, B., *Dekorieren von Spritzgußteilen im Werkzeug*; Kunststoffe 76 (1986) 1028
- Eckhardt, H., *Zweikomponentenverfahren für Kompaktspritzgegossene Formteile*; Plastverarbeiter 34 (1983) 4, 316
- Haack, U., *Präzisionsformteile in der Outsert-Technik*; Plastverarbeiter 35 (1984) 6
- Hauck, C. & A. Schneiders, *Optimieren der Schmelzkerntechnik für das Thermoplatzspritzgießen*; Kunststoffe 77 (1987) 12, 1237
- Johannaber, F., *Injection moulding machines*; Uitg. Hanser, 1982
- Knappe, *Zum optimalen Zyklusverlauf beim Spritzprägen von Thermoplasten*; Kunststoffe 74 (1984) 2, 79
- Menges, G., *Einführung in die Kunststoff-Verarbeitung*; Uitg. Hanser, 1979
- Miller, E., *Plastics Products Design Handbook Part B*; Uitg. Marcel Dekker
- Mink, W., *Grundzüge der Spritzgießtechnik*; Uitg. Zechner U. Hüthig, 1979
- Richter, W., *Wirtschaftlichkeit des Zweifarben- Spritzgießens*; Z. ind. Fertig. 68 (1978) 757
- Schmidt, Th.K., *Praktische Anwendungsbeispiele für die Benutzung von pvT-Diagrammen*; Plastverarbeiter 30 (1979) 1, 22
- Schwarz, E.L.S., *Kunststofverwerking*; Uitg. Kluwer, 1981
- Siddal, K.W., *Adiabatic injection moulding*; Paper 10, PPG Symposium "Effects of thermal history on plastics properties", London, May 1976
- Stockhert, K., *Werkzeugbau für die kunststoff-Verarbeitung*; Uitg. Hanser, 1979
- Stockhert, S., *Kunststoff-Maschinen-Führer*, Uitg. Hanser, 1979

Hoofdstuk 5: SCHUIMEN VAN KUNSTSTOFFEN EN AFGELEIDE TECHNIEKEN

5.1 INLEIDING

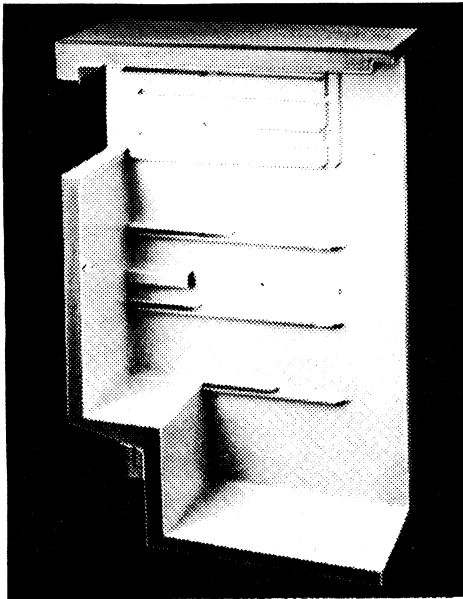
Een niet-geschuimd thermoplastisch spuitgietprodukt met dikke ribben en dikke nokken heeft geen fraai en strak uiterlijk. Nokken en ribben moeten dun worden gekonstrueerd als het uiterlijk van belang is. Het oppervlak vertoont inval aan de achterzijde van ribben en nokken die dikker zijn dan 50 à 70 % van de wanddikte. Vlakke kunststofprodukten zonder ribben en nokken met wanden dikker dan ongeveer 5 mm vertonen inval naast de randen; de rest van het oppervlak is niet strak. Het produkt ondergaat door ongelijke afkoeling bovendien vormveranderingen. Voor zwaarbelaste produkten kan de maximale wanddikte een grens vormen voor het toepassen van thermoplasten. Deze grens kan worden verhoogd met geschuimde produkten. Een thermoplastisch schuim, ook wel structuurschuim genoemd, vertoont in doorsnede hetzelfde beeld als een bot. De meeste vervaardigingstechnieken voor geschuimde produkten zijn varianten op het spuitgieten van kunststoffen.

Wanneer ongeveer 0,1 % chemisch blaasmiddel aan de grondstofkorrels wordt toegevoegd, kan inval al worden vermeden. De krimp wordt dan gecompenseerd door schuimvorming. Door méér blaasmiddel toe te voegen, ongeveer 0,5 %, ontstaat structuurschuim. Een chemisch blaasmiddel zou normaal bij de smelttemperatuur van de kunststof uiteen vallen, maar door de hoge druk op de grondstof gebeurt dit niet. Wanneer bij het inspuiten de druk wordt verlaagd, splitst zich gas af waaruit schuimbellen ontstaan. Het is ook mogelijk om een fysisch blaasmiddel, bijvoorbeeld fijn verdeelde stikstof, te gebruiken.

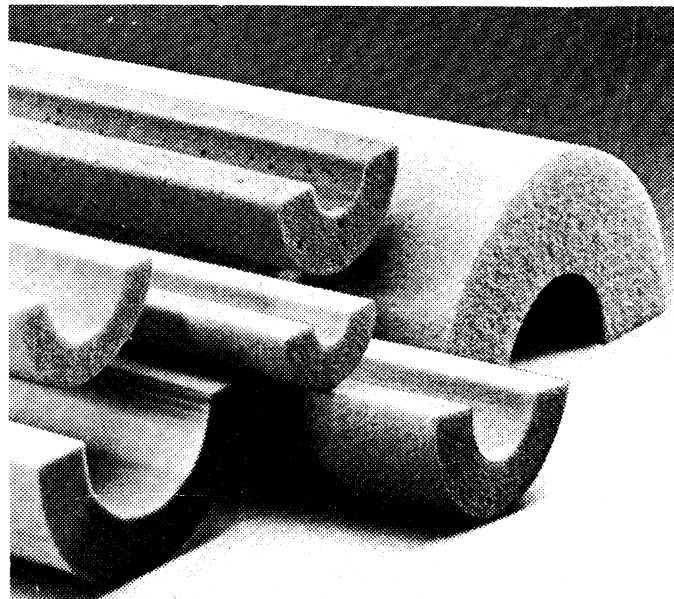
Met schuim is een veel grotere wanddikte dan 5 mm mogelijk. Het oppervlak is strak en er is geen inval. Het oppervlak is echter onrustig door vegen en strepen. De ruwheid van het oppervlak ligt tussen 50 en 200 μm . Met een structuurlak is het oppervlak te verfraaien. Eist men een glad gelakt oppervlak, dan moet men het vlak behandelen met spuitplamuur en vervolgens schuren; meestal moet er plaatselijk bijgeplamuurd worden. Na deze behandelingen kan men het produkt aflakken. Het eindprodukt kost door de langere fabricagetijd twee- à driemaal zoveel als een niet-geschuimd spuitgietprodukt.

Er is intensief gezocht naar methoden om geschuimde produkten te spuitgieten met een glad en fraai oppervlak:

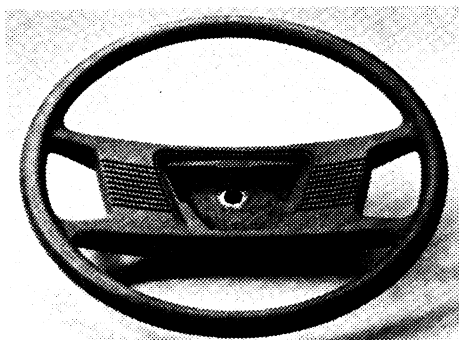
- inspuiten van kunststof in een matrijs waarin een hoge gasdruk heerst (gastegendrukproces);
- het holtevolume in de matrijs vergroten ná het inspuiten onder gastegendruk;
- vóór het inspuiten de matrijswand op een temperatuur brengen die hoger is dan de glasovergangstemperatuur; na het inspuiten wordt de matrijswand gekoeld (variothermpoces);
- het oppervlak van de matrijs voorzien van een thermische isolatielaag;
- het in één proces spuitgieten van twee verschillende materialen waarvan één de buitenwand vormt;
- tijdens het inspuiten van de grondstof in de matrijs stikstof of lucht in de kern van de neus toevoeren om de dikke delen in het produkt op te blazen (CINPRES-proces).



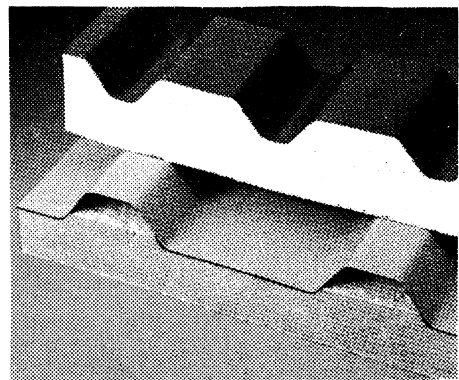
*wand van koelkast met
hard schuim volgeschuimd*



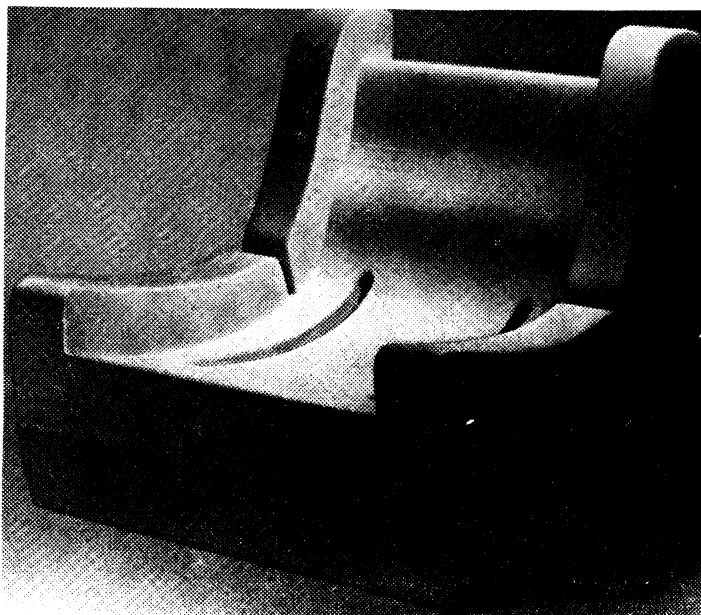
isolatie uit hard schuim



halfhard integraalschuim



*geprofileerd metaal met
hard schuim gevuld*



minder zacht elastisch schuim

Figuur 5.1: Diverse voorbeelden van geschuimde producten

Sommige van deze methoden worden met succes toegepast; andere zijn niet verder ontwikkeld. De processen die nog in gebruik zijn, worden hieronder beknopt beschreven. Men onderscheidt processen met lage druk en met hoge druk. Bij het lagedrukproces wordt de matrijs niet volgespoten: het vullen van de matrijs gebeurt door de expansie van het gas. Men spreekt van een hogedrukproces als de matrijs in één keer wordt gevuld.

5.2 LAGEDRUKPROCES

Voor het lagedruk-schuimspuiten wordt een aangepaste spuitgietmachine gebruikt (figuur 5.2). Het schotvolume is groot ten opzichte van de plastificeercapaciteit omdat de koeltijd vanwege de wanddikte lang is. De injectietijd is kort ten behoeve van een lage soortelijke massa van het produkt, ook bij een wat langere vloeiweg. Is de inspuittijd lang dan is de invloed van de afkoeling op het geëxpandeerde materiaal merkbaar: de matrijsholte komt niet vol en er moet méér materiaal worden ingespoten. De soortelijke massa van het geschuimde materiaal kan afhankelijk van de wanddikte 70% tot 90% bedragen van de soortelijke massa van hetzelfde niet-geschuimde materiaal. De soortelijke massa moet hoger zijn wanneer men hoge eisen stelt aan de oppervlaktekwaliteit. Voor technische artikelen en voor artikelen die in één keer met een structuurlak worden afgelakt is dit een zeer goede fabricagemethode.

5.3 GASTEGENDRUKPROCES

Het gastegendrukproces (figuur 5.3) wordt op grote schaal toegepast. De gasdruk in de kunststof bedraagt bij gebruik van een chemisch blaasmiddel 1,0 à 1,5 MPa; in sommige gevallen (afhankelijk van matrijsholte en materiaal) iets hoger.

In de matrijs wordt vóóordat het inspuiten van de kunststof begint een gasdruk aangebracht van ongeveer 2,5 MPa. De matrijs moet daarom goed worden afdicht. Behalve het deelvlak moeten ook andere naden en alle uitdrukpenen van afdichtingen worden voorzien. Het blaasmiddel kan tijdens de injectiefase niet werken door de hoge tegendruk in de matrijs. Als de matrijs gevuld is laat men het gas uit de matrijs weglopen. Het blaasmiddel gaat nu werken en op deze wijze wordt de krimp gecompenseerd. De inwendige druk is voldoende groot om inval tegen te gaan.

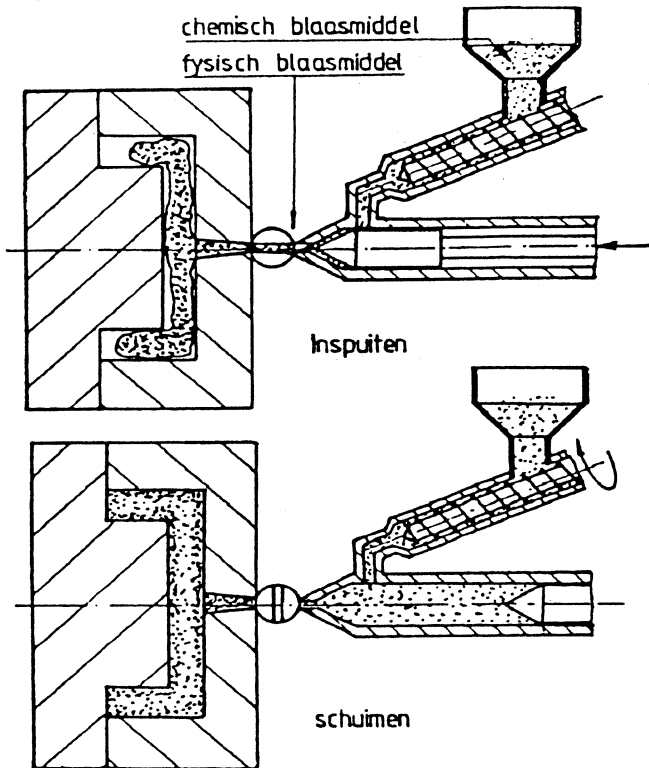
Voordelen en nadelen

Voordelen van het gastegendrukproces:

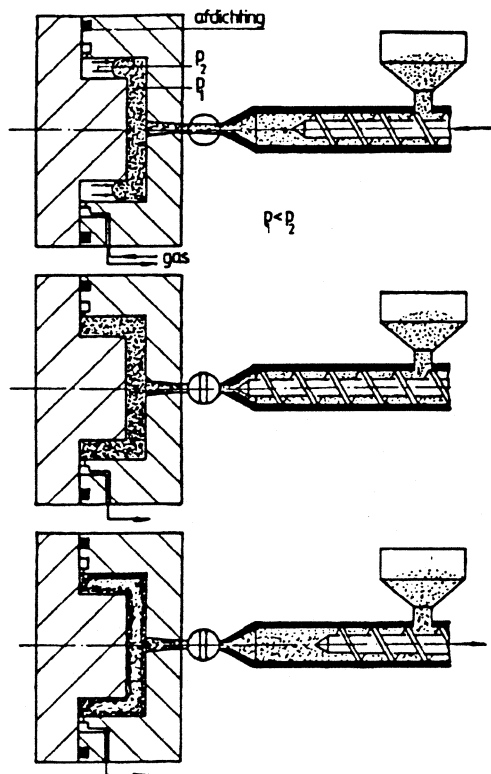
- het oppervlak is even glad als bij niet-geschuimde kunststoffen;
- het produkt kan desgewenst in één keer glad worden gelakt;
- het materiaalverbruik kan minimaal zijn (alle wanden even dik).

Nadelen van het gastegendrukproces:

- de matrijzen zijn duurder door de afdichtingen;
- het duurt enige dagen voordat het produkt kan worden gelakt (blaasvorming op het oppervlak);
- het proces functioneert niet bij wanddikten beneden 3 mm;
- de dichtheid is iets lager dan die van de niet-geschuimde kunststof;.



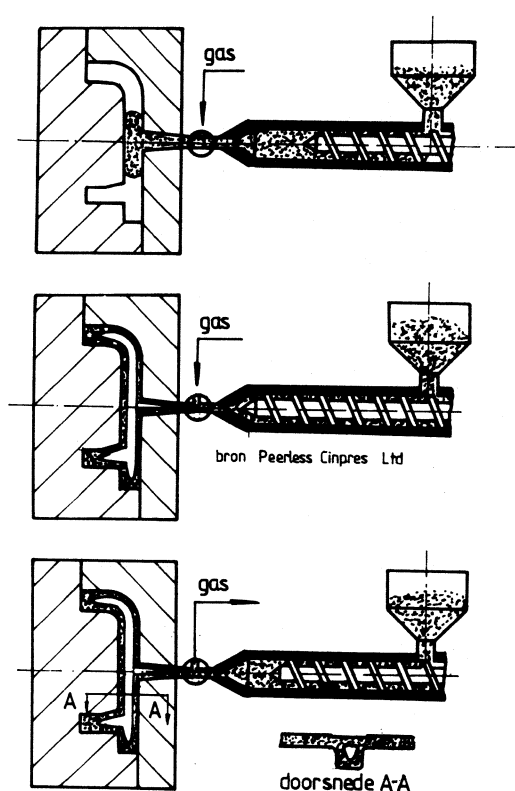
Figuur 5.2: Spuitgieten van thermoplastenschuim (lagedrukprocédé)



Figuur 5.3: Het gastendrukproces

5.4 CINPRES-PROCES

Het CINPRES-proces (Controlled Internal PRESsure) is eigenlijk géén schuimproces. Het materiaal is een compacte grondstof zonder blaasmiddel. Tijdens het inspuiten van de grondstof wordt in het centrum van de neus van de spuitgietmachine onder hoge druk stikstofgas toegevoerd. Het gas loopt door verdikte delen van het produkt omdat hier de temperatuur van de kunststof het hoogst is en dus de viscositeit van de kunststof lager is dan elders in het produkt. De verdikkingen in het produkt moeten als een netwerk over het gehele produkt lopen tot aan het einde van de vloeiwegen. De gasdruk blijft op een bepaald niveau totdat het produkt voldoende is afgekoeld. Op deze wijze wordt de krimp volledig gecompenseerd en treedt géén inval op. De gasdruk wordt weggenomen vóórdat de matrijs opengaat. De processtappen zijn schematisch geïllustreerd in figuur 5.4.



Figuur 5.4: CINPRES-proces

Voordelen en nadelen

Voordelen van het CINPRES-proces:

- er worden normale grondstoffen zonder bijmengsels gebruikt;
- het proces kan op een conventionele spuitgietmachine worden uitgevoerd;
- de cyclustijden zijn korter dan bij schuimen;
- de produkten kunnen desgewenst direct glad worden gelakt.

Nadelen van het CINPRES-proces:

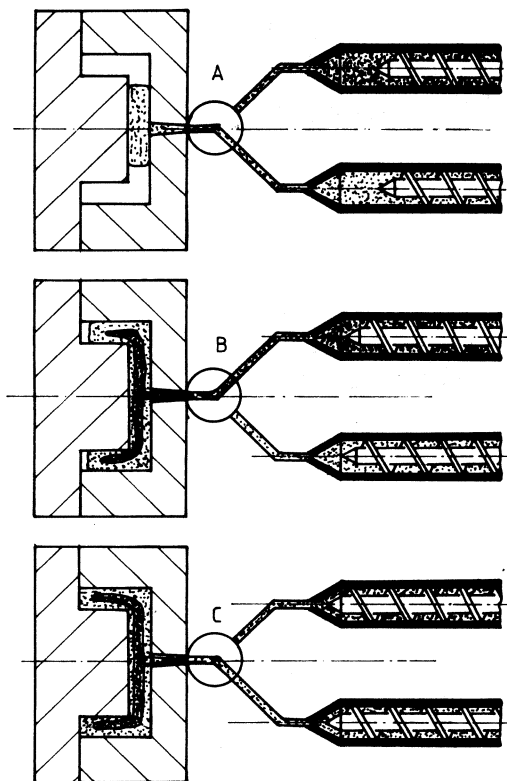
- er is een grote aansluiting met gat nodig voor gastoevoer;
- er lopen holle kanalen over het gehele produkt (kan ook een voordeel zijn).

5.5 TWEECOMPONENTEN-SPUITGIETPROCES

Het tweecomponenten-spuitsgieten met toepassing van schuim wordt ook wel sandwichspuiten of co-injectie genoemd. Bij dit proces wordt een bepaalde hoeveelheid grondstof zonder blaasmiddel in de matrijs gespoten (figuur 5.5). Deze grondstof zal uiteindelijk de huid vormen van het produkt. In de tweede stap blaast men het materiaal op door grondstof met blaasmiddel in te spuiten. Als laatste stap in het proces spuit men weer een kleine hoeveelheid grondstof zonder blaasmiddel in de matrijs om het schuim in de aanspuitvlek af te dekken en om het aanspuitkanaal te zuiveren van schuim voor de volgende cyclus.

Uitgaande van dit basisprincipe zijn twee spuitgietprocessen ontwikkeld:

- een sequentieel proces waarbij de materialen na elkaar in de matrijs worden gespoten;
- een simultaan proces waarbij gedurende een bepaalde fase beide materialen gelijktijdig in de matrijs worden gespoten.



Figuur 5.5: Tweecomponenten-spuitsgietproces

Voordelen en nadelen

Voordelen van het tweecomponentenproces:

- het oppervlak van het produkt is even glad als bij een niet-geschuimd materiaal;
- men kan goedkoop materiaal voor de kern toepassen;
- het produkt kan desgewenst direct worden gelakt.

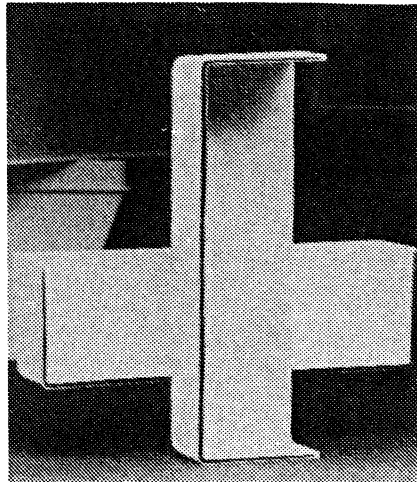
Nadelen van het tweecomponentenproces:

- er is een speciale (dure) spuitgietmachine nodig;
- achter openingen kan kernmateriaal door de huid breken;
- aan het einde van de vloeiweg is géén kernmateriaal meer aanwezig.

Het tweecomponenten-spuitsieten is toepasbaar voor diverse materiaalcombinaties. Het kernmateriaal kan een materiaal zijn dat bijdraagt aan verbetering van de produkteigenschappen of juist een goedkoop materiaal om de kostprijs te verlagen. In het laatste geval kan de kern een herverwerkt materiaal zijn, een verontreinigd materiaal of materiaal met een andere kleur. Door een met glasvezel versterkt materiaal in de kern te spuiten verhoogt men de stijfheid zonder dat de glasvezels het oppervlak verstoren.

Het tweecomponentenproces is ook bruikbaar om behuizingen te maken die electromagnetische interferentie (EMI) in elektronische apparaten tegengaan. Ter voorkoming van EMI brengt men aan de binnenzijde van behuizingen vaak een metaallaag aan (kooi van Faraday).

Een nieuwe methode is om de behuizing te vervaardigen volgens het tweecomponenten-spuitsietproces. Aan het kernmateriaal voegt men een metaalpoeder, aluminiumvlokken, of met aluminium gecoate glasvezels toe voor magnetische afscherming.



Figuur 5.5: Kooi van Faraday door toepassing van geleidend kernmateriaal

Past men verschillende materialen toe in één produkt dan moet men er op letten dat de gewenste produkteigenschappen worden gehaald. Men moet rekening houden met zowel de adhesie tussen de materialen als een eventueel verschil in krimp. Bij een mechanisch belast produkt moet de verbinding tussen kern en buitenwand goed zijn. Worden twee materialen met een groot verschil in krimp toegepast dan kunnen ook problemen ontstaan. Vertoont het kernmateriaal de grootste krimp dan kan op het buitenvlak inval optreden en er kunnen ook vormveranderingen ontstaan. Vertoont het huidmateriaal de grootste krimp dan ontstaan in de buitenwand trekspanningen die kunnen leiden tot vormveranderingen en/of vroegtijdig falen.

VRAGEN

- 1) *bij § 5.2 (zie ook § 4.3):* Wat is het verschil tussen een spuitgietmachine voor lagedrukschuimen en een spuitgietmachine met vóórplastificering?
- 2) *bij § 5.4:* In figuur 5.4 is te zien dat het CINPRES-produkt een gat heeft op de inspuitplaats. Is dit gat te voorkómen?
- 3) *bij § 5.5:* Hoe komt het dat bij sequentieel sandwichspuiten het geschuimde materiaal in de kern komt en (bij goede procesvoering) niet door de huid breekt?
- 4) *bij § 5.5:* Hoe komt het dat bij simultaan sandwichspuiten het geschuimde materiaal in de kern komt en (bij goede procesvoering) niet door de huid breekt?

LITERATUUR

- Eckardt, H.
Mehrkomponenten-Spritzgießen ermöglicht das Herstellen abgeschirmter Gehäuse mit guter Oberfläche in einem Arbeitsgang
Kunststoffe 75 (1985) 3 5. 145
- Miller, E.
Plastics products design handbook Part B
Marcel Dekker, New York, Basel
- Mörwald, K.
Schaumspritzgießen
Plastverarbeiter 28 (1977) 6 S. 305, 7 S. 354 en 8 S. 405
- Pearson, H.
Nieuwe spuitgietmethode mist nadelen structuurschuim
Metaal en Kunststof 23 (1985) blz. 22
- Pearson, T.
Formteilherstellung nach dem CINPRES-Verfahren,
Kunststoffe 76 (1986) 8 S. 667
- Semerdjiev
Thermoplastische Strukturschaumstoffe
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffenindustrie, Leipzig, 1980

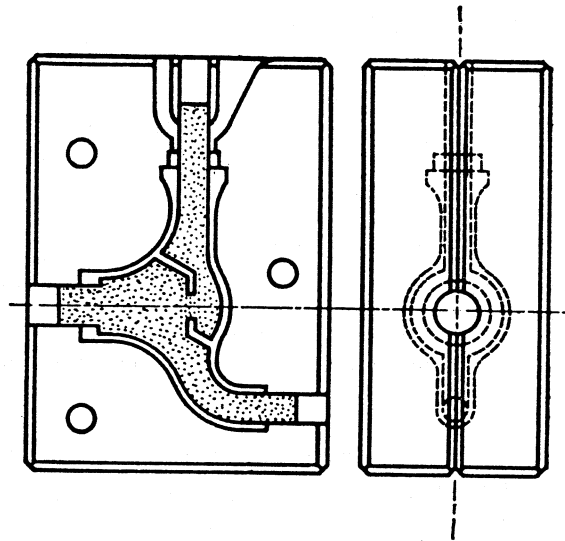
Hoofdstuk 6: COQUILLEGIETEN

6.1 INLEIDING

Het coquilllegieten, of zwaartekracht-gieten, is in principe een heel eenvoudig proces. Het gesmolten metaal wordt met een gietlepel in een permanente matrijs gegoten. De druk die nodig is om de matrijs helemaal te vullen wordt geleverd door de zwaartekracht. Als het gietstuk is gestold, wordt de matrijs geopend en het gietstuk verwijderd. Het coquilllegieten wordt nog vaak met de hand uitgevoerd, maar het kan ook geheel of gedeeltelijk worden gemechaniseerd.

Het coquilllegieten lijkt in veel aspecten op het zandgieten, maar het matrijsmateriaal dat voor coquilllegieten gebruikt wordt, heeft toch een paar belangrijke voordelen. Metalen matrijzen zijn vaak stabielere dan zandvormen en in een metalen matrijs koelt het materiaal sneller af dan in een zandmatrijs. Hierdoor treedt er korrelverfijning op en ontstaat er minder poreusheid in het materiaal. Bovendien kan er met een grotere mate van nauwkeurigheid en nauwere toleranties gewerkt worden en ook het oppervlak en de mechanische eigenschappen van het gietstuk zijn beter.

Om een grotere complexiteit van de gietstukken mogelijk te maken, kan er gebruik worden gemaakt van kernen van metaal of zand. In het laatste geval wordt er wel gesproken van een semi-permanente matrijs.



Figuur 6.1: Voorbeeld van een matrijs met een zandkern voor het gieten van een kraan

Toepassingen

Het proces wordt veel toegepast voor aluminium-, magnesium- en koperlegeringen en kleine gietstukken van gietijzer of staal worden er ook wel mee gemaakt.

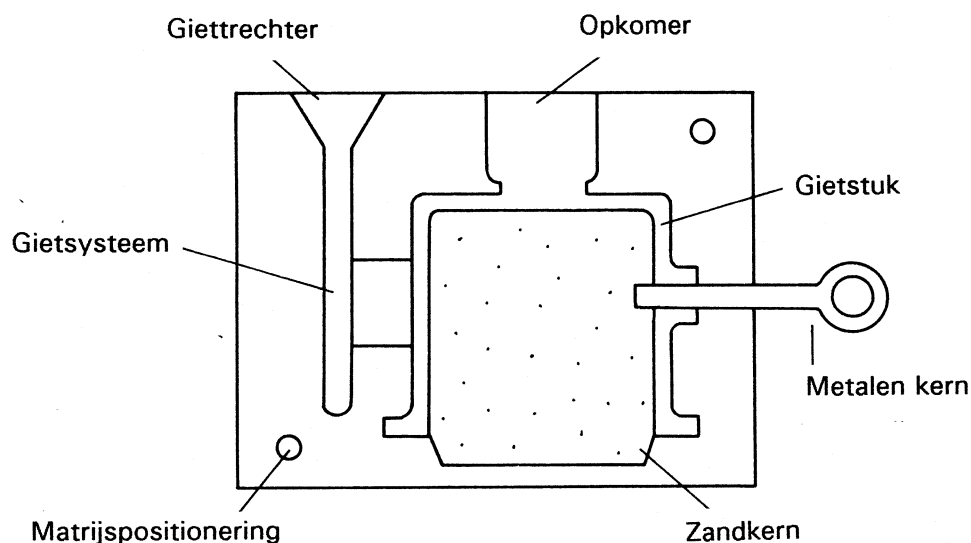
De meeste gietstukken die met behulp van het coquilllegieten worden gemaakt, variëren in gewicht van enkele grammen tot ongeveer 10 kg. Er kunnen wel gietstukken tot ongeveer 200 kg worden gemaakt, maar hiervoor is het coquilllegieten niet het meest economische proces.

Het proces is vooral geschikt voor de produktie van middelgrote tot grote series. Het wordt vooral gebruikt voor gietstukken met een ongeveer gelijkmatig verdeelde doorsnede en een relatief simpele vorm. Het is moeilijk om dunne wanddikten te gieten.

Typische voorbeelden van produkten die met behulp van coquillegieten worden gemaakt, zijn zuigers voor motoren, aandrijfstangen, tandwielen, wielschijven en waterkranen.

6.2 MATRIJS

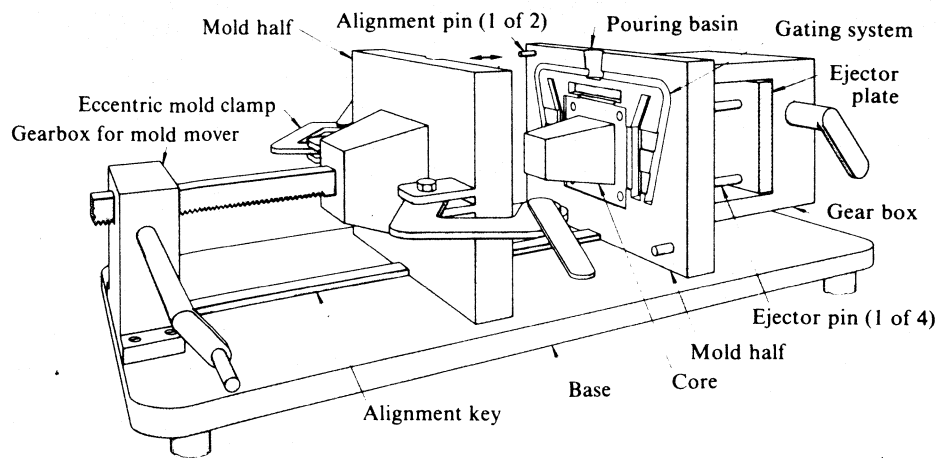
De matrijs is meestal een relatief eenvoudige constructie, die bestaat uit twee helften. In deze helften moeten behalve de matrijsholte ook voorzieningen zijn aangebracht voor de positionering, voor het sluiten van de matrijs, voor het gieten, voor het ontluchten en voor het verwijderen van het gietstuk. Een eenvoudig voorbeeld is gegeven in figuur 6.2. Soms wordt er niet van twee maar van drie matrijsdelen gebruik gemaakt, omdat het produkt niet in één richting lossend is.



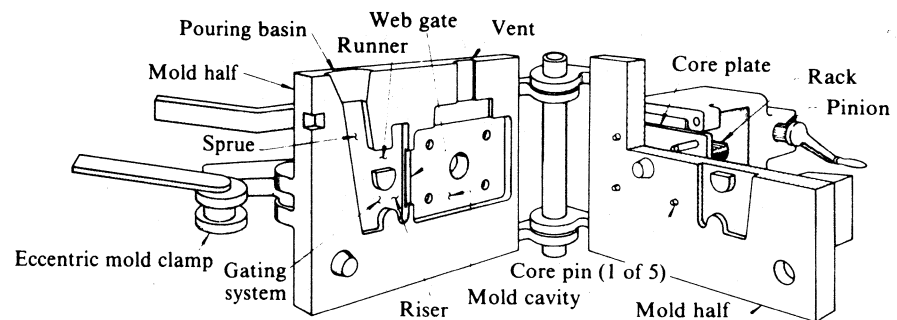
Figuur 6.2: Eenvoudig voorbeeld van een matrijshelft voor het coquillegieten

De twee matrijshelften kunnen verticaal tegen elkaar worden geplaatst of scharnierend aan elkaar worden bevestigd. Het principe van deze twee matrijstypen is gegeven in figuur 6.3 en 6.4. De matrijshelften worden soms scharnierend aan elkaar bevestigd, omdat de matrijs dan eenvoudiger te hanteren is. De scharnieren zorgen echter niet voor een voldoende goede positionering van de matrijshelften, daarvoor moeten nog extra pennen en gaten worden aangebracht.

Omdat de druk waarmee gewerkt wordt erg laag blijft, worden de matrijzen meestal gemaakt van gietijzer. Dit is een relatief goedkoop materiaal dat gemakkelijk is te bewerken. Hierdoor zijn de gereedschapkosten en de produktietijden aanzienlijk lager dan bij het spuitgieten. Voor legeringen met een hoog smeltpunt wordt gebruik gemaakt van koolstofstaal of matrijsstaal, omdat deze een betere thermische schokvastheid hebben.



Figuur 6.3: Een matrijs met tegen elkaar schuivende matrijshelften



Figuur 6.4: Een matrijs met tegen elkaar scharnierende matrijshelften

De levensduur van een matrijs hangt af van het ontwerp van het gietstuk, van het matrijsmateriaal en van de gietlegering. De levensduur neemt af met de smeltemperatuur van de gietlegeringen. Wanneer aluminiumlegeringen gegoten worden, kunnen in een matrijs 20.000 tot 30.000 gietstukken worden gemaakt. Met messing zijn dat er 10.000 tot 20.000 en met gietijzer slechts ongeveer 3000 stuks.

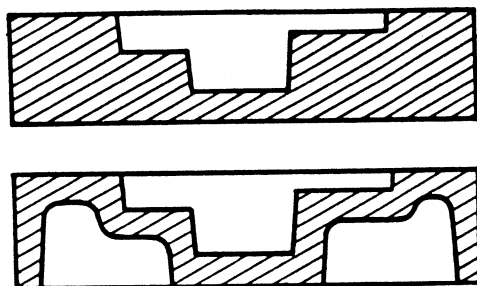
Wanddikte van de matrijs

De warmte die het materiaal tijdens het stollen afgeeft moet door de matrijs worden opgenomen. Een matrijs met dunne wanden zal sneller worden verwarmd tijdens het gieten en sneller afkoelen tussen het gieten in. Hierdoor zal de matrijs eerder slijten ten gevolge van thermische vermoeiing. Wanneer een te dikke wand wordt gekozen, zal de productiecyclus langer duren dan nodig is. Bovendien zal de matrijs door zijn gewicht dan moeilijker te hanteren zijn.

Het is dus belangrijk dat de juiste wanddikte wordt gekozen. De wanddikte zal afhankelijk van de toepassing over een groot bereik kunnen variëren. Voor de meeste toepassingen zal de wanddikte moeten liggen tussen de 30 en de 50 mm.

Door de wanddikte van de matrijs te variëren is het mogelijk om in verschillende delen de temperatuur te regelen. Door te zorgen dat op de plaats van een dik deel van het gietstuk ook het matrijsdeel dik is, kan het gietstuk sneller stollen zonder dat er krimmporeusheid ontstaat. Het tegenovergestelde is ook mogelijk: wanneer een gietstuk te snel stolt, kan dit opgelost worden door de matrijs op die plaats iets dunner te maken. Er is wel een beperking voor de wanddiktevariatie van de matrijs. Wanneer deze te groot is, zullen de verschillende delen onder invloed van de temperatuur verschillen in uitzetting en krimp vertonen, waardoor de matrijs kan gaan kromtrekken.

Voor simpele gietstukken wordt een matrijs vaak gemaakt door de vormholte door verspanen in een blok metaal aan te brengen. Op deze manier blijven de dikste matrijsdelen over op de plaatsen waar het gietstuk het dunst is. Dit is niet zo erg wanneer het gietstuk redelijk klein is en het blok groot genoeg zodat de wanddiktevariaties van het gietstuk relatief onbelangrijk zijn. Wanneer het toch een probleem zou zijn, kan de matrijs ook nog aan de buitenkant worden bewerkt zodat deze de vormholte ongeveer volgt (Figuur 6.5).

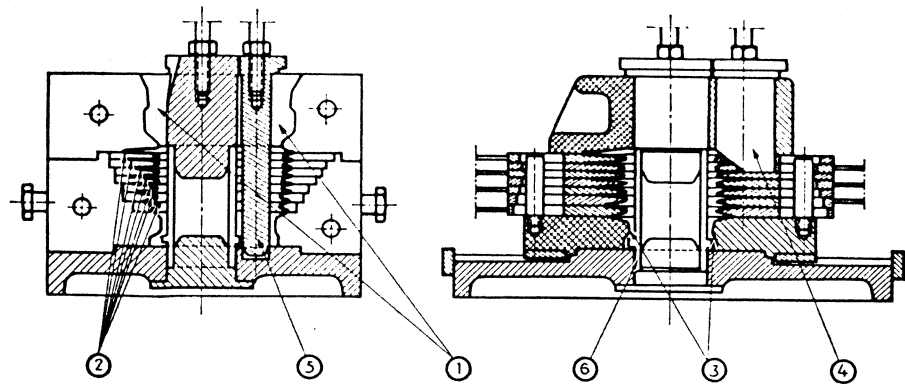


Figuur 6.5: Aanpassing van de wanddikte van de matrijs door deze aan de buitenkant te bewerken

Matrijscoating

Om te voorkomen dat het gietstuk te snel afkoelt kan de matrijs worden geïsoleerd door op het oppervlak een hittebestendige laag aan te brengen. Bovendien voorkomt deze coating dat een direct contact ontstaat tussen de matrijs en de gietlegering waardoor er minder erosie zal plaatsvinden. Wanneer de matrijs in direct contact zou staan met het vloeibare metaal, zou deze veel te snel opwarmen en afkoelen, waardoor thermische vermoeiing ontstaat. De coating is meestal gebaseerd op vulmiddelen zoals mica of roet in een basis van natriumsilicaat.

Als de laag dikker is isoleert deze beter. Op de plaats van zeer dunne delen van het gietstuk kunnen extra lagen worden aangebracht, zodat deze delen niet te snel afkoelen. Bij het gietsysteem en bij opkomers worden de dikste lagen coating toegepast. Hier is de laag tussen de 0,5 en de 1,0 mm dik. Bij dikke delen van het gietstuk waar het gevaar bestaat dat krimpporeusheid zal optreden, moet de dikte van de laag worden beperkt. Er zijn twee soorten coatings die verschillen in de mate waarin ze isoleren. De soort die het beste isoleert, wordt gebruikt op de plaats van het gietsysteem, de opkomers en zeer dunne delen van het gietstuk. Op de andere delen wordt de minder isolerende coating toegepast.



- (1) Opkomers: Sterk isolerende laag
 (2) t/m (5) Matrijswanden en kernen: 'geleidende' laag
 (6) Insert: geen laag

Figuur 6.6: Toepassing van coating op verschillende delen van de matrijs

Er kan nog een losmiddel worden aangebracht, dat er voor zorgt dat het gietstuk goed uit de matrijs verwijderd kan worden. Wanneer er geen losmiddel wordt gebruikt kan het gietstuk zich soms aan de matrijs hechten.

6.3 HET GIETPROCES

De aanloopserie

Voordat met gieten wordt begonnen moet de matrijs worden voorverwarmd tot deze ongeveer de temperatuur heeft die deze later tijdens het gebruik ook zal hebben. Hiermee wordt voorkomen dat de eerste gietstukken van onvoldoende kwaliteit zijn en dat de matrijs tijdens het aanlopen teveel thermische vermoeiing zal ondergaan. Het voorverwarmen gebeurt meestal door enkele gasbranders op het oppervlak van de matrijs te richten.

Vanaf het begin moet met een constante productiesnelheid worden gewerkt, zodat er zo snel mogelijk een evenwicht in de temperatuurverdeling ontstaat. Meestal gaat er de eerste paar keer dat er gegoten wordt nog iets verkeerd omdat de temperatuur nog niet helemaal goed is. Uit ervaring is ook gebleken dat het materiaal minder gemakkelijk in de matrijsholte stroomt wanneer deze nieuw is dan wanneer deze al een beetje is uitgesleten.

Bij de eerste keren dat er gegoten wordt moet er ook op gelet worden of er geen lucht in de holte wordt ingesloten. Als dit wel zo is, moeten er extra ontluchtingsgaten worden gemaakt.

Wanneer er met een constante snelheid wordt gewerkt en er evenwicht in de temperaturen is, kunnen zich nog steeds fouten voordoen. In dat geval kan het nodig zijn om het gietsysteem aan te passen.

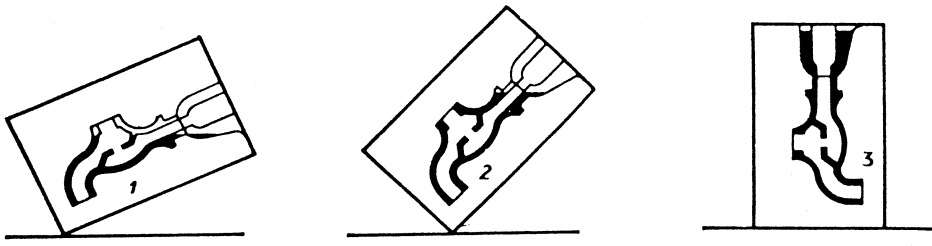
Het gieten

Bij het coquillegieten wordt de druk die nodig is om het materiaal de matrijs te laten vullen, geleverd door de zwaartekracht. Bij het ontwerpen van de matrijs moet dus rekening worden gehouden met de richting van de zwaartekracht. Doordat de druk zo laag is, is er weinig kans op braamvorming.

Het gieten moet zo worden uitgevoerd dat er geen turbulentie in de aanvoerkanalen ontstaat, omdat hierdoor lucht in de matrijs kan worden ingesloten. Hierdoor kunnen oxyden ontstaan die de degelijkheid van het gietstuk beïnvloeden. Er zijn wel constructies mogelijk waarbij de oxyden op een bepaalde plaats in de matrijs worden verzameld, zodat ze later eenvoudig van het gietstuk kunnen worden verwijderd, maar deze zijn meestal niet zo efficiënt. Het is beter om de oxydevorming zoveel mogelijk te voorkomen.

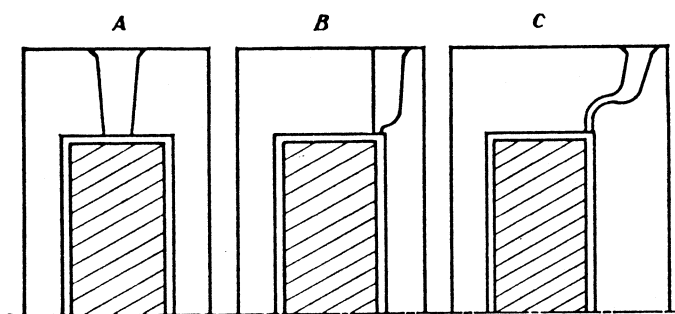
Als er tijdens het gieten turbulentie ontstaat, kunnen er ook poreusheid en insluitsels in het gietstuk voorkomen en de oppervlaktekwaliteit en de mechanische eigenschappen zullen minder goed zijn.

Een goede manier om turbulentie te voorkomen is door de matrijs tijdens het gieten te kantelen. Hierdoor stroomt het vloeibare materiaal rustig langs een wand in de matrijsholte en ontstaan er geen wervelingen.



Figuur 6.7: Het kantelen van de matrijs tijdens het gieten

Er moet altijd voor gezorgd worden dat de vloeistofstroom die uit het gietkanaal in de matrijsholte stroomt niet direct op het tegenoverliggende matrijsoppervlak of op een kern botst. Mogelijkheden hiervoor zijn aangegeven in figuur 6.8. In deze figuur is bij 8.A een slechte constructie aangegeven en zijn in de figuren 8.B en 8.C verbeteringen aangegeven.



Figuur 6.8: Het voorkomen van botsing van de vloeistofstroom met de matrijswand bij het binnenstromen van de matrijsholte

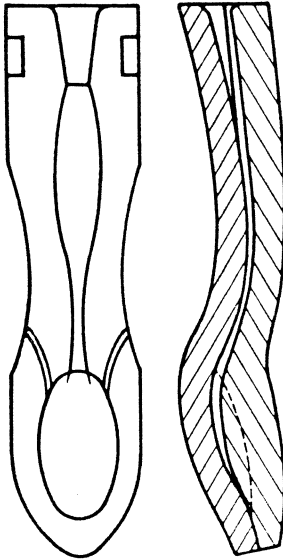
De turbulentie kan ook worden verminderd worden door een goed ontwerp van het gietsysteem en een goede giettechniek. Wanneer er goed wordt gegoten heeft de stroom vloeibaar materiaal die van de gietlepel komt dezelfde diameter als de opening van het verticale gietkanaal.

De doorsnede van het verticale kanaal wordt naar beneden toe langzaam kleiner, waardoor de snelheid van het materiaal naar beneden toe zal toenemen en het kanaal steeds vol blijft. Hierdoor kan er geen lucht in het kanaal gezogen worden. Bovendien wordt de druk op de plaats waar het materiaal in de matrijsholte stroomt op deze manier groter.

Gietmethoden

Het is het beste om de matrijsholte zo te vullen dat de stolling kan beginnen in de delen die het verste van de gietopening liggen. Het stollen moet vervolgens plaatsvinden in de richting van de gietopening zodat de delen die het laatst hard worden nog kunnen worden gevuld.

De matrijsholte kan op drie manieren worden gevuld, namelijk door het er direct boven in te gieten of door het via een gietkanaal aan de zijkant of onder in de matrijs te brengen.

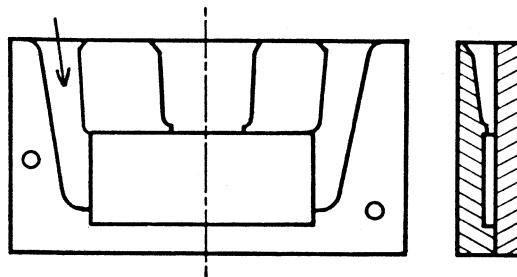


Bij het gieten *aan de bovenkant* van de matrijs loopt het gietkanaal meteen bovenin de holte. Deze methode wordt het meest toegepast, omdat op deze manier het best een stolling van onder naar boven is te realiseren. Er zijn helemaal geen opkomers nodig, omdat het gietkanaal als zodanig kan fungeren.

Het gieten moet heel voorzichtig gebeuren omdat er een grote kans is dat er turbulentie en luchtinsluitels ontstaan, doordat het metaal door de holte naar beneden valt en opspat van de bodem. Deze methode wordt dan ook vooral toegepast bij holten die niet zo diep zijn of bij dunwandige producten die bijna meteen zijn gestold. Bij diepere matrijzen is het mogelijk om de matrijs tijdens het gieten te kantelen zoals in figuur 6.6 al werd aangegeven.

Figuur 6.9: Voorbeeld van het vullen van de holte via de bovenkant

Het aangieten van de gietstukken *via de zijkant* wordt veel toegepast voor lichte legeringen. Op deze manier kan de stolling van onder naar boven redelijk goed geregeld worden. Omdat de gietkanalen iets later stollen dan het gietstuk kunnen ze ook als opkomers dienen. Een nadeel van deze manier van gieten is dat de matrijs asymmetrisch wordt verhit. Dit kan worden opgelost door tegenover het gietkanaal een opkomer te plaatsen met dezelfde vorm en deze om de beurt als gietkanaal te gebruiken (figuur 6.10).

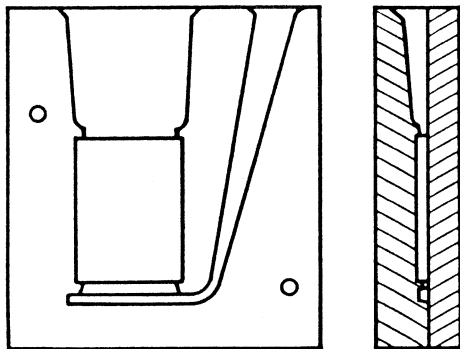


Figuur 6.10: Voorbeeld van het vullen van de holte via de zijkant

Wanneer de matrijsholte met een bodemaangieting *van onderaf* wordt gevuld, stijgt het metaalniveau in de holte heel geleidelijk en ontstaat er weinig turbulentie. Bovendien wordt de lucht door het stijgende niveau boven uit de matrijsholte gedreven. Een nadeel van deze methode is dat het

materiaal in de verkeerde richting stolt. Hierdoor bestaat het gevaar dat het materiaal gestold is voordat de matrijs tot bovenaan is gevuld. Om te zorgen dat toch de hele holte gevuld wordt, moet het materiaal heter zijn dan normaal. Hierdoor bestaat echter de kans op oververhitting van de matrijs en op oxydatie. Deze methode wordt vaak toegepast bij het zandgieten, omdat zand een lagere temperatuurgeleidingscoëfficiënt heeft. Om dezelfde reden wordt het ook wel bij coquillegieten gebruikt wanneer er van zandkernen gebruik wordt gemaakt.

Het vullen via de onderkant wordt tegenwoordig vaker toegepast omdat het de mogelijkheid biedt om de vloeibare massa uit de oven in de matrijs te brengen door de holte vacuüm te zuigen.



Figuur 6.11: Voorbeeld van het vullen van de holte via de onderkant

Temperatuur

Om te zorgen dat er gietstukken van een constante kwaliteit worden geproduceerd, moet er aandacht worden besteedt aan de kwaliteit van de smelt en de temperatuur.

Om een gietstuk met goede mechanische eigenschappen te krijgen moet de smelt vrij zijn van gassen en insluitels. Bovendien moet deze op een constante temperatuur worden gehouden.

De temperatuur van zowel het vloeibare materiaal als de matrijs moet in de gaten worden gehouden, omdat deze een directe invloed hebben op de kwaliteit van het gietstuk, de produktiviteit en de levensduur van de matrijs. Als regel kan worden aangehouden dat de temperatuur van de matrijs altijd relatief hoog moet zijn en dat het gietmetaal op de laagste temperatuur moet worden gehouden waarbij het de matrijs nog helemaal zal vullen. Wanneer de temperatuur van de matrijs relatief hoog wordt gehouden, zal het materiaal verder vloeien voordat het begint te stollen. Welke temperatuur moet worden aangehouden voor de matrijs en het materiaal hangt af van veel verschillende omstandigheden en kan alleen worden bepaald door het uit te proberen. In figuur 6.12 staat voor enkele legeringen aangegeven welke temperaturen de matrijs en het materiaal ongeveer moeten hebben.

Legering	Temperatuur (°C)	
	Materiaal	Matrijs
Aluminium	650	350
Koper-aluminium	1075	400
Messing	970	125
Gietijzer	1325	275

Figuur 6.12: Optimale materiaal- en matrijstemperatuur voor verschillende legeringen

Machines

Kleine aantallen gietstukken worden meestal handmatig gegoten en uit de matrijs gehaald. Bij hogere temperaturen en grotere aantallen gietstukken wordt het proces meestal gemechaniseerd.

De machines die gebruikt worden bij het coquillegieten kunnen handmatig of automatisch bediend worden. De belangrijkste inrichtingen die op de machine zijn aangebracht zijn die voor het openen en sluiten van de matrijs en eventueel voor het uitstoten van het gietstuk. Ook het verwijderen van de kernen kan automatisch gedaan worden.

Soms moeten gietstukken tijdens het gieten worden gekanteld of moeten ze worden gegoten met de deellijn in de horizontale stand, terwijl het uitnemen beter kan gebeuren met de deellijn verticaal. In dat geval moet op de machine de mogelijkheid zijn aangebracht om de matrijs tussentijds te kantelen. Dit kan door de matrijs op een frame te plaatsen dat rust op twee steunpunten waarover het kan kantelen. Er zijn enkele aanslagen aangebracht waarmee de uitwijking waarover gekanteld wordt, kan worden ingesteld. Het kantelen kan zowel met handbediening als automatisch gebeuren.

6.4 ONTWERPRICHTLIJNEN

Legeringen

De meeste gietstukken worden gemaakt van aluminium-, koper- en magnesiumlegeringen, maar ook gietijzer en zinklegeringen kunnen met behulp van het coquillegietsproces worden verwerkt.

Lossingshoek

Om te zorgen dat de gietstukken eenvoudig uit de matrijs kunnen worden verwijderd, moet er een kleine lossingshoek worden aangebracht. Bij toepassing van magnesiumlegeringen is deze het grootst. De lossingshoek moet dan liggen tussen de 5 en de 10°.

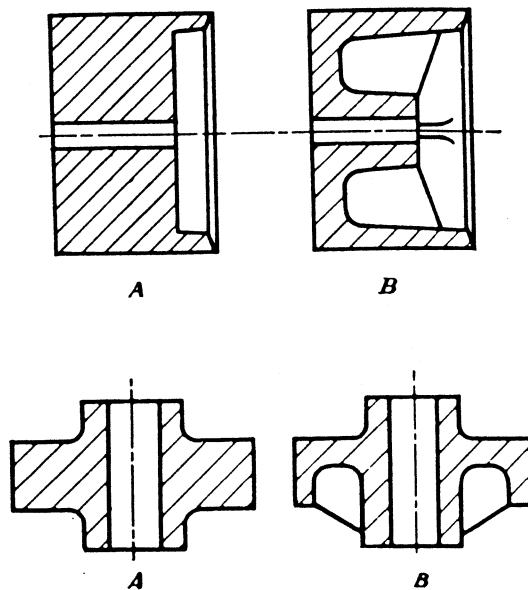
Grootte van de gietstukken

In het algemeen zijn de gietstukken die met behulp van coquillegieten worden gemaakt niet zwaarder dan 70 kg bij gebruik van aluminiumlegeringen, 25 kg bij magnesiumlegeringen, 15 kg bij gietijzer en 9 kilo bij koperlegeringen.

Wanddikte

Het coquillegieten is niet zo geschikt voor het gieten van dunwandige produkten. Dunwandige delen stollen te snel waardoor de dikkere delen niet meer bijgevuld kunnen worden. Hier kan poreusheid ontstaan. Er moet voor de wanddikte een minimum van 5 mm worden aangehouden.

Wanneer er een te groot verschil in wanddikte bestaat, kunnen er door het verschil in krimp inwendige spanningen en scheurtjes ontstaan. Dit heeft een slechte uitwerking op de mechanische eigenschappen van het gietstuk. Een te grote wanddiktevariatie moet zoveel mogelijk voorkomen worden. Een eenvoudige manier om de wanddikte te reduceren, is door het produkt uit te hollen, zoals te zien is in figuur 6.13. Wanneer dit niet zomaar mogelijk is omdat het gietstuk anders niet sterk genoeg meer is, kan er gebruik worden gemaakt van versterkingsribben of inserts van een sterker materiaal.



Figuur 6.13: Het uithollen van een produkt om dikke delen te voorkomen

Gaten

De minimale diameter van gaten die met een kern worden gemaakt, is 6 mm.

Toleranties

De nauwkeurigheid waarmee maten bereikt kunnen worden, is afhankelijk van de matrijskwaliteit en het toegepaste materiaal. Voor matrijs-gebonden maten liggen de toleranties tussen $\pm 0,25$ mm en ± 4 mm op de deellijn.

Oppervlakteruwheid

De ruwheid van het oppervlak van het gietstuk is afhankelijk van de matrijsafwerking, de matrijscoating, de temperatuur en het gietmateriaal. De waarde ligt meestal tussen de 3,2 en de 6,3 μm .

LITERATUUR

Bradley, E.F.

High performance castings - A technical guide
ASM International, 1989.

Clegg, A.J.

Precision casting processes
Pergamon press, 1991.

Harocopos, B.

The technology of gravity die casting
Hart publishing company, 1968.

Hoofdstuk 7: LAGE-DRUK-GIETEN

7.1 INLEIDING

Het lage-druk-gieten is een gietproces waarbij gebruik wordt gemaakt van een permanente matrijs. Het ligt tussen het coquillegieten en het spuitgieten.

Bij het lage-druk-gieten is de matrijs boven de oven geplaatst waarin het materiaal wordt verwarmd. Het vloeibare materiaal wordt met een kleine overdruk rechtstreeks vanuit de oven in de matrijs gebracht. Hierbij wordt de druk nauwkeurig in de gaten gehouden, zodat de matrijs heel geleidelijk en rustig wordt gevuld. Lucht en gassen kunnen hierdoor uit de matrijs ontsnappen. Door de aanwezige druk ontstaat er een gietstuk met goede materiaaleigenschappen.

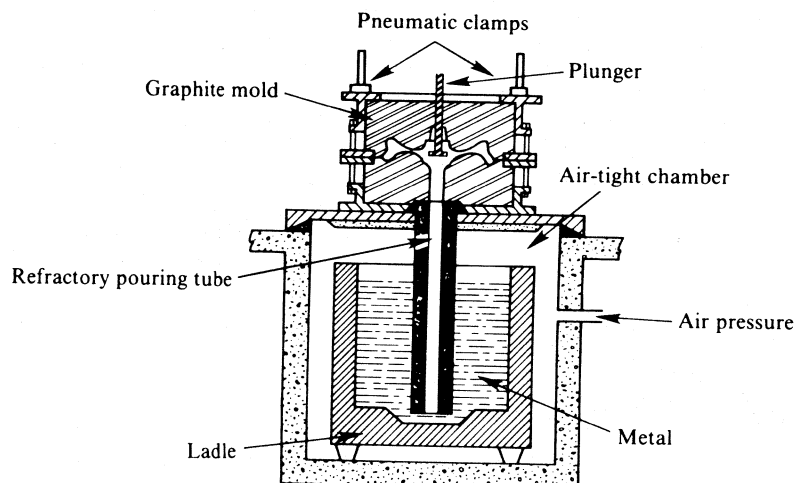
Toepassingen

Hoewel het principe van het lage-druk-gieten al in het begin van deze eeuw is ontwikkeld, wordt het pas sinds de vijftiger jaren op grotere schaal toegepast. Het proces wordt hoofdzakelijk gebruikt voor de vervaardiging van aluminium en magnesiumlegeringen. De belangrijkste toepassingen zijn te vinden in de auto-industrie. Typische voorbeelden zijn cilinderkoppen en -blokken, inlaatspruitstukken en autowielen.

Met het lage-druk-gieten worden ook treinwielen van staal gegoten. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een permanente grafietmatrijs.

7.2 HET GIETPROCES

Een opstelling voor het lage-druk-gieten bestaat uit een oven met een metaalreservoir, een matrijs en inrichtingen voor het openen en sluiten van de matrijs, het uitstoten en het bewegen van het vloeibare materiaal. Zoals is te zien in figuur 7.1 is de matrijs boven de oven geplaatst.



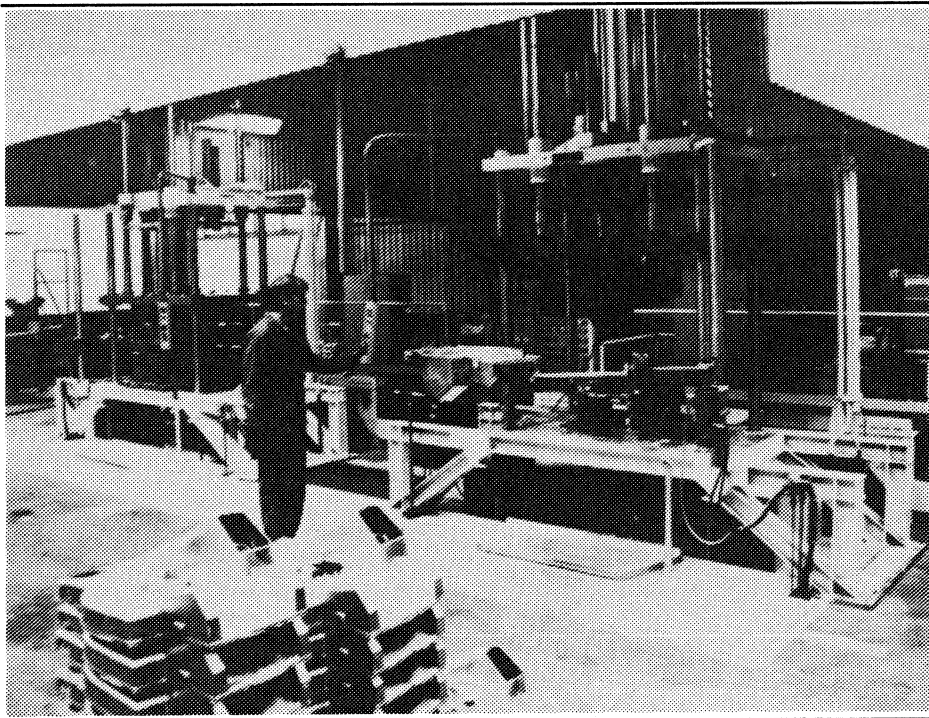
Figuur 7.1: Een voorbeeld van een opstelling voor het lage-druk-gieten

Door de oven onder een geringe overdruk (0,3 tot 1,0 bar) te brengen zal het vloeibare materiaal door een stijgbuis in de matrijsholte stromen. Deze druk wordt geleverd door lucht of een inert gas in de oven te brengen. De oven moet dus luchtdicht afgesloten kunnen worden. Terwijl het materiaal de matrijs in stroomt, ontsnapt de aanwezige lucht door de ontluuchtingskanalen. Het is ook mogelijk om het drukverschil aan te brengen door de matrijsholte van boven af vacuüm te zuigen.

Het koudste metaal bevindt zich aan de bovenzijde van de matrijs en de stolling zal dus ook daar beginnen en zich verplaatsen in de richting van de gietopening. Het is belangrijk dat de diameter van de gietopening groot genoeg is, zodat het materiaal hier later stolt dan in het gietstuk. Meestal is de diameter van deze opening ongeveer 25 mm. Ook de plaats van de gietopening op het gietstuk moet goed gekozen worden. Wanneer de matrijsholte is gevuld, wordt de druk nog aangehouden tot het gietstuk helemaal is gestold, zodat het gietkanaal kan dienen als opkomer. Doordat geen extra opkomers nodig zijn, kan het materiaalverlies worden beperkt. De tijd die nodig is voor de nadruk zorgt natuurlijk wel voor een verlenging van de cyclustijd.

Nadat het gietstuk helemaal is gestold, wordt de druk weggenomen en stroomt het materiaal uit de stijgbuis terug in het reservoir, zodat het voor het volgende shot kan worden gebruikt. De matrijs kan nu worden geopend om het gietstuk te verwijderen. Dit gebeurt meestal met behulp van uitstoterpennen die het gietstuk uit de bovenste matrijshelft stoten wanneer deze naar boven wordt bewogen.

De matrijshelften moeten met voldoende kracht worden gesloten, om de druk van het vloeibare materiaal te weerstaan. Omdat de druk niet zo hoog is, is er nauwelijks kans op braamvorming.



Figuur 7.2: Foto van een opstelling voor het lage-druk-gieten

7.3 GEREEDSCHAP

Matrijs

De matrijs die gebruikt wordt bij het lage-druk-gieten bestaat, net als bij het coquillegieten, meestal uit twee helften.

Omdat de druk waarmee gewerkt wordt relatief laag blijft, wordt er meestal gebruik gemaakt van matrijzen van gietijzer. Dit is een relatief goedkoop materiaal dat gemakkelijk is te bewerken. Voor de productie in grotere series of voor de productie van complexe gietstukken kan er gebruik worden gemaakt van inserts van gereedschapstaal in de matrijs. Bovendien kan gereedschapstaal worden gebruikt voor die delen van de matrijs die sterk aan slijtage onderhevig zijn.

Om de levensduur te verlengen kan er, net als bij het coquillegieten, gebruik worden gemaakt van een coating van vuurvast materiaal. Het gebruik van deze coating heeft ook een positief effect op de oppervlaktekwaliteit van de gietstukken. De gemiddelde levensduur van een matrijs voor het lage-druk-gieten is ongeveer 50.000 stuks.

Er moet bij de constructie van de matrijs rekening worden gehouden met de plaats van de gietopening, de ontluchting van de matrijsholte en een inrichting voor het uitstoten van het gietstuk.

Voor het gieten van niet-lossende delen kan gebruik worden gemaakt van metalen kernen. Om gietstukken te maken met een grotere complexiteit kan er ook gebruik worden gemaakt van zandkernen.

Wanneer de metalen matrijs wordt vervangen door een vorm uit zand kunnen met deze methode ook gietijzeren gietstukken worden gegoten. De kwaliteit van de gietstukken is dan hoger dan bij het normale zandgietwerk. Dit weegt op tegen de langere produktietijd en de hogere produktiekosten die daarvan het gevolg zijn.

Stijgbuis

Omdat de stijgbuis bijna constant in contact staat met het vloeibare materiaal moet deze gemaakt zijn van een hittebestendig materiaal met een hoge thermische schokvastheid. Meestal wordt net als voor de matrijs gebruik gemaakt van gietijzer waarop een coating is aangebracht.

7.4 ONTWERPRICHTLIJNEN

Lossingshoek

In het algemeen is een lossingshoek van 2 tot 3° voldoende.

Grootte van de gietstukken

Het proces wordt vooral gebruikt voor aluminium gietstukken met een gewicht tussen de 5 en de 25 kg, maar het kan ook voor lichtere of zwaardere gietstukken gebruikt worden.

Wanddikte

Dunne delen van een gietstuk kunnen het beste 3,5 tot 4,5 mm dik worden gemaakt, maar dunner is eventueel wel mogelijk. De minimaal te gieten wanddikte bedraagt echter 2 mm. De mogelijkheden zijn dus meer beperkt dan bij het spuitgieten.

Gaten

Wanneer er in een gietstuk gaten zitten die met behulp van metalen kernen worden meegegoten, moeten deze minimaal een diameter van 6 mm hebben.

Oppervlakteruwheid

De waarden voor de ruwheid van de oppervlakte liggen tussen die voor coquillegieten en spuitgieten en kunnen variëren van 1,6 tot 6,3 μm .

Detailering

De weergave van details is weliswaar goed, maar niet zo goed als bij het spuitgieten.

Maatnauwkeurigheid

Voor matrijs-gebonden maten die kleiner zijn dan 25 mm is de haalbare tolerantie ongeveer $\pm 0,35$ mm. Hierbij moet 0,08 mm worden opgeteld voor iedere 25 mm extra. Voor niet-matrijs-gebonden maten moet een grotere tolerantie worden aangehouden.

7.5 KOSTPRIJS

Doordat de matrijs voor het lage-druk-gieten minder gecompliceerd is dan een matrijs voor het spuitgieten, is deze vaak goedkoper. De kosten voor het vervaardigen van een matrijs voor het lage-druk-gieten liggen ongeveer tussen één derde en de helft van de kosten van een spuitgietmatrijs. Beneden een seriegrootte van 5000 stuks is toepassing van het proces meestal niet rendabel.

De cyclustijd kan variëren van 2 tot 16 minuten. Bij de vervaardiging van een autowiel duurt één cyclus ongeveer 4 minuten.

LITERATUUR

Bradley, E.F.

High performance castings - A technical guide
ASM International, 1989.

Clegg, A.J.

Precision casting processes
Pergamon press, 1991.

Niebel, B.W., A.B. Draper en R.A. Wysk

Modern Manufacturing Process Engineering
McGraw-Hill, 1989.

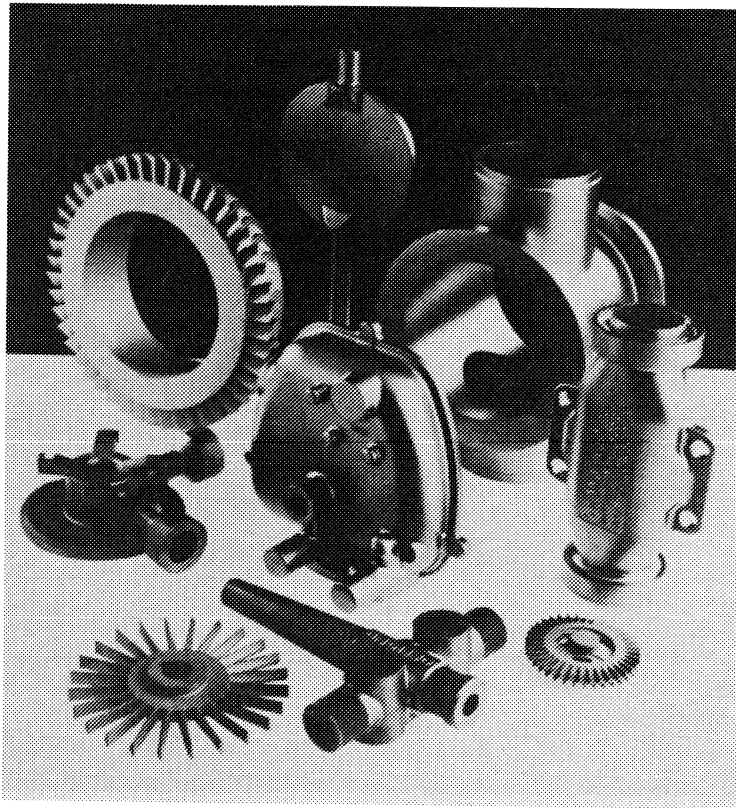
Hoofdstuk 8: VERLOREN-WAS GIETEN

8.1 INLEIDING

Het verloren-was gieten is van belang voor de industrieel ontwerper, omdat het mogelijkheden voor de vormgeving heeft die met andere gietprocessen niet zijn te realiseren. Met behulp van de verloren-was methode kunnen zeer ingewikkelde en maatnauwkeurige producten worden gemaakt van hoogsmeltende legeringen.

Ook kan het proces voor sommige toepassingen concurreren met het smeed-proces.

Producten die met behulp van de verloren-was methode zijn gegoten worden op veel verschillende plaatsen toegepast, zoals voor vliegtuig-, auto- en elektronica-onderdelen, protheses en handgereedschappen. Enkele voorbeelden van dergelijke producten staan in figuur 8.1.



Figuur 8.1: Voorbeelden van produkten die gemaakt zijn met de verloren-was methode

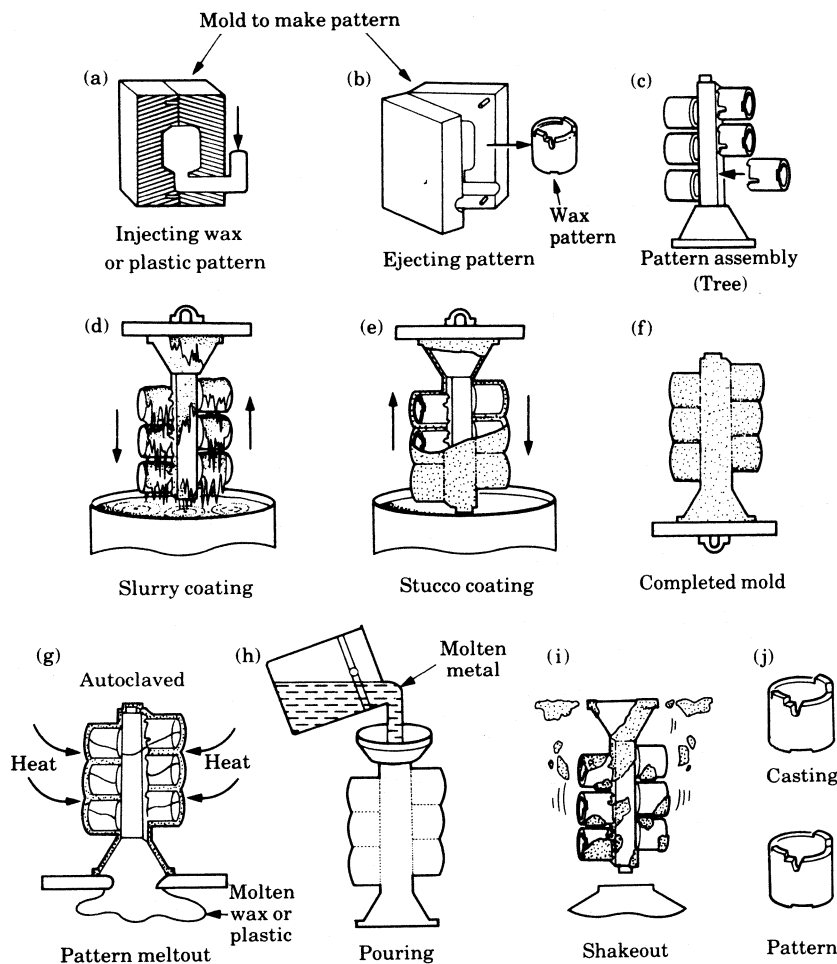
Het verloren-was gieten wordt al vele millenia lang toegepast. De oudst bekende toepassing van dit proces dateert uit het jaar 4500 voor Christus, toen er in Thailand al produkten op deze manier werden gemaakt. Ook in de oude beschavingen uit Mesopotamië, China en Griekenland werd het proces gebruikt. De industriële toepassing van het verloren-was gieten is pas sinds 1930 in ontwikkeling. Doordat het proces geschikt was voor de vervaardiging van onderdelen van vuurwapens en vliegtuigmotoren werd deze techniek in de jaren veertig steeds meer toegepast. Tegenwoordig wordt het veel

gebruikt voor hoogwaardig gietwerk in de apparatenbouw en de fijnmechanische techniek. Ook de schoepen van gasturbines worden met deze methode gemaakt.

8.2 PROCES

Veel gietmethoden vereisen een lossend model dat opnieuw kan worden gebruikt, nadat het uit de vorm is genomen. Zoals de naam al aanduidt, ligt dat bij het gieten met een verloren-was model anders.

Bij het verloren-was proces wordt uitgegaan van een matrijs van staal of aluminium, die gewoonlijk met verspanende bewerkingen wordt gemaakt. De matrijs is een nauwkeurige weergave van het te vervaardigen produkt. Met deze matrijs wordt een groot aantal identieke modellen gemaakt van was of kunststof. De productiesnelheid hangt af van de grootte en de complexiteit van het produkt.



Figuur 8.2: Het verloren-was proces

Het model gaat tijdens het proces verloren, zodat telkens een nieuw model gemaakt moet worden. Dit lijkt omslachtig, maar er staat een groot aantal voordelen tegenover, zoals de grote vormvrijheid, de grote maatnauwkeurigheid, de goede detaillering en de grote vrijheid in legeringskeuze.

Bij het basisproces van het verloren-was gieten worden de volgende stappen doorlopen:

- Het bereiden van de was;
- Het maken van wasmodellen van het produkt met behulp van een nauwkeurige matrijs;
- Het samenstellen van een gietboom uit meerdere modellen;
- Het maken van een gietvorm om de gietboom;
- Het verhitten van de gietvorm, zodat de was smelt en de vorm hard wordt, hierbij ontstaat de vormholte;
- Het gieten van het metaal in de gietvorm;
- Het verwijderen van de gietvorm;
- Het afwerken van de produkten.

8.3 HET BEREIDEN VAN DE WAS

De meeste modellen worden nog steeds van was gemaakt, hoewel er tegenwoordig kunststof modellen kunnen worden gemaakt met behulp van hoge-druk spuitmachines. Het materiaal voor het model moet zorgvuldig worden gekozen, om te verzekeren dat het reproduceerbare eigenschappen heeft.

De was, die gebruikt wordt om de modellen van te maken, is een combinatie van verschillende componenten, zoals natuurlijke en synthetische was, natuurlijke en synthetische hars, organische vulmiddelen en water. Door de verhouding waarin deze ingrediënten worden samengevoegd te variëren, kunnen de materiaaleigenschappen zoals het smeltpunt, de viscositeit, uitzetting en krimp, stollingssnelheid en de hardheid geregeld worden.

Waskeuze

Welke was het beste gekozen kan worden, hangt af van de specifieke toepassing. Het belangrijkste is dat de was uit de matrijs kan worden gesmolten zonder dat er wasresten, as of stof achterblijven. In de figuur 8.3 staat per procesfase aangegeven welke eigenschappen van invloed zijn.

In plaats van was kan ook een kunststof, zoals polystyreenschuim, worden gebruikt voor het model. Doordat dit materiaal sterker is, wordt het vaak toegepast bij dunwandige modellen. Een probleem bij de toepassing van een kunststof model is dat de gietvorm sneller breekt wanneer het model verwijderd wordt, omdat de kunststof hierbij iets uit kan zetten.

Procesfase	Belangrijke eigenschappen
Was spuiten	Smeltpunt, vloeibaarheids-eigenschappen, mogelijkheid om details te reproduceren, oppervlakte-eigenschappen en bereidingstijd
Bewerken, assembleren	Gladheid, sterkte, slagvastheid, stabiliteit, mogelijkheid om delen aaneen te smelten
Maatbeheersing	Thermische uitzetting/krimp, stollingslink, stabiliteit, vervorming, neiging tot het ontstaan van gaten
Matrijs maken	Sterkte, weerstand tegen oplos- en bindmiddelen, gevoeligheid voor vochtname
Matrijs ontwassen en uitstoken	Smeltpunt, viscositeit, thermische uitzetting, thermische geleiding
Diversen	Kosten, beschikbaarheid, recyclebaarheid, giftigheid, milieufactoren

Figuur 8.3: Aspecten die van invloed zijn op de keuze van de was

Toevoegingen

Om de stijfheid en sterkte van de was te verbeteren worden er vaak kunststoffen toegevoegd. Vooral polyethyleen wordt veel toegepast omdat het gebruikt kan worden in combinatie met veel verschillende wassoorten. De hoeveelheid kunststoffen die kan worden toegevoegd, is beperkt omdat de kunststoffen visceus zijn op de verwerkingstemperatuur van de was.

Doordat de was tijdens het afkoelen iets krimpt, kunnen er gaten in het oppervlak ontstaan. Deze gaten kunnen voorkomen worden door harsen of vulmiddelen te gebruiken.

De harsen zijn bij de verwerkingstemperatuur vloeibaar. Er zijn veel soorten hars te gebruiken, zowel natuurlijke als synthetische. Bij de keuze van de hars moet er op worden gelet dat deze samen met de was gebruikt kan worden. Bovendien zijn het smeltpunt en de relatie tussen viscositeit en temperatuur van belang.

De meeste vulmiddelen zijn niet vloeibaar bij de verwerkingstemperatuur. Omdat de vulmiddelen tijdens het hele proces vast blijven, slinken ze niet. Hierdoor wordt het wasmengsel beter maarvast wanneer er meer vulmiddelen aan toegevoegd zijn. Het meest gebruikte vulmiddel is polystyreenschuim.

Een voorbeeld van de samenstelling van de was is te zien in figuur 8.4. Met 'Overigen' worden de kleurmiddelen (om de verschillende modellen uit elkaar te houden), oliën (om de spuuteigenschappen te verbeteren) en koolstof (om de afkoelingslink te verminderen) bedoeld.

Ingrediënt	Percentage
Was (meestal enkele soorten)	30 tot 70 %
Harsen (meestal één of twee)	20 tot 60 %
Kunststof (één)	0 tot 20 %
Overigen	0 tot 5 %

Figuur 8.4: Samenstelling van de was

Het smelten van de was

Bij het smelten van de was moet men zorgvuldig te werk gaan. De was mag nooit oververhit raken, omdat sommige bestanddelen hierdoor kunnen oxyderen. Bovendien kan de was hierdoor bros worden en kunnen de spuitkarakteristieken zoals die in figuur 8.3. genoemd worden, verslechteren. De was kan tijdens het smelten het best op een temperatuur tussen de 80 en de 90°C gehouden worden. Tijdens het smelten moet de was continu omgeroerd worden. Hierdoor blijft de temperatuur in het hele smeltbad ongeveer gelijk en komen er nergens oververhitting of beschadigingen aan de was voor.

Om te zorgen dat de was een homogeen mengsel vormt, moet deze gedurende een paar uur voor het gieten op de juiste spuittemperatuur worden gehouden.

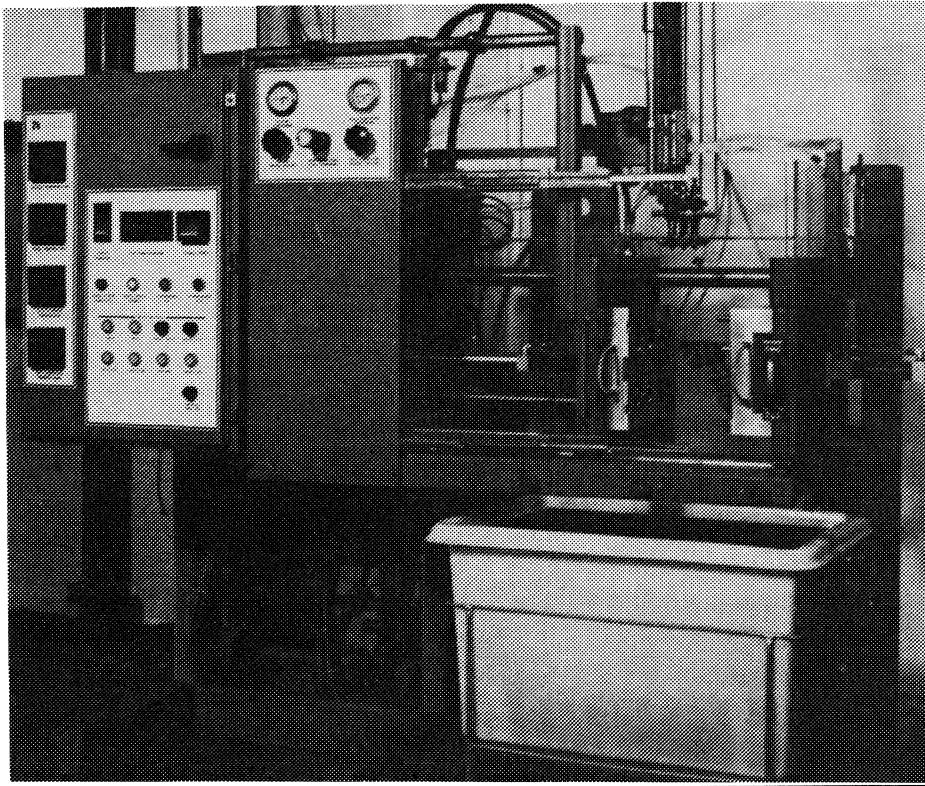
8.4 HET MAKEN VAN EEN WASMODEL

Om een wasmodel te maken worden er eerst verschillende onderdelen van het produkt gespoten. Deze onderdelen moeten allemaal lossend zijn. Vervolgens wordt met deze onderdelen een wasmodel samengesteld.

Het spuiten van de was

De was wordt onder druk in de matrijs van staal of aluminium gespoten. Hierbij kan de was vloeibaar of pasteus zijn. Wanneer de temperatuur daalt, stijgt de viscositeit van de was en is er een grotere druk nodig om de was in de matrijs te spuiten. Meestal wordt de was in de vloeibare fase gespoten, ondanks de problemen die daar aan verbonden zijn. Het eerste probleem is de krimp, die toeneemt met de stijgende temperatuur van de was. Dit probleem kan gedeeltelijk worden opgelost door vulmiddelen te gebruiken. Het tweede probleem is het voorkomen van luchtinsluitels die ontstaan door de wervelingen van de vloeibare was. Dit probleem kan worden beperkt door de inspuitnelheid volgens een goed beheerst programma te laten verlopen.

De belangrijkste variabelen die men tijdens het proces in de gaten moet houden zijn de temperatuur van de was en de spuitneus, de spuitdruk, de sluitdruk van de matrijs en de vloeistofstroom.



Figuur 8.5: Een opstelling voor het spuiten van was

Het samenstellen van het model

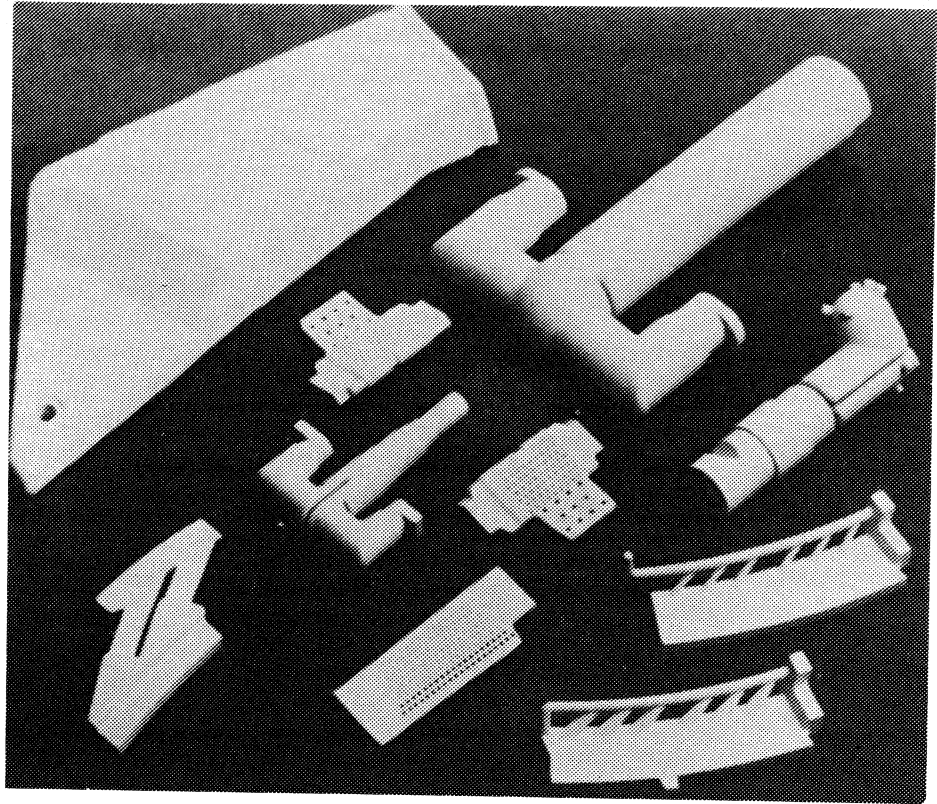
In het ideale geval wordt het wasmodel in één keer gegoten, maar vaak is dit niet mogelijk.

Als het gietstuk te gecompliceerd wordt, moet het model uit meerdere onderdelen worden opgebouwd. Het is mogelijk om op verschillende plaatsen in het produkt gebruik te maken van verschillende wassoorten. Zo kan op de plaatsen waar veel detaillering nodig is een iets zachtere, beter vormbare was gebruikt worden.

Ook kunnen kernen gebruikt worden. Deze worden meestal van een keramisch materiaal gemaakt. De kernen worden in de matrijs geplaatst en de was wordt er dan omheen gegoten.

Meestal wordt het model gemaakt met een klein stuk van het gietkanaal er aan. Meerdere van deze modellen worden samengevoegd met een centraal gietkanaal, de opkomers en een gietkom, die ook van was zijn gemaakt. Vaak kan voor deze onderdelen gebruik worden gemaakt van standaardvormen. Voor de constructie van gietkanalen en opkomers gelden de regels, zoals die ook voor andere gietprocessen gelden.

De wassen modellen worden samengevoegd, door deze plaatselijk te smelten en ze dan stevig op elkaar te drukken, zoals bij het solderen gebeurt. Het gebied rond de verbinding moet nog wel worden afgewerkt om te voorkomen dat er gaten of ondersnijdingen ontstaan. Op deze manier ontstaat het uiteindelijke gietmodel, die ook wel de gietboom wordt genoemd. Bij het ontwerpen van het gietkanaal moet er rekening mee worden gehouden dat deze wordt gevuld met metaal dat afval wordt dat van het produkt moet worden verwijderd.



Figuur 8.6: Voorbeelden van keramische kernen

8.5 HET MAKEN VAN DE GIETVORM

Oorspronkelijk werd het samengestelde model in een kuip geplaatst en omgoten met een slurry van vuurvast materiaal. Op deze manier ontstaat een 'blok-gietvorm' uit één materiaal. Dit proces wordt het 'ceramic mold' proces genoemd.

Tegenwoordig maakt men in meer dan 85% van de gevallen gebruik van het 'ceramic shell' proces, waarbij een dunne keramische schaal rondom het model wordt gevormd.

Het ceramic-shell proces

Nadat het samengestelde model is gedroogd en schoongemaakt, wordt het in een keramische slurry gedompeld. De overtollige slurry wordt verwijderd en het oppervlak wordt bestoven met relatief grofkorrelige, vuurvaste deeltjes. Dan wordt deze eerste laag gedroogd. Deze procedure van dompelen, bestuiven en drogen wordt net zo vaak herhaald tot er zich een voldoende dikke laag om het model heeft gevormd. Meestal is deze laag ongeveer 8 millimeter dik. Het slurry-bad bestaat voornamelijk uit twee componenten, namelijk een gelatine-achtig bindmiddel (zoals gehydroliseerd ethylsilicaat) en een vuurvast poeder (zoals aluminiumsilicaat). Soms worden extra ingrediënten toegevoegd om de sterkte van de gietvorm te vergroten, wanneer deze nog niet is uitgehard. Het mengsel moet goed geroerd worden, om opeenhopingen van materiaal te verbreken en het poeder te verspreiden en te bevochtigen. Er moet zolang geroerd worden tot alle lucht uit de slurry is ontsnapt. Procesvariabelen die in de gaten gehouden moeten worden zijn de mengverhouding van de ingrediënten en de viscositeit van de slurry.

De eerste laag die aangebracht wordt is erg belangrijk, omdat hiermee de oppervlaktekwaliteit en de detaillering van het eindproduct worden vastgelegd. Om deze reden kan de samenstelling van deze laag verschillen van die van de volgende lagen.

Een vergelijking van de kenmerken van het blok- en het schaal-proces staat in figuur 8.7.

Kenmerk	Ceramic mold (blok)	Ceramic shell (schaal)
Oppervlakenauwkeurigheid	2 tot 3 μm	1 tot 3 μm
Mogelijke complexiteit	Groot	Zeer groot
Toleranties	Goed tot zeer goed	Zeer goed
Cyclustijd	Kort	Lang
Legeringen	Geen beperkingen	Geen beperkingen
Gietvorm-kosten	Laag	Hoog

Figuur 8.7: Vergelijking van blok- en schaal-proces

Bij beide processen, zowel het blok- als het schaal-proces, wordt de keramische vorm verhit, om de was te laten smelten. Dit moet voorzichtig gebeuren, omdat de was tijdens het verhitten uitzet, zodat er scheuren in de gietvorm kunnen komen. Om deze reden wordt de gietvorm vaak eerst gedurende 16 tot 48 uur gedroogd, voordat men de was smelt, zodat de sterkte al iets toeneemt. Bovendien verhit men de gietvorm van buitenaf, zodat eerst de buitenste laag van de was weg smelt. Het verwijderen van de was duurt ongeveer 15 minuten. De was kan worden opgevangen voor hergebruik.

Wanneer de meeste was uit de gietvorm is gelopen, wordt de gietvorm verhit tot ongeveer 1000°C om de laatste resten was en vocht te verwijderen en om het keramische materiaal te sinteren. Ook wordt de gietvorm zo al op de juiste temperatuur gebracht voor het gietproces.

Het Shaw-proces

Een variatie op het verloren-was gieten zoals dat hiervoor is beschreven is het Shaw-proces. Eigenlijk is dit geen verloren-was proces. Het belangrijkste verschil is dat er nu een soort gel aan de slurry wordt toegevoegd, voordat het model hierin wordt gedompeld. Omdat hierdoor een flexibele gietvorm ontstaat, kan deze eenvoudig van het model worden getrokken. Het model kan van verschillende materialen worden gemaakt, zoals hout, gips of metaal. Doordat het model niet uit de gietvorm wordt gesmolten maar bewaard blijft, kan deze worden hergebruikt.

Meerdere vormen samen worden, wanneer ze zijn uitgehard, gecombineerd tot een gietvorm. Deze gietvorm gaat na het gieten verloren.

Soms worden het Shaw- en het verloren-was proces gecombineerd, om de voordelen van beide processen te combineren.

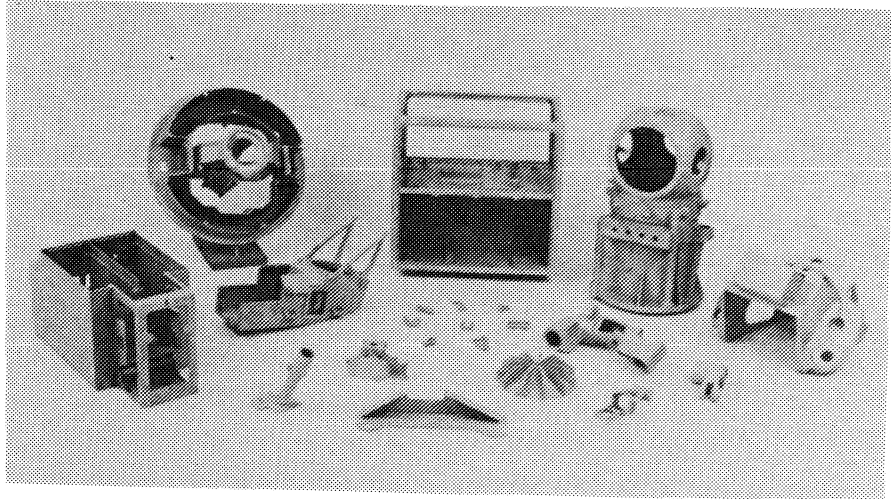
Het Shaw-proces wordt vooral voor zeer ingewikkelde vormen toegepast. Het grote voordeel boven de andere verloren-was technieken is dat het model kan worden hergebruikt.

8.6 HET GIETEN VAN HET METAAL

Bij alle variaties van het verloren-was gieten wordt de gietvorm goed verhit voordat met gieten wordt begonnen. Het metaal wordt gesmolten in vlamboog- of inductie-ovens. Dit gebeurt afhankelijk van de samenstelling van het metaal in lucht, in een inerte atmosfeer of in vacuüm. Legeringen die titanium en aluminium bevatten om het metaal te versterken, moeten gesmolten worden zonder dat er lucht aanwezig is, omdat deze twee metalen in zuivere vorm erg snel reageren. Het gieten kan statisch of roterend gebeuren en zowel met een gietlepel als direct uit de smeltoven. Vaak wordt de luchtdruk gebruikt om te zorgen dat alle details van de gietvorm gevuld worden. Het is bij verloren-was gieten van groot belang dat er op de details wordt gelet, omdat er vaak een glad oppervlak en nauwkeurige toleranties verlangd worden.

Normaal koelen de gietstukken langzaam af in de gietvorm. Soms wordt het afkoelen van de gietstukken nauwkeurig geregeld, om de juiste resultaten zoals structuur en korrelgrootte te bereiken. Als ze zijn afgekoeld, wordt de gietvorm verwijderd door deze kapot te breken.

De gietkanalen worden verwijderd met behulp van een schuurschijf. De plaats waar de gietkanalen aan het produkt hebben gezeten, worden geschuurd tot de gewenste oppervlaktekwaliteit is bereikt. Het gietstuk wordt gereinigd door het te zandstralen.



Figuur 8.8: Voorbeelden van produkten die gemaakt zijn met de verloren-was methode

8.7 ONTWERPRICHTLIJNEN

- Met behulp van de verloren-was methode kunnen bijna alle staal-, non-ferro- en speciale legeringen worden gegoten. Ook hoogsmeltende materialen kunnen zo worden gegoten.

- Hoewel de meeste produkten die op deze manier gemaakt zijn relatief klein zijn, kunnen er produkten tot ruim 300 kilo gemaakt worden.
- Er is zeer nauwkeurig gereedschap nodig voor het vervaardigen van het wasmodel en het maken van de gietvormen kost behoorlijk veel tijd. Hierdoor duurt het proces relatief lang.
- Bij een normaal proces kunnen wanddiktes van minimaal 1,5 millimeter gemaakt worden.
- Een oppervlakteruwheid van 3,2 μm kan eenvoudig bereikt worden. Wanneer het proces goed beheerst wordt, kunnen nog betere waarden worden gehaald.
- Voor gaten die in het produkt worden meegegoten, moet een minimale diameter van 1 millimeter worden aangehouden, waarbij er van wordt uitgegaan dat de diepte van het gat relatief klein is.
- In het algemeen kan worden aangenomen dat de maatafwijking voor lineaire maten ongeveer 0,5% is.

LITERATUUR

Bradley, E.F.

High performance castings - A technical guide
ASM International, 1989.

Clegg, A.J.

Precision casting processes
Pergamon press, 1991.

Kalpakjian, S.

Manufacturing engineering and technology (2nd edition)
Addison-Wesley Publishing company, 1992.

Niebel, B.W., A.B. Draper en R.A. Wysk

Modern manufacturing process engineering
McGraw-Hill, 1989.

Hoofdstuk 9: SINTEREN

9.1 INLEIDING

In de meeste produktie-processen worden de grondstoffen óf vloeibaar óf vast, in een massieve vorm verwerkt. In dit hoofdstuk wordt uitgegaan van een andere vorm voor de grondstof: poederdeeltjes.

Er zijn verschillende processen om het poeder tot een produkt te verwerken, waarvan het pers/sinter proces de meest toegepaste variant is. Het poeder wordt in een matrijs geperst, waarna de poederdeeltjes op hoge temperatuur aan elkaar gesinterd worden door ze te verhitten tot vlak onder het smeltpunt. Dit proces heet *sinteren*. Wanneer dit proces wordt uitgevoerd met metaalpoeders, wordt ook wel de naam *poedermetallurgie* gebruikt.

Produkten, die met het sinterproces gemaakt zijn, hebben een goede maatnauwkeurigheid. Het formaat kan variëren van de kogeltjes van een ball-point tot onderdelen die 50 kg wegen, maar de meeste onderdelen wegen minder dan 2,5 kg.

Het proces werd ontwikkeld aan het begin van deze eeuw. Een van de eerste toepassingen was het vervaardigen van wolfram staven voor de produktie van gloeidraden voor gloeilampen.

Staal en staallegeringen worden verreweg het meest verwerkt. Wereldwijd wordt circa 600.000 ton verwerkt, in Europa zo'n 100.000 ton per jaar.

In Nederland wordt het pers/sinterproces relatief weinig toegepast.

Toepassingen

Vrijwel ieder materiaal kan als een poeder verwerkt worden. Er zijn dan ook zeer veel metalen én niet-metalen waarvoor het sinterproces een geschikte vervaardigingsmethode is.

De meest toegepaste metalen zijn: ijzer, koper, aluminium, tin, nikkel en titanium. Voor onderdelen, gemaakt van messing, brons, staal en roestvrijstaal, worden vorgelegeerde poeders gebruikt, waar ieder poederdeeltje op zichzelf gelegeerd is. In andere gevallen worden poederdeeltjes van zuivere materialen goed door elkaar gemengd.

Het proces wordt veel gebruikt voor de produktie van onderdelen die ook met andere technieken, zoals gieten, smeden en verspanen, vervaardigd kunnen worden. Poedermetallurgie is concurrerend geworden met deze processen, vooral voor relatief complexe produkten met een hoge sterkte en voor het verwerken van harde legeringen met een hoog smeltpunt. In een aantal gevallen is het sinterproces de enige manier waarop bepaalde materialen en mengsels te verwerken zijn.

Eén van de toepassingsgebieden is de verwerking van metalen met een zeer hoog smeltpunt, zoals wolfram, molybdeen en tantaal. Deze materialen kunnen niet gegoten worden: geen matrijs zou bestand zijn tegen de hoge temperatuur van de smelt.

Het is mogelijk om twee of meer metalen die een groot verschil in smeltpunt hebben, samen te voegen. Het is vaak moeilijk om van dergelijke

materialen een legering te maken. Bij het gietproces treedt een zeer grote segregatie op: wanneer het materiaal met het hoogste smeltpunt al lang is gestold tot grote kristallen is het andere materiaal nog vloeibaar. Met het sinterproces blijft in ieder geval één van de componenten in vaste toestand, waardoor de kleine deeltjes blijven bestaan en er dus een fijne structuur ontstaat. Bijvoorbeeld koper en wolfram kunnen zo als poeders gemengd worden. Deze legering heeft de geleidende eigenschappen van koper én de hoge sterkte en hardheid van wolfram. De legering wordt gebruikt voor elektrische contacten en elektroden voor weerstandslas.

Het proces wordt ook gebruikt voor het vervaardigen van technisch en medisch keramiek.

Met het sinterproces kunnen metalen en niet-metalen gecombineerd worden. Men kan een niet-metalen schuurmiddel toevoegen aan een metaalpoeder om schurende oppervlakken te krijgen. Dit wordt bijvoorbeeld toegepast bij koppelingsplaten, remvoeringen en schuurschijven. Een ander voorbeeld zijn hardmetalen gereedschappen. Het materiaal bestaat uit een zeer harde carbide-deeltjes in een bedding van een zachter materiaal. Een van de hardmetalen bestaat bijvoorbeeld uit wolframcarbide en kobalt.

Een gesinterd produkt zal altijd in meer of mindere mate poreus zijn. Door hier gebruik van te maken, kunnen filters en zelfsmurende lagers gemaakt worden. De zelfsmurende lagers worden met olie geïmpregneerd. Een poreuze lager kan 10 tot 40% van zijn gewicht aan olie opnemen. Als het lager door wrijving warm wordt zal het volume van de olie groter worden en op het oppervlak van de lager verschijnen, om daar een smerende laag te vormen. Bij afkoeling wordt de olie weer geabsorbeerd. Deze lagers hebben geen onderhoud nodig.

Gesinterde onderdelen hebben dempende eigenschappen. Hierdoor kunnen ze gebruikt worden om stillere machines te maken.

In figuur 9.1 zijn nog enkele toepassingen genoemd, in figuur 9.2 zijn enkele gesinterde produkten te zien.

Toepassingsgebied	Produkten
Automobielandustrie	Kleppen, tandwielen, lagers.
Elektrisch/elektronisch	Contacten, heat sinks
Lucht- en ruimtevaart	Straalmotoren, hitteschilden
Magnetisme	Magneten, relais
Medisch/tandheelkundig	Implantaten, amalgaamvullingen
Nucleair	Schilden, reflectoren, filters.
Productie	Matrijzen, gereedschappen
Verbinding	Soldeer- en laselektroden
Warmtebehandeling	Ovenelementen, thermokoppels

Figuur 9.1: Enkele toepassingen van het sinterproces



Figuur 9.2: Enkele gesinterde onderdelen

9.2 HET PERS/SINTERPROCES IN STAPPEN

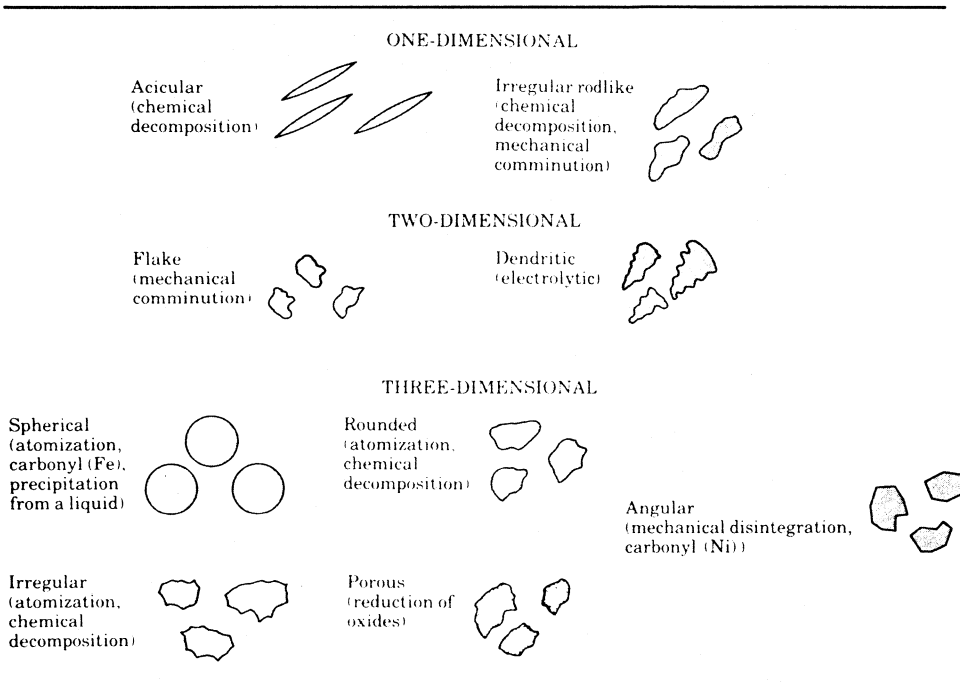
In principe bestaat het proces uit vier stappen:

1. De benodigde poeders worden bereid uit vast of vloeibaar metaal. Vaak kan de grondstof al in poedervorm toegeleverd worden.
2. De poeders worden gemengd tot de gewenste samenstelling en er worden hulpstoffen als smeer- en bindmiddelen toegevoegd.
3. Het poeder wordt samengeperst in een vorm. De ontstane vorm wordt *de groenling* genoemd.
4. De groenling wordt in een oven gesinterd waardoor het materiaal zijn uiteindelijke eigenschappen verkrijgt.

Hierna kunnen nog een aantal nabewerkingen uitgevoerd worden, maar deze zijn niet voor alle producten noodzakelijk.

Stap 1: Poederbereiding

Er zijn verscheidene methoden voor de productie van de metaalpoeders. Als grondstoffen kunnen bulkmetalen, -legeringen, ertsen of zouten genomen worden. De grootte van de deeltjes varieert tussen 0,1 en 1000 μm . De vorm, grootte, groottevariatie, poreusheid, oppervlakte-eigenschappen en zuiverheid van de deeltjes hangen af van het proces waarmee ze gemaakt zijn (figuur 9.3). Deze eigenschappen zijn belangrijk, omdat ze de permeabiliteit en de vloeikarakteristieken tijdens de verdichting en het sinteren beïnvloeden.



Figuur 9.3: Verschijningsvormen van de deeltjes

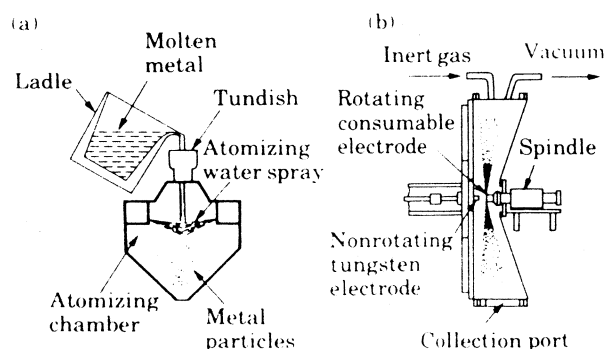
Bolvormige deeltjes laten zich moeilijker samenpersen dan hoekige deeltjes. Deze laatste kunnen eenvoudiger plastisch vervormen en daardoor beter op elkaar aansluiten. Bij het sinteren daarentegen zijn de bolvormige deeltjes in het voordeel doordat zij gemakkelijker samenvloeien. De keuze zal dus een compromis zijn.

De belangrijkste methoden voor de bereiding van het poeder worden hier kort besproken.

Verstuiving

Een gesmolten metaal wordt door een kleine opening geperst zodat er een metaalstroom ontstaat. Deze stroom wordt verstoven door een inert gas, lucht of water (zie figuur 9.4a). De grootte van de gevormde deeltjes hangt af van de temperatuur van het metaal, de stroomsnelheid, de grootte van de spuitmond en de eigenschappen van het verstuivingsgas.

Bij waterverstuiven ontstaan onregelmatig gevormde deeltjes, bij gas- en luchtverstuiven globulaire deeltjes.



Figuur 9.4: Poederbereiding door middel van verstuiving (a) en door rotatie (b)

Bij een variatie op deze methode worden de deeltjes verstoven door centrifugaalkrachten: een smeltbare elektrode roteert snel in een met helium gevulde kamer. De centrifugaalkracht slingert deeltjes van de gesmolten top van de elektrode (zie figuur 9.4b).

Reductie

Bij reductie is het uitgangsmateriaal een (zeer zuiver) metaaloxijde. De metaaloxiden worden gereduceerd (de zuurstof wordt verwijderd). Als reductor worden gassen gebruikt als waterstof en koolstofmonoxyde. Met deze methode worden zeer fijne metaaloxiden gereduceerd tot zuivere metaaldeeltjes. De geproduceerde poeders zijn poreus en hebben een globulaire of hoekige vorm.

Elektrolytische neerslag

Het metaal wordt neergeslagen uit een waterige oplossing of een gesmolten zout. De poeders die met deze methode geproduceerd worden, zijn zeer zuiver.

Vorming uit carbonaat

IJzer- en nikkelpoeders worden vaak gemaakt door de ontbinding uit ijzercarbonaat en nikkelfcarbonaat. De metaal-carbonaten $\text{Fe}(\text{CO})_5$ en $\text{Ni}(\text{CO})_4$, die gasvormig zijn bij de temperatuur waarop het proces wordt uitgevoerd, ontbinden tot koolstofmonoxide en ijzer of nikkel. Er worden meestal globulaire poederdeeltjes gevormd.

Mechanisch verbrijzelen of verpulveren

Brosse metalen kunnen worden vernalen in een kogelmolen of tot kleine deeltjes worden geschuurd. Bij brosse metalen ontstaan hoekige deeltjes. Bij taaie metalen ontstaan schilfers die niet zo geschikt zijn voor poedermetallurgie.

Door de inwerking van de harde kogels smelten de versplinterde poederdeeltjes weer gedeeltelijk samen. Wanneer verschillende metalen tegelijk worden verwerkt ontstaan gelegeerde poeders.

De deeltjes die met deze methode gevormd worden, zijn zo zuiver als het uitgangsmateriaal: verontreinigingen of een eventueel aanwezige oxydehuid blijven in het poeder aanwezig.

Poeders kunnen ook verkregen worden door een blok (gelegeerd) metaal te verspanen.

Stap 2: Het mengen van de poeders

De tweede stap in het proces is het mengen van de poeders.

De belangrijkste en meest voor de hand liggende reden is het samenvoegen van twee of meer legeringscomponenten om een goede en homogene samenstelling van het materiaal te krijgen.

Deze samenstelling zal in de meeste gevallen nog niet geschikt zijn om het pers- en sinterproces goed uit te voeren.

Vaak zullen er *smeermiddelen* toegevoegd worden. De deeltjes geven de perskrachten niet zo goed door als een vloeistof: wanneer in de volgende stap het poeder in een vorm wordt geperst, zal er een verloop in de dichtheid van het poeder ontstaan. De kant waar het poeder door de pers samengedrukt wordt, zal een grote verdichting krijgen maar verder hiervan verwijderd neemt de druk af en zullen de poederdeeltjes minder in elkaar gedrukt worden.

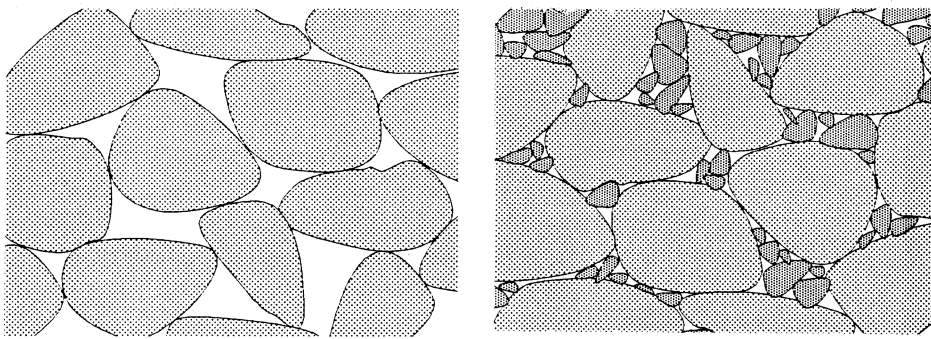
Deze afname van de druk wordt de *drukgradiënt* genoemd. Smering vermindert de wrijving tussen de poederdeeltjes en de drukgradiënt in het poeder. Hierdoor kan het poeder gemakkelijker stromen en gelijkmatiger samengedrukt worden.

De toegevoegde smeermiddelen maken tussen de 0,2 en 1,0 % van het totaalgewicht van het poeder uit. De smeermiddelen verbranden tijdens het sinteren.

Een *bindmiddel* kan toegevoegd worden aan het poeder om de 'groene sterkte' te vergroten. Dit is de sterkte, die het in vorm geperste, maar nog niet gesinterde poeder (de groenling) heeft.

Bindmiddelen worden gebruikt bij poreuze groenlingen, bij heel fijn poeder, of bij poeders met bolvormige deeltjes. Ze maken circa 1 tot 5% uit van het totaalgewicht.

Wanneer alle deeltjes ongeveer dezelfde maat hebben, zullen er behoorlijk grote holten tussen de deeltjes overblijven. Hierdoor zal het poeder en het later produkt *poreus* zijn. Kleinere poederdeeltjes kunnen de holten voor een gedeelte opvullen (figuur 9.5). Vaak zal men ook nog mengen om de maatspreiding van de poederdeeltjes te vergroten. In dat geval worden poeders van hetzelfde materiaal, maar met verschillende korrelgrootte bij elkaar gevoegd.



Figuur 9.5: Het opvullen van holten door kleinere poederdeeltjes

De poeders kunnen gemengd worden in lucht, in een inerte atmosfeer of in een vloeistof. De vloeistof dient als smering, waardoor het mengsel gelijkmatiger wordt.

Het mengen moet onder gecontroleerde omstandigheden gebeuren om verontreiniging, oxydatie en versterking van de deeltjes vermijden.

Oxydatie kan bij de meeste poeders zeer gemakkelijk optreden, de deeltjes hebben immers een zeer groot oppervlak. Daarom zal het mengen in lucht minder vaak voorkomen.

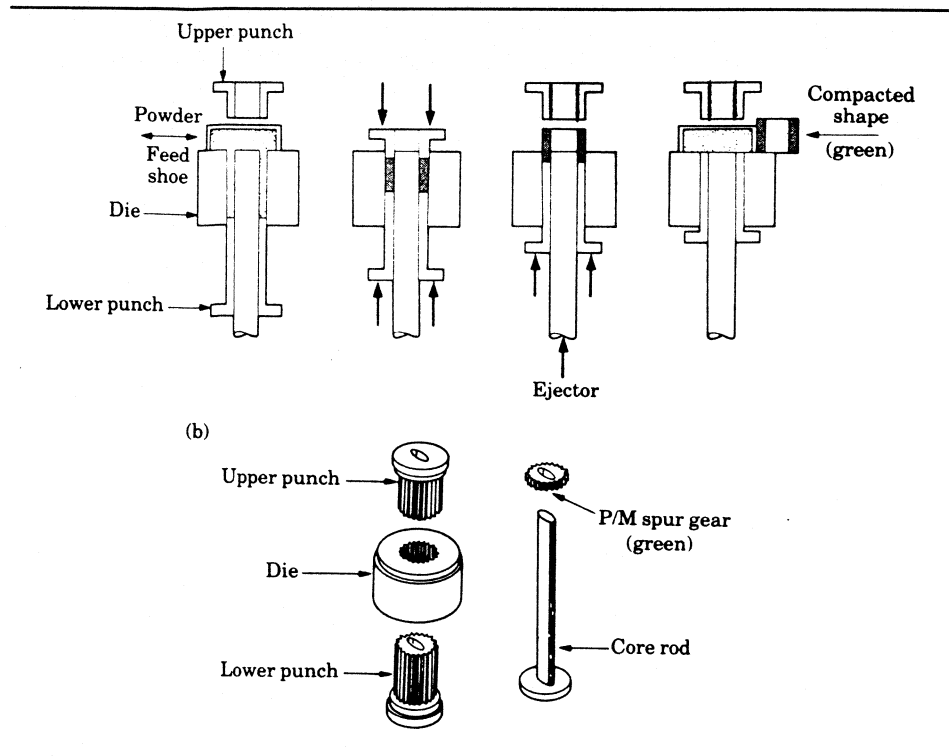
Wanneer de poeders te krachtig worden gemengd, zullen de deeltjes plastisch deformerend. Hierdoor ontstaat versterking en laten de deeltjes zich moeilijker samenpersen.

Stap 3: Het persen

Een volgende fase in het proces is het persen. Dit gebeurt in een matrijs waarvan de holte de vorm van het uiteindelijke produkt heeft. Hierdoor ontstaat de groenling met ongeveer de eindvorm en voor een belangrijk deel de eigenschappen van het produkt (figuur 9.6).

De matrijsholte wordt met een afgemeten hoeveelheid poeder gevuld. Het volume van los poeder ligt tussen de 2 en 10 keer het volume van de geperste groenling, afhankelijk van het materiaal, de vorm van de poederdeeltjes en de gewenste dichtheid.

Het vullen gebeurt gewoonlijk per volume-eenheid, wat de eenvoudigste en snelste methode is.



Figuur 9.6: Principe van het tweezijdig persen

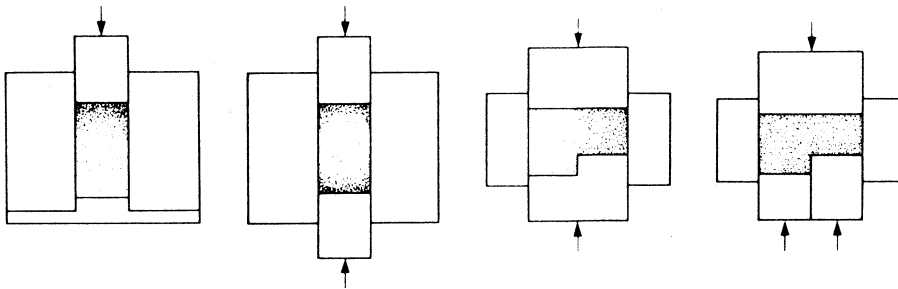
Wanneer de dichtheid van het poeder varieert, of als het gewicht van het produkt binnen nauwe toleranties moet blijven, zal men per massa-eenheid vullen.

Tijdens het persen treden een aantal effecten op:

- De holten tussen de poederdeeltjes worden verkleind. Hierdoor neemt de dichtheid toe.
- Er ontstaan adhesieverschijnselen en koudlassen tussen de poederdeeltjes. De groenling krijgt voornamelijk hierdoor zijn sterkte.
- De poederdeeltjes worden plastisch vervormd. Hierdoor ontstaan grotere contactvlakken tussen de deeltjes en worden de holten verder verkleind, omdat de deeltjes 'passend' worden gemaakt. Door de plastische vervorming kan ook rekristallisatie tijdens het sinteren optreden.

De groenling is na het persen nog erg breekbaar. Toch moet deze sterk genoeg zijn om niet te beschadigen tijdens het uitstoten uit de matrijs en het vervoer naar de sinteroven.

De eenvoudigste en goedkoopste vorm van persen is enkelzijdig (figuur 9.7a). Dit kan toegepast worden voor produkten die zeer eenvoudig en niet te hoog zijn. Door een hoge drukgradiënt zal het persen echter niet gelijkmatig gebeuren: onderaan is de dichtheid van het samengeperste poeder lager dan bovenaan. Dit kan verminderd worden door tweezijdig persen (figuur 9.7b). Voor produkten met niveaueverschillen is dit niet voldoende: het dunne deel wordt meer verdicht dan het dikkere. Door met meerdere stempels aan te drukken wordt het poeder gelijkmatiger verdicht (figuur 9.7c en d). Ook smering van de matrijswand en tussen de poederdeeltjes onderling levert een gelijkmatiger dichtheid op.



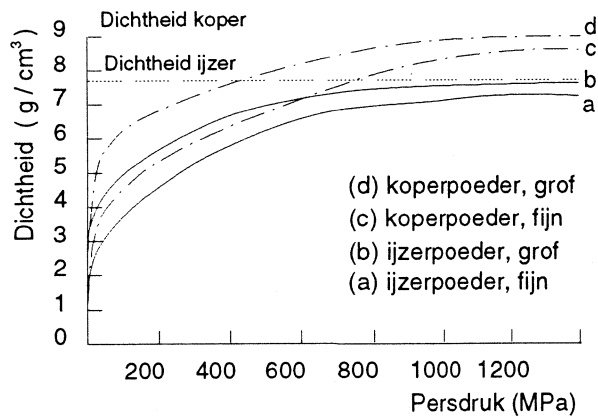
Figuur 9.7: enkel-, tweezijdig en meervoudig persen

Procesdruk

De dichtheid van het samengeperste poeder is afhankelijk van de aangebrachte druk op het werkstuk (figuur 9.8). Een hogere dichtheid betekent een hogere sterkte en E-modulus.

In figuur 9.9 wordt voor enkele materialen de persdruk gegeven.

Om poreuze produkten te maken, wordt de persdruk laag genomen. De hoogste druk is nodig voor zwaarbelaste machine-onderdelen met een grote dichtheid. Deze worden meestal met een nabehandeling zoals slagpersen extra verdicht.



Figuur 9.8: Dichtheid van koper- en ijzerpoeder als functie van de persdruk

Materiaal	Druk op het oppervlak van het werkstuk (MPa)
Aluminium	70-275
Messing	400-700
Brons	200-275
IJzer	350-800
Wolfraam	70-140
Aluminiumoxyde	110-140
Koolstof	140-156

Figuur 9.9: persdrukken voor enkele materialen.

Perskracht

Het persen wordt meestal bij kamertemperatuur uitgevoerd.

De benodigde perskracht is afhankelijk van het materiaal (figuur 9.8), de gewenste verdichting en van de oppervlakte in persrichting van het werkstuk. Nemen we bijvoorbeeld een aluminium produkt, met een benodigde persdruk van 275 MPa en oppervlakte 6500 mm², dan is de benodigde perskracht: $275 \text{ N/mm}^2 \cdot 6500 \text{ mm}^2 = 1,8 \text{ MN}$. Wanneer een pers de gewenste kracht niet kan leveren, kan ook onder hogere temperatuur geperst worden om eenzelfde verdichting te krijgen.

Perssnelheid

De snelheid waarmee het poeder samengeperst wordt, heeft niet veel invloed op het proces. Er is wel een bovengrens aan de snelheid: als deze te hoog is heeft de lucht, die zich in de holten tussen de poederdeeltjes bevindt, geen tijd om te ontsnappen en wordt in de groenling ingesloten. Het sinteren kan dan uitzetting van het werkstuk tot gevolg hebben, in plaats van het krimpen dat normaal optreedt.

De snelheid is hierdoor enigszins afhankelijk van de grootte en de vorm van het werkstuk: de lucht kan snel uit een klein werkstuk ontsnappen en minder snel uit een groter werkstuk.

Er zijn grote produktiesnelheden te halen: snelheden van 500 tot 5000 stuks per uur zijn haalbaar voor grote tot middelgrote werkstukken. Voor kleine en eenvoudige onderdelen zijn nog hogere snelheden haalbaar, tot 200.000 stuks per uur voor enkele miniatuuronderdelen.

De pers

De perskracht kan variëren van 2 MN, voor normale toepassingen, tot 9 MN voor enkele speciale toepassingen. De meeste toepassingen vereisen echter minder dan 1 MN. Voor kleine perskrachten worden excenterpersen gebruikt, grotere krachten worden opgebracht door kniehefboompersen of hydraulische persen.

Wanneer er met meer stempels geperst wordt, zijn twee- of drievoudige persen nodig.

Matrijs en stempels

De matrijs en stempels moeten met zeer nauwe toleranties gemaakt worden en slijtvast zijn om een constante vorm van de produkten te krijgen. Vaak moeten ze enige overmaat hebben om de krimp tijdens het sinteren te compenseren.

Stempel en matrijsdelen moeten een nauwkeurige glijdende passing hebben. Wanneer de spleet tussen de matrijs en de stempel te groot is, kan er metaalpoeder tussen komen. De spleet is, afhankelijk van de grootte van de poederdeeltjes, meestal kleiner dan 25 µm. Matrijs en stempeloppervlakken moeten gepolijst worden, vooral in de richting van de beweging.

De keuze van het materiaal voor de stempel en de matrijs hangt af van het aantal produkten dat gemaakt moet worden, van de gevraagde toleranties en van de schurende werking van de poederdeeltjes. Het meest gebruikt worden lucht- of oliegehard gereedschapsstaal. Voor een grotere hardheid en slijtagebestendigheid wordt hardmetaal genomen. De levensduur hiervan bedraagt meer dan 100.000 stuks.

De matrijs is vrij kostbaar, zodat de serie vrij groot moet zijn om het proces economisch te maken. Meestal wordt een serie van 10.000 stuks als minimum hoeveelheid aangehouden.

Voorsinteren

Bij sommige poedersamenstellingen of bij kritisch gevormde produkten is de gevormde groenling te zwak om verder behandeld te worden. De

groenling krijgt dan, terwijl deze nog *in* de matrijs zit, een warmtebehandeling. Dit *voorsinteren* wordt uitgevoerd op een vrij lage temperatuur en is van korte duur. Door deze warmtebehandeling wordt de sterkte zodanig verhoogd dat verdere behandeling wel mogelijk is.

Stap 4: Het sinteren

De volgende stap in het proces is het sinteren. In een oven wordt de groenling verhit tot vlak onder de smelttemperatuur van het belangrijkste bestanddeel van de poeders. Dit gebeurt om de afzonderlijke deeltjes van het poeder met elkaar te verbinden, zodat de sterkte groter wordt. Soms worden verscheidene sinteroperaties achter elkaar uitgevoerd om bepaalde specificaties te halen, maar meestal is één operatie voldoende.

Procesparameters:

De belangrijke factoren die het sinteren beïnvloeden zijn:

- het sintermechanisme;
- de sinteratmosfeer;
- de sintertemperatuur en -tijd;
- de snelheid van het opwarmen en afkoelen.

Sintermechanisme

In principe vindt het sinteren plaats door vier mechanismen:

- diffusie;
- rekristallisatie;
- korrelgroei;
- verdichting.

Verhoging van de sterkte tijdens het sinteren is vooral het gevolg van het verdwijnen van de grenzen tussen de afzonderlijke deeltjes, door diffusie en rekristallisatie. De poederdeeltjes worden meestal tot voorbij de kritische rek gedeformeerd, zodat rekristallisatie en samengroeiing optreden.

Poreusheid kan in een pers/sinter handeling niet volledig vermeden worden, omdat de holten na het persen blijven bestaan, en er tijdens het sinteren gassen ontstaan.

Poreusheid kan bestaan als een netwerk van onderling verbonden poriën, of als gesloten holten. In het eerste geval kan de structuur voor filters en lagers toegepast worden.

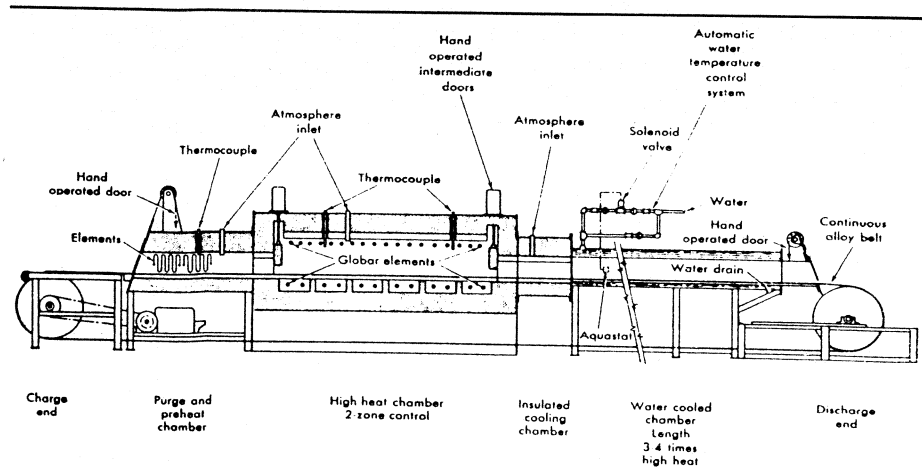
Sinteratmosfeer

Sinteren wordt meestal uitgevoerd in een oven met een gecontroleerde, zuurstofvrije atmosfeer, omdat oxydatie van de deeltjes een onderlinge verbinding kan bemoeilijken of zelfs verhinderen. De gebruikte gassen zijn waterstof, stikstof of verbrandingsgassen van koolwaterstoffen of ammonia.

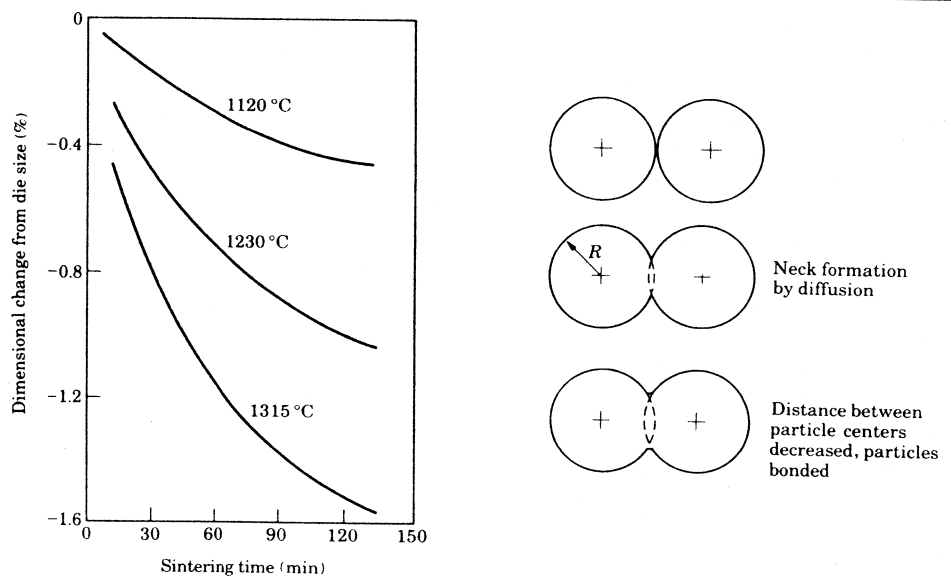
Voor het sinteren wordt meestal een doorloopoven (figuur 9.10) gebruikt. Deze oven heeft een laadtafel om de groenlingen op de lopende band te zetten, een voorkamer om smeer- en bindmiddelen te verwijderen door middel van verbranding of pyrolyse, een hoge-temperatuurskamer voor het sinteren, een koelkamer en een uitladstation.

Sintertemperatuur en -tijd

Een toename van sintertijd en -temperatuur verhoogt de effecten, die bij het sinteren optreden, maar geeft ook hogere kosten. Gewoonlijk neemt de dichtheid van het werkstuk toe en zal er krimp optreden (figuur 9.11.a). Dit komt door het verkleinen van de afstand en het ontstaan van een groter contactvlak tussen de poederdeeltjes (figuur 9.11.b).



Figuur 9.10: Een doorloopoven



Figuur 9.11: (a) Invloed van sintertijd en -temperatuur op de krimp; (b) verkleining van de afstand tussen de poederdeeltjes.

Materiaal	Temperatuur (°C)	Tijd (min)
Koper, messing en brons	760-900	10-45
IJzer en staal	1000-1150	8-45
Nikkel	1000-1150	30-45
Roestvast staal	1100-1290	30-60
Alnico legeringen (permanente magneten)	1200-1300	120-150
Wolfram carbide	1430-1500	20-30
Molybdeen	2050	120
Wolfram	2350	480

Figuur 9.12: Sintertemperatuur en -tijd voor enige materialen

Wanneer de smeltpunten van de verschillende componenten ver uit elkaar liggen, wordt er gesinterd op een temperatuur waarbij een van de

componenten vloeibaar wordt. De vloeibare component zal om de vaste deeltjes heen vloeien. Hierdoor is sneller een hoge dichtheid te behalen, maar het werkstuk zal ook meer krimpen. Een voorbeeld hiervan is het kobalt in hardmetaal voor gereedschappen en matrijzen.

In figuur 9.12 zijn de sintertijd en -temperatuur voor verschillende materialen gegeven.

9.3 NABEWERKING

Voor de meeste toepassingen zijn de hiervoor besproken stappen afdoende. Het ontstane produkt zal echter nog een poreuze structuur hebben, de toleranties zijn redelijk maar niet erg nauwkeurig en een aantal materiaaleigenschappen zijn niet optimaal. Bovendien zijn er beperkingen aan de vorm, waardoor de geometrie van het gewenste produkt niet in alle gevallen met sinteren alleen gemaakt kan worden. Wanneer het werkstuk niet aan de eisen voldoet, kunnen er een aantal nabewerkingen worden toegepast. Er moet wel worden afgewogen of extra kosten, die het nabewerken met zich meebrengt, opwegen tegen de voordelen.

Verspanende bewerkingen

Schroefdraad en inwendige kamers kunnen niet tijdens het persen gevormd worden, ondersnijdingen en gaten loodrecht op de persrichting zeer moeilijk.

Het is mogelijk om een anti-lossing in de persmatrijs aan te brengen, maar die wordt daardoor dermate gecompliceerd dat het meestal goedkoper is om het produkt achteraf te bewerken.

Om de gewenste vorm te bereiken, kunnen bewerkingen als frezen, draaien, boren en draadsnijden nodig zijn.

Slagpersen

Er zijn twee redenen om slagpersen als tweede persgang, na het sinteren, toe te passen:

1. Met behulp van slagpersen is het mogelijk om nauwere *maattoleranties* te halen dan in één persgang mogelijk is.
2. Het slagpersen wordt ook toegepast om de *dichtheid* en daarmee de mechanische eigenschappen van het werkstuk te verhogen.

Het tweede persen gebeurt in een aparte matrijs. De operatie wordt zeer snel uitgevoerd op slagpersen en is vergelijkbaar met warm persen.

Deze techniek wordt soms gevolgd door een extra sintergang. Voor produkten waaraan extreem hoge eisen gesteld worden, kunnen het persen en het sinteren verscheidene keren achter elkaar uitgevoerd worden.

Infiltratie

Infiltratie is een proces waarbij een extra metaalbestanddeel in de vorm van een vloeistof toegevoegd wordt. Het wordt toegepast om het werkstuk minder poreus te maken, om het produkt lucht- en/of vloeistofdicht te maken of om het produkt elektrisch geleidend te maken.

Een pastille van een metaal met een lager smeltpunt dan dat van de hoofdbestanddelen wordt bovenop de groenling of het gesinterde produkt geplaatst, voordat het (weer) de sinteroven ingaat. Door de sintertemperatuur smelt de pastille en wordt de vloeistof in de structuur van het werkstuk opgenomen. De poriën die normaal in het gesinterde

produkt blijven zitten, worden gevuld.

Afhankelijk van het toegevoegde materiaal kunnen óf een hoge hardheid en sterkte, óf een hoge taaheid en slagvastheid verkregen worden.

Harden

De meeste staallegingen kunnen met conventionele warmtebehandelingen gehard worden. Het is ook mogelijk om het werkstuk te nitreren of te carboneren. De dichtheid en poreusheid blijven ongeveer gelijk, maar er kan wel enige vervorming optreden, zodat een nabewerking nodig kan zijn om toleranties te halen.

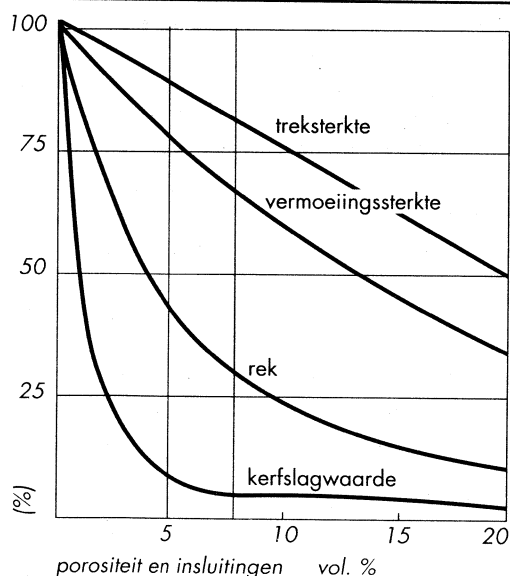
9.4 MATERIAALEIGENSCHAPPEN

De eigenschappen van een gesinterd werkstuk worden vergeleken met de eigenschappen van een werkstuk dat met andere technieken, zoals gieten, walsen en smeden, vervaardigd is.

De gesinterde producten hebben een uniforme microstructuur en een homogene samenstelling, er treedt geen segregatie op zoals bij het gietproces.

De metaalkristallen hebben geen voorkeursoriëntatie zoals bij het walsen. Hierdoor zijn de materiaaleigenschappen niet richtingsafhankelijk. Gesinterde producten hebben door rekristallisatie lage inwendige spanningen.

In de structuur van sinterproducten zitten poriën. De dichtheid die een normaal gesinterd produkt heeft, bedraagt zo'n 85 à 90 % van de dichtheid die een gewalst of gesmeed werkstuk heeft. Hierdoor zijn de mechanische eigenschappen slechter dan die van een gewalst of een gesmeed werkstuk. Vooral de weerstand tegen vermoeiing (figuur 9.13) is beduidend minder dan die van bijvoorbeeld een gesmeed werkstuk. Wanneer het proces goed gecontroleerd wordt, is zonder nabewerkingen een dichtheid van 90-95% haalbaar.



Figuur 9.13: Invloed van porositeit en insluitingen op de mechanische eigenschappen

Er kunnen echter nabewerkingen plaatsvinden, waarbij de dichtheid van de produkten verhoogd wordt (de poederdeeltjes worden dichter op elkaar gedrukt, of de ruimte tussen de deeltjes wordt opgevuld met een ander materiaal). Hierdoor kunnen de eigenschappen sterk verbeterd worden en zelfs beter worden dan die van de gesmede en gewalste produkten. Daarom wordt het proces de laatste tijd, naast smeden, veel gebruikt voor de vervaardiging van zwaar belaste onderdelen, zoals drijfstanden voor automobielmotoren.

De treksterkte van een normaal gesinterd stalen werkstuk is ongeveer 200 MPa. Koudgewalst staal heeft een treksterkte van 350 tot 600 MPa. Door het verhogen van de dichtheid van het gesinterde werkstuk kan een treksterkte bereikt worden van 350 tot 750 MPa.

9.5 VOOR- EN NADELEN

Voordelen

- Het is mogelijk om vrij complexe produkten te vervaardigen.
- Het is mogelijk om legeringen te verwerken waarvan de componenten grote verschillen in dichtheid en smeltpunt hebben.
- Metalen met een zeer hoog smeltpunt kunnen verwerkt worden.
- Metalen kunnen in combinatie met niet-metallische componenten verwerkt worden.
- De poeders kunnen een hoge zuiverheid hebben.
- Er ontstaat weinig afval en er zijn geen smeltverliezen.
- Er hoeven geen gietkanalen of bramen verwijderd te worden.
- Bij een procesgang zijn redelijke toleranties en een goede oppervlaktekwaliteit te halen.
- Het proces kan snel uitgevoerd worden.
- Het proces is te automatiseren.

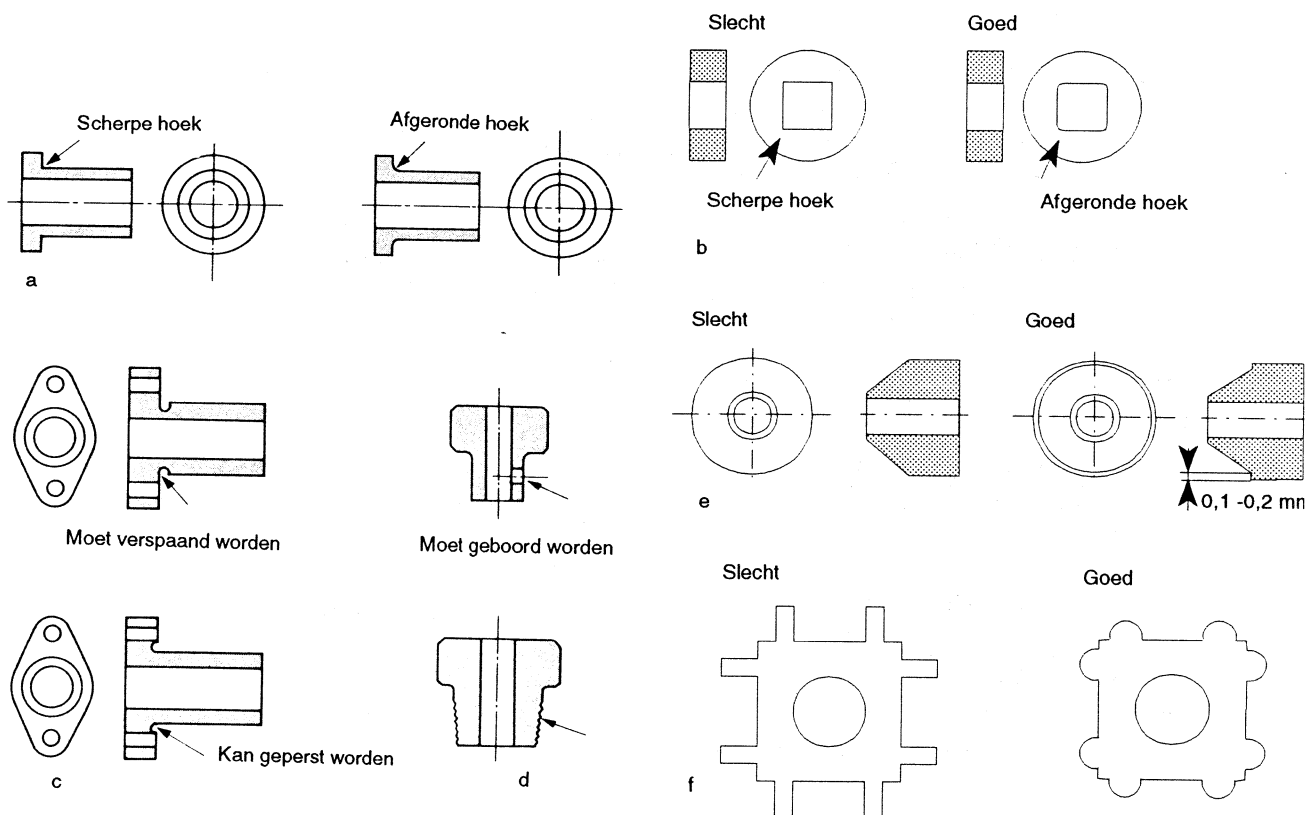
Nadelen

- De mechanische en fysische eigenschappen zijn zonder nabehandeling minder dan bij andere processen.
- Er is minder vormvrijheid dan bij gieten, omdat poeders moeilijker vloeien.
- Om de gewenste geometrie te krijgen, zal het werkstuk in veel gevallen nog verspanend bewerkt moeten worden.
- Zonder nabewerking zijn de haalbare toleranties ruimer dan bij een proces als verspanen. Vooral in de persrichting kunnen niet te hoge eisen gesteld worden.
- Zonder nabewerking kunnen er alleen poreuze produkten vervaardigd worden.
- De metaalpoeders zijn veel duurder dan metalen in bulkvorm.
- De gereedschapkosten zijn vrij hoog: om het proces economisch te maken is een seriegrootte van minimaal 10.000 stuks nodig.
- De investeringskosten in persen en ovens zijn hoog.
- Er moeten vaak maatregelen genomen worden om corrosie en stofexplosies te vermijden.

9.6 ONTWERPRICHTLIJNEN

- De vorm moet zo simpel mogelijk gehouden worden.
- Grote variaties in contour, wanddikte en dikte moeten vermeden worden.
- Grote lengte/diameter-verhoudingen moeten vermeden worden.

- Het moet mogelijk zijn om het werkstuk uit de matrijs te halen. De vorm moet daarom lossend zijn in de bewegingsrichting. Een lossingshoek van $0,1^\circ$ tot $0,2^\circ$ is voldoende.
- Pas geen scherpe hoeken en overgangen toe, maar afrondingen. Dit vergemakkelijkt het vloeien van het poeder (figuur 9.14a en b).
- Gat en loodrecht op de persrichting, ondersnijdingen, inwendige kamers en schroefdraad kunnen, als ze nodig zijn, met een nabewerking aangebracht worden (figuur 9.14c en d).
- Scherpe kanten aan het gereedschap moeten vermeden worden. Daarom moet er een vlak stuk zitten tussen een rechte en schuine rand (figuur 9.14e).
- Smalle en diepe gleuven en ribben moeten vermeden worden, omdat de matrijs hierdoor zwak wordt (figuur 9.14f).
- Grote wanddikteverschillen en sterk asymmetrische doorsneden moeten vermeden worden. Door ongelijkmatige krimp tijdens het sinteren kan het werkstuk kromtrekken.
- Toleranties zijn meestal in de grootte-orde van $\pm 0,05-0,10$ mm. Ze kunnen verbeterd worden door een nabewerking, maar dat geeft extra kosten. De toleranties in de persrichting zijn groter dan die loodrecht daarop.



Figuur 9.14: ontwerprichtlijnen

9.7 AFGELEIDE TECHNIEKEN

Naast het pers/sinter-proces zijn er nog diverse andere technieken die ook onder de poedermetallurgie vallen. Deze worden hieronder kort besproken.

Isostatisch persen

Bij het traditionele persen moet het werkstuk in de persrichting lossend zijn. Bovendien varieert de dichtheid van het werkstuk in de persrichting. Wanneer er aan produkten erg hoge eisen gesteld worden, of wanneer ze een ingewikkelde geometrie hebben, kunnen ze *isostatisch* geperst worden.

Bij dit proces wordt een flexibele container gevuld met poeder. Deze wordt onder alzijdige druk gebracht (figuur 9.15). De groenling wordt hieruit gehaald en op de normale manier gesinterd.

Er zijn twee methoden voor het isostatisch druk aanbrengen:

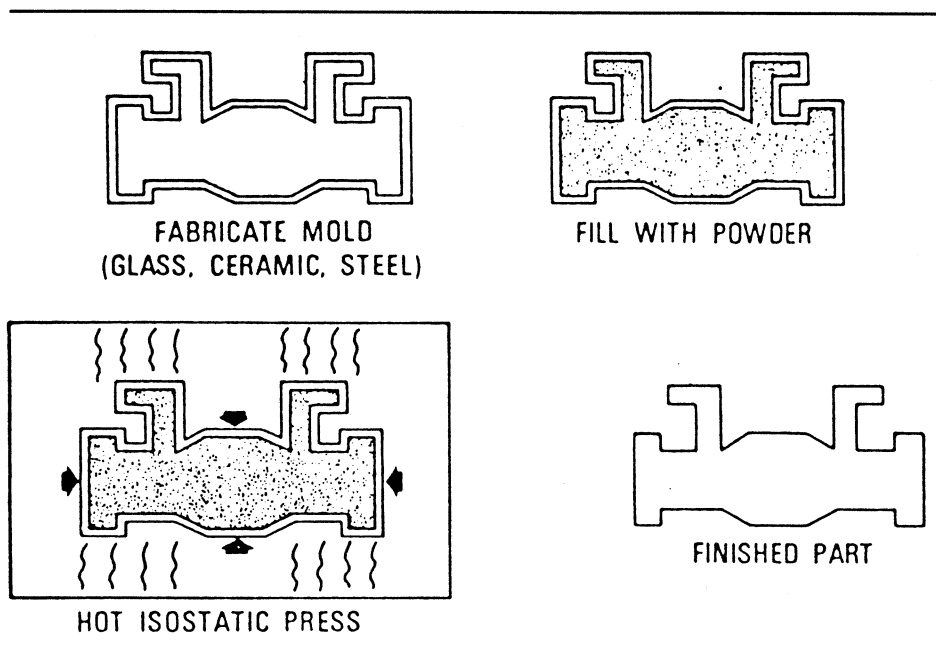
Cold Isostatic Pressing (CIP)

De container is gemaakt van een rubber. De druk wordt hydrostatisch aangebracht, meestal in water.

Hot Isostatic Pressing (HIP)

De container is gemaakt van een metaalplaat met een hoog smeltpunt. Het drukmedium is een inert gas of een glasachtige vloeistof.

Het voordeel van isostatisch persen is dat door de alzijdige druk en door afwezigheid van wrijving met de matrijswand een vrijwel uniforme structuur ontstaat die onafhankelijk is van de vorm. Het is echter wel een duur proces.



Figuur 9.15: Principe van het isostatisch persen

Poederspuitgieten (MIM-proces, Metalpowder Injection Molding)

Bij dit proces worden zeer fijne metaalpoeders gemengd met een polymeer. De mix wordt gespuitgiet als een kunststof. Na het uitstoten wordt het polymeer verbrand en het werkstuk gesinterd.

Dit proces laat een grotere vormvrijheid toe en er zijn dunnere wanden te verwerken dan met het conventionele persen.

Het proces wordt vooral voor kleinere precisie-onderdelen gebruikt, zoals onderdelen voor horloges, geweren en chirurgische messen.

Drukloos compacteren

Het poeder wordt in een matrijs gegoten en verhit. Er ontstaat een zeer poreuze structuur die vooral voor filters toegepast wordt.

Laser-sinteren

Dit is een vrij nieuwe techniek, die toegepast kan worden voor prototypen en kleine series. Het poeder wordt zeer plaatselijk verwarmd en aan elkaar gesinterd. Het poeder dat niet verwarmd is, wordt van en uit het ontstane produkt gestoft.

9.8 LITERATUUR

Kalpakjian, S.

Manufacturing engineering and technology (2nd edition)

Addison-Wesley Publishing company, 1992.

Niebel, B.W., A.B. Draper en R.A. Wysk

Modern Manufacturing Process Engineering

McGraw-Hill, 1989.

Trucks, H.E.

Designing for economical production

Society of Manufacturing Engineers, 1976.

Zeeuw, J. de

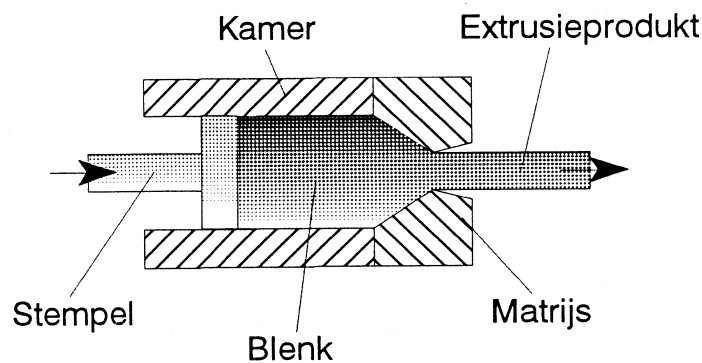
Poedermetallurgie, het overwegen waard!

IOP Metalen Kennisoverdracht, 1993.

Hoofdstuk 10: EXTRUDEREN VAN METALEN

10.1 INLEIDING

Extrusie is een techniek waarbij het uitgangsmateriaal met behulp van een stempel door een matrijs wordt geperst. Het uitgangsmateriaal is meestal een cilindrisch gietstuk en wordt de *blenk* genoemd. De blenk wordt in de kamer van de extrusiemachine geplaatst en met behulp van een stempel onder zo'n grote druk gezet dat het materiaal gaat vloeien. Hierdoor kan het metaal grote vervormingen ondergaan. Door het metaal door een matrijsopening te persen kan een grote verscheidenheid aan doorsnedes gemaakt worden.



Figuur 10.1: Het basisprincipe van meelopende extrusie

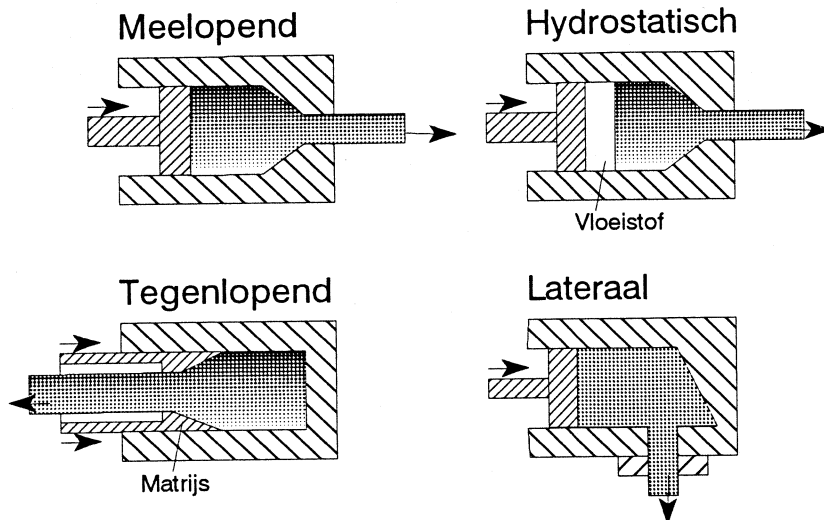
Omdat de matrijsopening tijdens het proces gelijk blijft, heeft het hele extrusieprofiel dezelfde doorsnede. De lengte van het geëxtrudeerde profiel is afhankelijk van het volume van de blenk. Voorbeelden van geëxtrudeerde producten zijn raamkozijnen en glijders voor schuifdeuren. Door het werkstuk op de gewenste maat af te korten, kunnen ook losse producten zoals deurkrukken en tandwielen, gemaakt worden.

Afhankelijk van het gebruikte materiaal wordt het proces uitgevoerd op kamertemperatuur of een verhoogde temperatuur. Dit proces wordt *warm-extrusie* genoemd. Veel gebruikte materialen zijn staal, aluminium, koper, lood en magnesium. Andere metalen en legeringen kunnen ook geëxtrudeerd worden, maar dit geeft vaak problemen. Met behulp van warm-extrusie worden altijd lange profielen met een constante doorsnede gemaakt. Een speciale vorm van warm-extrusie is *hydrostatische extrusie*.

Als het extruderen wordt gecombineerd met kouddemeden, wordt dat meestal *koud-extrusie* genoemd. Deze techniek heeft veel belangrijke toepassingen in de automobiel- en de rijwielindustrie. Een speciale vorm van koud-extrusie is *slagextrusie*.

10.2 HET EXTRUSIEPROCES

Bij het basisproces, het *meelopend* extruderen, verplaatst het materiaal zich in dezelfde richting als de stempel. Andere processen zijn het *tegenlopend* extruderen, het *hydrostatisch* extruderen en het *lateraal* extruderen (figuur 10.2).



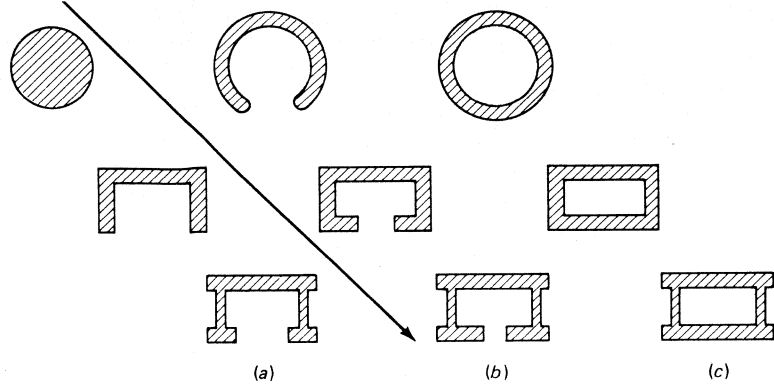
Figuur 10.2: Soorten extrusie: meelopend, tegenlopend, hydrostatisch en lateraal

De geometrische variabelen bij het extruderen zijn de matrijshoek α en de extrusieverhouding A_0/A_1 , de verhouding tussen de oppervlakten van de blenk (A_0) en van het werkstuk (A_1). De extrusieverhouding varieert van 10:1 tot 100:1. Voor enkele toepassingen kan deze hoger zijn (400:1) en bij zeer brosse materialen kunnen ze lager zijn, hoewel ze meestal niet lager zijn dan 4:1.

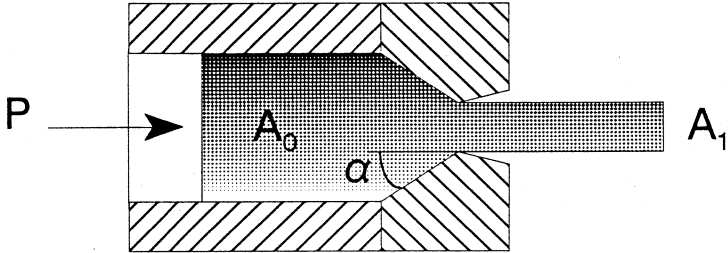
De vorm van de doorsnede kan worden beschreven met de diameter van de omschreven cirkel (CCD=Circumscribing-Circle Diameter). Dit is de diameter van de cirkel waarbinnen de doorsnede van het werkstuk nog net past. Bij aluminium kan deze diameter variëren van 6 millimeter tot 1 meter, maar meestal is deze niet groter dan 25 centimeter. Omdat bij staal hogere krachten nodig zijn is de maximale CCD ongeveer 15 centimeter. De CCD moet altijd kleiner zijn dan de diameter van de kamer.

De complexiteit van een extrusieproduct is afhankelijk van de vormfactor, dit is de verhouding tussen de omtrek van het werkstuk en de oppervlakte van de doorsnede. Een massieve ronde staaf heeft een lage vormfactor en ingewikkelde extrusieproducten hebben een hoge vormfactor (figuur 10.3).

Andere proces-variabelen zijn de extrusie-kracht, de temperatuur van de blenk, de snelheid van de stempel en het type smeermiddel (figuur 10.4).



Figuur 10.3: Doorsnedes met toenemende vormfactor van (a) massieve, (b) niet-gesloten en (c) gesloten profielen



Figuur 10.4: Procesvariabelen bij extrusie: de matrijshoek α , de extrusieverhouding A_0/A_1 en de extrusiekracht P

Extrusiekracht

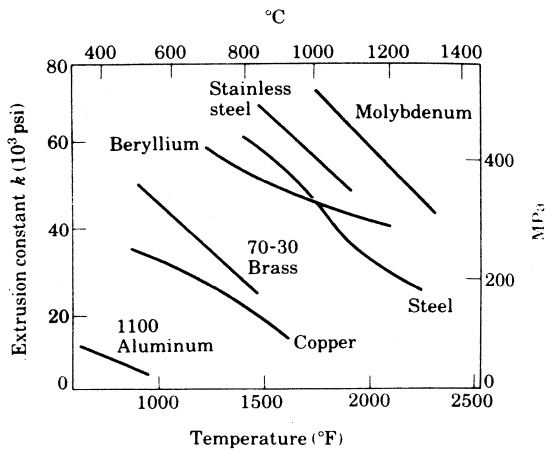
De kracht die nodig is om een blenk door de matrijsopening te persen is afhankelijk van de sterkte van het blenkmetaal, de extrusieverhouding, de wrijving tussen blenk en gereedschap, de temperatuur van de blenk en de extrusiesnelheid. De benodigde kracht P kan worden geschat met de volgende formule:

$$P = A_0 k \ln\left(\frac{A_0}{A_1}\right)$$

Waarin:

- P : extrusiekracht (N)
- A_0 : oppervlakte van de doorsnede van de blenk (mm^2)
- A_1 : oppervlakte van de doorsnede van het werkstuk (mm^2)
- k : extrusieconstante (MPa)

Verschillende waarden voor k zijn te vinden in figuur 10.5.



Figuur 10.5: Extrusie-constante k voor verschillende metalen bij verschillende temperaturen

Voorbeeld

Een ronde koperen blenk wordt geëxtrudeerd bij een temperatuur van 700°C . De diameter van de blenk is 120 mm en de diameter van het werkstuk is 50 mm . Bereken de benodigde extrusiekracht.

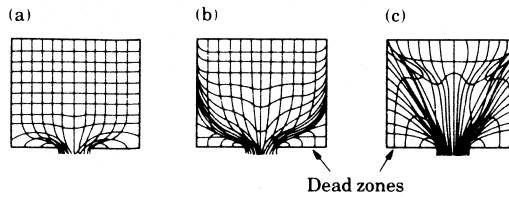
De extrusiekracht kan worden uitgerekend met de hierboven gegeven formule. De constante k wordt opgezocht in figuur 10.5. Voor koper geldt bij 700°C dat $k = 200\text{ MPa}$. Nu kan de kracht worden uitgerekend:

$$P = \frac{1}{4} \pi (120^2) (200) \ln\left(\frac{\frac{1}{4} \pi (120^2)}{\frac{1}{4} \pi (50^2)}\right) = 3,96 \times 10^6 \text{ N}$$

Het vloeien van metaal

Het vloeien van metaal is net als bij andere vervormingsprocessen van belang, omdat dit grote gevolgen heeft voor de kwaliteit en de mechanische eigenschappen van het eindproduct. Bij extrusie vloeit het materiaal vooral in de lengterichting, zodat de extrusieproducten een verlengde kristalstructuur hebben.

Een veelgebruikte manier om het vloeien te bestuderen is door een blenk in de lengterichting in tweeën te delen en op één oppervlak een ruitjespatroon aan te brengen. De twee helften worden samen in de kamer geplaatst en vervolgens geëxtrudeerd. Wanneer ze daarna weer uit elkaar worden gehaald, kan het vervormde ruitjespatroon bestudeerd worden. In figuur 10.6 is het vloeipatroon te zien dat op deze manier verkregen is. Het betreft hier een matrijs waarbij de matrijshoek $\alpha=90^{\circ}$. In deze figuur zijn duidelijk de dode zones in het materiaal te zien. Situatie (a) treedt op wanneer er weinig weerstand is tussen blenk en kamer. Situatie (b) doet zich voor wanneer er sprake is van hoge weerstand tussen blenk en kamer. Wanneer er sprake is van een zeer hoge weerstand tussen blenk en kamer en afkoeling van de buitenkant van de blenk, komt situatie (c) voor. In deze situatie kan een fout ontstaan die 'pipe' wordt genoemd.



Figuur 10.6: Enkele voorbeelden van vloeipatronen

Extrusie-praktijk

Voor het extruderen worden vooral staal, aluminium, koper, lood en magnesium toegepast. Deze materialen zijn voldoende taai, zodat ze plastisch vervormd kunnen worden zonder dat de samenhang van het materiaal verloren gaat. Andere metalen zoals titanium en hittebestendige legeringen kunnen onder bepaalde omstandigheden ook geëxtrudeerd worden, maar dat geeft veel problemen, zoals een grote gereedschapslijtage. Hoewel extrusie een batch- of een semicontinu-proces is, kan het toch goed voor grotere series gebruikt worden. De gereedschapkosten zijn in het algemeen laag, vooral bij eenvoudige doorsneden.

De beweging van de stempel moet worden gestopt voordat deze de matrijsopening raakt. Wanneer er dode zones in het materiaal ontstaan, moet worden voorkomen dat deze door de matrijsopening worden geperst omdat dit inwendige fouten zou veroorzaken. Door de aanwezigheid van een matrijshoek α zal er altijd wat materiaal in de kamer achterblijven. Deze blokrest wordt later van het werkstuk gescheiden. Ook is het soms mogelijk om deze blokrest met een nieuwe blenk door de matrijsopening te persen.

10.3 WARM-EXTRUSIE

Er zijn twee gevallen waarin wordt geëxtrudeerd op een temperatuur boven kamertemperatuur. Allereerst wanneer er een materiaal wordt geëxtrudeerd dat bij kamertemperatuur onvoldoende plastisch vervormbaar is, maar ook om de benodigde proceskrachten te verminderen. In figuur 10.7 staat voor enkele materialen de gebruikte extrusietemperatuur aangegeven.

Materiaal	Temperatuur (°C)
Lood	200 - 250
Aluminium en -legeringen	375 - 475
Koper en -legeringen	690 - 975
Staal en -legeringen	875 - 1300
Hittebestendige legeringen	975 - 2200

Figuur 10.7: De extrusietemperatuur van enkele materialen

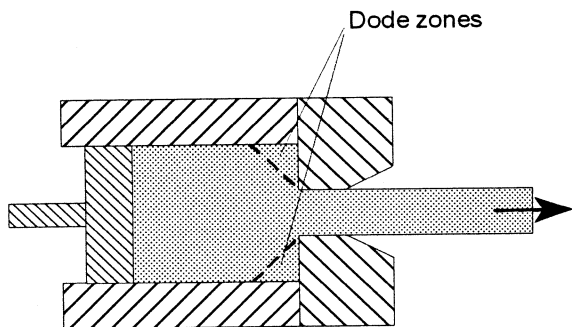
Het afkoelen van de warme blenk kan een probleem zijn, dat leidt tot een niet-gelijkmatige vervorming. Om het afkoelen van de blenk te beperken, kan de

extrusiematrijs worden voorverwarmd.

Omdat de blenk verwarmd is, ontstaat er een oxydelaag, tenzij de blenk in een oven met schutgas verhit is. Deze oxydelaag beïnvloedt het wrijvingsgedrag tussen gereedschap en werkstuk en daardoor ook het vloeipatroon van het materiaal. Bovendien heeft het een slechte invloed op de oppervlaktekwaliteit van het werkstuk. Om te voorkomen dat zich een oxydelaag op het werkstuk vormt, maakt men vaak gebruik van een kop op de stempel die iets kleinere afmetingen heeft dan de kamer. Hierdoor blijft een dun profiel, dat voornamelijk uit de geoxydeerde laag bestaat, achter in de kamer.

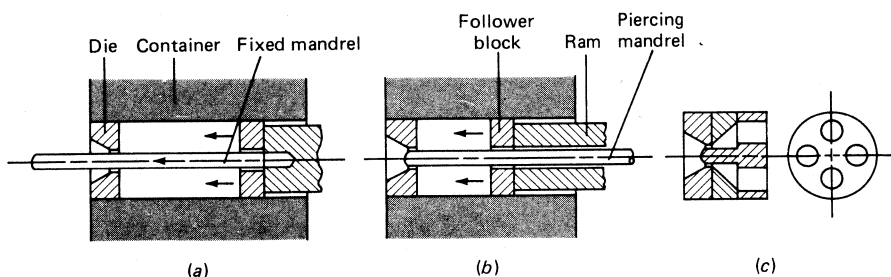
Extrusiematrijs

Er is een ruime ervaring nodig om een goede extrusiematrijs te ontwerpen. Rechthoekige matrijzen worden gebruikt voor de extrusie van nonferro-metalen, waarvan vooral aluminium. Bij het gebruik van rechthoekige matrijzen ontstaan dode zones in het materiaal die een vorm vastleggen waarlangs het materiaal vloeit in het vervormingsgebied. De dode zones veroorzaken een mooi afgewerkt metaaloppervlak.



Figuur 10.8: Het ontstaan van dode zones in het materiaal in een rechthoekige matrijs

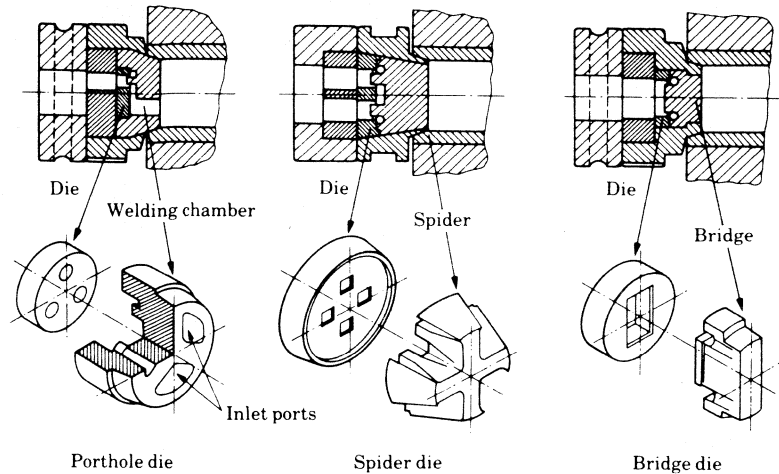
Bij het extruderen van buizen wordt zowel gebruik gemaakt van massieve als holle blenks. Bij het gebruik van holle blenks wordt er een doorn op de stempel geplaatst die een gat in de blenk drukt. Vanwege de wrijving en de mate van vervorming is het moeilijker om dunwandige buizen te extruderen dan dikwandige. De minimale wanddikte is gewoonlijk beperkt tot 1 millimeter voor aluminium, 3 millimeter voor koolstofstaal en 5 millimeter voor roestvrijstaal.



Figuur 10.9: Het gebruik van een doorn bij het extruderen van buis

Een andere methode waarmee holle doorsneden geëxtrudeerd kunnen worden,

is door gebruik te maken van een 'welding-chamber' en een speciale matrijs zoals een 'spider die', een 'porthole die' of een 'bridge die' (figuur 10.10).



Figuur 10.10: Componenten voor de extrusie van holle onderdelen

Het materiaal splitst zich door de in de matrijs geplaatste hulpstukken in meerdere stromen, die zich even later weer samenvoegen en door de hoge druk in de 'welding chamber' worden samengesmeed. Het proces is alleen te gebruiken voor lood, aluminium en enkele aluminiumlegeringen, omdat het bij deze materialen mogelijk is om ze onder hoge druk in elkaar te smeden. Smeermiddelen kunnen niet worden gebruikt, omdat deze tussen de verschillende stromen kunnen raken en zelfs een klein beetje ervan al kan belemmeren dat de materialen weer in elkaar gesmeed worden. Extrusiematrijzen worden meestal gemaakt van gesmeed staal, waarbij keramische coatings kunnen worden gebruikt om de levensduur te verlengen. Omdat de gereedschapslijtage zeer hoog is, worden snel slijtende gereedschapsonderdelen meestal zo gemaakt, dat ze gemakkelijk verwisseld kunnen worden.

Smeermiddelen

Naarmate de omvormtemperatuur stijgt, levert de noodzakelijke smering van het proces steeds meer problemen op. Vloeibaar glas is een voortreffelijk smeermiddel voor het warm-extruderen van staal en hittebestendige legeringen. In de jaren veertig is het Séjournet-proces ontwikkeld, waarbij een glazen vulsel in de matrijsopening wordt geplaatst. Dit vulsel is een reservoir van gesmolten glas en geeft dit tijdens het extruderen af als smeermiddel. Voordat de blenk in de kamer wordt geplaatst, wordt het oppervlak ingesmeerd met glaspoeder om de weerstand tussen blenk en kamer te verminderen.

Bij materialen die de neiging hebben om zich aan de kamer of de matrijs te hechten, kan de blenk worden omhuld door een dunwandige bus van een zachter metaal zoals koper. Dit omhulsel verlaagt de weerstand, maar het voorkomt ook dat de blenk door de omgeving wordt beïnvloed.

Hydrostatische extrusie

Bij hydrostatische extrusie wordt de druk die nodig is voor het extruderen, geleverd door een vloeistof die zich rondom de blenk bevindt. Hierdoor is er geen wrijving tussen het werkstuk en het gereedschap. De druk is normaal ongeveer 1400 MPa. Door de hoge druk in de kamer loopt er ook wat vloeistof over het oppervlak van de matrijs, zodat hier de krachten en de wrijving aanzienlijk worden verminderd.

Een grote hoeveelheid metalen en kunststoffen kan op deze wijze worden geëxtrudeerd, maar meestal wordt het voor taaiere materialen toegepast.

Omdat alzijdige druk op het materiaal de vervormbaarheid verhoogd, kunnen met hydrostatische extrusie ook brossere materialen worden verwerkt.

Hydrostatische extrusie wordt meestal uitgevoerd op kamertemperatuur, waarbij plantaardige olie als vloeistof wordt gebruikt. Bij de keuze van de vloeistof moet er op gelet worden dat de viscositeit weinig afhankelijk is van de druk. Bij extrusie op hogere temperaturen wordt gebruik gemaakt van was, kunststof of glas als vloeistof. Deze materialen werken ook isolerend, zodat de temperatuur van de blenk ongeveer gelijk blijft tijdens het proces.

Ondanks de voordelen die hydrostatische extrusie biedt, zijn er nog maar weinig industriële toepassingen. Dit komt vooral doordat er nogal complexe machines gebruikt worden en er veel ervaring nodig is met het werken met hoge drukken. Bovendien zijn de cyclustijden relatief lang.

10.4 KOUD-EXTRUSIE

Met koud-extrusie wordt vaak een combinatie van processen zoals mee- en tegenlopend extruderen en koude smeden bedoeld. Het proces is ontwikkeld in de jaren veertig. De techniek wordt veel gebruikt voor de fabricage van onderdelen van auto's, fietsen, huishoudelijke artikelen en tuingereedschap.

Voor dit proces worden verschillende soorten uitgangsmateriaal gebruikt, zowel staf als draad en zowel koud- als warmgevormd. Het uitgangsmateriaal wordt in alle gevallen de *pastille* genoemd. Er wordt gebruik gemaakt van nonferrometalen en laaggelegeerde staalsoorten, die voldoende plastisch vervormbaar zijn op kamertemperatuur.

Met behulp van koud-extrusie kunnen onderdelen worden gemaakt met een gewicht van 45 kilo en met een lengte van 2 meter, maar meestal zijn de onderdelen veel kleiner.

Koud-extrusie heeft enkele belangrijke voordelen boven warm-extrusie:

- Doordat er versteviging optreedt, zijn de mechanische eigenschappen van het eindproduct beter. Dit geldt echter alleen wanneer de warmte, die door wrijving en vervorming ontstaat, niet leidt tot rekristallisatie van het materiaal.
- Er is een hoge maatnauwkeurigheid, zodat het werkstuk niet nabehandeld hoeft te worden. De haalbare toleranties liggen tussen 0,1 en 1,0%.
- Wanneer er goede smering is, ontstaat een werkstuk met een hoge oppervlaktekwaliteit, onder andere doordat er geen oxydelag wordt gevormd.
- De seriegrootte en de kosten zijn vergelijkbaar met die van andere technieken die gebruikt kunnen worden om een zelfde product te maken. Sommige machines kunnen meer dan 2000 onderdelen per uur vervaardigen.



Figuur 10.11: Een voorbeeld van een koudextrusie-proces in zeven stappen

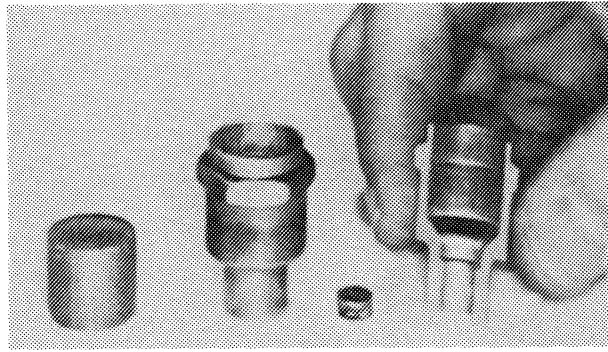
De belastingen van het gereedschap zijn bij koud-extrusie erg hoog. Dit geldt vooral voor de extrusie van stalen produkten. De hardheid van de stempel en de matrijs is ongeveer 60 HRC. De stempel is een kritiek onderdeel, want deze moet niet alleen sterk zijn, maar ook bestand tegen vermoeiing en slijtage van het materiaal.

Het is bij koud-extrusie van groot belang dat er een goede matrijs ontworpen wordt en dat de juiste gereedschapsmaterialen gekozen worden. Bovendien is het belangrijk dat er wordt uitgegaan van een pastille van een hoge kwaliteit. Om te voorkomen dat het proces vastloopt doordat het werkstuk zich hecht aan het gereedschap is er, vooral bij stalen werkstukken, smering nodig. Veelgebruikte smeermiddelen bij koud-extrusie zijn zeep en was. Vaak wordt nog gebruik gemaakt van een conversielaag, om te zorgen dat het smeermiddel goed hecht.

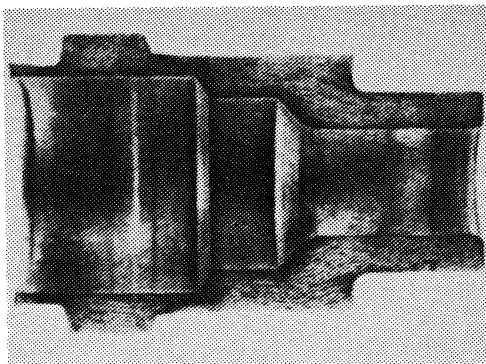
Voorbeeld

In figuur 10.12 is een voorbeeld te zien van een koud-geëxtrudeerd produkt. Het is het metalen onderdeel van een bougie. Het uitgangsmateriaal is een stuk staal dat van staf wordt gezaagd. In een proces dat vergelijkbaar is met het proces uit figuur 10.11 wordt deze pastille geëxtrudeerd tot het produkt in het midden van de figuur, waarin onderin een blind gat zit. De bodem van dit blinde gat wordt er vervolgens uitgeponst. Dit stukje metaal is ook in de figuur te zien.

Het is erg belangrijk om het vloeipatroon van het metaal regelmatig te controleren. Op deze manier kunnen fouten worden opgespoord en kunnen de stempel en de matrijs worden verbeterd. Een veelgebruikte manier om het werkstuk te analyseren is door het doormidden te snijden en het deelvlak te polijsten en te etsen, zodat de kristalstructuur zichtbaar wordt (figuur 10.13).



Figuur 10.12: Voorbeeld van koud-geëxtrudeerd produkt

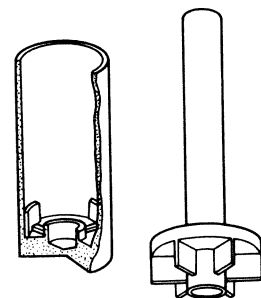


Figuur 10.13: Analyse van het vloeipatroon

Slagextrusie

Slagextrusie is een manier van extruderen die lijkt op tegenlopend extruderen. Het wordt vaak ingedeeld onder de koud-extrusie. Bij slagextrusie wordt de pastille in de matrijs geplaatst. Doordat de stempel met grote snelheid op de pastille komt, wordt de pastille verwarmd en daardoor plastisch. Het materiaal wordt hierdoor achterwaarts door de spleet tussen matrijs en stempel geëxtrudeerd. De dikte van het geëxtrudeerde profiel hangt af van de ruimte tussen de stempel en de matrijsopening. Een afstroopplaat zorgt ervoor dat het werkstuk van de stempel wordt verwijderd.

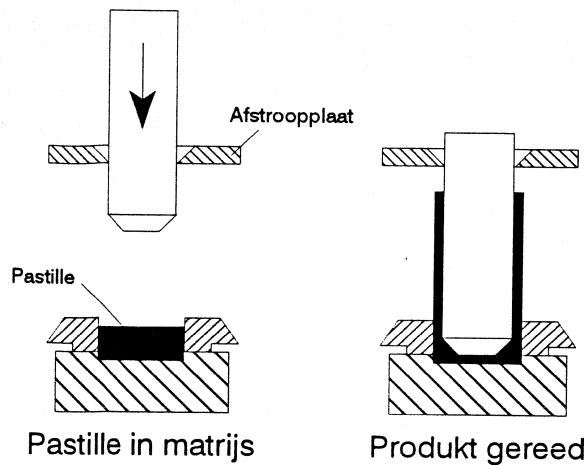
De diameter van de gemaakte werkstukken kan oplopen tot 150 millimeter. Voorbeelden van produkten die met behulp van slagextrusie worden gemaakt staan in figuur 10.14. Andere produkten die met slagextrusie kunnen worden gemaakt zijn spuitbussen, metalen tubes en elco-bussen (electrolytische condensator).



Figuur 10.14: Voorbeelden van slagextrusie produkten

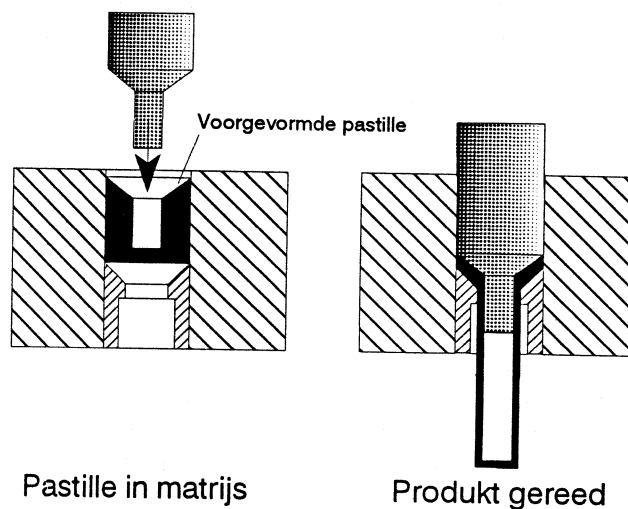
Bij slagextrusie wordt gebruik gemaakt van een verticale pers, waarmee twee produkten per seconde kunnen worden gemaakt.

Met slagextrusie kunnen heel dunwandige produkten gemaakt worden, met een wanddikte-diameterverhouding van ongeveer 0,005. Het is heel belangrijk dat de stempel en de matrijsopening concentrisch geplaatst zijn en dat het produkt symmetrisch is.



Figuur 10.15: Tegenlopende slagextrusie

Een ander methode van slagextrusie is die waarbij de stempel en het materiaal voorwaarts door de matrijsopening worden geperst (figuur 10.16).



Figuur 10.16: Meelopende slagextrusie

Het materiaal vloeit hierbij in de richting waarin de stempel beweegt. Dit proces wordt wel het Hooker-proces genoemd. Er wordt gebruik gemaakt van een voorgevormde pastille, waar een gat met een bodem in zit. De bodem verandert niet tijdens het proces.

10.5 EXTRUSIEGIETEN

Bij extrusiegieten wordt het warm-extruderen gecombineerd met gieten. Hierbij moeten de matrijshelften stevig op elkaar gedrukt worden, zodat de enorme druk waarmee het plastische materiaal in de matrijs wordt geperst ze niet uit elkaar drukt. Het materiaal moet met zo'n grote druk in de matrijs worden geperst omdat het anders niet de volledige holte zal opvullen. Het materiaal blijft plastisch en wordt niet vloeibaar, zodat er naderhand niet zoals bij het spuitgieten sprake is van krimp. De producten die gemaakt worden zijn dus

heel nauwkeurig. De fysische en mechanische eigenschappen van de producten zijn gelijkwaardig aan die van warmgeperste producten en beter dan die van gegoten producten.

Door de grote inwendige druk wordt er in het materiaal warmte ontwikkeld die ervoor zorgt dat het materiaal gelijkmatig wordt verwarmd en een mooie, fijne korrelstructuur krijgt. Wanneer de extrusieverhouding te groot is of wanneer de extrusiesnelheid te hoog is, kan het materiaal oververhit raken en gedeeltelijk smelten. Dit is ongewenst omdat dit kristalsegregatie en inwendige oxydevervorming veroorzaakt.

Voor het gieten van hoogsmeltende legeringen geldt hetzelfde probleem als voor de warm-extrusie. Het is moeilijk om de juiste materialen voor het gereedschap te kiezen en het gereedschap en de matrijs zo te ontwerpen dat ze hoge temperaturen aankunnen.

Voor het ontwerpen van extrusiegegoten producten gelden ongeveer dezelfde regels als voor gietproducten. Er moet dus gelet worden op gelijkmatige wanddikteovergangen en op de afrondingsstralen.

10.6 FOUTEN BIJ EXTRUSIE

Afhankelijk van de materiaaleigenschappen en de procesvariabelen kunnen er verschillende fouten optreden tijdens het extruderen. Deze kunnen een grote invloed hebben op de sterkte en de produktkwaliteit. Er zijn drie belangrijke fouten te onderscheiden: oppervlaktescheuren, 'pipe' en inwendige scheuren.

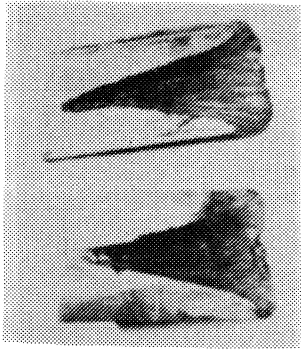
Oppervlaktescheuren

Als de extrusietemperatuur, de wrijving of de snelheid te groot is, kunnen er scheurtjes in het oppervlak van het werkstuk ontstaan. Deze scheurtjes bevinden zich tussen de korrelgrenzen. Ze treden vooral op bij aluminium-, magnesium- en zinklegeringen, maar ze kunnen ook bij hoogsmeltende legeringen optreden. De oppervlaktescheuren kunnen voorkomen worden, door de temperatuur van de blenk te verlagen, of door een lagere extrusiesnelheid toe te passen.

Oppervlaktescheuren kunnen zich ook voordoen bij lagere temperaturen. Wanneer het werkstuk zich hecht aan het matrijsoppervlak, neemt de extrusiedruk snel toe. Op een bepaald moment wordt de druk te hoog en volgt er een ontlasting. Dit proces herhaalt zich steeds, zodat er een regelmatig patroon van scheuren over de omtrek van het werkstuk ontstaan. Omdat het werkstuk lijkt op een bamboe-stok, wordt dit wel het bamboe-effect genoemd.

Pipe

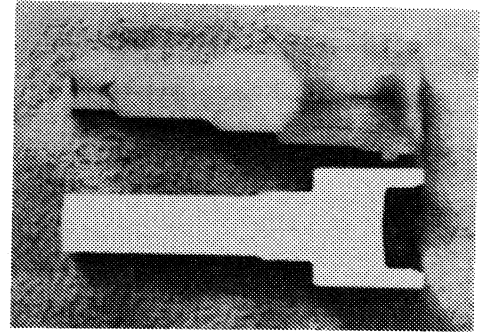
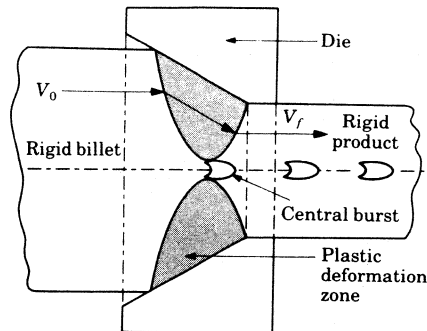
Bij het vloeipatroon zoals in figuur 10.6(c) te zien is, komt het voor dat er oxyden en onzuiverheden naar het midden van de blenk worden gedreven. Dit gebeurt doordat er een verschil in snelheid is tussen het materiaal aan de wand en in het centrum van het werkstuk. Dit effect wordt 'pipe' genoemd. Soms wordt wel éénderde van de lengte van het werkstuk op deze manier aangetast en moet het later als afval verwijderd worden. Pipe kan worden voorkomen door te zorgen dat er een meer uniform vloeipatroon ontstaat, bijvoorbeeld door de wrijving of de temperatuurgradiënt te verminderen. Een andere manier is door vóór het extruderen het oppervlak van de blenk te verwijderen, zodat er geen onzuiverheden meer in de blenk zitten.



Figuur 10.17: Een voorbeeld van pipe in het uiteinde van een produkt

Inwendige scheuren

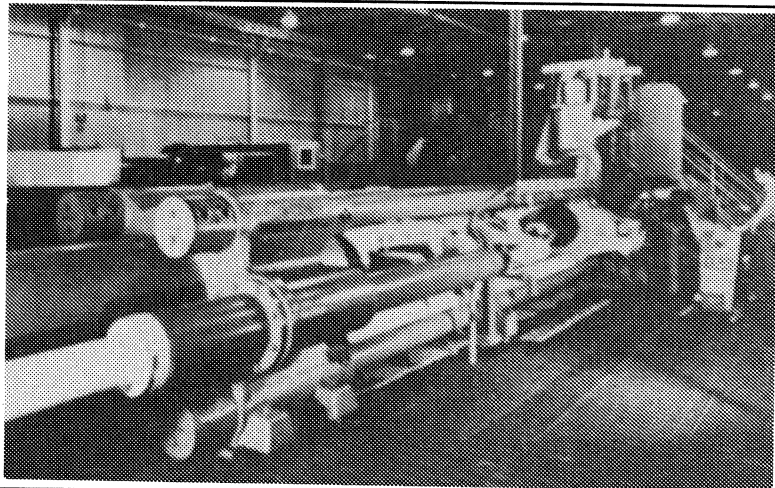
In het centrum van de blenk kunnen inwendige scheuren ontstaan. De oorzaak hiervan is de hydrostatische trekspanning die op de hartlijn van het werkstuk ontstaat in het vervormingsgebied. Deze situatie is te vergelijken met de insnoering van het materiaal tijdens een trekproef. Deze scheurtjes ontstaan gemakkelijker wanneer de matrijshoek groter wordt en wanneer er meer onregelmatigheden in het materiaal zitten. De scheurtjes zullen minder snel ontstaan wanneer de extrusieverhouding en de wrijving groter zijn.



Figuur 10.18: Een voorbeeld van het optreden van inwendige scheuren

10.7 EXTRUSIEMACHINE

De basismachine voor het extruderen is een hydraulische pers zoals in figuur 10.19. Deze persen zijn geschikt voor extrusie, omdat de slag en de snelheid instelbaar zijn. Ze kunnen over een langere afstand dezelfde druk aanhouden, zodat ook een lange blenk kan worden geëxtrudeerd en de productiesnelheid kan toenemen. Voor warm-extrusie van blenks zijn hydraulische persen gebouwd die een kracht tot 100 MN kunnen leveren.

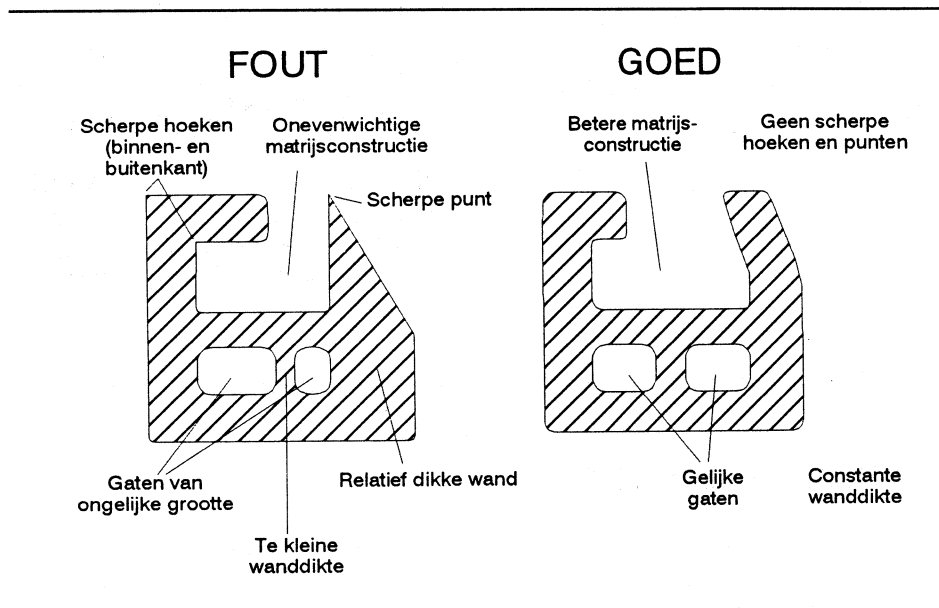


Figuur 10.19: Een hydraulische extrusie-pers

Voor koud-extrusie worden vaak verticale hydraulische persen gebruikt. Deze hebben meestal een kleinere capaciteit, maar ze nemen ook minder vloeroppervlak in beslag. Naast hydraulische persen worden ook persen met een kniehefboom- of een heugelmechanisme toegepast voor koud- en slagextrusie. Hiermee kunnen kleine produkten in grote series gemaakt worden. De persen worden uitgebreider behandeld in hoofdstuk 24.

10.8 ONTWERPRICHTLIJNEN

Richtlijnen voor het ontwerpen van een goed extrusieproduct staan in figuur 10.20. Hierbij moet vooral worden gelet op het belang van de symmetrie van de doorsnede en het vermijden van scherpe hoeken en extreme maatveranderingen in de doorsnede.



Figuur 10.20: Aandachtsgebieden bij het ontwerpen

Wanddikte

De wanddikte van de doorsnede moet zo gelijkmatig mogelijk verdeeld zijn, zodat het materiaal gelijkmatig zal vloeien. Toch kunnen er soms werkstukken met sterk verschillende wanddiktes worden geëxtrudeerd. Hierbij wordt in bepaalde delen van de matrijs de stroom afgeremd, bijvoorbeeld door het weerstandsoppervlak plaatselijk te vergroten.

De minimale wanddikte van buizen is gewoonlijk beperkt tot 1 millimeter voor aluminium, 3 millimeter voor koolstofstaal en 5 millimeter voor roestvrijstaal.

Extrusieverhouding

De extrusieverhouding bij het extruderen van aluminium varieert van 15:1 tot 50:1. Een verhouding onder de 15:1 wordt bijna nooit gebruikt. De gemiddelde extrusieverhoudingen bij het extruderen van koolstofstaal en roestvrijstaal zijn respectievelijk 5:1 en 3,5:1.

Werkstukgrootte

In het algemeen wordt de grootte van de werkstukken beperkt door de

beschikbare perscapaciteiten. Bij het ontwerpen moet er op gelet worden dat de omgeschreven cirkel (CCD) kleiner is dan de diameter van de kamer van de machine.

De maximale omgeschreven cirkel bij het extruderen van aluminium, magnesium en koper heeft een diameter van ongeveer 30 cm, hoewel er tegenwoordig persen zijn waarmee de diameter op kan lopen tot 65 cm. Voor staal is de maximale diameter 12 cm en voor titanium 16 cm.

Afrondingen

Bij het extruderen van aluminium of magnesium onderdelen is de minimale afronding 0,8 mm. Voor de extrusie van staal geldt een minimale afronding van 1,5 mm, hoewel er meestal met een waarde van 6 mm wordt gewerkt.

LITERATUUR

Alting, L.

Manufacturing engineering processes (2nd edition)

Marcel Dekker, 1994.

*

Kalpakjian, S.

Manufacturing engineering and technology (2nd edition)

Addison-Wesley Publishing company, 1992.

*

Laue, K., en H. Stenger

Extrusion - processes, machinery, tooling

American Society for Metals, Ohio, 1981.

Niebel, B.W., A.B. Draper en R.A. Wysk

Modern Manufacturing Process Engineering

McGraw-Hill, 1989.

Schey, J.A.

Introduction to manufacturing processes (2nd edition)

McGraw-Hill, 1987.

Trucks, H.E.

Designing for economical production

Society of Manufacturing Engineers, 1974.

* = speciaal aanbevolen

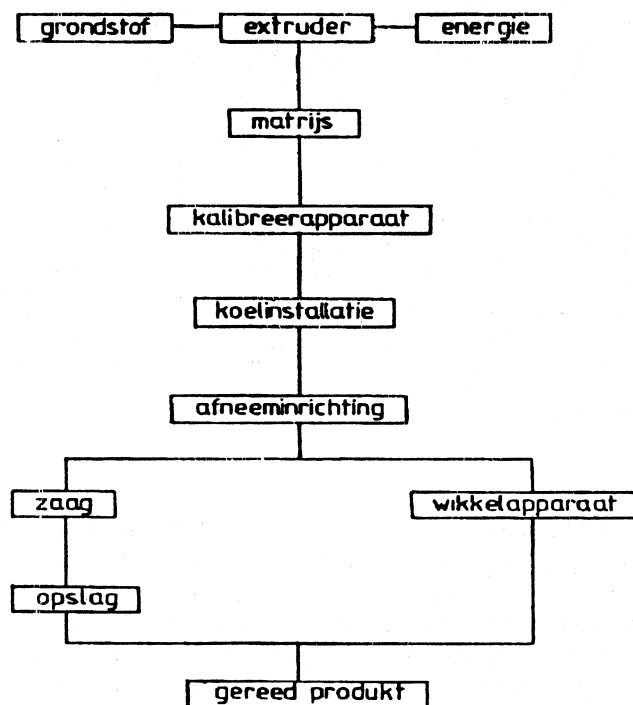
Hoofdstuk 11: EXTRUSIE VAN KUNSTSTOFFEN

11.1 INLEIDING

Overag → Extrusie van kunststoffen is wezenlijk anders dan extrusie van metalen. Bij extrusie van metalen is er sprake van plastische vervorming. Extrusie van kunststoffen, overwegend thermoplasten, is echter een smeltproces. Dit proces verloopt continu en dient voor het vervaardigen van produkten met constante of bijna constante doorsneden zoals staf, buis, plaat, folie, draad, band en profielen. Extrusieprodukten zijn meestal halffabrikaten maar kunnen ook eindprodukten zijn.

11.2 HET EXTRUSIEPROCES

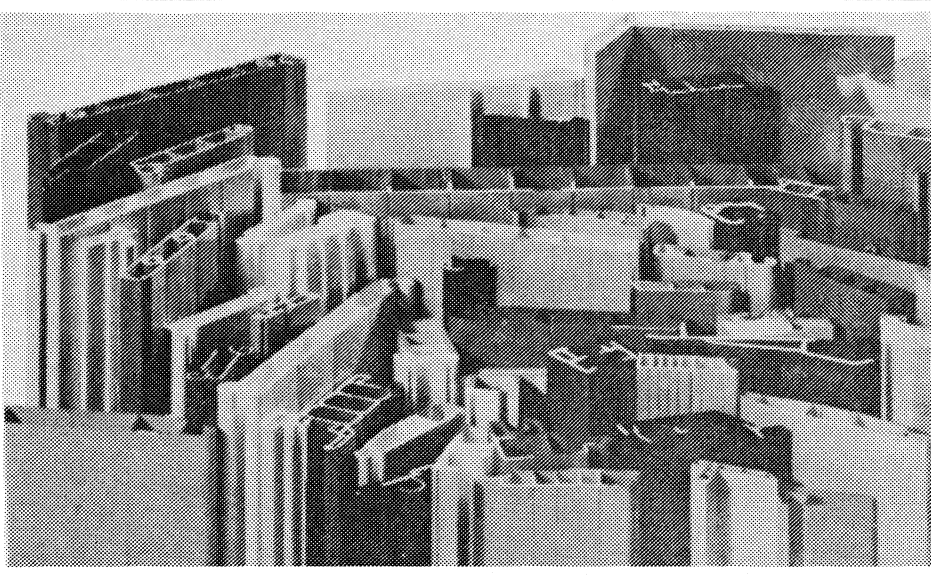
Overag → Een extrusie-installatie bestaat uit diverse elementen. De extruder is het essentiële onderdeel van de installatie. In de extruder wordt de grondstof gesmolten en onder druk door een spuitkop of matrijs naar buiten geperst. De meest gebruikelijke elementen van een extrusie-installatie zijn in figuur 11.1 weergegeven.



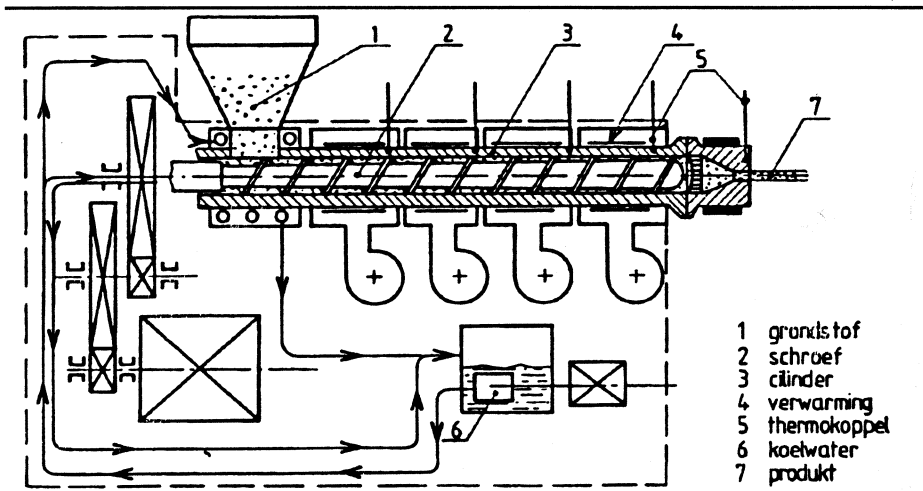
Figuur 11.1: Schema van een extrusie-installatie

De grondstof en de energie worden aan de extruder toegevoerd. De meeste extruders hebben een enkele schroef. Extruders met méér dan één schroef en extruders met bijzondere werkingsprincipes worden besproken in paragraaf 11.3.

In figuur 11.3 is een schets van een extruder met één schroef weergegeven.



Figuur 11.2: Enkele kunststof extrusieprofielen



Figuur 11.3: Schema van een enkelschroefsextruder

De schroef en de cilinder vormen samen de plastificeereenheid. De kunststof wordt via de trechter (1) geleid naar de cilinder. De schroef transporteert het materiaal door de cilinder naar de matrijs of spuitkop. De buitenzijde van de cilinder wordt verwarmd met verwarmingselementen (4). De kunststof smelt tijdens het transport door de cilinder. De toevoerzone in de cilinder wordt gekoeld om aankoeken van warme kunststofkorrels in de opening te vermijden. De druk op het materiaal neemt toe naarmate het de matrijs nadert. Het materiaal wordt geperst door een matrijs die de doorsnede heeft van het te fabriceren produkt.

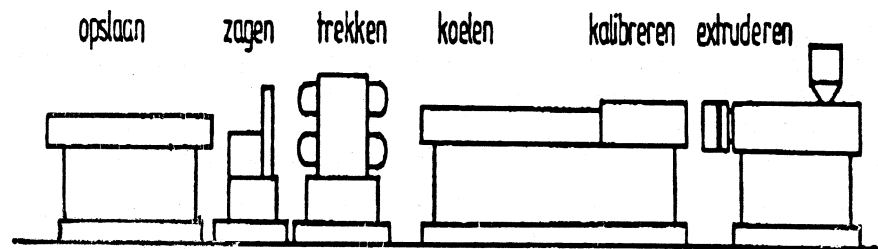
Het aandrijven van de extruderschroeven gebeurt meestal door elektromotoren met een traploze toerentalregeling. Het schroeftoerental wordt na een reductiekast verder gereduceerd tot 25 à 300 omw/min. De omtreksnelheid van de schroef is voor de meeste extruders ongeveer 0,7 m/s.

Aan het einde van een extruder is een spuitkop of matrijs gemonteerd. Het doel van de matrijs is de cilindervormige smeltstroom aan het einde van de schroef geleidelijk over te laten gaan in de gewenste doorsnede van het produkt. Het is van belang dat de smeltstroom op elke plaats in de doorsnede dezelfde snelheid heeft. Daarom is een extrusiematrijs meestal in drie secties onderverdeeld.

De eerste sectie is het aanstroomkanaal, het verlengde van de extrusiecilinder. Aan het einde van de matrijs bevindt zich een parallelgeleiding van de kunststofstroom: het gewenste profiel is aangebracht over een lange zone. Deze sectie wordt fixeerzone genoemd. De fixeerzone dient voor het stabiliseren van de vorm van de smeltstroom. Tussen de instroomsectie en de fixeerzone is een overgangszone die dient om een constante stroomsnelheid in de fixeerzone te realiseren.

De konstruktie van een extrusiematrijs is produktafhankelijk (zie verder paragraaf 11.4).

Na het passeren van de matrijs wordt het produkt gecalibreerd en gekoeld. Het calibreren heeft tot doel het produkt binnen de gestelde tolerantiegrenzen te houden totdat het zover is afgekoeld dat het de gewenste vorm behoudt. Het koelen gebeurt tijdens en na het calibreren totdat het materiaal voldoende vast is geworden. De afneeminrichting dient om de extrusiesnelheid constant te houden. De afmetingen van het produkt worden beïnvloed door de afneemsnelheid. Staf, buis, profiel of plaat wordt na het koelen in handelbare lengten gezaagd en opgeslagen. Dunne folies worden na het koelen op haspels gewikkeld. In figuur 11.4 is een extrusie-installatie geschetst voor een buis of een profiel. Het schema van figuur 11.1 is in deze schets duidelijk herkenbaar.



Figuur 11.4: Schema van een extrusie-installatie

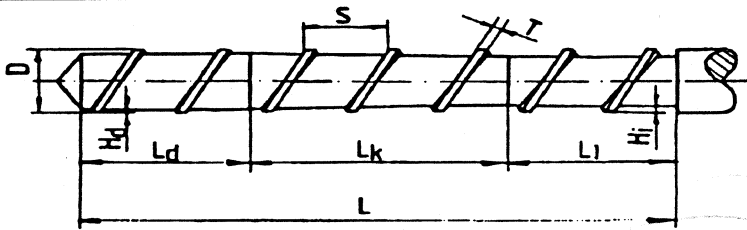
11.3 DE EXTRUSIESCHROEF

Uit een jarenlange ervaring en uit experimenten is een schroefvorm gekonstrueerd die algemeen wordt toegepast. Deze schroef noemt men de driezonenschroef (figuur 11.5).

De eerste zone is de voedingszone of invoerzone. De gangdiepte H_1 is hier groter dan in de rest van de schroef. De pakkingsgraad (het schudgewicht) van de kunststof is laag, omdat zich veel lucht tussen de grondstofkorrels bevindt.

De tweede zone is de compressiezone, waarin de kunststof begint te smelten. Lucht en eventuele gassen ontwijken door de trechter en de pakkingsgraad van de kunststof neemt toe. De druk in het materiaal neemt toe door afnemende gangdiepte van de schroef.

In de derde zone, de doseerzone, is de gangdiepte weer constant. De doseerzone wordt in navolging van het Engelse spraakgebruik dikwijls 'metering zone' genoemd.



totale lengte	$L = 20-30D$
lengte van de invoerzone	$L_i = 4-8D$
lengte van de kompressiezone	$L_k \approx 4D$
lengte van de doseerzone	$L_d = 6-10D (6-12)$
steek	$S = 1D$
dikte van de schroefrand	$T = 0,1D$
diepte van de schroefgang	$H_j = 0,10-0,15D$
gangdiepteverhouding	$\frac{H_j}{H_d} = 2-4$
enkelgangige schroef	
diameter van de schroef	D

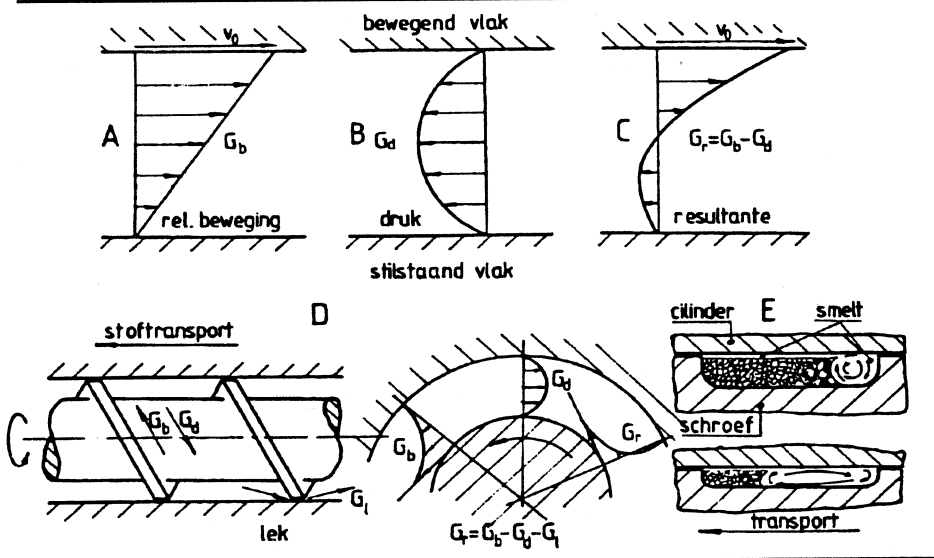
bron : Rauwendaal

Figuur 11.5: Driezonenschroef

Modelvorming

De transportwerking van een extrusieschroef kan voorgesteld worden door middel van het tweepalatenmodel. Dit model past men ook toe bij hydrodynamische smering (figuur 11.6A t/m C).

Het materiaaltransport in een schroef is de resultante van twee bewegingen.



Figuur 11.6: Vereenvoudigde modellering kunststofextrusie

De relatieve beweging van de twee platen ten opzichte van elkaar veroorzaakt een planparallele schuifstroming (figuur 11.6A). Op de stilstaande plaat treedt geen beweging op. Op de bewegende plaat is de snelheid van de kunststof gelijk aan de snelheid van de plaat. Bij een thermoplastische smelt is het snelheidsprofiel overigens niet rechtlijnig zoals in figuur 11.6A.

De tweede drijvende kracht van materiaaltransport is de druk in de smelt. In de extruder neemt de druk naar de uitgang toe. Hierdoor ontstaat een stroming die in figuur 11.6B een parabolisch snelheidsprofiel heeft. Voor een thermoplastische smelt is het snelheidsprofiel ingewikkelder.

Het totale materiaaltransport, de resultante van beide stromen, is te zien in figuur 11.6C.

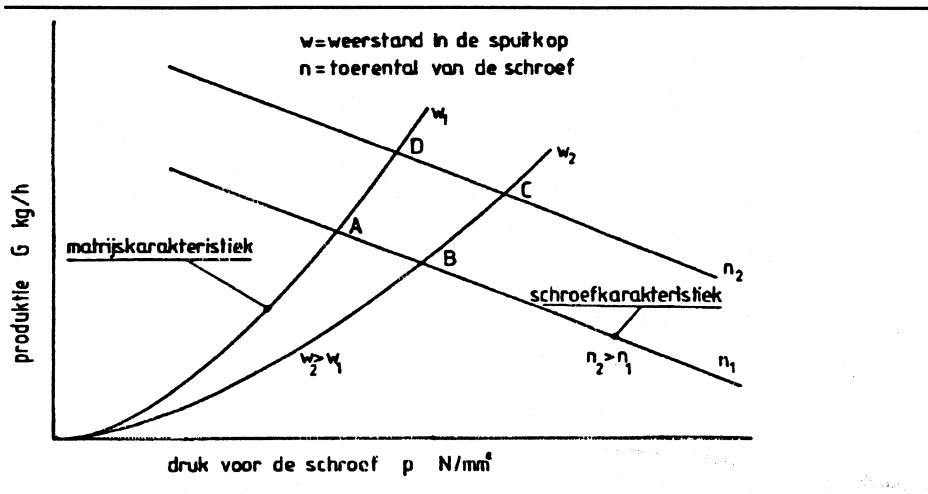
Op dezelfde wijze ontstaat stroming in de schroefgangen van een extruder. De kunststof wordt door rotatie van de schroef meegenomen: dit is weer parallele schuifstroming. De opgewekte druk werkt hier ook naar achteren en veroorzaakt een stroming in achterwaartse richting. De druk in de schroef ontstaat door de vernauwing tussen de cilinder en de matrijs en door de stromingsweerstand in de matrijs. De speling tussen schroef en cilinder (0,1 à 0,2 mm) veroorzaakt nog een kleine lekstroom. Het resulterende materiaaltransport is ook hier de som van de afzonderlijke stromen (figuur 11.6D).

De schroef dient niet alleen voor het transport van de kunststof maar zorgt ook voor het smelten van de kunststof. De kunststof wordt in de compressiezone verdicht. Langs de warme cilinderwand ontstaat een dunne film van gesmolten materiaal (figuur 11.6E). De schroefgang schraapt een deel van de smelt van de wand, de rest lekt naar de volgende schroefgang. De smelt verzamelt zich voor de schroefgang. Naarmate het materiaal opschuift naar het einde van de extruder neemt de hoeveelheid smelt toe. Er wordt ook warmte in het materiaal opgewekt door afschuiving in de kunststofstroom. Het is zelfs mogelijk dat alle smeltwarmte door de schroef wordt opgewekt: in dit geval spreekt men van een adiabatische extruder. Bij temperatuurgevoelige materialen zoals PVC moet men oppassen omdat er door teveel afschuiving degradatie of verbranding kan ontstaan.

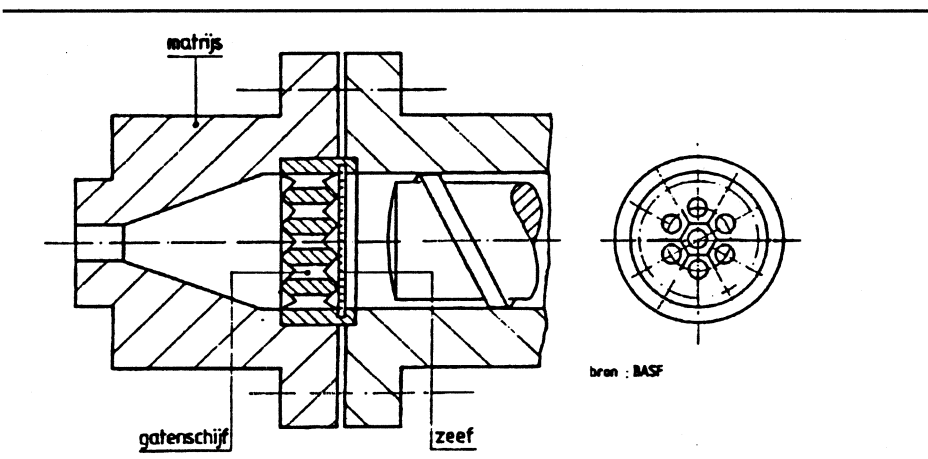
Bij onvoldoende procesbeheersing of een verkeerde keuze van extrudertype bestaat de kans dat niet gesmolten korrels omsloten worden door gesmolten materiaal. Dan vormt zich een slecht gemengde thermisch inhomogene zone in het centrum van de schroefgang, die niet in contact kan komen met de warme cilinderwand. Hoe dieper de schroefgang, hoe hoger de viscositeit van het materiaal en hoe korter de verblijftijd van de kunststof in de extruder, des te groter is de kans op een niet-homogene smelt. Verhoging van de wandtemperatuur is niet altijd mogelijk. Een langere schroef en cilinder daarentegen vergen een hogere investering; een verlaging van het schroeftoerental vermindert de opbrengst van de extruder.

Het verband tussen het toerental van de schroef en de opbrengst (output) of de produktie van een extruder is getoond in figuur 11.7.

De produktie is ook afhankelijk van de matrijskarakteristiek, de weerstand van de matrijs. Monteert men bijvoorbeeld een andere matrijs met een hogere weerstand, dan loopt de druk in de cilinder op en neemt de opbrengst af. Wil men bij het extruderen met een bepaalde matrijs de weerstand beïnvloeden dan zijn er enkele mogelijkheden. Zo kan men aan het einde van de extruder tussen schroef en matrijs een gatenschijf monteren (figuur 11.8). De gatenschijf dient om rotatie van de grondstof te verminderen vóórdat deze in de matrijs komt. Een bijkomend voordeel van de schijf is dat het snelheidsprofiel van de smelt over de doorsnede minder verschillen vertoont. Soms wordt de gatenschijf toegepast ter verhoging van de effectiviteit van een zeef om ongerechtigheden uit de smelt te verwijderen. Dit is ondermeer essentieel bij recycling.



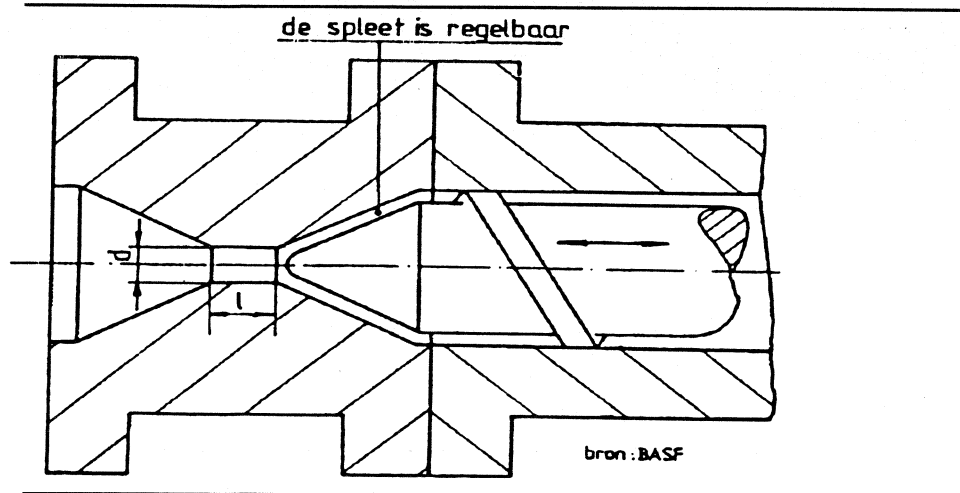
Figuur 11.7: Extrusiediagram



Figuur 11.8: Gatenschild

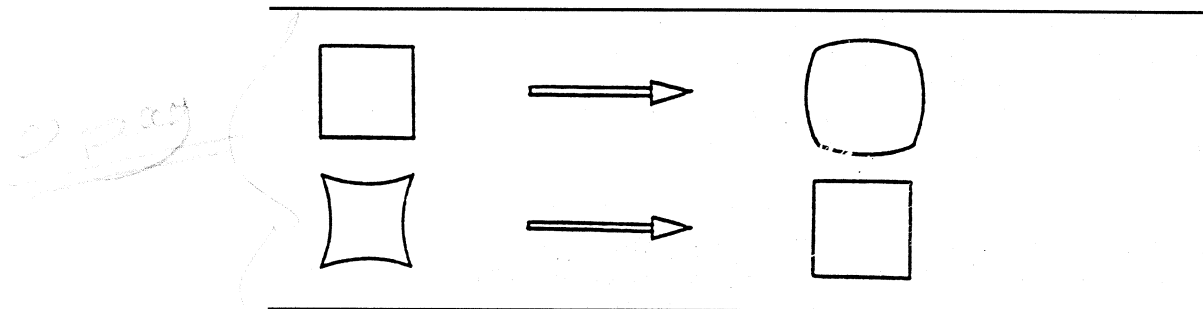
Een andere mogelijkheid om de weerstand te wijzigen is een geringe axiale verschuiving van de schroef in de cilinder, waardoor de kunststofstroom min of meer wordt afgeremd. Men kan ook een verwisselbaar onderdeel toepassen met een bepaalde doorlaatlengte ℓ en een diameter d (figuur 11.9). De drukverhoging ten gevolge van dit onderdeel is recht evenredig met ℓ en omgekeerd evenredig met d^4 .

Een thermoplastische smelt is visco-elastisch. Dit heeft gevolgen voor de vorm in en vlak na de spuitmond: de uiteindelijke vorm is niet precies voorspelbaar. De relatieve diameter-toename of extrudaatzwelling ('die swell') kan waarden van 2 tot 4 bereiken, afhankelijk van procesparameters, materiaal en vormdetails. De matrijs of spuitmond en vervolgens calibratie en koeling moeten bijdragen aan beheersing van de produktmaten door ervoor te zorgen dat de oriëntaties van de polymeermoleculen niet relaxeren (met als gevolg ontoelaatbare vormafwijking) maar worden ingevroren. Overigens kunnen oriëntaties in het eindproduct op de lange duur toch vormveranderingen veroorzaken, vooral bij hogere gebruikstemperaturen.



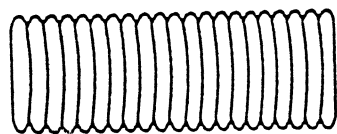
Figuur 11.9: Smoren van de smelt in een kunststofextruder

De eigenschappen van gesmolten thermoplasten hebben gevolgen voor de doorsnede van de spuitmond. Zo wordt voor het extruderen van vierkante staaf géén vierkante doorsnede van de spuitmond toegepast, want deze zou door de extrudaatzwelling een bijna ronde staaf opleveren (figuur 11.10 boven). Beter is een doorsnede zoals in figuur 11.10 onderaan is weergegeven.

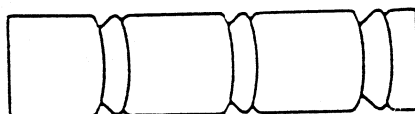


Figuur 11.10: Verband tussen spuitmonddoorsnede en produktdoorsnede

De elastische eigenschappen van gesmolten thermoplasten kunnen, afhankelijk van de procesparameters, ook verantwoordelijk zijn voor kwaliteitsverlagende effecten zoals in figuur 11.11 geschetst. Smeltbreuk is de ernstigste vorm van verstoring van een normaliter glad extrudaatoppervlak. Smeltbreuk blijkt op te treden als de schuifspanning in het materiaal een bepaalde waarde (ongeveer 0,1 MPa) overschrijdt.



"rimpel"



"bamboe"



smeltbreuk

Figuur 11.11: Kwaliteitsverlagende effecten in een kunststofsmelt

Op de driezonenschroef zijn in de loop van de tijd variaties ontwikkeld (zie ondermeer figuur 11.12).

Schroef A is de standaard driezonenschroef. Bij de schroeven B, C en D domineert of ontbreekt één van de drie zones uit de standaardschroef. De kerndiameter van ontgassingsschroef E is na de eerste compressiezone verkleind waardoor een drukverlaging ontstaat. Door deze drukverlaging kunnen lucht en eventuele andere gassen de cilinder verlaten. Na het passeren van de ontgassingszone volgt opnieuw een compressiezone.

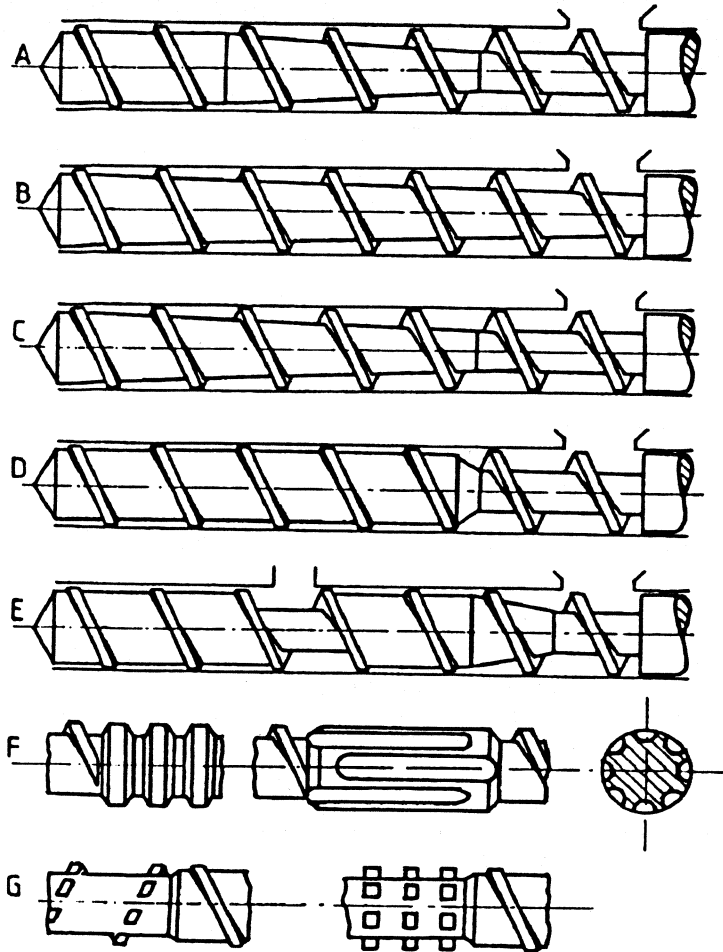
Er zijn nog andere varianten dan die uit figuur 11.12, onder andere schroeven met variabele schroefgang. Voor verdere gegevens over schroeven wordt verwezen naar de gespecialiseerde literatuur.

Het mengen en homogeniseren van de smelt is een belangrijke functie van een schroefextruder. Mengen is het gelijkmatig verdelen van de samenstellende componenten in een mengsel. De mengcapaciteit van een standaard driezonenschroef is beperkt. Daarom zijn er in de loop van de tijd mengelementen ontwikkeld om de mengcapaciteit te verbeteren.

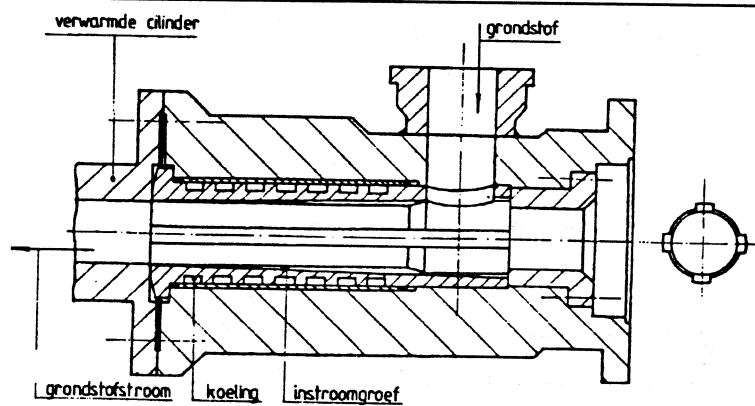
Dispersieve mengelementen (figuur 11.12F) worden toegepast voor materialen waarin samenklontering in de smelt moeten worden afgebroken. In de schroef worden barrières aangebracht waarin hoge afschuifsnelheden optreden. De optredende schuifspanningen moeten hoog genoeg zijn om vaste deeltjes in de smelt te breken en te mengen.

Distributieve mengelementen (figuur 11.12G) worden toegepast bij het mengen van blends van verschillende kunststoffen met ongeveer gelijke viscositeit.

In combinatie met mengelementen worden ook getande of gegroefde voedingszones toegepast. Een gegroefde voedingszone (figuur 11.13) verhoogt de productie van de extruders. De diepte van de groeven neemt meestal af met de afstand tot de vultrechter (figuur 11.13). De groeven hebben tot taak de grondstof uitsluitend axiale beweging mee te geven.

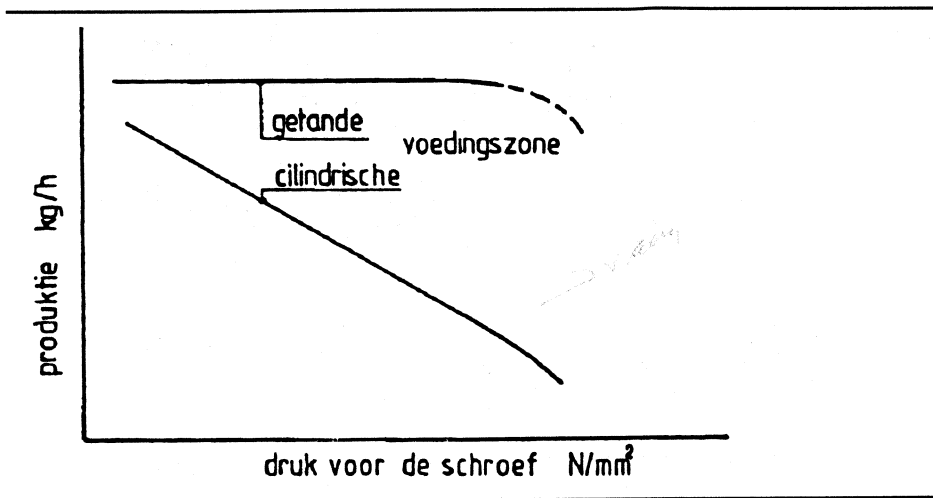


Figuur 11.12: Extruderschroeven



Figuur 11.13: Ingangzone van een kunststofextruder

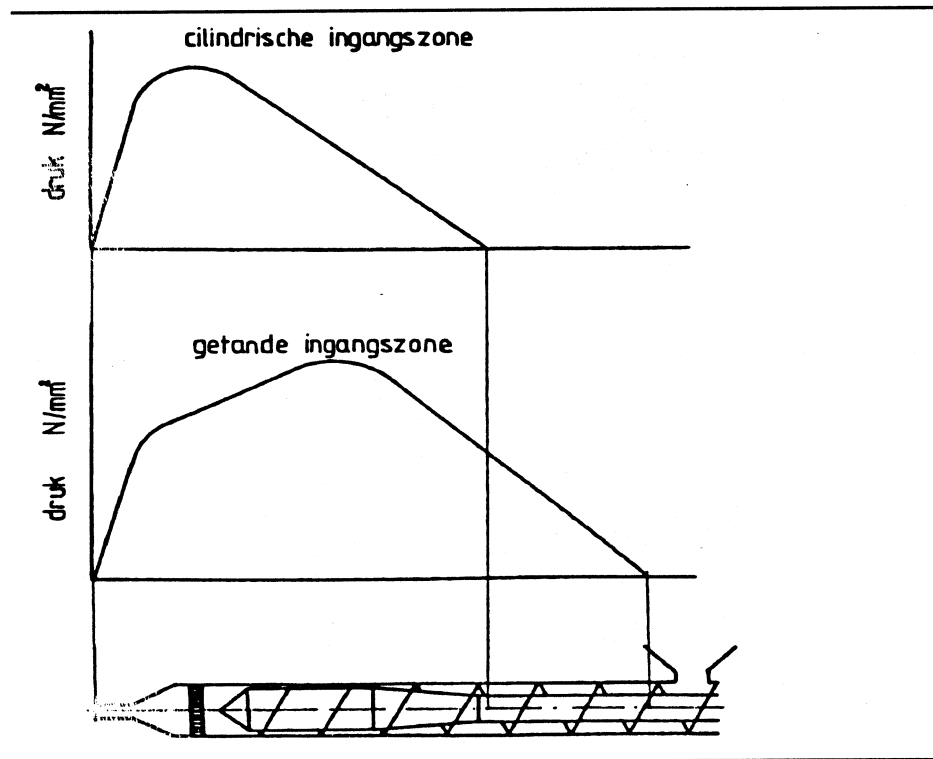
In figuur 11.14 is de productie weergegeven als functie van de druk in de cilinder vóór de schroef, voor een getande ingangzone en een cilindrische ingangzone.



Figuur 11.14: Invloed van de voedingszone op de productie

Bij een gegroefde ingangszone vertoont de productie uitgezet tegen de druk een vlakker verloop dan in het diagram van figuur 11.7.

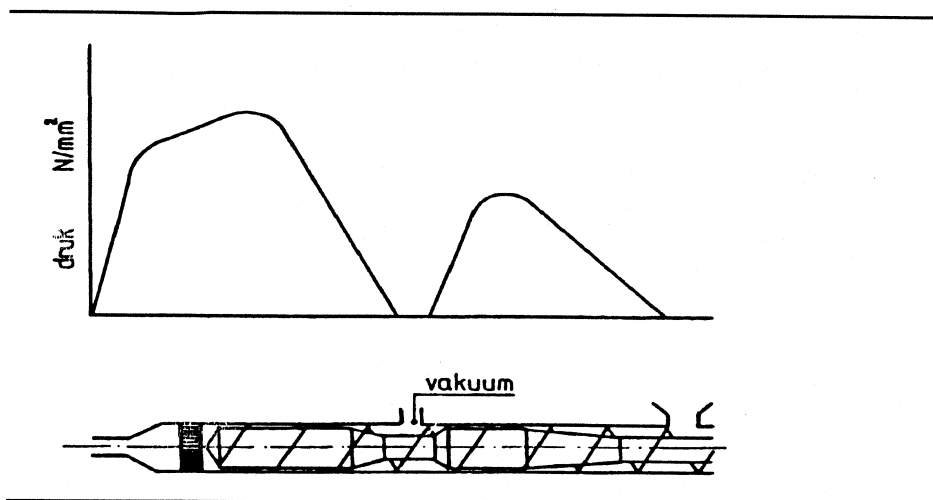
In figuur 11.15 is het drukverloop in de cilinder weergegeven voor een cilindrische en voor een getande ingangszone. De drukopbouw in de getande ingangszone begint eerder dan in de cilindrische zone.



Figuur 11.15: Drukverloop in extrusiecilinders

Het drukverloop in een ontgassingsschroefcilinder (figuur 11.12E) is weergegeven in figuur 11.16. Waar de kerndiameter van de schroef afneemt daalt de druk tot nul. Hier kunnen lucht en eventuele gassen naar buiten ontsnappen zonder dat gesmolten kunststof naar buiten geperst wordt.

Ontgassingsschroeven worden toegepast voor het extruderen van platen uit PS, slagvast PS en ABS. Vergeleken met een standaard driezonenschroef is de schroef langer en is de extruder voorzien van een motor met een groter vermogen. De extruder werkt bij een hoger toerental, waardoor de opbrengst wordt vergroot. Het materiaal gaat zó snel door de extruder dat vocht en lucht niet door de vultrechter kunnen ontwijken. Deze gassen kunnen alléén in het ontgassingsstuk worden afgevoerd.

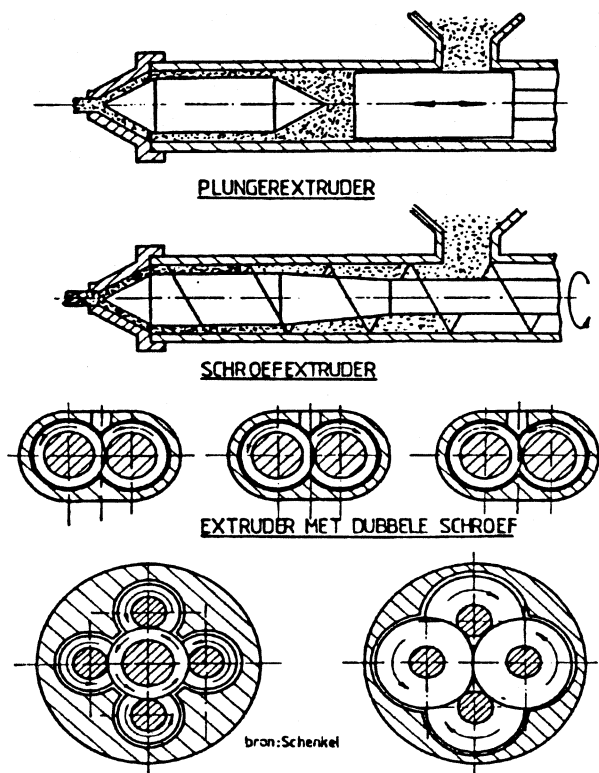


Figuur 11.16: Drukverloop in een ontgassingscilinder

Andere plastificeerunits

Tot nu toe zijn de meest gangbare extruders met een enkele schroef besproken. Kunststoffen kunnen ook met andere typen extruders worden geëxtrudeerd (figuur 11.17). De meest eenvoudige machine is de plunjermachine; deze wordt nog toegepast voor het extruderen van ultrahoogmoleculaire polyethenen en komt verder nog voor in kleine spuitgietmachines. De meeste moderne spuitgietmachines hebben overigens een plastificeerzone met een axiaal beweegbare enkele schroef (zie het hoofdstuk *Spuitgieten van kunststoffen*).

In beperkte mate komen extruders voor met méér schroeven. Enkele geometrieën van dubbelschroefsextruders zijn getoond in figuur 11.18. Dubbelschroefsextruders waarvan de schroefgangen niet in elkaar grijpen worden uitsluitend toegepast voor mengen en componderen. De schroeven van dit type extruder draaien in tegengestelde richting. De capaciteit is ongeveer even groot als die van twee extruders met enkele schroef.

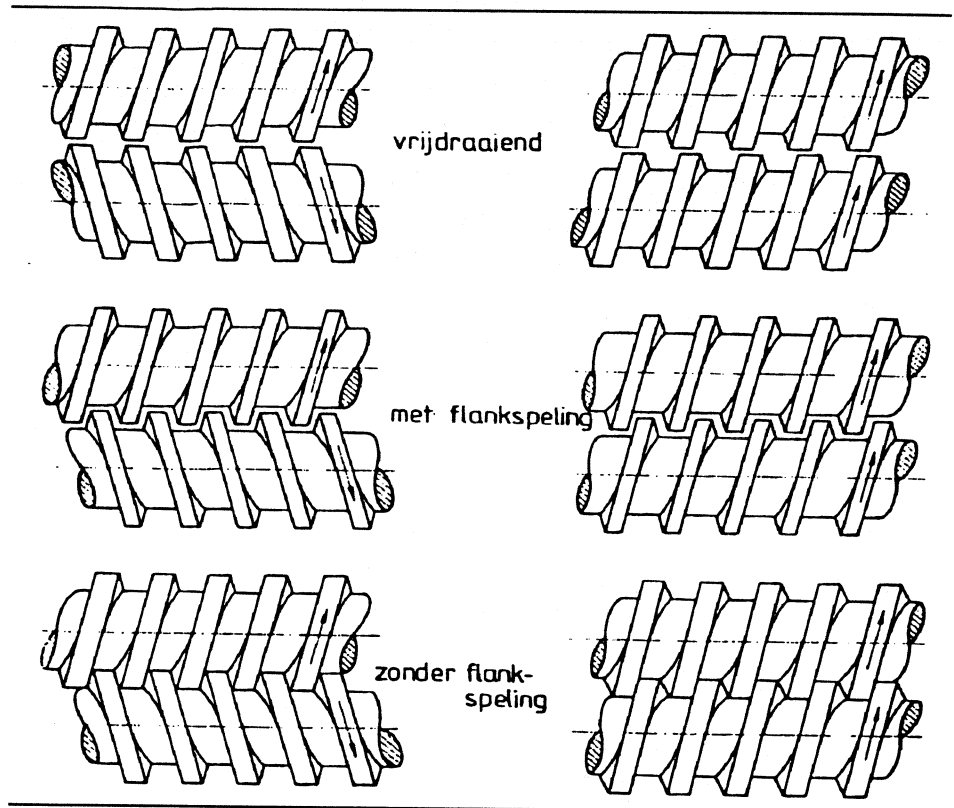


Figuur 11.17: Enkele typen extruders

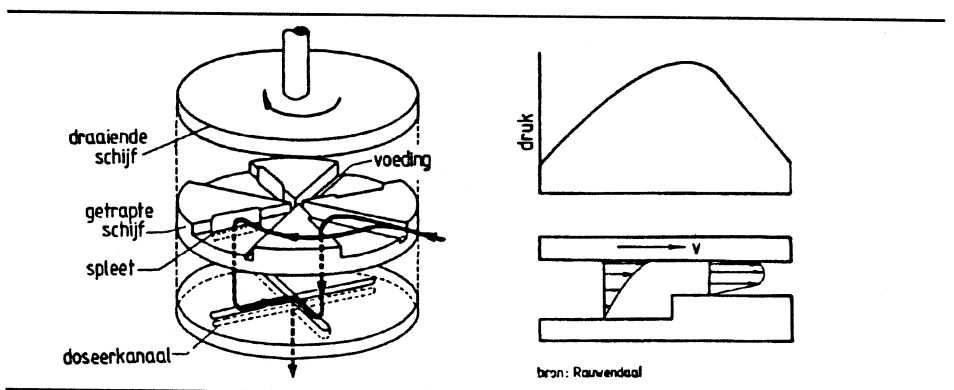
Schroeven met in elkaar grijpende schroefgangen worden gebruikt voor het extruderen van poedervormige kunststoffen met een beperkte warmtestabiliteit zoals PVC. Het materiaal wordt geforceerd door de cilinder getransporteerd. Bij tegengesteld draaiende schroeven zit de grondstof in de achtvormige ruimte opgesloten en wordt bij elke omwenteling over een schroefgang verplaatst. Bij gelijkdraaiende schroeven wordt geen volledige afsluiting bereikt.

De voordelen van dubbelschroefextruders, bijvoorbeeld bij de productie van PVC-profielen, zijn de korte verblijftijd van de grondstof in de cilinder en een goede homogene smelt. Het toerental van een dubbelschroefsextruder is lager dan van een enkelschroefsextruder.

Er bestaan continu werkende schroefloze extruders, de zogenaamde diskextruders. De werking van de viscodynamische extruder in figuur 11.19 berust op drukopbouw in de getapte schijf. Dit is hetzelfde principe als hydrodynamische smering in een druklager van een schroefas (zie ook figuur 11.6).

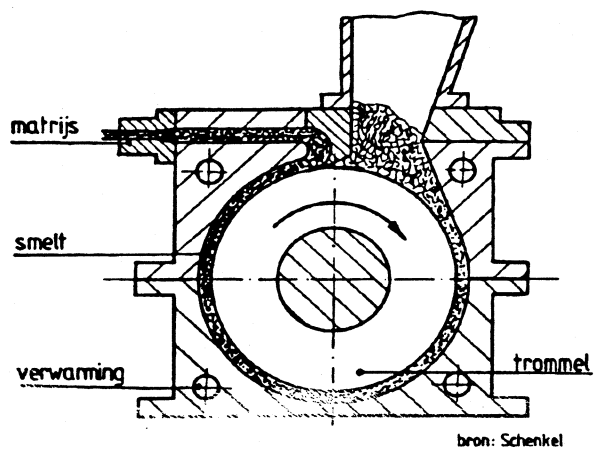


Figuur 11.18: Geometrieën van dubbelschroefextruders

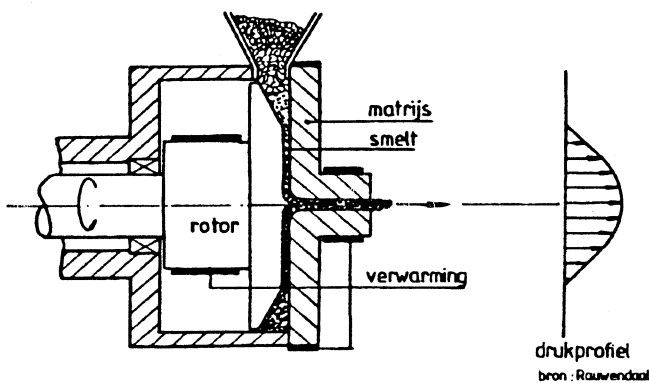


Figuur 11.19: Viscodynamische kunststofextruder (Westover)

In de trommelextruder volgens figuur 11.20 wordt de kunststof gesmolten door wrijving van de korrels in de ruimte tussen buitenwand en cilinder. Een mes schaaft de gesmolten laag van de cilinder en onder een bepaalde druk stroomt de smelt naar de matrijs.



Figuur 11.20: Trommelextruder (Schmid & Kocher)



Figuur 11.21: Elastodynamische kunststofextruder

In figuur 11.21 is een elastodynamische extruder weergegeven. Als een visco-elastische kunststofsmeelt wordt onderworpen aan afschuiving ontstaan normaalspanningen die niet, zoals bij zuiver visceuze vloeistoffen, in alle richtingen gelijk zijn. De normaalspanning wekt een centripetale pompactie op. De extruder volgens figuur 11.21 wordt ook wel 'normaalspanningsextruder' genoemd.

Met de huidige stand van de techniek kunnen de diskextruders het niet opnemen tegen de opbrengst van de enkelschroefextruder. Voor een beschrijving van andere manieren van extruderen wordt verwezen naar gespecialiseerde literatuur.

11.4 TOEPASSINGEN

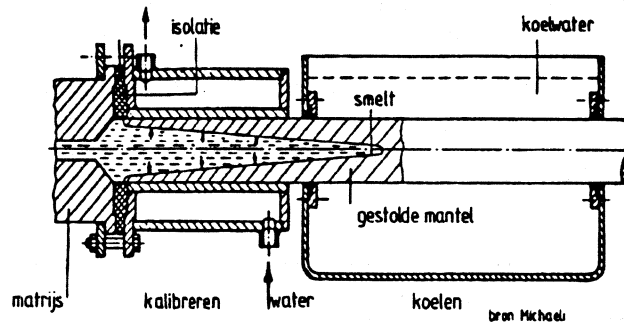
Achtereenvolgens wordt nu extrusie van de volgende produkttypen besproken:

- Stafmateriaal;
- Buizen;
- Profielen;

- Plaat en folie;
- Ommanteling van metaaldraad;
- Draad en band;
- Verpakkingsnetten.

Extrusie van stafmateriaal

Voor massief cilindervormig stafmateriaal tot een diameter van 500 mm en voor prismatisch stafmateriaal met een rechthoekige doorsnede tot 250 x 100 mm wordt het calibreerapparaat direct aan de matrijs gekoppeld. Isolatie zorgt voor de scheiding tussen de verwarmde matrijs en het sterk gekoelde calibreergedeelte (figuur 11.22).



Figuur 11.22: Extrusie van stafmateriaal

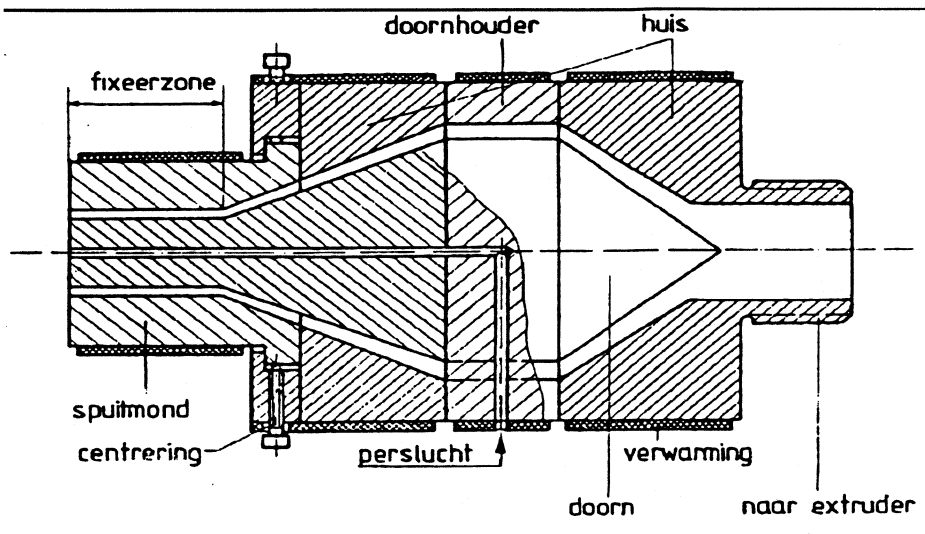
Tijdens en na het calibreeren wordt er gekoeld. De smelt stroomt vanuit een matrijs met een diameter van 8 tot 10 mm onder een vrij steile hoek in de koelsectie. Het materiaal dat in contact komt met de wand van de koelzone vormt een vaste buisvormige wand om een vloeibare kern. De druk in de extruder werkt door tot in het vloeibare deel in de calibreersectie. De vloeibare kern en de extrusiedruk voorkómen dat door de volumekrimp van het materiaal krimpholten in de kern ontstaan.

Door de zéér langzame afkoeling van dik stafmateriaal kunnen kleine extruders worden gebruikt met een schroefdiameter tussen 30 en 45 mm. Voor nylon stafmateriaal met een diameter van 60 mm is de extrusiesnelheid 2,5 m/h en bij 200 mm diameter ongeveer 0,5 m/h.

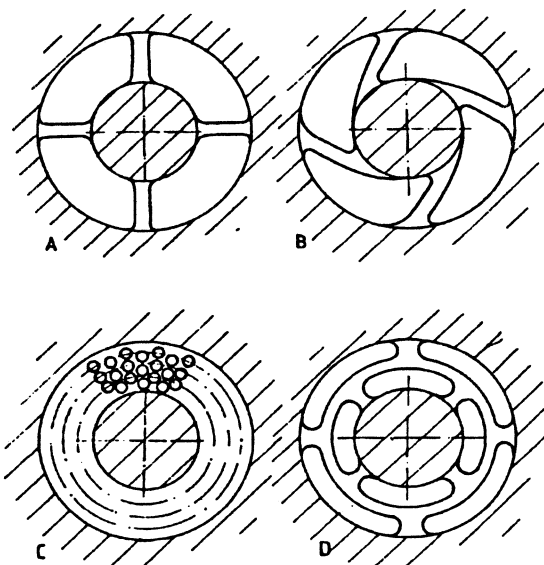
Extrusie van buizen

Het extruderen van buizen gebeurt op soortgelijke wijze als het extruderen van stafmateriaal. In het inwendige van de matrijs moet een torpedo of doorn worden ingebouwd om de binnenkant van de buis te vormen (figuur 11.23).

De ophanging van de doorn in de matrijs kan op verschillende manieren gebeuren (figuur 11.24). Direct achter de ophanging van de doorn ontstaan vloeinaden. Om deze naden goed aaneen te laten vloeien laat men de doorsnede van de matrijsopening achter de doorn afnemen. Hierdoor ontstaat in het laatste gedeelte van de spuitkop een compressiezone.



Figuur 11.23: Extrusie van buisprofiel



Figuur 11.24: Ophanging van de doorn

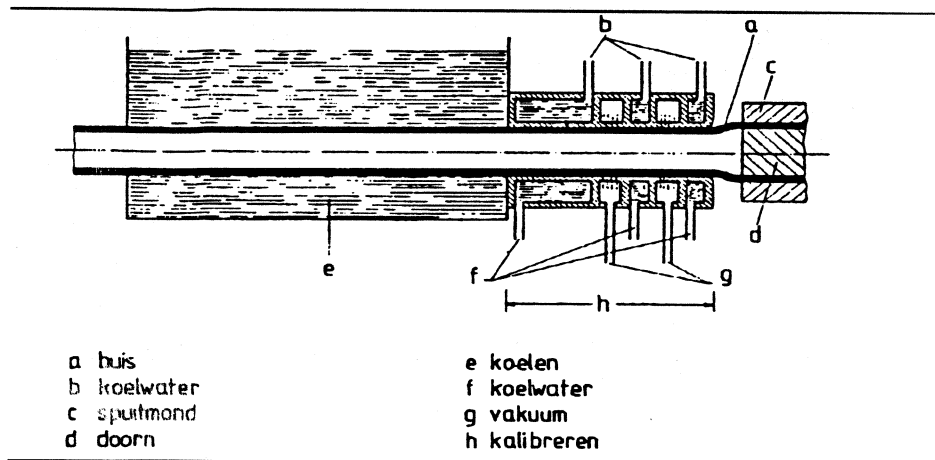
De perslucht in de doornhouder dient voor calibrering van de buis. Op de matrijs zijn stelschroeven aangebracht waarmee men tijdens het extrusieproces de wanddikte kan corrigeren.

Na het extrusieproces volgt het calibreren en het koelen.

Een buis kan inwendig of uitwendig worden gecalibreerd. Uitwendig calibreren is het meest gebruikelijk omdat in het algemeen de buitenmaten in normen zijn vastgelegd. De verbinding van buizen gebeurt met moffen en spuitstukken die worden gespuitsgiet met nauwkeurige inwendige maten. Voor kritieke toepassingen worden de verbindingstukken aan de buizen gelast.

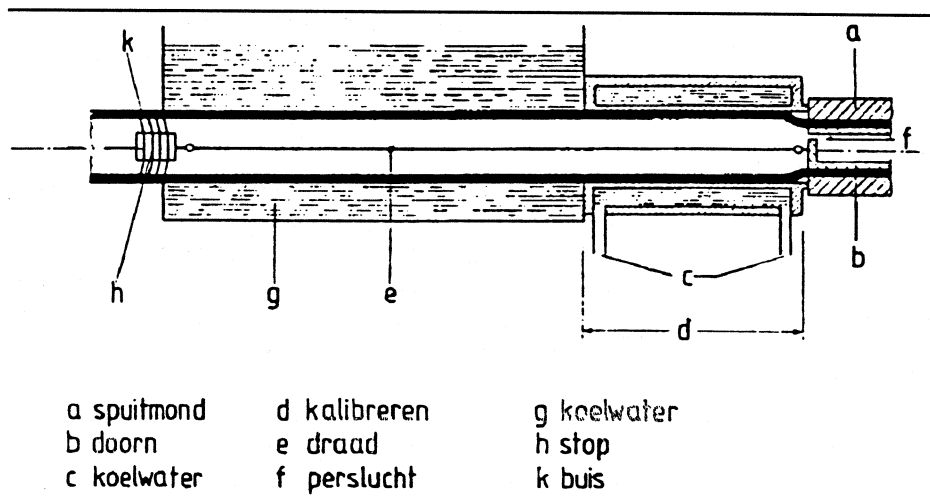
Voor het calibreren van de buitenmaat gebruikt men perslucht of vacuüm.

Bij *vacuümcalibreren* (figuur 11.25) wordt de buis na het passeren van de matrijs tegen een gekoelde vorm gezogen. In het eerste gedeelte van het apparaat zijn beurtelings kamers met koelwater en kamers met vacuüm aangebracht. Door de sleufjes wordt de nog slappe buis tegen de calibreercilinder gezogen. Na de calibreerinrichting volgt de koelsectie.



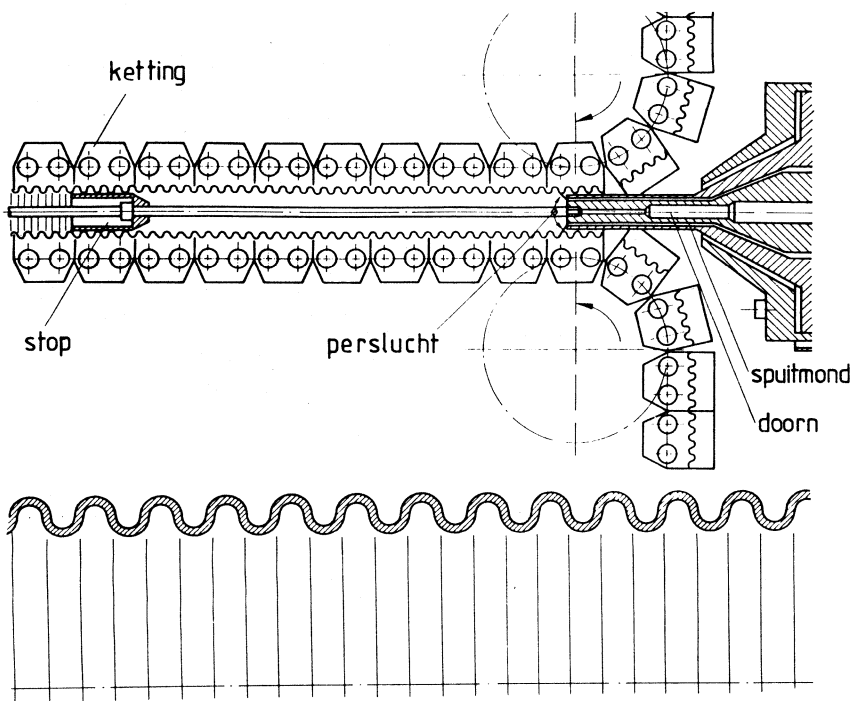
Figuur 11.25: *Uitwendig calibreren met vacuüm*

Bij *persluchtcalibreren* wordt de perslucht door de doornhouder en de doorn van de matrijs in de buis gevoerd. Een stop in de geëxtrudeerde buis zorgt er voor dat de perslucht niet wegstroomt (figuur 11.26). De perslucht drukt de nog slappe buis tegen de gekoelde calibreercilinder en vervolgens gaat de buis over naar de koelsectie van een installatie.



Figuur 11.26: *Uitwendig calibreren met perslucht*

Gegolfde buis wordt gevormd door periodieke fluctuaties in de calibreerzone (figuur 11.27). De vormgeving gebeurt in halve-cirkelvormige matrijssegmenten die door een transportketting worden voortbewogen met dezelfde snelheid als de geëxtrudeerde buis. De perslucht drukt de nog slappe buis in de holten van de matrijselementen. Ook hier wordt de perslucht binnengehouden door een stop in de buis.



Figuur 11.27: Extrusie van gegolfde buis

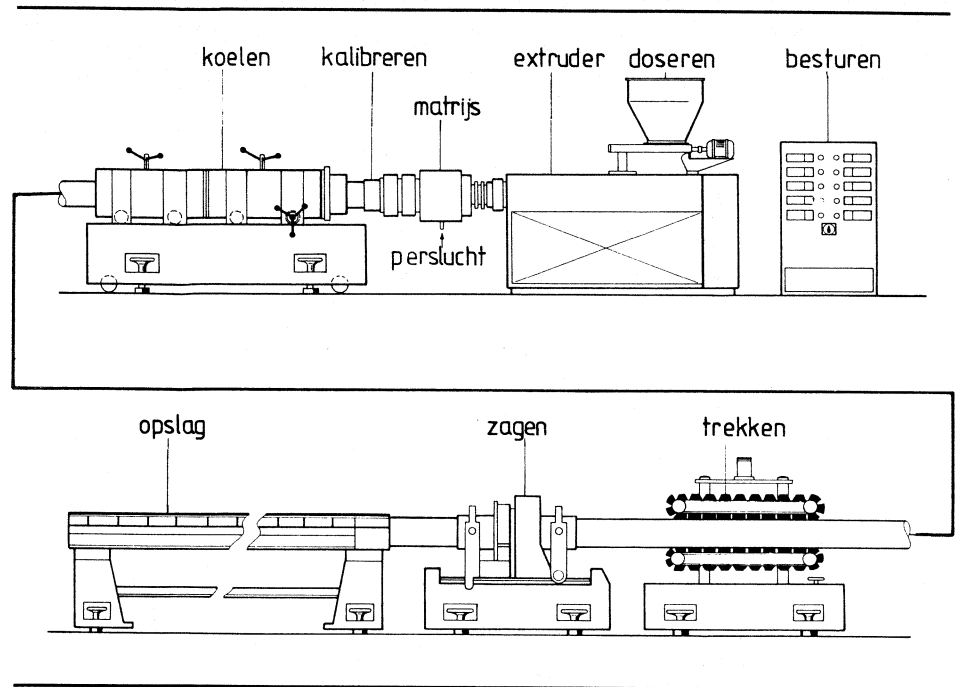
In figuur 11.28 is een extrusie-installatie weergegeven voor het fabriceren van buisprofielen.

Voor fabricage van buizen met een zéér grote diameter, ca. 3 m, past men een wikkelprocédé toe. Men extrudeert band die direct op een cilindrische stalen mal wordt gewikkeld. De band wordt met een bepaalde overlap opgewikkeld en door de druk wordt deze overlap aan elkaar gelast.

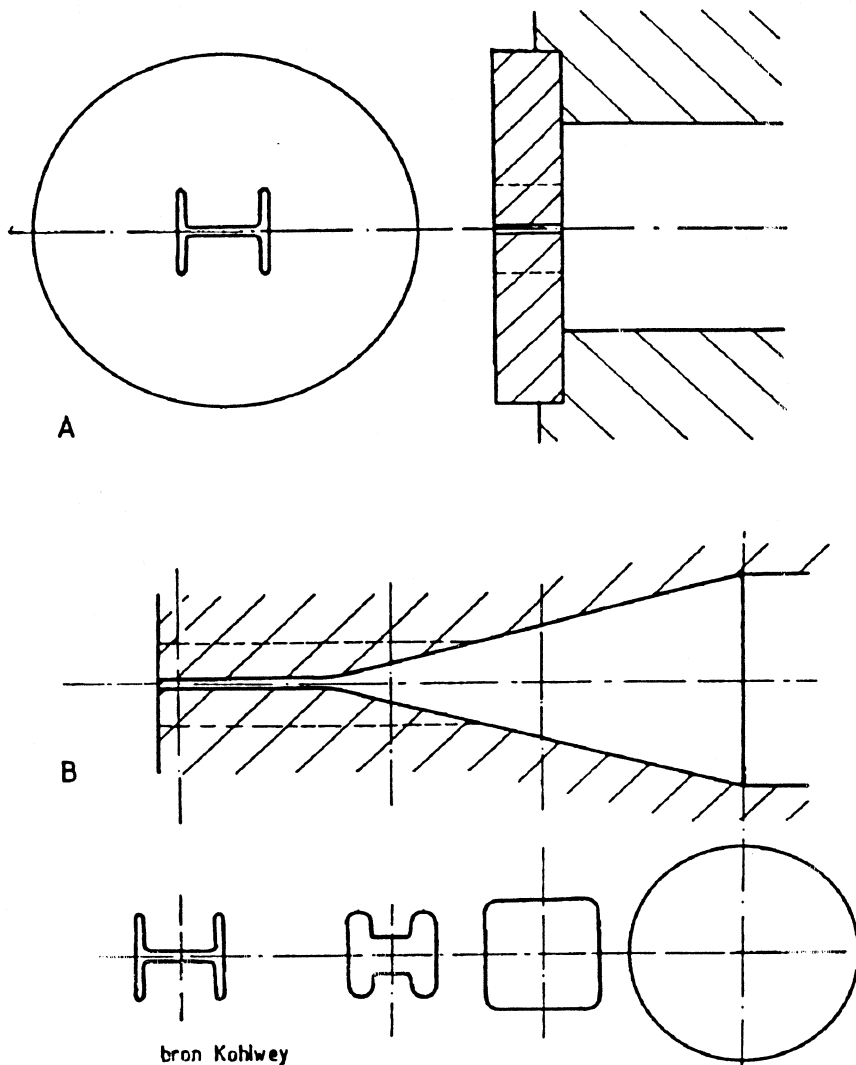
Profielextrusie

Bij profielextrusie zijn grote verschillen in matrijskonstrukties mogelijk. In figuur 11.29A is een zéér eenvoudige konstruktie weergegeven. Het produktvormende deel vormt een abrupt einde van de instroomsectie. Door de dode hoeken (zie ook het hoofdstuk *Extrusie van metalen*) kan men deze konstruktie alléén toepassen voor thermisch stabiele kunststoffen. Dergelijke eenvoudige matrijzen zijn vooral geschikt voor zéér kleine produktieruns.

figuur 11.29B toont een geheel ander type matrijs. De cilindervormige instroomsectie gaat over in een rechthoekige doorsnede en vervolgens komt geleidelijk het profiel naar voren. Daarna volgt een lange fixeerzone. Dit soort matrijzen wordt toegepast voor grote produktieruns. Een dergelijke goed uitgevoerde instroomzone is noodzakelijk om degradatie bij thermisch gevoelige materialen te voorkómen.



Figuur 11.28: Extrusie van buisprofielen

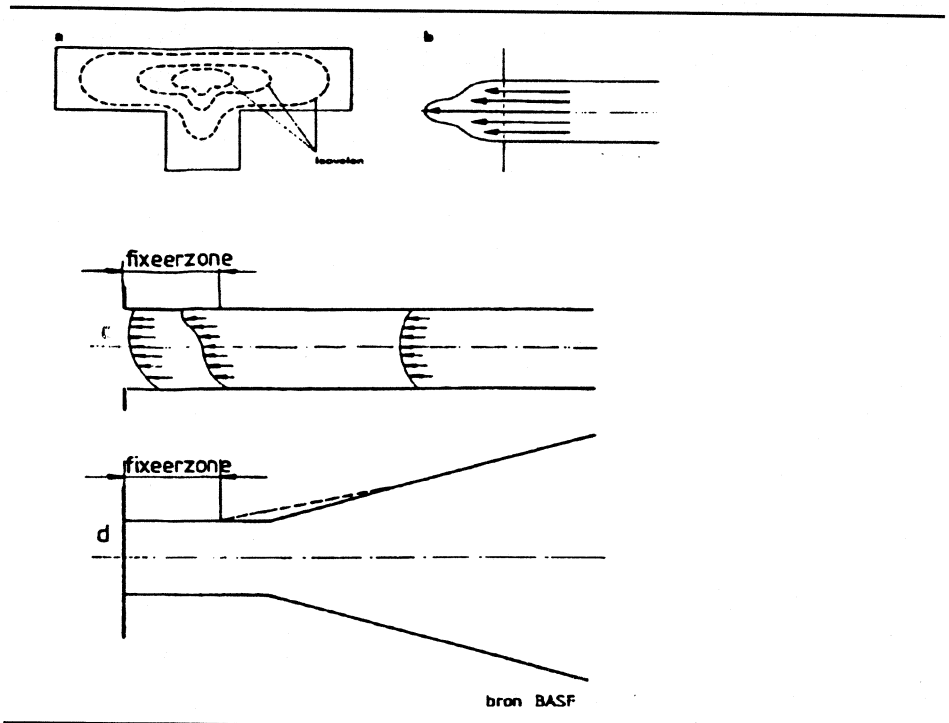


Figuur 11.29: Profielmatrijzen voor kunststofextrusie

Het is belangrijk dat de snelheidsverdeling in het profiel gelijkmatig is. In paragraaf 11.3 is al vermeld dat de gelijkmatigheid van de instroom kan worden bevorderd door een gatenschijf. In het profiel van figuur 11.30b is de weerstand in het centrum véél kleiner dan aan de rand. Het materiaal stroomt in het midden sneller naar buiten.

Figuur 11.30a toont isovelen: lijnen van constante uitstroomsnelheid. Dit T-profiel kan worden verbeterd door vormaanpassingen zoals een wandverdunning in het centrum.

In figuur 11.30c is aan de rechterzijde een stroomsnelheidsprofiel weergegeven. Wil men de snelheid aan de bovenzijde wat opvoeren (figuur 11.30c links) dan kan men bijvoorbeeld de fixeerzone korter maken. De weerstand in een kanaal is recht evenredig met de lengte en omgekeerd evenredig met de derde macht van de breedte.

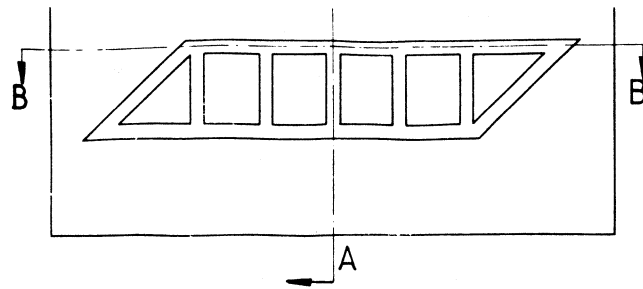


Figuur 11.30: Kunststofstroom in een extrusiematrijs

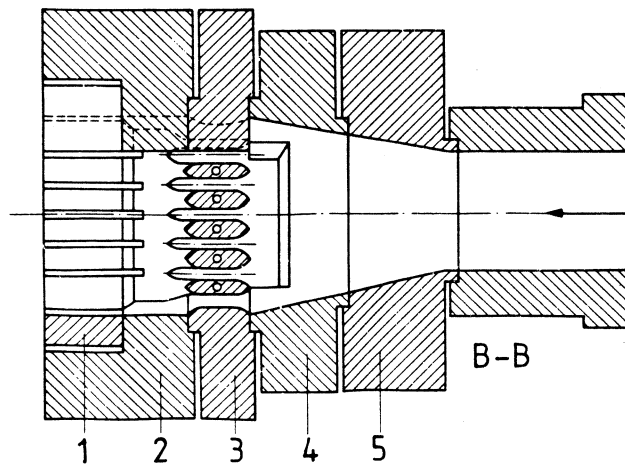
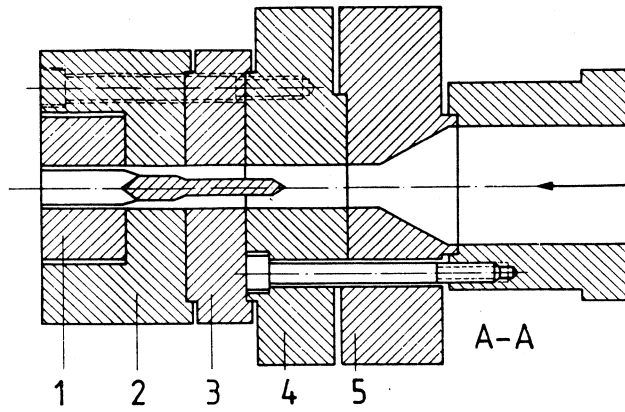
Bij profielextrusie moet men rekening houden met het herinneringsvermogen van kunststoffen. Bij een rechthoekig profiel wordt de breedte smaller dan de matrijsbreedte en de dikte wordt groter dan de opening in de matrijs. Daarom neemt men de breedte in de matrijs ongeveer 5 % groter en de hoogte van de instroomopening ongeveer 10 % kleiner dan de produktmaten.

In de figuren 11.31 en 11.32 is een matrijs weergegeven voor een profiel met een aantal gesloten secties. De cilindrische smeltstroom in de extruder gaat geleidelijk over in een ongeveer rechthoekige stroom die aangepast is aan het gewenste profiel. Na de overgang wordt de stroom gesplitst. Daarna worden de schotten in het produkt gevormd. In de doorn wordt perslucht toegelaten voor de koeling in het inwendige van het profiel.

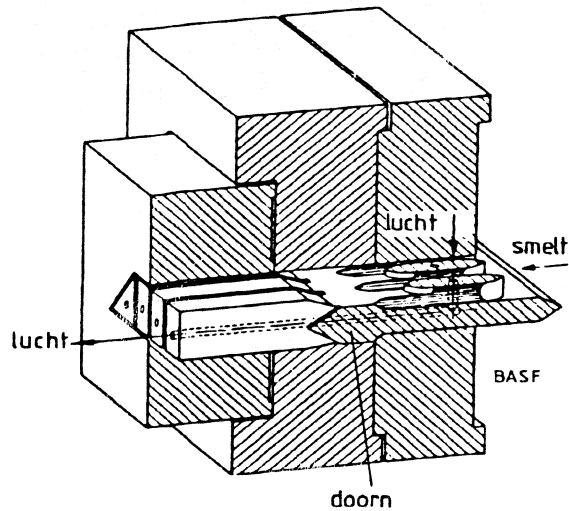
Profielen moeten evenals staf- en buismateriaal op maat worden gecalibreerd. In figuur 11.33 is een vacuümcalibreerapparaat weergegeven. In de vacuümsectie wordt het profiel tegen de gekoelde wand gezogen.



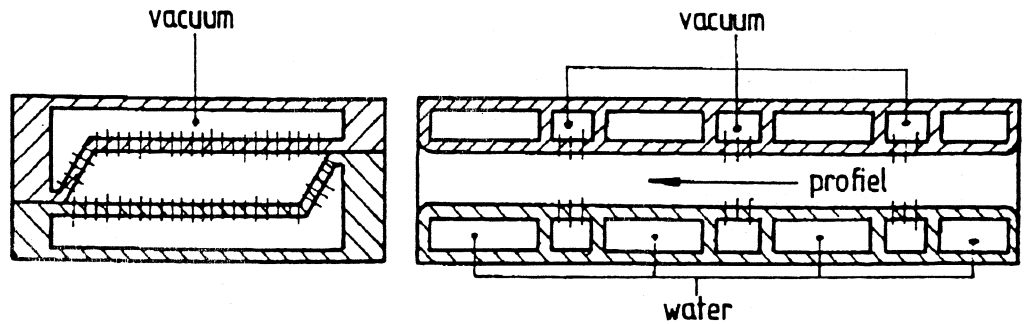
- 1 spuitmond
- 2 plaat
- 3 doornhouder
- 4 plaat
- 5 plaat



Figuur 11.31: Extrusiematrijs voor een profiel

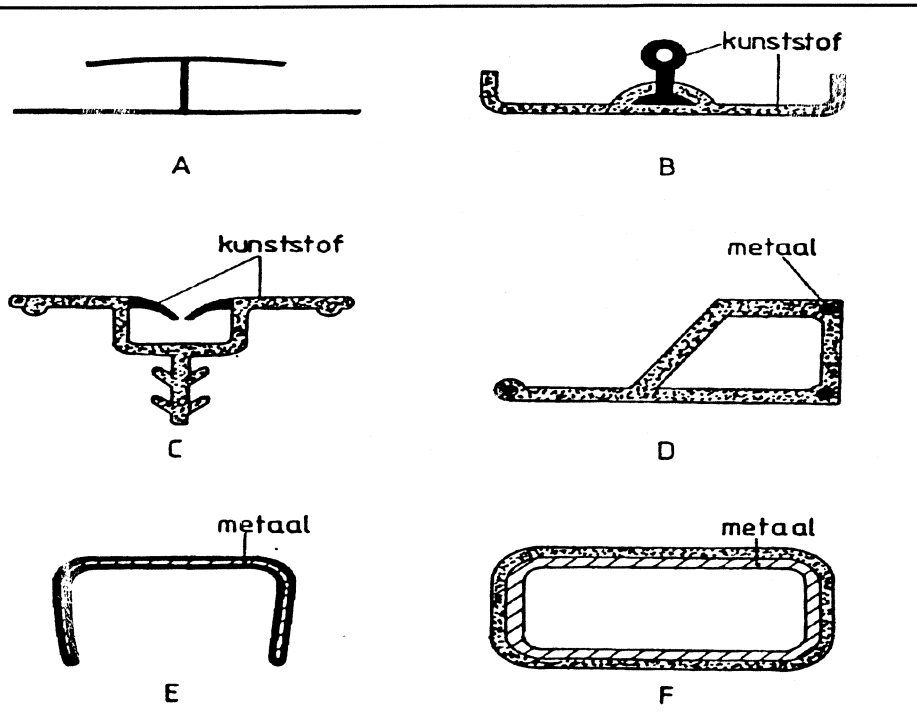


Figuur 11.32: Extrusiematrijs voor een profiel



Figuur 11.33: Vacuümcalibreren van een profiel

In figuur 11.34 zijn enkele profielen weergegeven. De figuren 11.34B en C tonen profielen die uit twee verschillende materialen en/of kleuren bestaan; men spreekt hier van coëxtrusie. Een coëxtrusie-installatie bestaat uit twee of méér extruders en één matrijs. Coëxtrusie wordt bijvoorbeeld toegepast voor PVC-raamkozijnprofielen met een afdichtingsrand van een flexibeler kunststof. De profielen van de figuren 11.33D, 11.33E en 11.33F bezitten metalen profielen: het metaal is een draagprofiel of een sierprofiel. Deze profielen worden geëxtrudeerd in een dwarskop zoals ook gebruikt voor ommanteling van draad (zie figuur 11.46).



Figuur 11.34: Extrusieprofielen

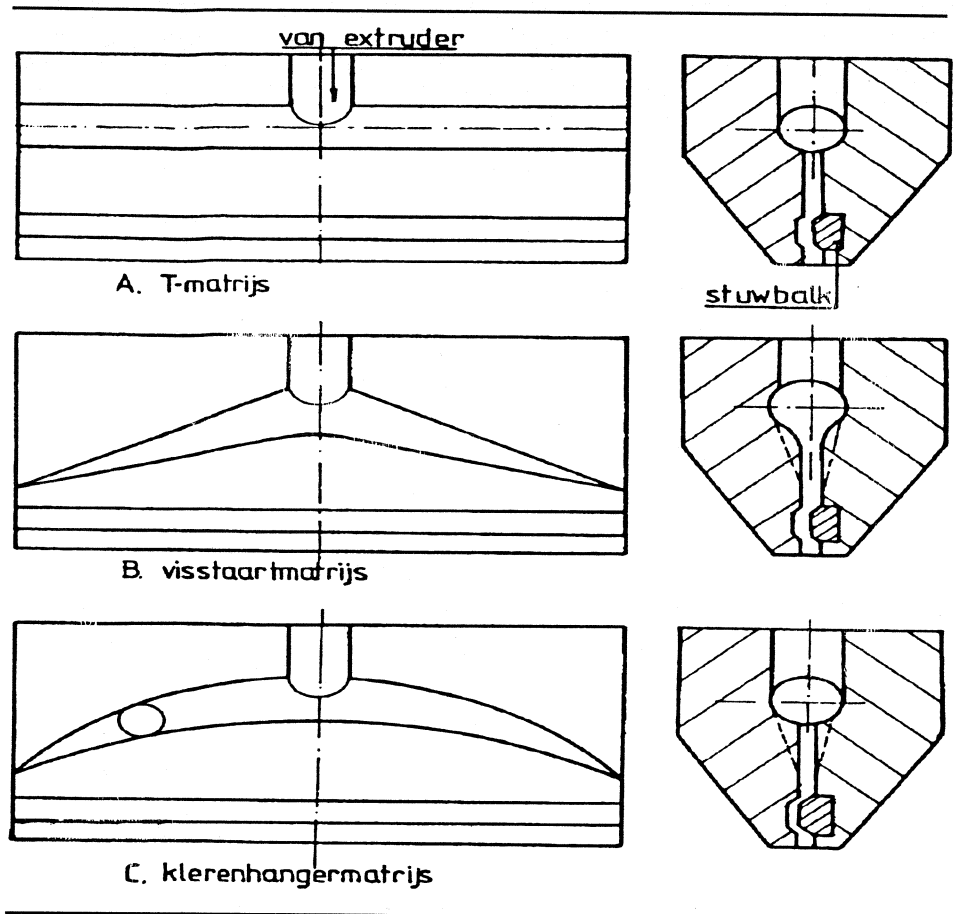
Extrusie van plaat en folie

Bij het extruderen van plaat en folie moet de smeltstroom over een korte afstand van een cilindrische stroom omgezet worden in een zeer brede en dunne stroom. De smeltstroom in de plaat moet zo gelijkmatig over de volle breedte verlopen. Er zijn een aantal soorten spuitkoppen waarmee dit te bereiken is (figuur 11.35).

De meest eenvoudige constructie is de T-matrijs van figuur 11.35A. De spuitkop heeft een cirkelvormig verdeelkanaal. De kunststof stroomt vanuit het verdeelkanaal door een nauwe spleet, de zogenaamde afremzone, waarin een stuwbalk is opgenomen. Deze stuwbalk is over de lengte flexibel. Met behulp van een groot aantal stelschroeven kan de stuwbalk zodanig worden gebogen dat de smelt met gelijkmatige snelheid naar buiten stroomt. De T-matrijs bezit een aantal dode hoeken die deze matrijs minder geschikt maakt voor temperatuurgevoelige materialen zoals PVC.

De matrijsen van figuur 11.35B en vooral figuur 11.35C zijn beter geschikt voor het verwerken van temperatuurgevoelige kunststoffen. Het type volgens figuur 11.35C wordt ook wel klerenhangermatrijs genoemd. De doorsnede van het verdeelkanaal neemt af naar de einden van de matrijs en door de gebogen vorm wordt de afremzone korter.

In figuur 11.36 zijn enige details van spuitkoppen getekend. Figuur 11.36A is een klerenhangermatrijs. Als de stuwbalk goed wordt ingesteld zullen bij deze constructie géén dode hoeken ontstaan in de smeltstroom. Behalve door de stuwbalk kan de smeltstroom ook worden gecorrigeerd door de rij stelschroeven in de flexibele lip van de spuitkop.

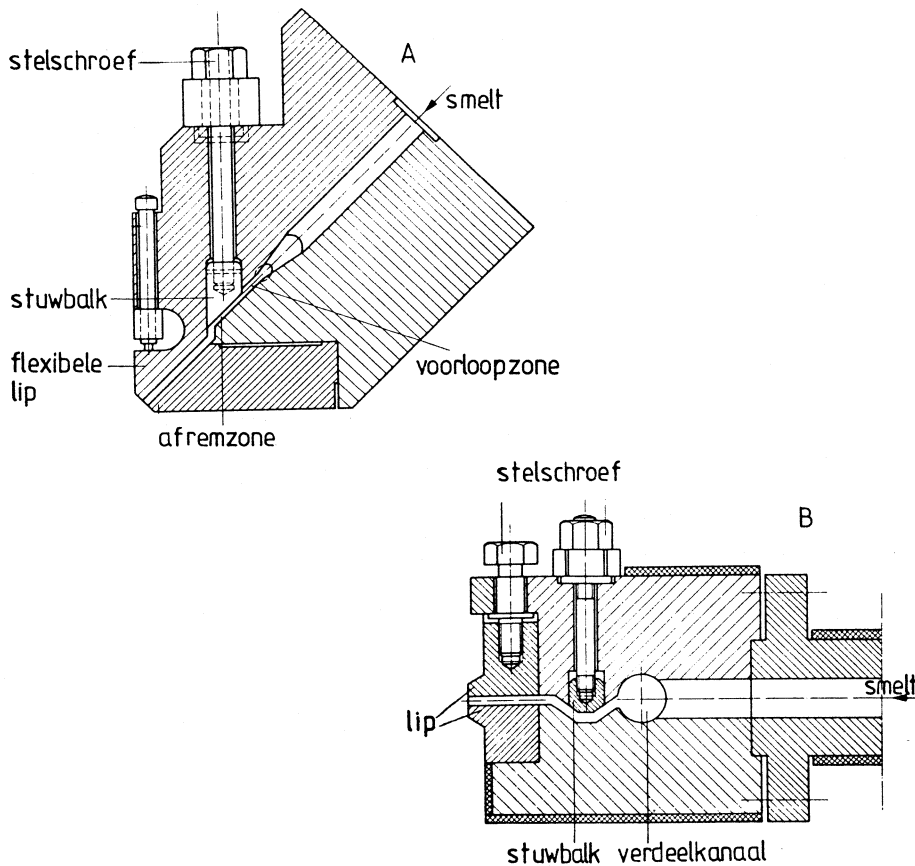


Figuur 11.35: Verdeelkanalen in extrusiematrijzen

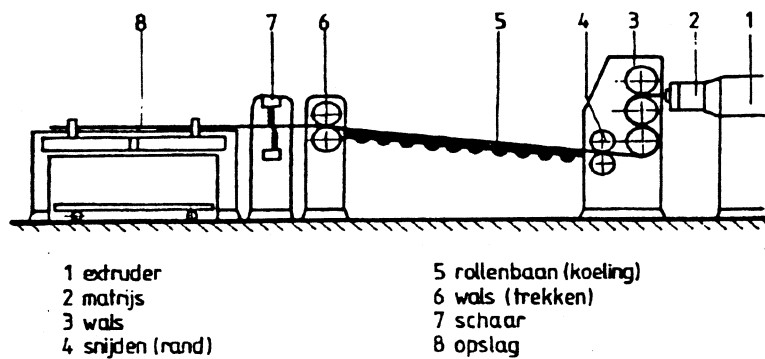
De spuitkop van figuur 11.36B is een T-matrix. Ook in deze uitvoering is er voor gezorgd dat bij de stuwbalk geen dode hoeken ontstaan.

In figuur 11.37 is een installatie getekend voor het extruderen van plaat. Na de matrix gaat het materiaal door een walsenstelsel om de oppervlaktekwaliteit van de plaat te verbeteren en om de plaat te koelen. Indien de volgende fabricage­stap bestaat uit thermovormen mag de plaat in de wals niet worden uitgewalst om ingewalste spanningen en daardoor extra vervorming te voorkómen. Na walsen wordt de plaat op breedte gesneden en daarna volgt een extra lucht­koeling van de plaat op een rollenbaan. De plaat wordt nu op maat geknipt en opgeslagen.

Er is tot dusver géén onderscheid gemaakt tussen plaat en folie. Onderscheid tussen folie en plaat is in het extrusieproces niet te maken. Men spreekt doorgaans van een folie als deze op een rol wordt gewikkeld. Als dit niet kan vanwege de dikte dan spreekt men van plaat.

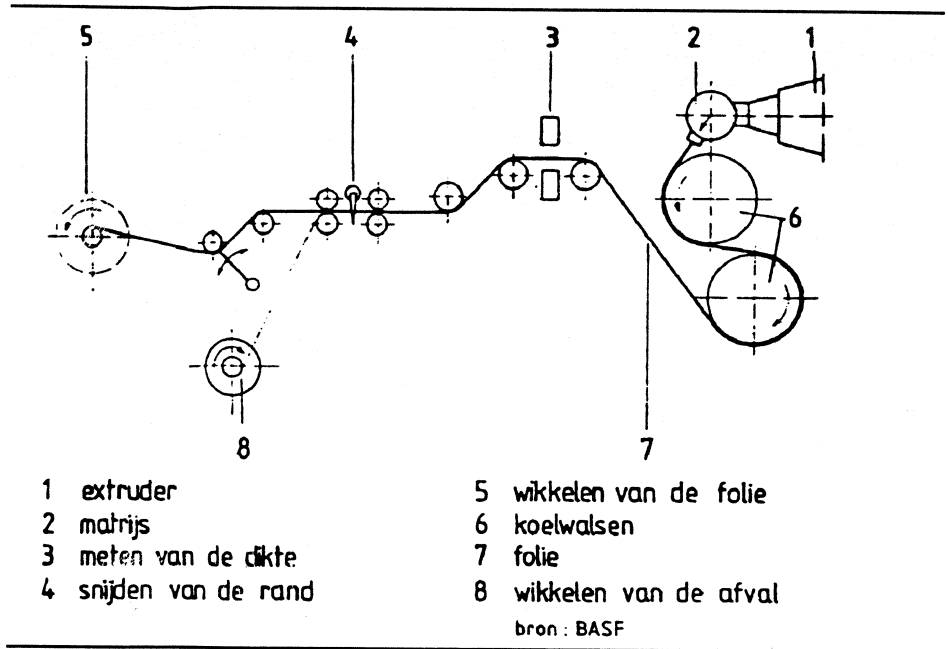


Figuur 11.36: Extrusiematrijzen voor folie en plaat



Figuur 11.37: Installatie voor het extruderen van plaat

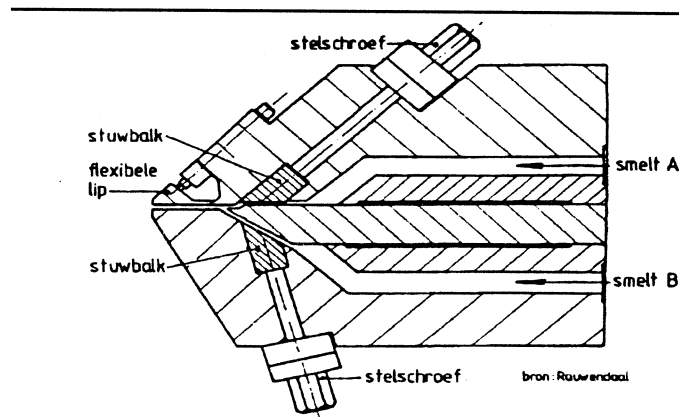
De dikte bij het uitstromen uit de spuitkop bedraagt voor dunne folies tenminste 0,5 mm. De folie wordt daarna op de gewenste dikte getrokken. De folie passeert na de spuitkop een stelsel koelwalsen of een waterbad (figuur 11.38). Na diktemetingen en na afsnijden van de rand volgt het opwickelen op rollen. Deze installatie noemt men een Chill-roll-installatie.



Figuur 11.38: Installatie voor het extruderen van folie

Om bepaalde eigenschappen van plaat of van folie te verhogen past men wel een coëxtrusieproces toe waarbij twee of méér extruders met verschillende materialen een matrijs voeden (figuur 11.39). Een voorbeeld is de tweelaags afdekkfolie voor yoghurtbekers: één laag dient voor de stevigheid (vormvastheid); de andere laag heeft een geringe gas- en dampdoorlaatbaarheid.

Bij coëxtrusie worden de materiaalstromen in het laatste gedeelte van de matrijs samengevoegd tot één stroom. Vermenging van deze stromen treedt niet op omdat tengevolge van de hoge viscositeiten geen turbulentie optreedt. Materialen die goed aan elkaar hechten kan men direct op elkaar extruderen. Bij materialen die niet goed hechten moet men met een extra extruder een tussenlaag aanbrengen, die aan de andere materialen goed hecht.

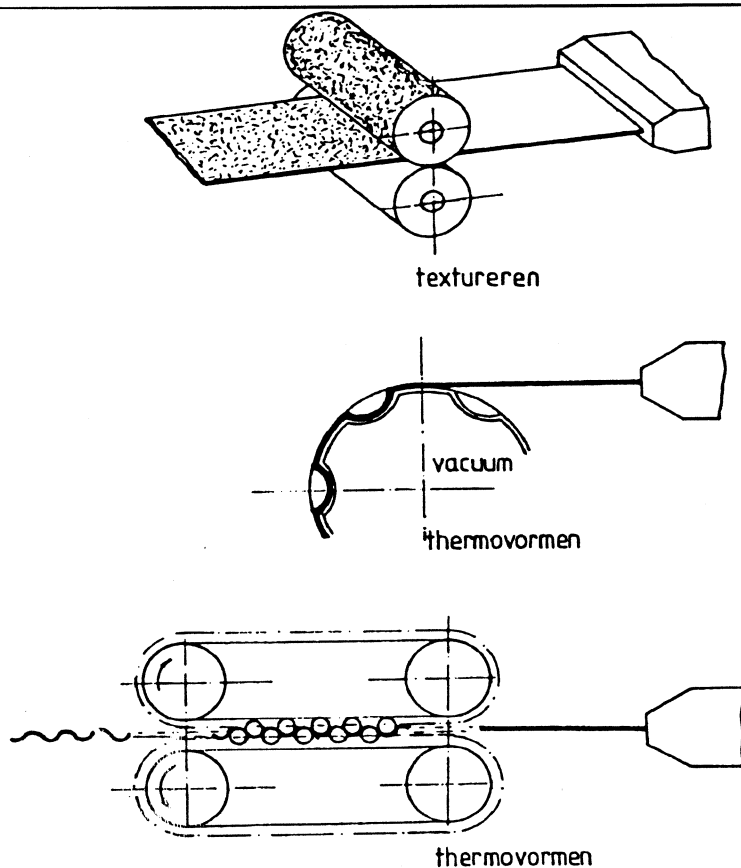


Figuur 11.39: Matrijs voor coëxtrusie van plaat

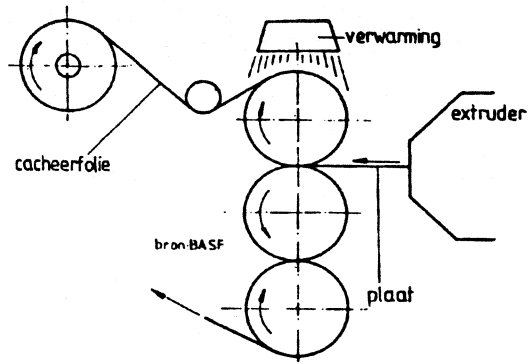
In het extrusieproces voor de fabricage van plaat kan men oppervlaktebewerkingen integreren (figuur 11.40). In plaats van een hoogglans gepolijste en verchroomde walsrol gebruikt men bijvoorbeeld een getextureerde wals om een getextureerde plaat te verkrijgen.

Men kan ook thermovormen integreren in het extrusieproces. Op deze wijze worden thermoplastische golfplaten gemaakt.

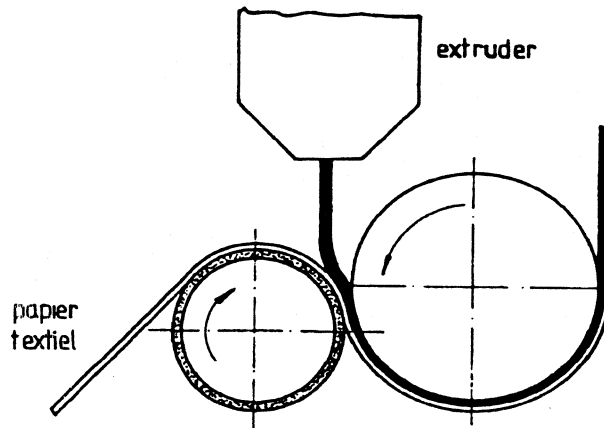
Men kan ook geëxtrudeerde plaat bekleden met een sierfolie van kunststof of met een metaalfolie (figuur 11.41). Bij twee kunststoffen met een lage verwerkingstemperatuur kunnen zonder voorverwarmen van de folie beide delen op elkaar worden gewalst. Een metaalfolie moet echter worden voorgewarmd. Een omgekeerd proces komt ook voor, namelijk het bekleden van papier en textiel met kunststof. Een extruder laat kunststof stromen op een papier- of textielbaan die met grote snelheid door een stelsel walsrollen loopt. De ongeveer 0,5 mm dikke kunststofsmeelt wordt zéér snel gerekt en op de drager gewalst (figuur 11.42).



Figuur 11.40: Geïntegreerde nabewerkingen



Figuur 11.41: Cacheren van plaat



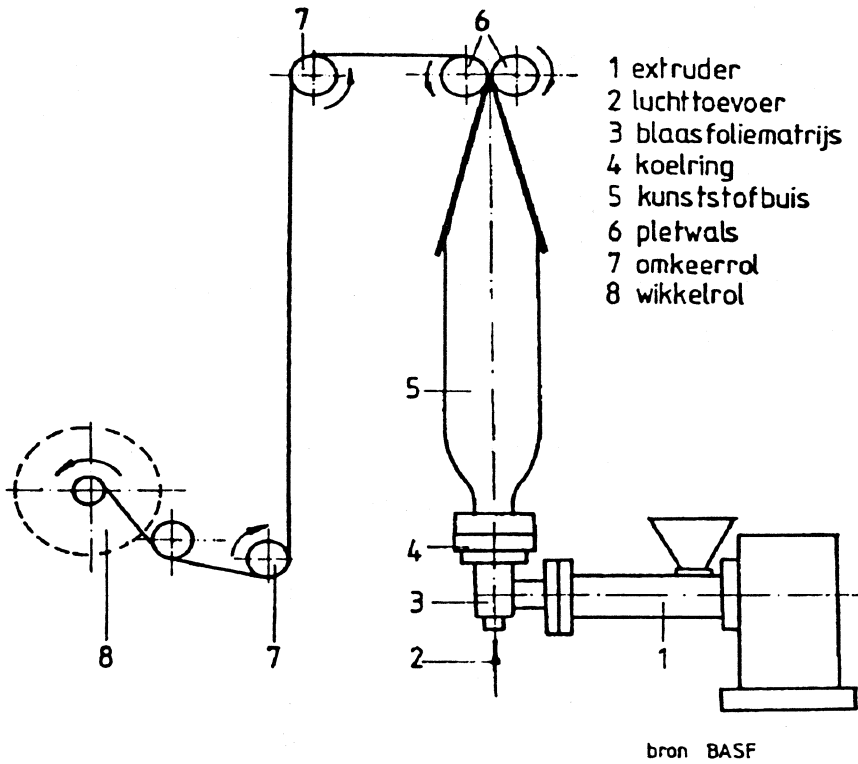
Figuur 11.42: Bekleden van papier en textiel

Een geheel ander proces voor het fabriceren van folie is het folieblazen. Deze techniek is geïntegreerd in het extrusieproces. Folieblazen wordt niet beschouwd als een blaasvormproces omdat blaasvormen bedoeld is voor holle produkten. Een schema van een folieblaasinstallatie is in figuur 11.43 weergegeven. In de matrijs wordt een dunne geëxtrudeerde buis gevormd, die in deze figuur naar boven wordt geleid. In de buis brengt een geringe overdruk aan waardoor de buis in diameter oprekt tot de gewenste foliedikte. De diameterverhouding is meestal 1 : 2½. De folie wordt niet alleen tangentiële richting opgerekt maar ook in axiale richting. De lucht voor het opblazen van de buis dient ook voor de koeling binnenin de buis. Bij punt 4 wordt lucht tegen de buitenzijde van de buis geblazen voor het koelen van de buitenzijde.

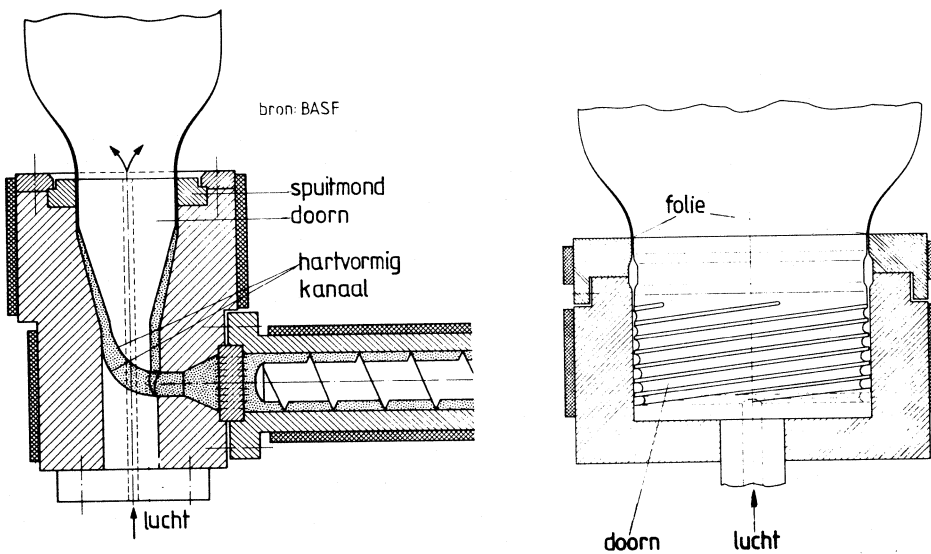
Bij de meeste installaties wordt de buis naar boven geleid zodat de extruder op de grond kan blijven staan. Er bestaan ook blaasinstallaties waarbij de buis horizontaal beweegt of verticaal naar beneden gaat. Na het dichtknijpen van de buis bij punt 6 wordt de folie op een rol gewikkeld. De buis kan ook worden opengesneden; men wikkelt de folie dan op twee rollen. Oppervlaktekwaliteit en glans van blaasfolies zijn over het algemeen minder dan van vlakgeëxtrudeerde folies.

De stroming van de smelt naar de matrijs kan op twee verschillende manieren gebeuren. De stroom kan in de matrijs worden omgeleid met behulp van een speciaal gevormd kanaal in de doorn (figuur 11.44 links). Dit systeem past men

in hoofdzaak toe voor kleine tot middelgrote diameters. Voor grote diameters en voor temperatuurgevoelige materialen wordt de smelt buiten de matrijs omgeleid en stroomt dan centraal de matrijs in (figuur 11.44 rechts).

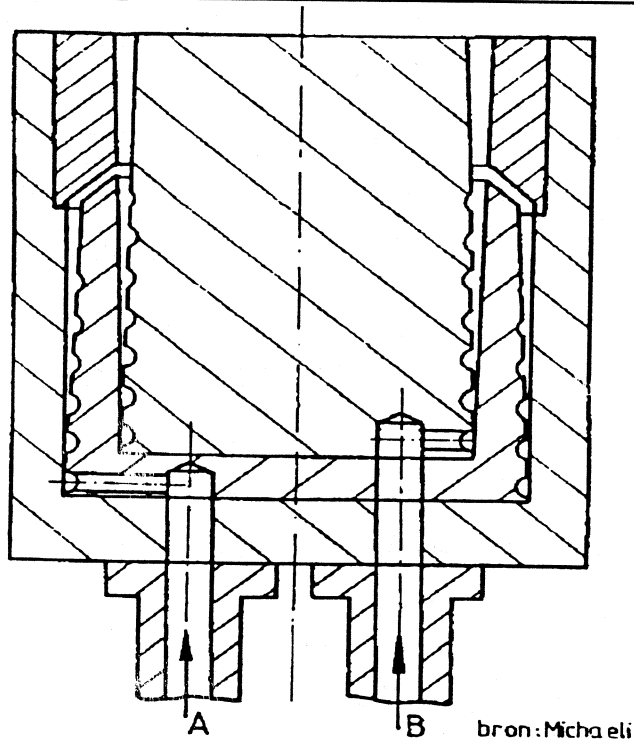


Figuur 11.43: Folieblaasinstallatie



Figuur 11.44: Blaasfolie-extrusiematrijzen

Coëxtrusie bij folieblazen is ook mogelijk. Soms is bijvoorbeeld een extra laag nodig om sealen mogelijk te maken. In figuur 11.45 is een schema van een matrijs weergegeven voor het extruderen van blaasfolie van twee materialen. Deze materialen moeten dan wel aan elkaar lassen of kleven. Lukt dit niet dan is een derde laag nodig die voldoende aan de twee andere lagen hecht.



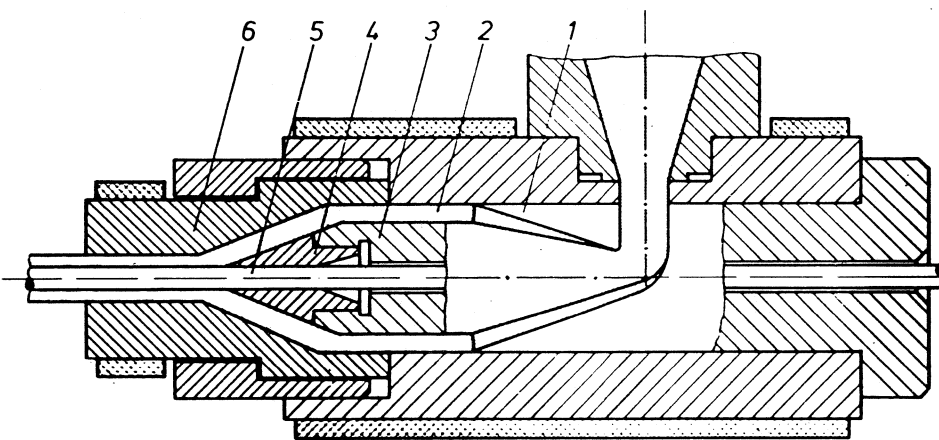
Figuur 11.45: Matrijs voor coëxtrusie van blaasfolie

Ommanteling van metaaldraad

Het extrusieproces wordt ook gebruikt voor het bekleden van blanke metaaldraad. De draad wordt continu door de matrijs gevoerd (figuur 11.46). De doorvoersnelheid is 1 à 1000 meter per minuut, afhankelijk van de draaddikte. De lengte-as van de matrijs staat loodrecht op de as van de extruder. In de matrijs bevindt zich een doorn. De kunststof wordt in twee stromen om de doorn heen geleid over een hoek van 90°. Daarna wordt de stroom verbreed tot een cilindervormige stroom in de richting van de uitstroomopening. De smelt komt binnen of buiten de matrijs in contact met de draad.

Voor de isolatie van enkele draad wordt de draad binnen de matrijs onder hoge druk bekleet (figuur 11.47B). Met dit hogedrukprocédé verkrijgt men een goed contact tussen kunststof en draad en een goede isolatie zonder luchtinsluitingen.

Het ommantelen van een aantal reeds beklede draden wordt meestal buiten de matrijs gedaan. De bekleding komt als buis uit de extruder en wordt onder vacuüm op de kabel gezogen. Op deze wijze verkrijgt men een goed gecentreerde bekleding (figuur 11.47A).

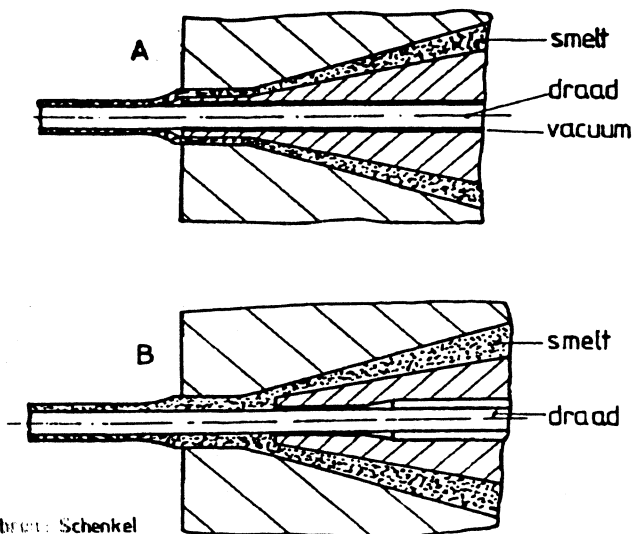


1 verdeelkanaal
2 sleuf
3 doorn

4 draadgeleider
5 draad
6 spuitmond

bron: Michaeli

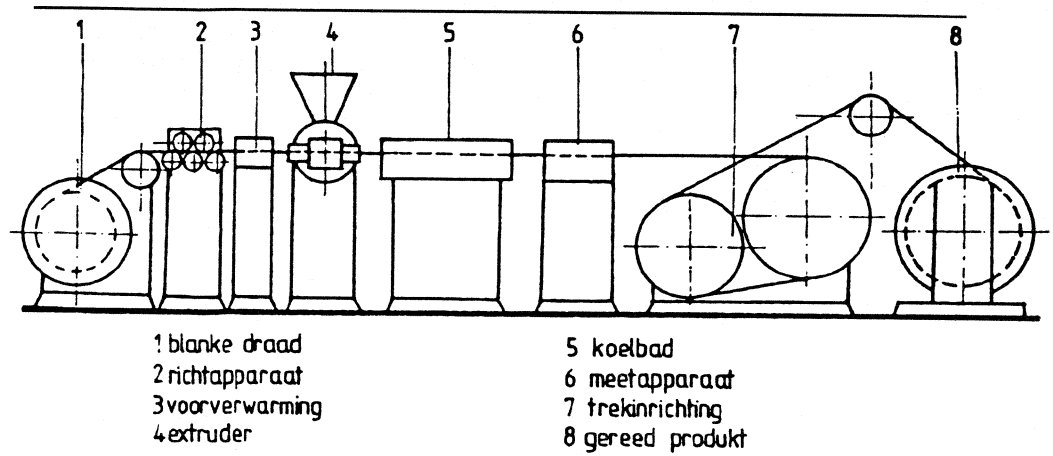
Figuur 11.46: Matrijs voor het ommantelen van draad



bron: Schenkel

Figuur 11.47: Ommantelen van draad

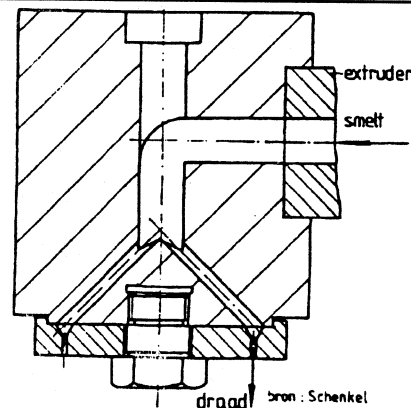
In figuur 11.48 is een installatie getekend voor het ommantelen van draad. De draad wordt op haspels toegevoerd. Voordat de draad door de spuitkop gaat wordt de draad gericht. Na het spuiten wordt de mantel in een waterbad gekoeld, gemeten op doorslag en andere elektrische eisen en daarna weer opgerold op haspels of in vaten gedraaid.



Figuur 11.48: Installatie voor het ommantelen van draad

Extrusie van draad en band

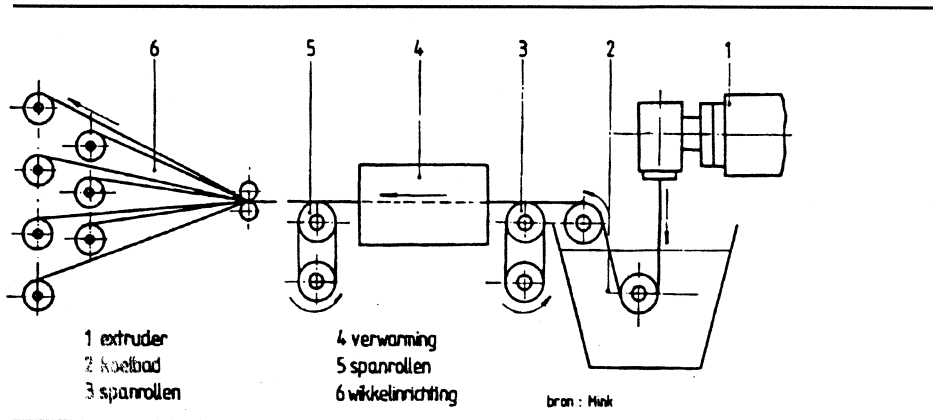
Voor het extruderen van draad gebruikt men meestal de kunststoffen PA, PET, PE PP, PS of PVC. Kunststofdraad wordt toegepast bij de fabricage van borstels, kabels en weefsel. De draad wordt in een verticale matrijs geëxtrudeerd (figuur 11.49). De diameter van de matrijsopening ligt meestal tussen 0,8 en 1,5 mm.



Figuur 11.49: Extrusiematrijs voor kunststofdraad

Handwritten notes:
 word
 1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8

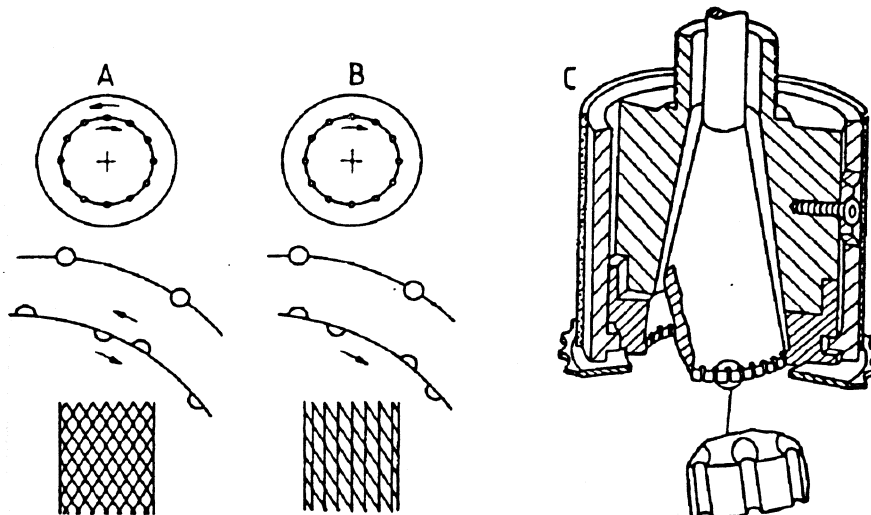
Na het extruderen wordt de draad in een waterbad gekoeld en daarna volgt in twee of drie stappen het rekken van de draad (figuur 11.50). Het oprekken gebeurt tussen de spanrollen (punt 3 en punt 5) onder toevoeren van warmte. Vervolgens wordt snel afgekoeld tot beneden de glasovergangstemperatuur van de kunststof. Hierdoor ontstaat een blijvende moleculaire oriëntatie. De sterkte van de draden kan oplopen tot het tienvoudige van niet-gerekte draad. De dikte van de getrokken draad bedraagt minimaal 0,08 mm tot maximaal enkele millimeters. Na het rekken worden de draden op afzonderlijke rollen gewikkeld. Voor de fabricage van borstels wordt een aantal draden samengevoegd tot een streng omwikkeld met krimpfolie. Men kan op dezelfde wijze folie die in repen wordt gesneden uit vlakfolie of blaasfolie mono-axiaal oprekken. Meestal wordt PP of PE band toegepast. De bereikbare treksterkte is groter dan die van gerekte draad. Folieband wordt geweven tot een soort 'jute' voor de fabricage van zakken en tapijtweefsel.



Figuur 11.50: Installatie voor het extruderen en rekken van draad

Extrusie van verpakkingsnetten

De konstruktieve uitvoering van een matrijs voor het extruderen van netten is in figuur 11.51C weergegeven. De draadvormende delen zijn in beide matrijsdelen aangebracht. Beide matrijsdelen kunnen roteren (figuur 11.51A) of één matrijsdeel roteert (figuur 11.51B). Als bij de uitstroomopeningen de beide draden tegenover elkaar staan komt de verbinding tussen de draden tot stand. Bij verder doordraaien van de matrijs ontstaan weer gescheiden draden. Afhankelijk van de uitvoering van de matrijs ontstaat een ruitvormig netwerk (figuur 11.51A) of een parallellogramvormig netwerk (figuur 11.51B).



Figuur 11.51: Extrusie van verpakkingsnetten

11.5 VOOR- EN NADELEN

De voordelen van het extrusieproces zijn:

- het is mogelijk om complexe vormen te extruderen;
- het is mogelijk om zeer dunwandig te construeren;
- toepasbaar voor vezelgevulde materialen;
- het is een continu proces;
- een snelle levering van de matrijs is mogelijk.

Mogelijke nadelen zijn:

- er ontstaat een anisotropisch materiaal, met veel inwendige spanningen;
- door onregelmatige krimp bij wanddikteverschillen kan het profiel kromtrekken;
- om smeltbreuk te voorkómen is de extrusiesnelheid beperkt;
- calibreren is vaak noodzakelijk;
- het oppervlak is in de lengterichting gekrast.

11.6 ONTWERPRICHTLIJNEN

Bij het ontwerpen van kunststof extrusieprofielen moet men de volgende richtlijnen rekening worden gehouden:

- de minimale wanddikte is afhankelijk van het materiaal: ABS en CA: 0,3-0,4 mm, PA en PC: 0,7-0,8 mm,
- om inwendige spanningen en vervormingen te voorkómen, moeten wanddiktevariëaties zoveel mogelijk beperkt worden;
- de maximale doorsnede van een profiel heeft een oppervlakte van ongeveer 500 mm²;
- bij de extrusie van plaat is de maximale breedte ongeveer twee meter en de maximale dikte 50 mm;
- voor holle of complexe profielen zijn kalibreermatrijzen noodzakelijk.

11.7 KOSTEN

De prijs van extrusiegereedschap is lager dan die van spuitgietgereedschap, omdat de vormholte van een extrusiematrijs of kalibreereenheid tweedimensionaal is. Met de huidige CNC-draadvonkmachines zijn dergelijke holten eenvoudige te fabriceren. De prijs van een extrusiematrijs ligt afhankelijk van de grootte en complexiteit van het profiel tussen fl. 1500,- en fl. 6000,-. Bij een zeer complexe matrijs kunnen de matrijskosten gemakkelijk boven de fl. 30.000,- komen.

Een calibreereenheid is altijd duurder dan de extrusiematrijs, maar kost meestal niet meer dan fl. 8000,-. Vaak kan echter niet volstaan worden met één calibreereenheid, maar zijn er meer nodig.

VRAGEN

- 1) *bij § 11.2 (zie ook §§ 4.1 en 4.2):* Wat is plastificeren? Wat is de vorm van de grondstof voor plastificeren?
- 2) *bij § 11.3:* Welke stappen zijn bij het plastificeren te onderscheiden?
- 3) *bij § 11.3 en figuur 11.15:* Op welke plaats in de extruder begint de drukopbouw als de ingangszone cilindrisch is? Waarom begint de drukopbouw eerder als de ingangszone gegroefd of getand is (zie ook figuur 11.13)?

- 4) *bij § 11.4: Waarom moet er bij stafextrusie een goede isolatie zijn tussen matrijs en calibreerapparaat?*
- 5) *bij § 11.4: Waarom is er voor buisextrusie een aanmerkelijk langere calibreerzone nodig dan voor stafextrusie?*
- 6) *bij § 11.4: De profielmatrijzen volgens A en volgens B in figuur 11.29 worden gemonteerd op exact dezelfde extruders. Op beide extruders wordt exact hetzelfde toerental ingesteld. Gevraagd:*
 - a) *bij welke extruder is de druk voor de schroef het grootst?*
 - b) *bij welke extruder is de opbrengst het grootst?*
- 7) *bij §§ 11.1 t/m 11.3 (zie ook hoofdstuk 10): Noem drie verschillen tussen kunststofextrusie en metaalextrusie.*
- 8) *bij §§ 11.1 t/m 11.3 (zie ook § 4.3): Leg het verschil in werking uit tussen een plastificeerschroef in een spuitgietmachine en een extrusieschroef in een extruder.*

LITERATUUR

Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch 2: Extrusion
BASF, 1982.

Procestechnologie I - Kunststoffen
Collegedictaat mk48
Technische Universiteit Delft

Dam, J. van

Kunststofverwerking
Collegedictaat mk57
Technische Universiteit Delft

Ebeling, Lüpke, Schelten en Schwartz

Kunststofverwerking
Kluwer, 1981.

Kohlwey, J.F.

Kunststoffen
Agon Elsevier Amsterdam Brussel, 1971

Menges, G.

Einführung in die Kunststoff-Verarbeitung
Hanser Verlag München, 1979.

Michaeli, W.

Extrusion Dies
Hansers Publishers - Munich, 1984.

Mink, W.

Grundzüge der Extrudertechnik
Zechner u. Hüthig Verlag GmbH, 1968.

Rauwendaal, C.

Polymer Extrusion,
Hansers Publishers - Munich, 1986.

Schenkel, G.

Kunststoff-Extrudertechnik
Carl Hanser Verlag - München, 1963.

Tadmor, Z. en I. Klein

Engineering principles of plasticating Extrusion
Van Nostrand Reinhold - New York, 1970.

Tan, S.

Verwerkingstechnieken voor kunststoffen
io bo 17 - Serie io bijzondere onderwerpen deel 17
Technische Universiteit Delft, 1988.

Hoofdstuk 12: BLAASVORMEN

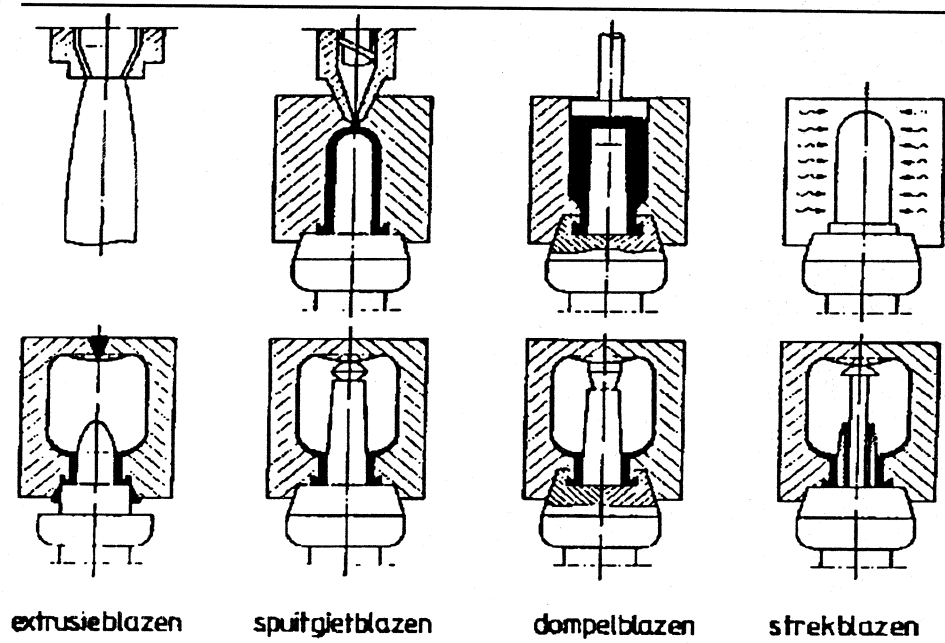
12.1 INLEIDING

Voor het vormgeven van holle produkten uit thermoplastische materialen bestaan verschillende technieken. In dit hoofdstuk wordt het blaasvormen behandeld. Blaasvormen is een proces waarbij een plastisch halffabrikaat door opblazen met lucht in een matrijs zijn eindvorm krijgt. Ter inleiding op dit hoofdstuk wordt uit het dictaat *ide140 Konstruktieleer 1* uit het hoofdstuk *PET-fles* het onderdeel 'Fabricage van PET-drankflessen' bekend verondersteld.

Voor het blaasvormen kunnen verschillende technieken worden toegepast, te onderscheiden naar de fabricage van het halffabrikaat:

- extrusieblazen; het halffabrikaat (de *parison*) is een geëxtrudeerde slang;
- spuitgietblazen of spuitblazen; het halffabrikaat (de *preform*) is een spuitgietprodukt;
- dompelblazen (hier niet behandeld); men verkrijgt een preform door de blaasdoorn te dompelen in gesmolten kunststof.

Door opblazen van het halffabrikaat wordt het eindprodukt verkregen. Tijdens het blazen van het holle produkt kan het materiaal van het halffabrikaat ook mechanisch in lengterichting worden opgerekt. Men spreekt dan over biaxiaal rekken of strekblazen. De verschillende processen zijn te zien in figuur 12.1.

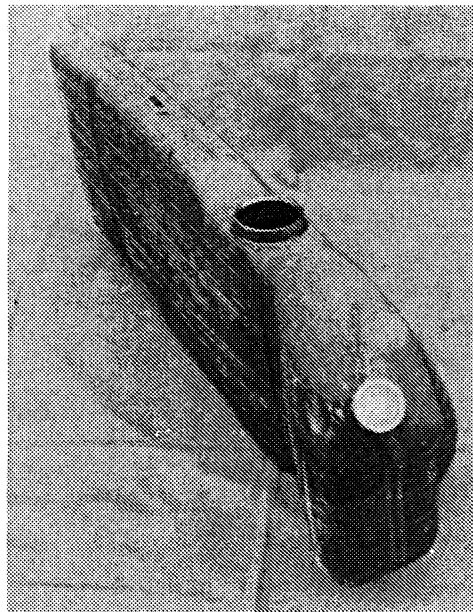


Figuur 12.1: Verschillende blaasvormtechnieken

Extrusieblazen is het meest voorkomende blaasvormproces. Het wordt gebruikt voor het blazen van flessen, vaten en tanks met een inhoud vanaf ongeveer 250 ml tot ongeveer 10 m³. Bij dit proces is het mogelijk de handvatten direct mee te blazen.



flessen voor motorolie



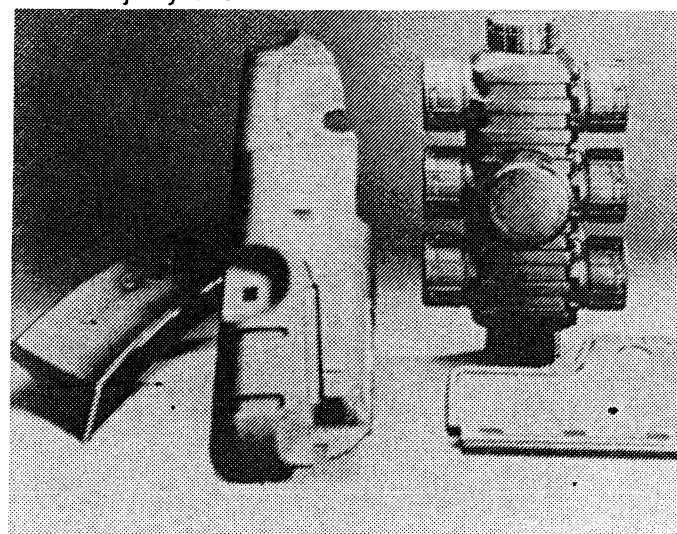
benzinetank



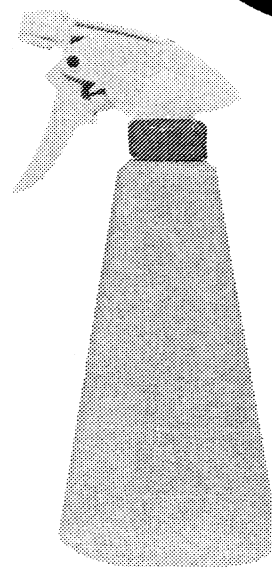
vaten en jerrycans



vat



deze complexe producten zijn ook geblazen



plantensproeier

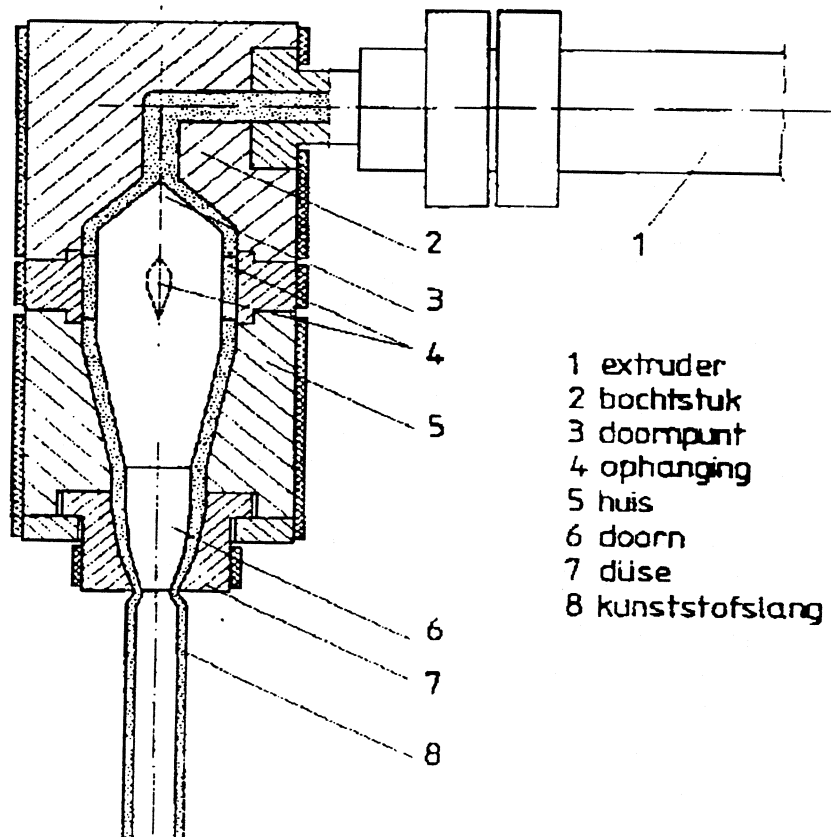
Figuur 12.2: Enkele voorbeelden van geblazen producten

Spuitsgietblazen wordt toegepast voor flessen met een inhoud tot ongeveer 3 liter. Dit proces levert geen productie-afval op. De flesopening kan qua afmeting met grote nauwkeurigheid worden vervaardigd. De reproduceerbaarheid van het eindproduct is goed (ondermeer geringe spreiding in massa). Er kunnen echter geen handvatten worden meegeblazen. De gereedschappen zijn zéér duur.

Strekblazen kan worden toegepast op extrusiegeblazen en spuitgietgeblazen flessen van 0,5 tot 3 liter. Sommige materialen krijgen door biaxiaal rekken een hogere sterkte en stijfheid bij een minimale massa en een betere barrièrewerking voor sommige gassen en vloeistoffen. Deze techniek is beperkt tot eenvoudig gevormde flessen. Het strekblazen kan geschieden in één stap: dit wil zeggen dat het halfproduct direct na fabriceren wordt geblazen en gerekt tot het eindproduct. Streckblazen kan ook in twee stappen verlopen. Het halfproduct wordt dan later elders opgewarmd en tot eindproduct gevormd.

12.2 EXTRUSIEBLAZEN

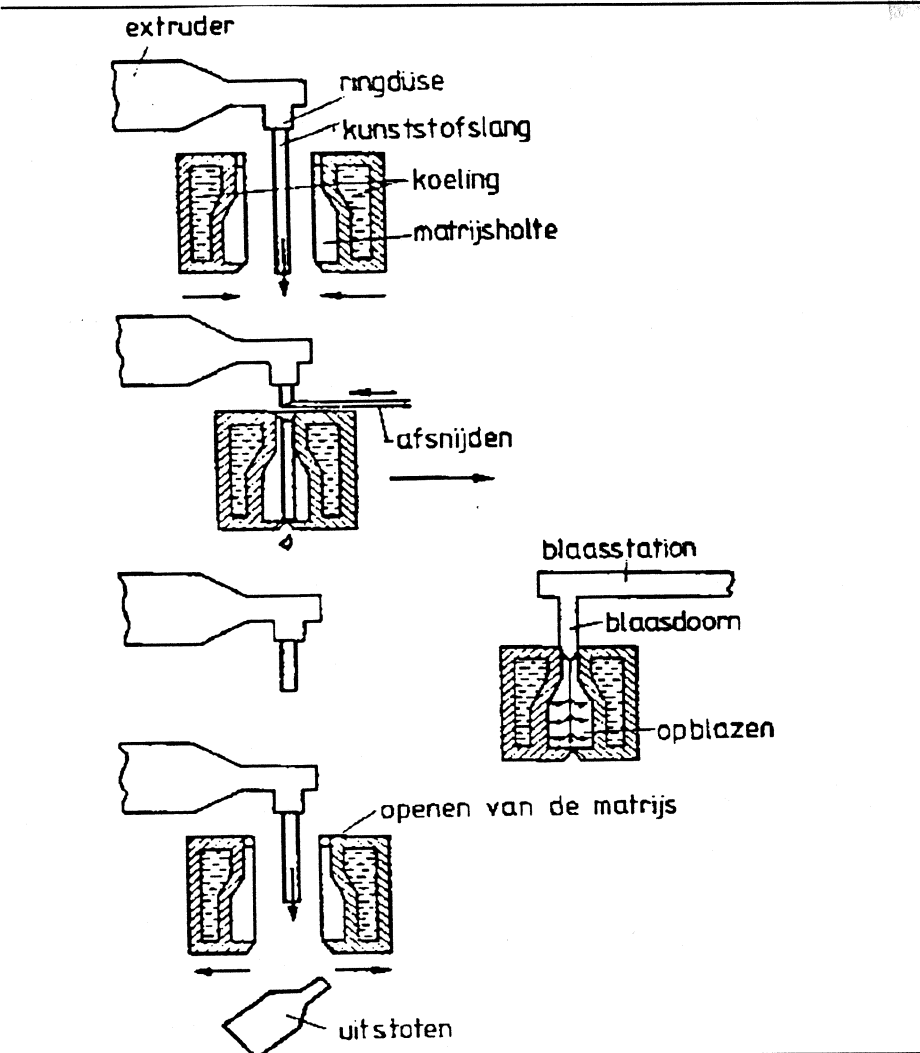
Het extrusieblaasproces bestaat uit extruderen van het slangvormige halfproduct (de *parison*), gevolgd door blazen van het eindproduct. Het extruderen van de slang gebeurt op dezelfde wijze als het extruderen van buis. Voor vervaardiging van de slang is een spuitkop met doorn en mondstuk (*Düse*) nodig (figuur 12.3).



Figuur 12.3: Spuitkop voor extrusieblazen
(Düse = mondstuk)

Bij het extrusieblazen wordt de smelt verticaal afgebogen en wordt het holle eindprodukt uit de parison geblazen. Het blaasproces bestaat uit de volgende vier stappen (zie figuur 12.4):

- 1 De slang wordt geëxtrudeerd. De twee matrijshelften worden om de slang in positie gebracht.
- 2 De matrijs wordt gesloten. Hierdoor wordt de naad aan de flesbodem dichtgeknepen. De slang wordt bij de extruder afgesneden.
- 3 De matrijs wordt naar een andere positie gebracht om het extruderen van een nieuwe slang mogelijk te maken. In deze nieuwe positie wordt een blaasdoorn door de opening in de matrijs gedrukt. Het slappe materiaal in de matrijs wordt met perslucht opgeblazen tot het eindprodukt.
- 4 Wanneer het materiaal voldoende is gekoeld wordt de matrijs geopend en het product uitgestoten. De matrijs gaat dan weer naar de extruder om een nieuwe slang af te nemen.

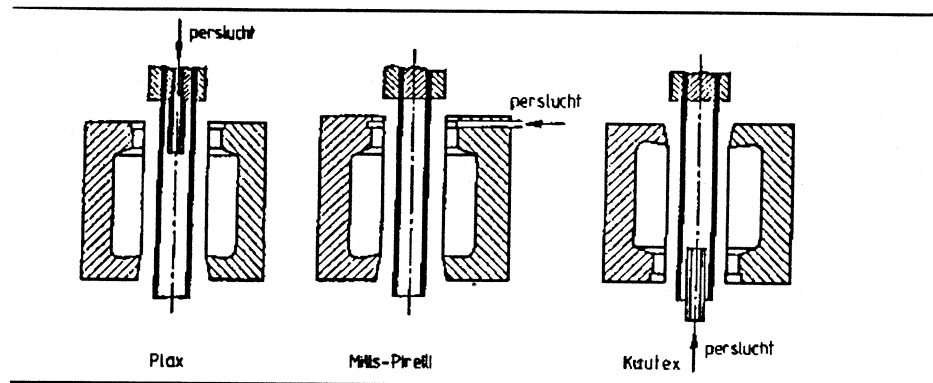


Figuur 12.4: Stappen in het extrusieblaasproces (Düse = mondstuk)

Extrusieblaassystemen

Er zijn drie systemen om perslucht toe te voeren (figuur 12.5):

- In het Plaxsysteem wordt de blaaslucht toegevoerd door het centrum van het extrusiekanaal. Tijdens het dichtlopen van de matrijs wordt het plastische materiaal aan de bovenzijde tussen de blaasdoorn en de matrijs afgeknepen. Bij een variant op dit systeem wordt de matrijs weggehaald en een blaasdoorn in de opening van de matrijs gestoken.
- Het Mills-Pirellisysteem werkt met een verloren kop. Na het dichtlopen van de matrijs wordt in het bovenste gedeelte een naald gestoken voor het toevoeren van de blaaslucht.
- Het Kautexsysteem, ook wel Polvasysteem genoemd, werkt met een blaasdoorn aan de onderzijde van de matrijs. De slang schuift over de blaasdoorn heen. Vervolgens laat men de matrijs dichtlopen. Tijdens het dichtlopen van de matrijs wordt de slang boven afgesneden en dichtgedrukt. Bij een variant op dit systeem loopt de matrijs eerst dicht en wordt onder de extruder vandaan gehaald; vervolgens wordt de blaasdoorn in de opening gedrukt.



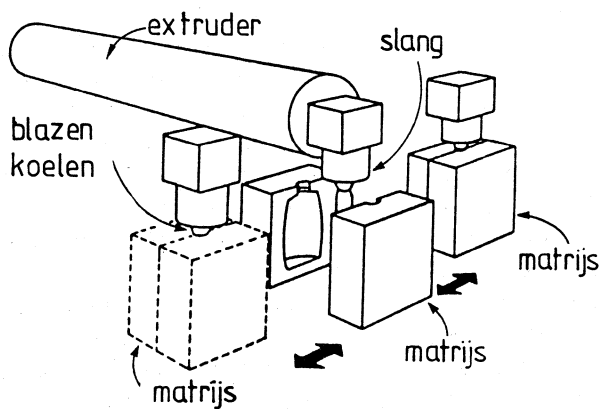
Figuur 12.5: Extrusieblaassystemen

Bij extrusieblazen wordt onderscheid gemaakt tussen continue extrusie en intermitterende extrusie.

Continue extrusie

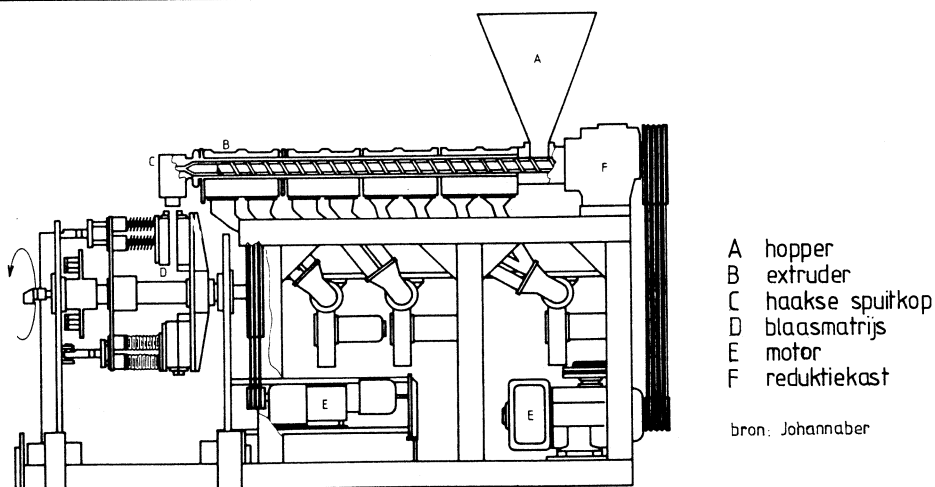
Bij continue extrusie wordt de slang in een continu proces gevormd in dezelfde tijdinterval als waarin de eindprodukten worden geblazen. Ter vermijding van problemen met het vormen van de slang moet het sluitmechanisme van de matrijs snel naar de extrusiekop bewegen, de slang opnemen en teruggaan naar het blaasstation. Na het blazen en uitstoten uit de matrijs wordt het proces herhaald. Een principeschets van een continu werkende installatie is in figuur 12.6 gegeven.

De continu werkende extruder kan alle thermoplasten verwerken. Met name voor PVC is het een goede verwerkingsmethode omdat PVC al bij zéér geringe oververhitting degradeert. De relatief langzame materiaalstroom vermindert de kans op plaatselijke oververhitting (lagere afschuifsnelheden in het materiaal). Blazen met continue extrusie is in het algemeen geschikt voor produkten tot ongeveer 4 liter. Grotere vaten zijn mogelijk bij ultrahoogmoleculaire soorten PE met een hoge smeltsterkte.



Figuur 12.6: Blaasmachine met continue extrusie

Er zijn verschillende uitvoeringsvormen van de blaasmachine met continue extrusie. In figuur 12.7 is een blaasmachine weergegeven met twee matrijsen op een draaitafel. De matrijs vangt in de bovenste stand de slang op. Wanneer de slang eenmaal de juiste lengte heeft wordt deze door de matrijs gepakt en naar het blaasstation gevoerd (de draaitafel roteert dan). In de onderste stand wordt de slang opgeblazen tot een fles of een vat, dat vervolgens wordt gekoeld en uitgestoten. Tegelijkertijd pakt de bovenste matrijs een nieuwe slang.



- A hopper
- B extruder
- C haakse spuitkop
- D blaasmatrijs
- E motor
- F reductiekast

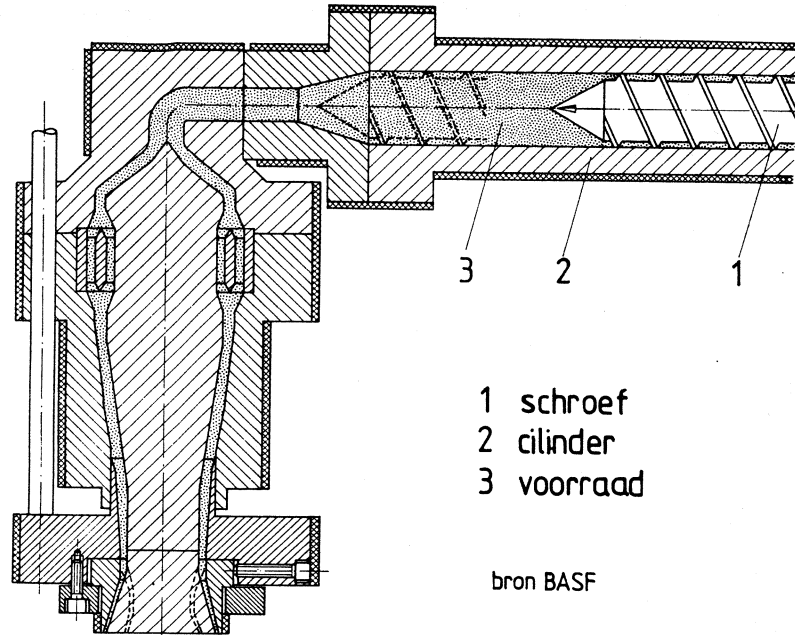
bron: Johannaber

Figuur 12.7: Schema van een extrusieblaasmachine

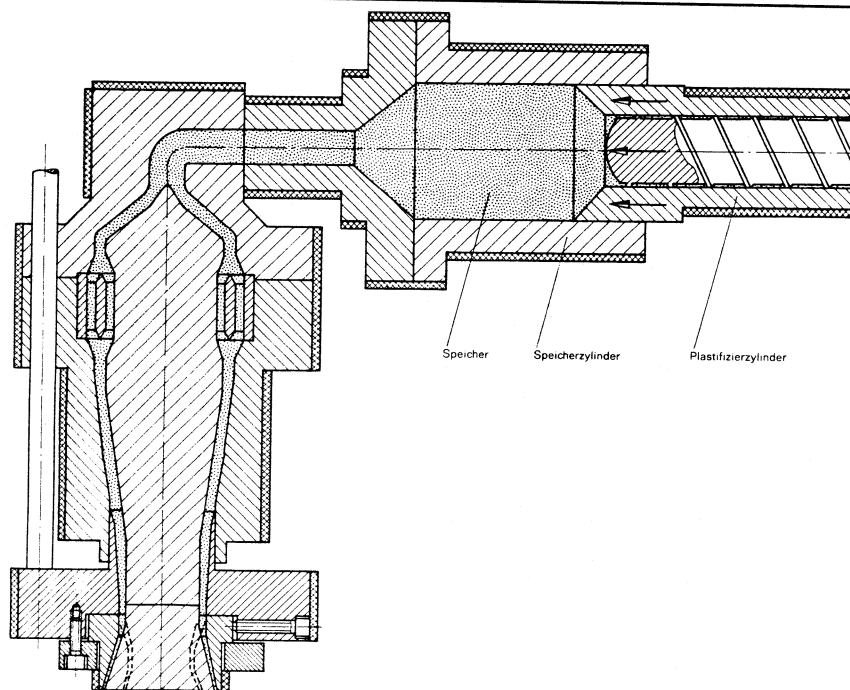
Intermitterende extrusie

Intermitterende extrusie wordt toegepast voor grote blaasproducten of voor het tegelijk blazen van een aantal producten. Een installatie voor blazen met intermitterende extrusie heeft altijd een voorraadvat voor de geplastificeerde grondstof. De slang wordt pas vlak voor het blazen geëxtrudeerd. Dit heeft als voordeel dat uitzakken en tevéél afkoelen van de slang worden geminimaliseerd. Een ander voordeel is dat de veelal grote matrijsconstructies een vaste opstelling hebben. Het sluitmechanisme van de blaasmatrijs staat altijd onder de spuitkop van de extruder en is hierdoor eenvoudiger dan bij continu werkende machines. De voorraadruimte wordt met smelt gevuld door het draaien van de schroef, analoog aan plastificeren bij kunststofspuitgieten.

Er bestaan diverse varianten van voorraadvorming. Figuur 12.8 toont een constructie waarin de schroef axiaal beweegt tijdens plastificeren; tijdens de extrusiestap werkt de schroef als spuitplunjer. Figuur 12.9 toont een constructie met een aparte plunjer, waarin de schroef alléén dient voor het plastificeren.



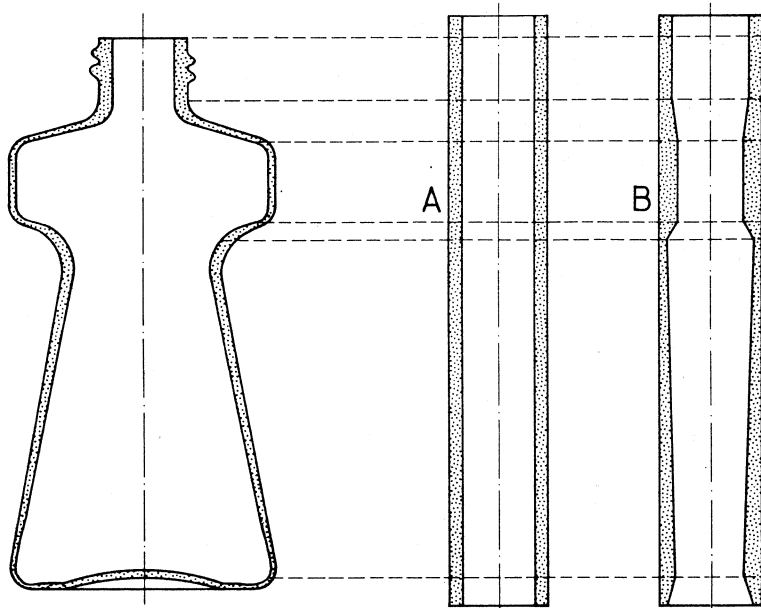
Figuur 12.8: Extruderkop voor intermitterende extrusie met beweegbare schroef



Figuur 12.9: Extruderkop voor intermitterende extrusie met starre schroef

Wanddiktevariatie

Wanneer een slang wordt opgeblazen tot een fles of vat met een complexe vorm zal de wanddikte van het eindprodukt niet overal gelijk zijn. Grote diameters bezitten een dunnere wand dan kleine diameters, omdat het materiaal van de grootste diameter méér wordt opgerek. De fles van figuur 12.10 is geblazen uit de slang van figuur 12.10A. Om in het eindprodukt een gelijkmatige wanddikte te verkrijgen, moet men de slang een variabele wanddikte geven zoals geïllustreerd in figuur 12.10B. Hiertoe moet de doorstroomopening in de spuitkop gewijzigd kunnen worden tijdens het vormen van de slang.

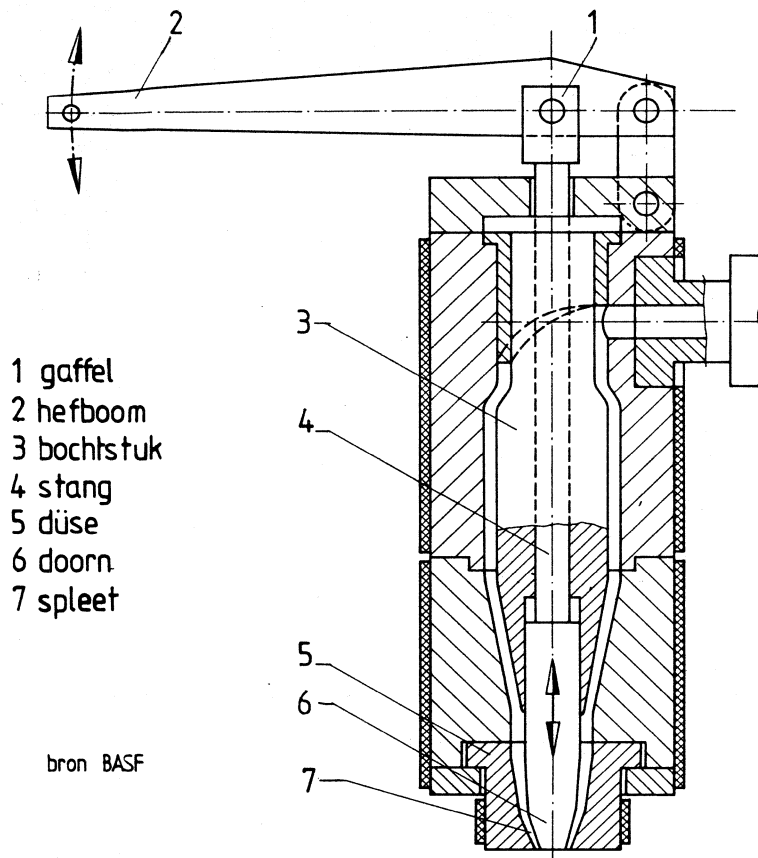


Figuur 12.10: Wanddikteverschillen

In figuur 12.11 is een regelbare spuitkop weergegeven. Een besturingsprogramma bedient via een hydraulische cilinder de hefboom (2) waardoor de spleet in de spuitkop groter of kleiner wordt. Omdat de extrusiesnelheid constant is kan de doorn via een tijdsinstelling worden bediend. Er bestaan andere regelingen om de wanddikte van de slang te laten variëren, bijvoorbeeld door de doorn op zijn plaats vast te houden en het mondstuk van plaats te laten veranderen.

Naast wanddiktevariatie van het halfprodukt in axiale richting is bij de fabricage van platte flessen ook wanddiktevariatie mogelijk in de omtreksrichting van de fles. Deze variatie wordt vastgelegd in de spuitmond en blijft over de gehele lengte van de slang constant. Een op de juiste wijze geprogrammeerde wanddikteverdeling in het halffabrikaat geeft de volgende voordelen:

- optimale kwaliteit bij minimale massa;
- kortere koeltijd van het eindprodukt door een zo gering mogelijke, gelijkmatige wanddikte.



*Figuur 12.11: Spuitkop voor wanddiktereregeling
 (Düse = mondstuk)*

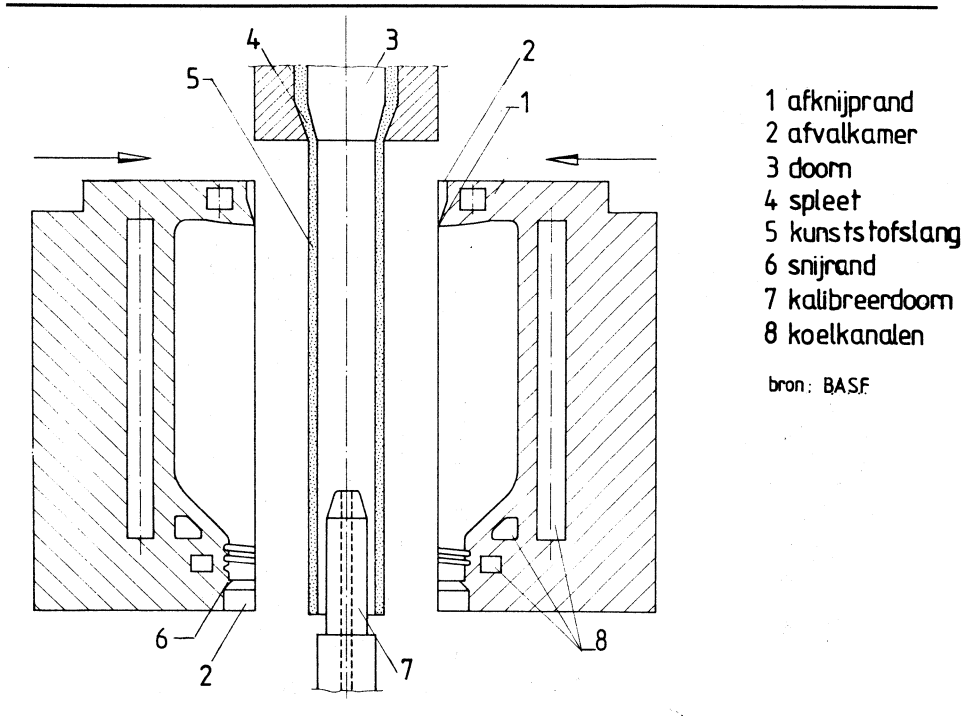
Extrusieblaasmatrijzen

In figuur 12.12 is schematisch een extrusieblaasmatrijs in geopende toestand weergegeven.

De matrijs is voorzien van koelkanalen voor de koeling van het produktvormend oppervlak van de matrijs. Op de deling van de matrijs is aan de bovenzijde een afknijprand te zien. Deze afknijprand dient om de bodem van de fles luchtdicht en vloeistofdicht te knijpen. De twee zijden van de slang moeten tijdens het afknijpen aan elkaar lussen. De afknijprand zorgt er ook voor dat de verbinding tussen de fles en het afvalmateriaal zó dun is dat de fles zonodig gemakkelijk kan worden afgewerkt.

Aan de onderzijde (punt 7 in figuur 12.12) is de blaasdoorn gepositioneerd die tevens dient als calibreerdoorn voor de flesopening. Door de hoge druk van de blaasdoorn tegen de hals wordt de schroefdraad van de fles volledig met materiaal gevuld.

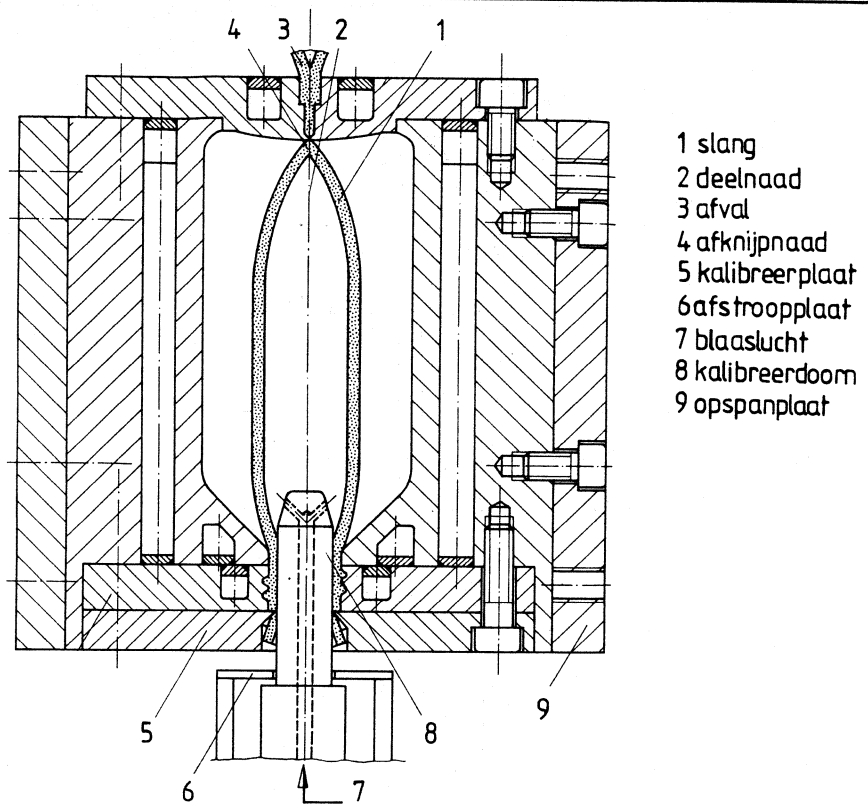
Figuur 12.13 toont dezelfde matrijs in gesloten toestand. Bij punt 3 is het afvalstuk te zien dat ontstaat na het dichtlassen door afknijpen van de bodem. Bij punt 5 zorgt een snijrand in de matrijs ervoor dat overtollig materiaal van de flesopening wordt afgesneden. Er bestaan verschillende constructies van blaasdoorns die het afval bij de vulopening van de fles automatisch afsnijden. Figuur 12.13 toont ook de afstroopplaat (punt 6) die aan het einde van de cyclus de fles van de calibreerdoorn afstroopt.



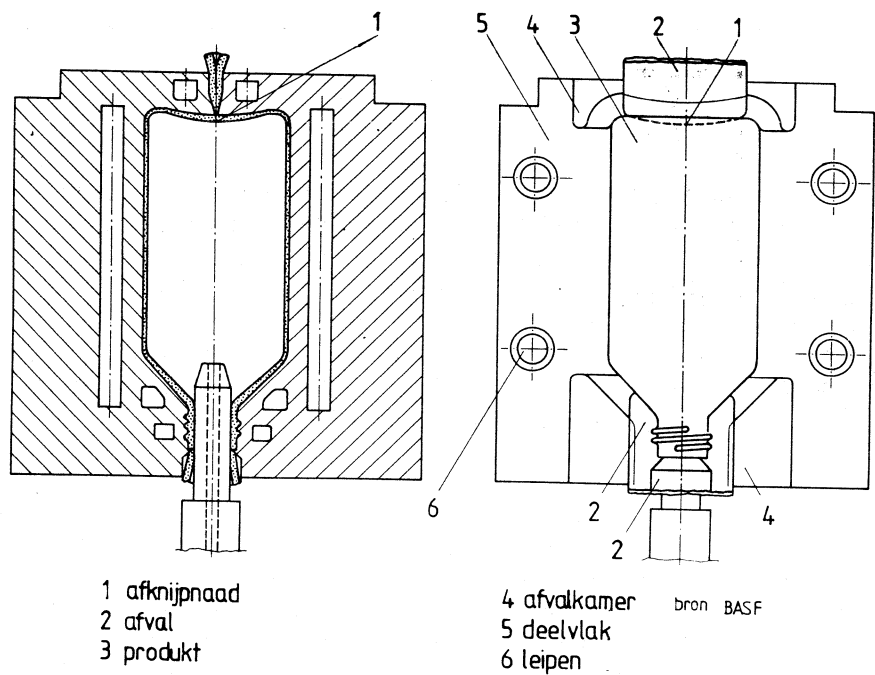
Figuur 12.12: Geopende extrusieblaasmatrijs

De situatie ná het blazen is in figuur 12.14 aangegeven. In het deelvlak van de matrijs bevindt zich het afvalmateriaal dat moet worden verwijderd: zowel in het bovenste gedeelte waar de slang is dichtgelast als aan de zijkant bij de vulopening van de fles. Het verwijderen gebeurt automatisch in de blaasmachine. De afknijprand aan de hals geeft de fles een lelijk uiterlijk. Indien mogelijk probeert men deze rand te vermijden. De afknijprand bij de hals wordt veroorzaakt doordat de diameter van de parison groter is dan de diameter van de blaasdoorn, ter vermindering van problemen bij het opsteken van de slang op de doorn. Het overtollige materiaal bij de hals verdwijnt achter de afknijprand.

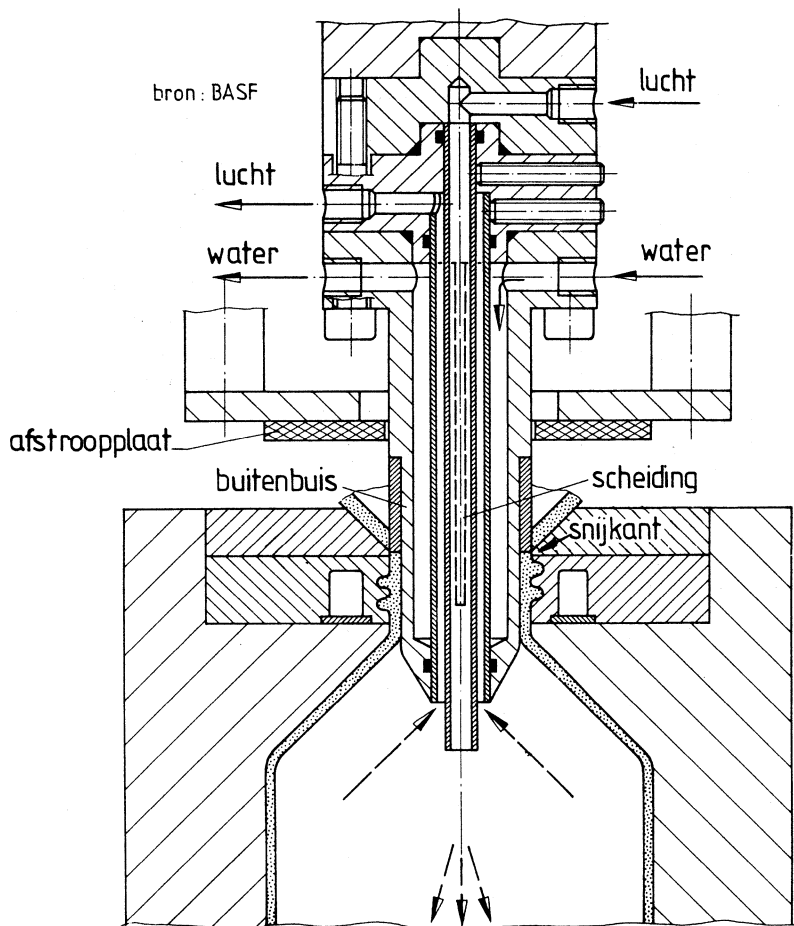
Geheel anders wordt de situatie als de fles wordt omgekeerd en de blaasdoorn van de bovenzijde van de matrijs wordt ingebracht. De matrijs met slang wordt verplaatst zoals reeds in figuur 12.4 was aangegeven. Voor het afsnijden van de slang aan de extruder wordt een luchtstoot toegevoerd waardoor de slang plaatselijk opbolt. Hierna wordt de slang afgesneden en brengt men de matrijs in de blaaspositie. De blaasdoorn wordt met kracht in de opening geperst. De slangdiameter kan nu kleiner zijn dan de schroefdraadopening van de fles (figuur 12.15).



Figuur 12.13: Gesloten extrusieblaasmatrijs



Figuur 12.14: Extrusieblaasmatrijs ná het blazen

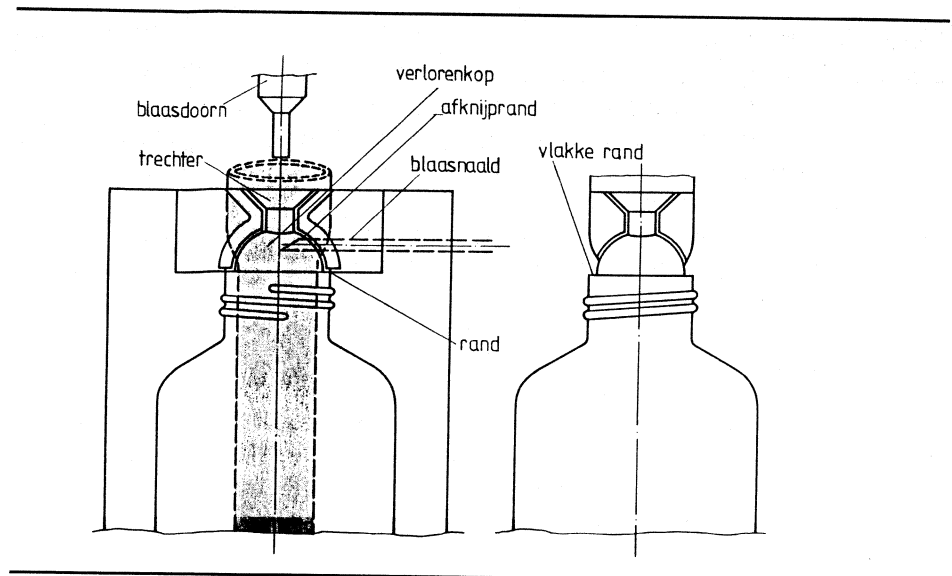


Figuur 12.15: Blaasdoorn

Een andere oplossing is in figuur 12.16 weergegeven. Hierbij wordt gewerkt zonder calibrering van het gat. Deze methode heet verloren-kop-methode. De slang past hier ook tussen het schroefdraadgedeelte. Buiten de fles wordt de slang geplet. Afhankelijk van de blaasinrichting kan een kleine blaasdoorn van bovenaf worden ingebracht. Indien de slang van boven geheel dichtgeplet is kan vanuit de zijkant een blaasdoorn door de wand van de fles worden gestoken. De fles is voorzien van een vlakke bovenrand op de plaats waar men de verloren kop van de fles afsteekt.

In figuur 12.17 zijn twee verschillende afknijpranden getekend. Reeds eerder is genoemd dat een afknijprand dient als aandrukker van de lasnaad en tevens als een soort snijmes. Figuur 12.17 toont twee verschillende afknijpranden. In de afknijprand volgens A komt het materiaal dichtbij de fleswand onder druk te staan. Een deel van het materiaal vloeit in de afvalruimte; een ander deel kan nog in de matrijsholte stromen en veroorzaakt daar een verdikking. Na het blazen is deze verdikking nog te zien. Ter plaatse van de las is de lasnaad voldoende dik. Het afvalmateriaal wordt weggedrukt door een klein plat kantje aan de afknijprand.

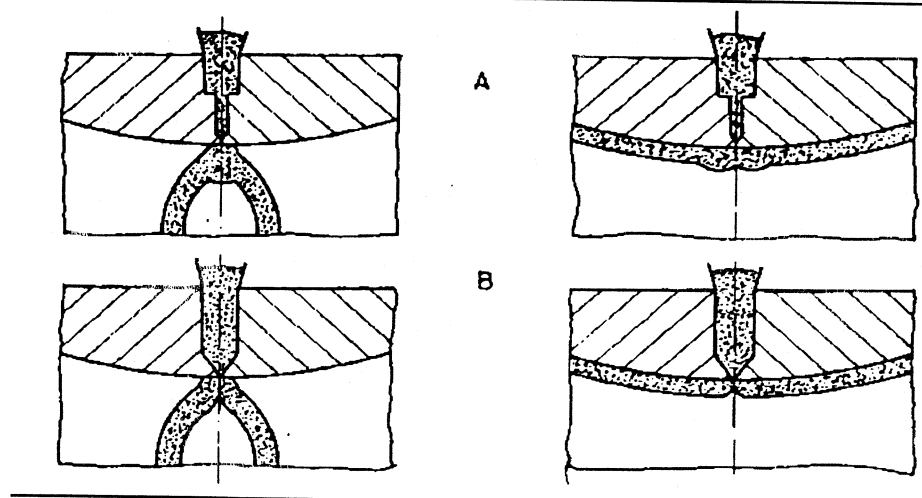
Als men de afknijprand volgens B uitvoert ontstaat er géén of weinig druk in de afvalruimte en wordt er géén materiaal in de matrijs geperst. De lasnaad volgens B is minder sterk dan die volgens A.



Figuur 12.16: Verloren-kop-methode

Matrijsmateriaal

De materiaalkeuze voor blaasmatrijzen wordt bepaald door de noodzakelijke warmtegeleiding en de onvermijdelijke slijtage van de afknijpranden. Bij grote produktieseries zal men de afknijpranden uitwisselbaar maken. De materiaalkeuze valt in dit geval op gehard stalen inzetstukken. De produktvormende delen worden gemaakt van een materiaal met een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt, zoals een aluminiumlegering of zink. Vormholten uit aluminium of zink kunnen direct op maat worden gegoten en zijn hierdoor goedkoper dan de gekopieerde stalen holten. De matrijzen moeten goed worden ontluicht omdat de persluchtdruk in de holte niet hoger is dan 0,7 MPa (7 bar). Op het deelvlak worden groeven aangebracht waarin de lucht kan ontsnappen. Blijft in hoeken nog lucht achter, dan kunnen daar kleine gaatjes worden geboord waarin de lucht wordt opgevangen. Staalstralen of glasstralen van het produktvormend oppervlak vermindert luchtinsluitingen in het produkt.



Figuur 12.17: Afknijpranden

Voor- en nadelen

De voordelen van het extrusieblaasproces zijn:

- het proces vindt plaats met lage krachten en drukken.;
- er kunnen zeer grote produkten (tot 4 meter) worden gemaakt;
- de investeringen zijn hoog maar toch aanzienlijk lager dan bijvoorbeeld voor spuitgieten;
- het is mogelijk om voor kleinere series (tot 500 stuks) matrijzen van kunststof te gebruiken; ook proefmatrijzen kunnen uit kunststof worden gemaakt.

De nadelen zijn:

- er is een beperkte vormvrijheid;
- er is altijd afvalmateriaal en er is meestal nabewerking nodig;
- er is geen goede detaillering mogelijk (bijvoorbeeld een afrondingsstraal van minimaal 1½ maal de wanddikte);
- het produkt heeft inwendige spanningen.

Inserts

Bij het extrusieblazen is het mogelijk inserts mee te vormen (figuur 12.18). Als de insert van hetzelfde materiaal is gemaakt als het te blazen produkt, wordt de insert voorverwarmd in de matrijs gezet; beide delen lassen of kleven aan elkaar (A). Indien de insert van een ander materiaal is gemaakt, bijvoorbeeld van een metaal, past men ondersnijdingen toe die de insert vastzetten, zoals in de voorbeelden B en C is weergegeven. Deze ondersnijdingen moeten niet scherp zijn of onder een te grote hoek lopen: het blaasprodukt wordt dan ter plaatse van de insert te dun.

Het is ook mogelijk om decoratiefilms, zogenaamde transfers, in de matrijs te leggen. Deze inserts worden door het blazen samengelast met het materiaal.

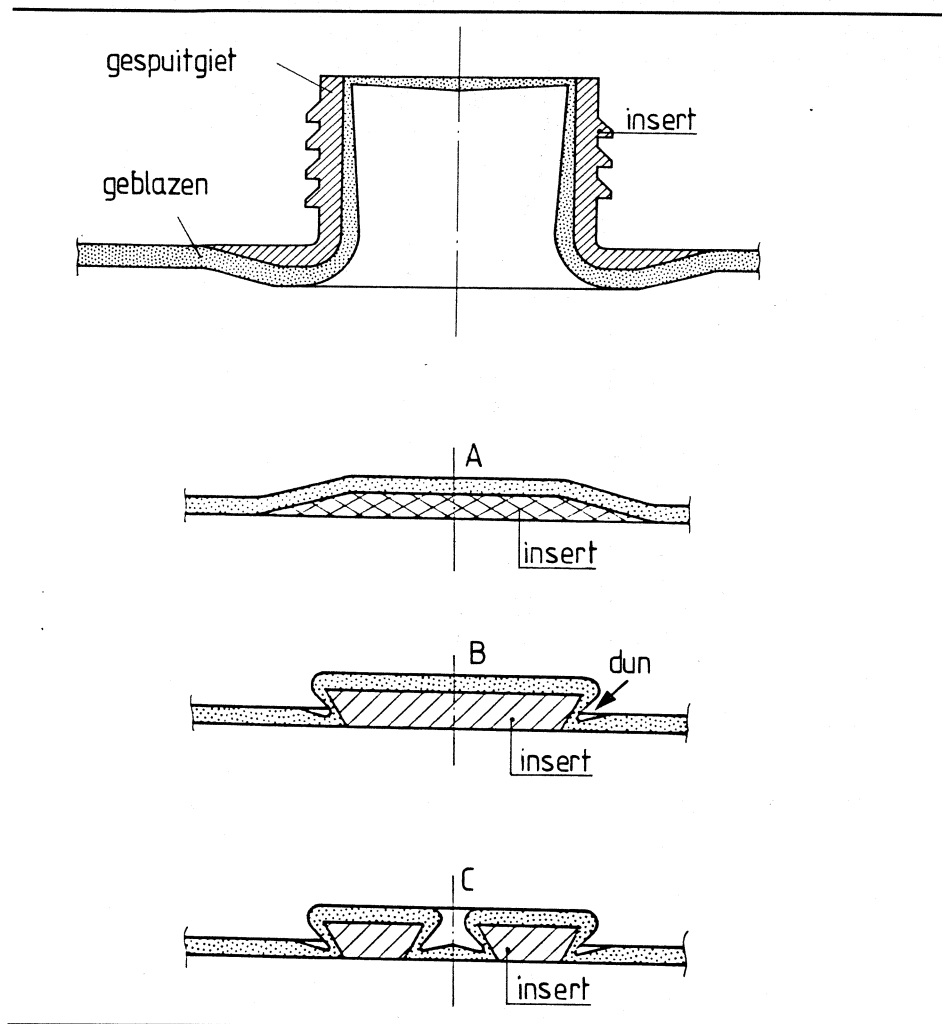
12.3 COËXTRUSIE

Het principe van coëxtrusie is besproken in het hoofdstuk *Extrusie van kunststoffen*. Voorafgaande aan het blazen is coëxtrusie mogelijk en soms nodig om het materiaal aan de eisen te laten voldoen.

De materiaalkeuze van een fles voor een bepaalde inhoud kan ondermeer afhangen van de doorlaatbaarheid van de kunststof voor gassen, damp of vloeistoffen. Deze problematiek is besproken in het hoofdstuk 'PET-fles' van het dictaat *ide140 Konstruktieleer 1*. Levensmiddelen die gevoelig zijn voor oxidatie kunnen bijvoorbeeld niet worden bewaard in verpakkingen van PE of PP. Ook voor koolzuurhoudende dranken zijn deze materialen ongeschikt. Kunststofflessen moeten sterk, helder en goedkoop zijn en moeten bovendien het produkt in de fles kunnen verdragen. De fles moet ook een rem zijn voor gassen. PE en PP zijn goedkope materialen en bijzonder geschikt voor contact met voedsel, bovendien laten ze weinig waterdamp door. EVA is een duur materiaal dat weinig zuurstof en koolzuurgas doorlaat; het is echter gevoelig voor water. Door een aantal lagen van speciaal gekozen materialen samen te extruderen en tot flessen te verwerken verkrijgt men flessen met een gewenste combinatie van eigenschappen.

Het meest voorkomende aantal lagen is:

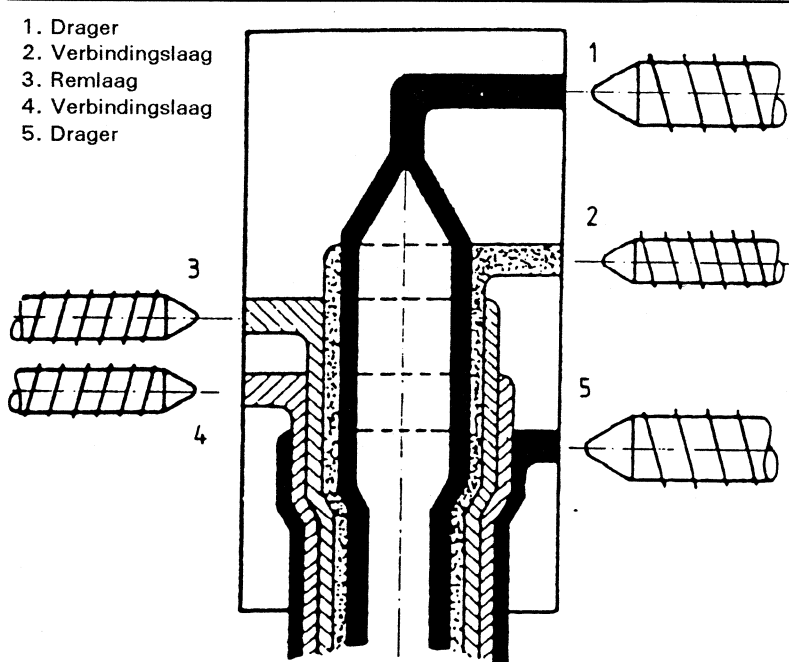
- Drie: twee barrièrelagen met daartussen een lijmlaag of een verbindingslaag;
- Vijf: de middelste barrièrelaag met aan beide zijden lijmlagen zit tussen de twee buitenste lagen (figuur 12.19).



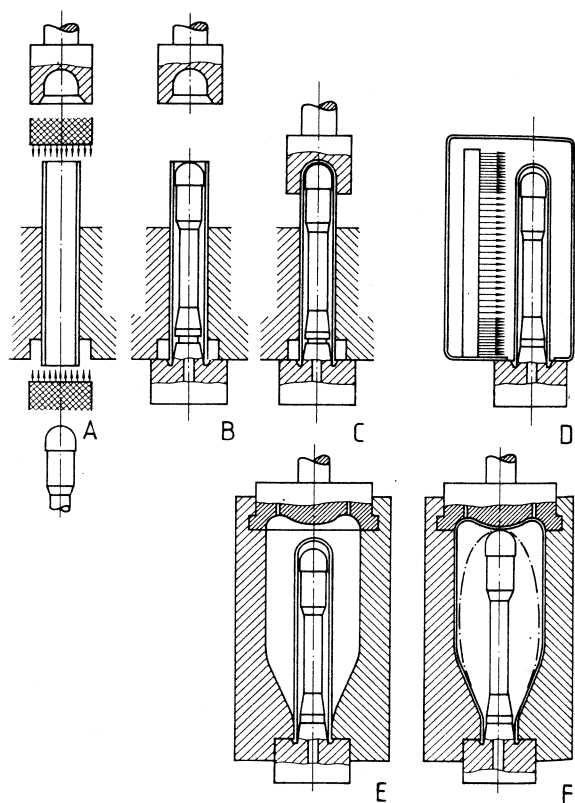
Figuur 12.18: Inserts bij het extrusieblazen

Bij de meest voorkomende vijflaagscombinatie zijn de buitenlaag en de binnenlaag van PP of HDPE en is de barrièrelaag van EVA. Voor het warm vullen van flessen met bijvoorbeeld ketchup is een PP als drager noodzakelijk. Bij flessen voor vruchtensappen wordt de zuurstofbarrière gevormd door de middelste laag van EVA; de waterbarrière wordt geleverd door buitenlagen van PP.

Het blazen van gecoëxtrudeerde slang tot flessen kan op dezelfde wijze gebeuren als met enkelvoudig geëxtrudeerde slang. Naast het conventionele extrusie-blazen wordt ook een andere techniek toegepast. Op een extrusie-installatie wordt gecoëxtrudeerde buis geproduceerd en op een bepaalde maat gesneden. De aldus verkregen buisvormige produkten kunnen elders en/of later tot flessen worden verwerkt. De buizen worden op een blaasmachine gezet (figuur 12.20). Het kopeinde van de buis wordt verwarmd (A), omgekeerd (B) en aaneen gelast (C). Voor meerlagige geëxtrudeerde buis moeten de binnenlagen iets worden teruggelegd zodat alléén de uitwendige lagen aan elkaar worden gelast. Op dezelfde wijze kan nu ook de flesopening naar wens worden gevormd. Vervolgens verwarmt men de gehele buis (D). De warme buis wordt in een blaasmatrijs opgeblazen (E en F). Dit proces geeft géén produktiefval. Een ander voordeel is dat het extruderen en het blazen volkomen gescheiden zijn zodat beide deelprocessen volledig kunnen worden geoptimaliseerd.



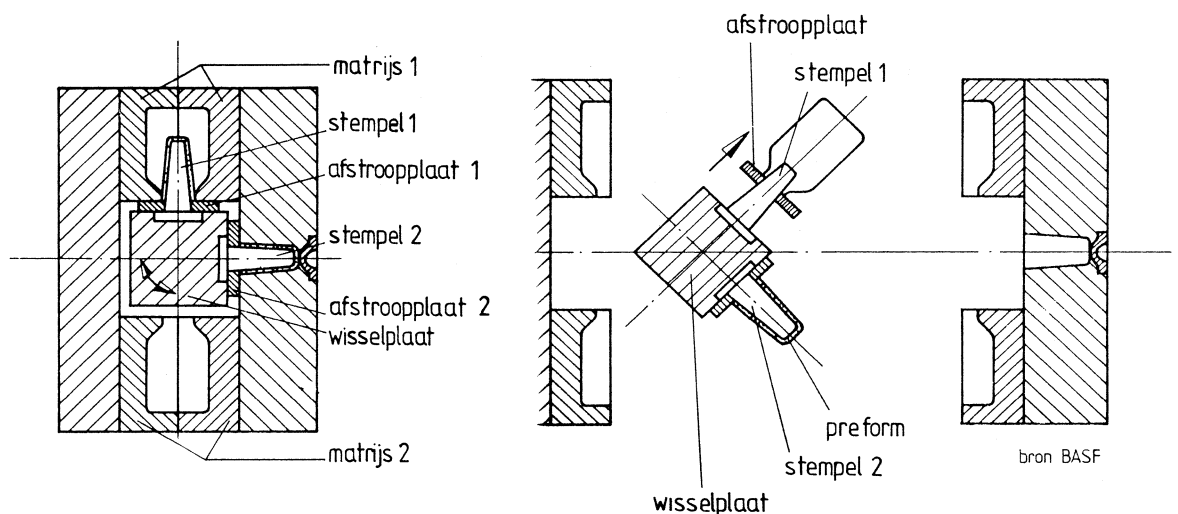
Figuur 12.19: Coëxtrusie



Figuur 12.20: Blazen van voorgevormde buis

12.4 SPUITGIETBLAZEN

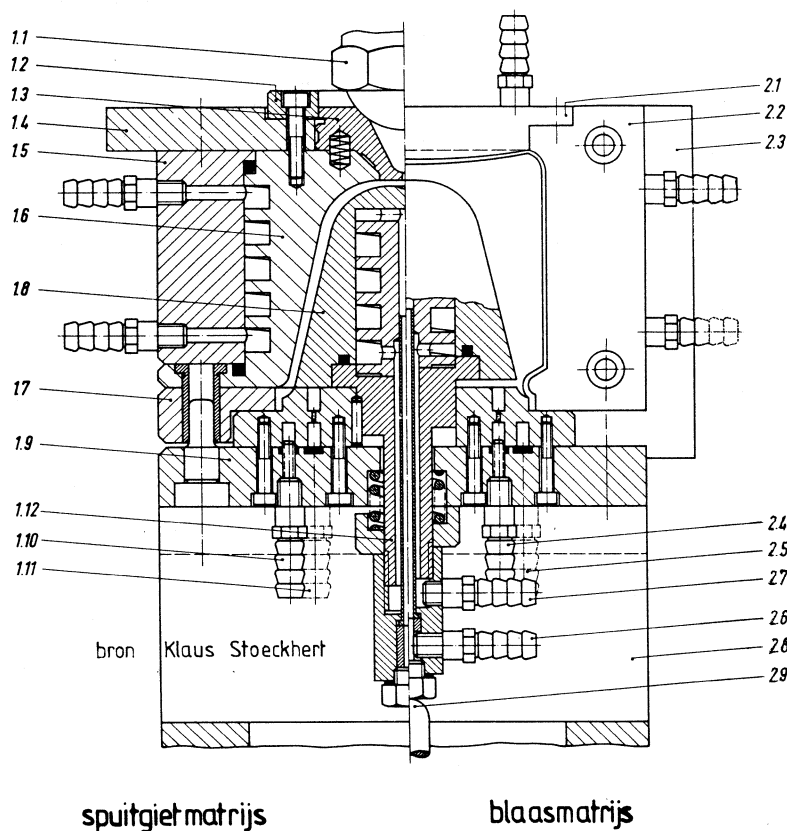
Een andere methode voor het blazen van holle voorwerpen is het spuitgietblazen. Het uitgangspunt is nu niet een geëxtrudeerde slang zoals bij extrusieblazen, maar een gesputgiet cilindertje met bodem met ongeveer de vorm van een reageerbuisje. Deze *preform* wordt op de kop aangespoten met een zogenaamde pinpoint (figuur 12.21). Na een bepaalde afkoeltijd loopt de matrijs open; het produkt blijft op de stempel van de matrijs zitten. De stempelzijde van de matrijs kan draaien, zoals bij het tweecomponentensputgieten (besproken in het hoofdstuk *Sputgieten van kunststoffen*). Het produkt wordt in de holte van de blaasmatrijs gebracht en opgeblazen tot het eindprodukt. Na doordraaien van het stempelgedeelte wordt het gereede produkt van de stempel gestroopt. Aan het spuitgietgedeelte van de machine wordt ondertussen een nieuw tussenprodukt vervaardigd. Figuur 12.22 toont details van een spuitgietblaasmatrijs.



Figuur 12.21: Spuitgietblazen

Een andere methode voor het spuitgietblazen van dunwandige flessen met een wijde hals is weergegeven in figuur 12.23. Als eerste stap spuit men een vlakke schijf. De nog warme de schijf wordt met inklemming overgezet op de blaasmachine. Met een stempel wordt de plaat in lengterichting opgerekt. Vervolgens wordt het produkt geblazen. In het volgende station wordt het produkt uitgeworpen. Bij deze methode is het uiteraard niet mogelijk om schroefdraad mee te spuitgieten.

Het is ook mogelijk de preform in een later stadium verder te verwerken. De preform is dan te beschouwen als een gewoon spuitgietprodukt. De tweede processtap, het verwarmen en blazen, gebeurt zoals in figuur 12.20 D, E en F is weergegeven. Deze methode wordt bijvoorbeeld toegepast bij het strekblazen van PET-flessen (zie paragraaf 12.5).



Figuur 12.22: Spuitgietblaasmatrijs

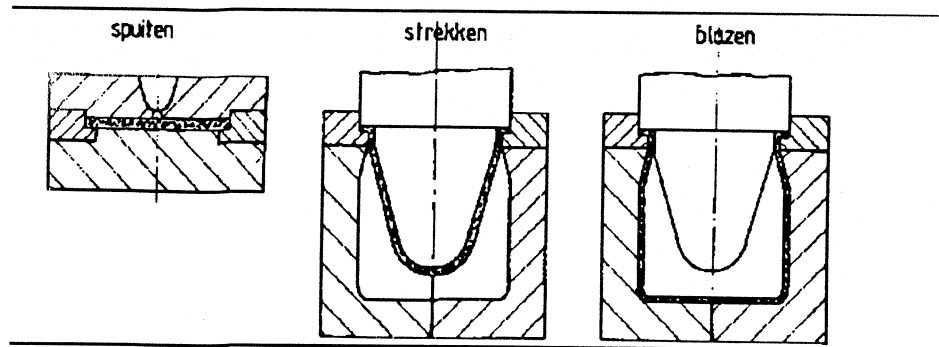
Voor- en nadelen

De voordelen van het spuitgietblazen zijn:

- korte cyclustijden mogelijk (produkt hoeft niet volledig af te koelen in de spuitgietmatrijs);
- braamvrije vulopening, schouder en bodem;
- géén productie-afval (extra van belang bij grote series);
- hoge maatnauwkeurigheid van hals en vulopening en schroefdraad (gelijk aan die van spuitgieten);
- geringe spreiding in massa van de flessen;
- betere oppervlaktekwaliteit dan bij extrusieblazen;
- grote halsdiameters zijn gemakkelijk te fabriceren.

De nadelen zijn:

- zéér hoge gereedschapskosten: er zijn twee dure matrijzen nodig;
- de binnendiameter van de preform kan niet groter zijn dan de halsdiameter en de lengte is begrensd tot tienmaal de diameter in verband met het buigen van de stempel;
- handgrepen kunnen niet worden worden meegeblazen;
- massa- en volumecorrecties zijn niet mogelijk (wel bij extrusieblazen);
- scherpe hoeken en onregelmatige vormen zijn moeilijk te realiseren;
- het proces is alléén geschikt voor vaten met eenvoudige vorm (cirkelvormige doorsneden en enigszins ovale en platte flessen);
- maximale produktinhoud is ongeveer 3 liter.



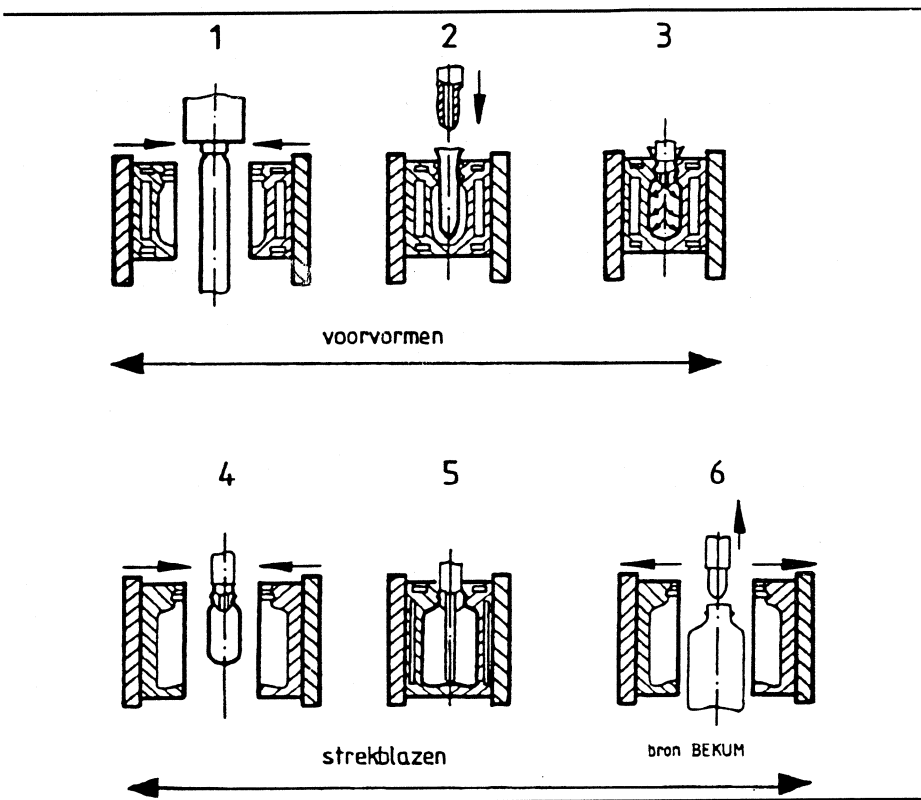
Figuur 12.23: Spuitgietsblazen van een fles met wijde hals

12.5 STREKBLAZEN

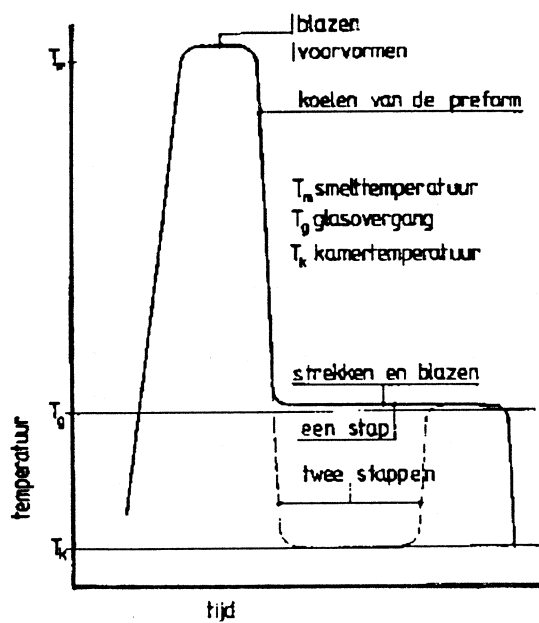
Strekblazen is een proces waarin het blazen in twee stappen gebeurt (figuur 12.24). Het tussenproduct wordt op bekende wijze opgeblazen tot een klein flesje. Dit flesje wordt overgezet in een grotere matrij. De eerste stap in het blaasproces gebeurt boven de smelttemperatuur. In het tweede blaasstation wordt de fles, die een temperatuur heeft juist boven de glasovergangstemperatuur, opgeblazen en tegelijkertijd met een stift in axiale richting opgerekt. Na dit biaxiaal verstrekken wordt het product snel afgekoeld tot beneden de glasovergangstemperatuur.

Door het biaxiaal verstrekken boven de glasovergangstemperatuur krijgt het materiaal een moleculaire oriëntatie die na het invriezen onder de glasovergangstemperatuur blijft bestaan. Het strekblazen wordt toegepast op flessen van PVC en PET. Door deze fabricagemethode nemen de sterkte, slagsterkte en taaiheid aanmerkelijk toe; men kan de wanden dus dunner maken. Na het strekken is het materiaal doorzichtiger geworden en bezit de fles een hoogglanzend oppervlak. Bovendien verbetert biaxiaal rekken de gasdichtheid met ongeveer een factor 2. Onder bepaalde omstandigheden kunnen ook koolzuurhoudende dranken worden bewaard in PET-flessen. Warm vullen van biaxiaal gerekte flessen is echter uitgesloten omdat de moleculen deels hun oriëntatie verliezen. Warmtegestabiliseerde flessen (zie *ide140 Konstruktieleer 1*, hoofdstuk 'PET-fles') zijn wél warm vulbaar.

In figuur 12.25 is een diagram gegeven voor het strekblazen van flessen. Voorvormen en strekblazen kunnen in één stap in één machine worden uitgevoerd zoals in figuur 12.24. De voorvorm kan ook worden afgekoeld tot kamertemperatuur en later in een andere machine tot een biaxiaal gestrekte fles worden geblazen. De laatste methode is gebruikelijk voor PET-flessen. De PET-preforms worden op een afzonderlijke blaasmachine met infraroodstraling verwarmd tot boven de glasovergangstemperatuur en daarna geblazen onder gelijktijdige verstrekking in lengterichting (figuur 12.20D, E en F).



Figuur 12.24: Streckblazen (Bekum)



Figuur 12.25: Streckblaasdiagram

Voor- en nadelen

De voordelen van het strekblazen zijn:

- dunwandig construeren is mogelijk mede door verbetering van materiaaleigenschappen;
- door de preform in wanddikte te laten variëren, kan de wanddikte en zonodig de diktevariatie van het eindproduct worden beheerst;
- scherpe hoeken en onregelmatige vormen zijn moeilijk te realiseren;
- bij delen die niet gestrekt worden is een goede detaillering mogelijk;
- er ontstaat geen afvalmateriaal.

De nadelen zijn:

- er zijn hoge investeringen nodig;
- de totale cyclustijden zijn relatief lang hoewel met meervoudige matrijzen de cyclustijd per produkt kan worden beperkt;
- er zijn slechts een beperkte vorm, grootte en complexiteit mogelijk.

VRAGEN

- 1) *bij § 12.1:* Waarom is voor blaasvormen een hoogvisceuze smelt gewenst? Is er bij het blazen shear-thinning (zie § 4.6) te verwachten?
- 2) *bij § 12.2:* Waarom is extrusieblazen met continu-extrusie niet geschikt voor grote produkten?
- 3) *bij § 12.2:* Waarom is voor het blazen van platte flessen een wanddiktevariatie van de parison in de omtrekriching gunstig?
- 4) *bij § 12.2:* Hoe kan de wanddikte van de parison bij een niet-instelbare spuitkop toch worden gevarieerd?

LITERATUUR

- Bikaleo, M., Overberger en Menges
Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Vol.2: Blow Molding
John Wiley and Sons
- Ebeling, Lüpke, Schelten en Schwartz
Kunststofverwerking
Kluwer, 1981,
- Johannaber, F.
Injection molding machines
Hanser, 1982.
- Miller, E.
Plastics Products Design Handbook, Part B,
Marcel Dekker, New York
- Onasch en Junk
Coextrusions Blasformen
Kunststoffe (77) 1987/7 S 663
- Plajer, O.
Werkzeuge für die Extrusions-Blastechnik
Plastverarbeiter (18) 1967/1 S 1 e.v.
- Rappel
Barrierematerialien für blasgeformte Hohlkörper
Kunststoffe 77(1987)12 S 1259
- Schaab en Stoeckert
Kunststoff-Maschinenführer
Hanser, München, 1979.

Stoeckert, K.

Werkzeugbau für die Kunststoff Verarbeitung
Hanser Verlag, München Wien

Stoeckert, K.

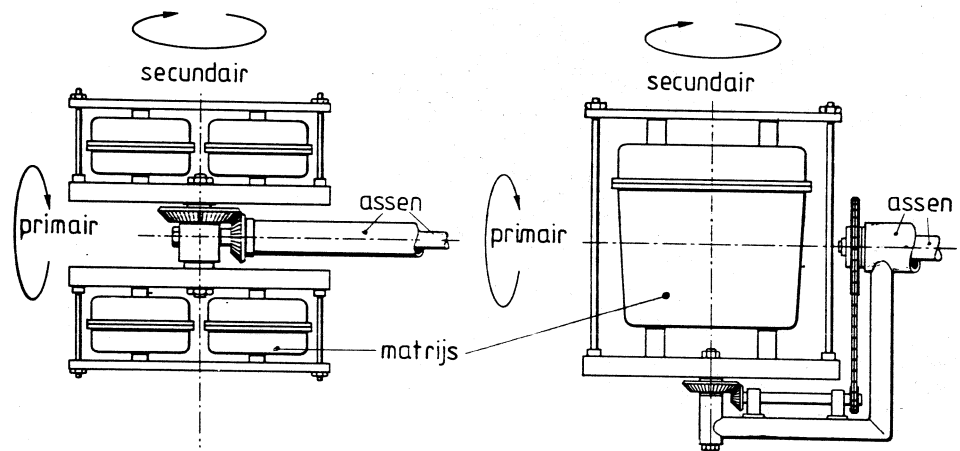
Spritzblasen und andere spezielle Blasformverfahren
Kunststoffe (67) 1977/10 S 602

Hoofdstuk 13: ROTATIEGIETEN VAN KUNSTSTOFFEN

13.1 INLEIDING

Rotatiegieten is een proces voor holle produkten met kleine tot zéér grote afmetingen. Doordat het gieten plaatsvindt in gesloten matrijzen zijn de produkten naadloos. Tijdens het proces treedt er géén afschuifvervorming op. Dientengevolge hebben rotatiegietprodukten zéér lage inwendige spanningen en geen moleculaire oriëntatie.

Een rotatiegietmatrijs roteert continu om twee assen die loodrecht op elkaar staan (biaxiale rotatie; zie figuur 13.1). Beide assen hebben verschillende toerentallen. Het toerental van de secundaire as ligt meestal tussen 15 en 35 omwentelingen per minuut. Het toerental van de primaire as is een factor 2 tot 8 lager. De verschillende toerentallen worden verkregen door tandwiel- en kettingoverbrengingen. Het toerental van de matrijs is laag, zodat de centrifugale krachten klein zijn ten opzichte van de zwaartekracht. De verwarming van de matrijzen geschiedt met hete lucht in een oven of met een vloeistof. Zéér grote matrijzen worden echter direct verwarmd met gas.



Figuur 13.1: Rotatiegietmatrijs met twee assen

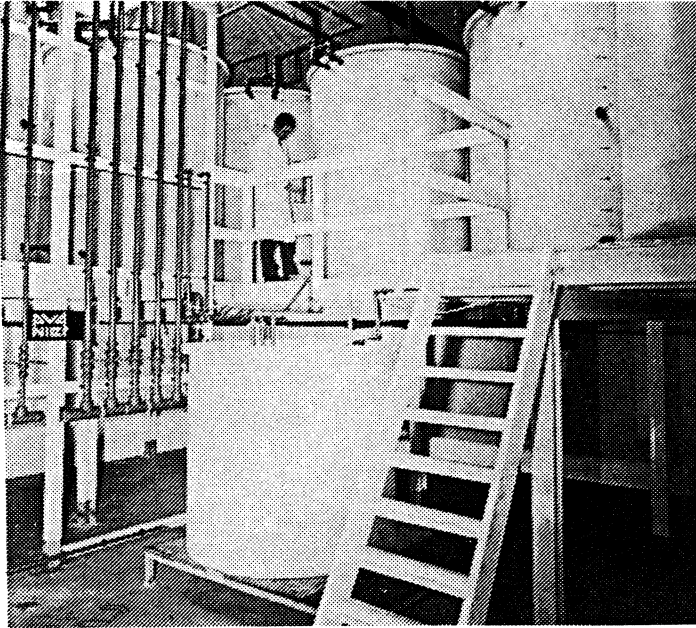
Toepassingen

Produkten die op deze wijze worden gefabriceerd zijn (zie ook figuur 13.2): opslagtanks tot 15 m³ inhoud (wanddikte tot 18 mm), rechthoekige, ronde en ovale containers, afdekkappen, surfplanken, boten, wegmarkeringen en speelgoed (zoals ballen, poppen en grote schaakstukken).

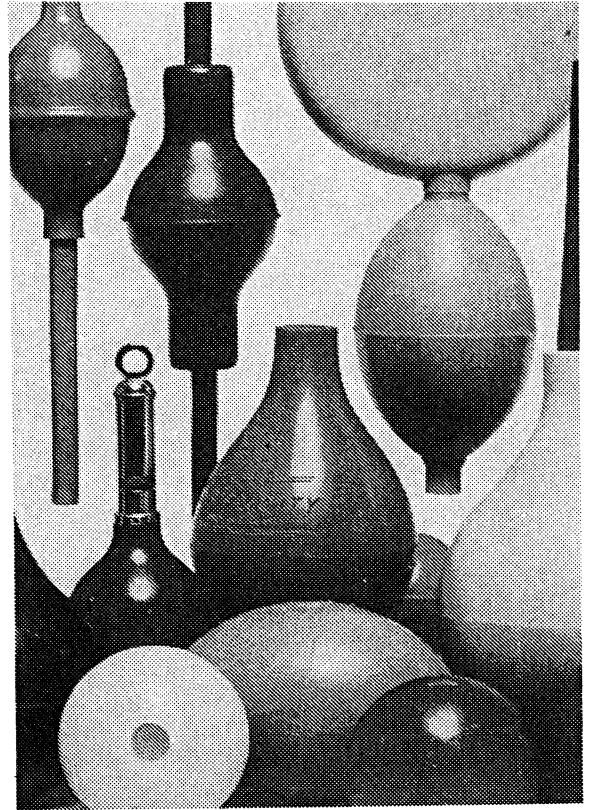
13.2 HET ROTATIEGIETPROCES

In het rotatiegietproces zijn een aantal stappen te onderscheiden (figuur 13.3):

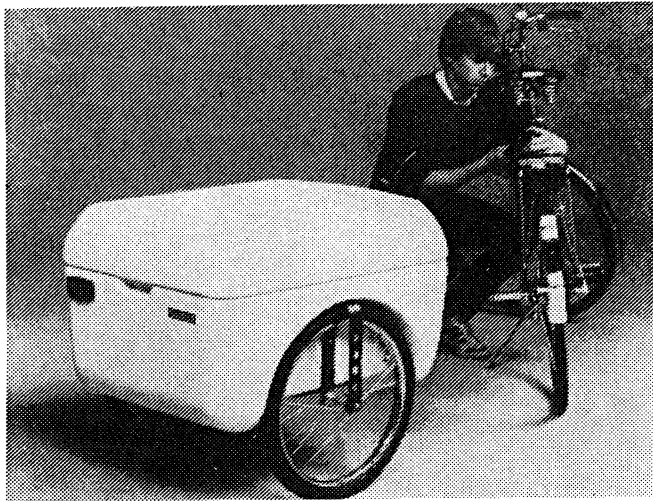
- A: het vullen van de matrijs met de grondstof en het afsluiten van de matrijs;
- B: het smelten van de grondstof in de matrijs totdat de kunststof een homogene gesmolten laag vormt op de wand van de matrijs;



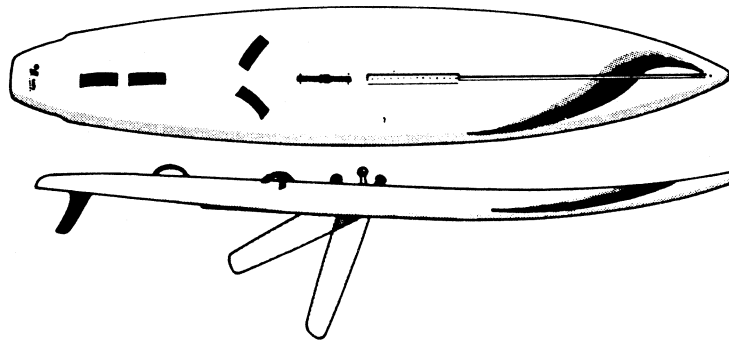
vloeistofreservoirs



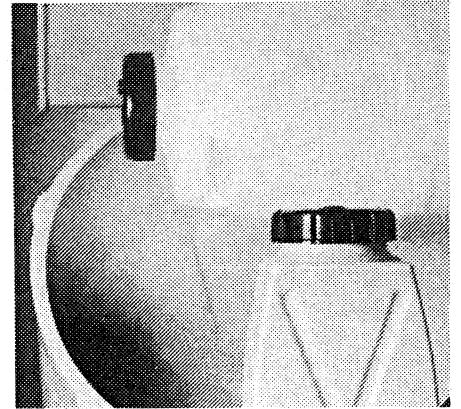
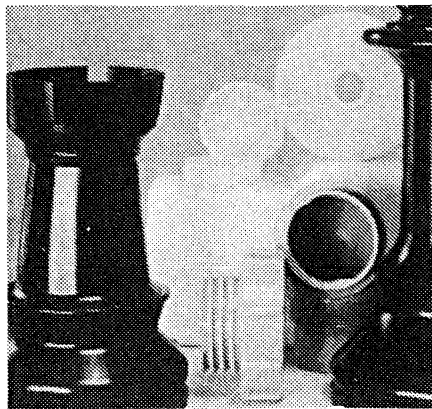
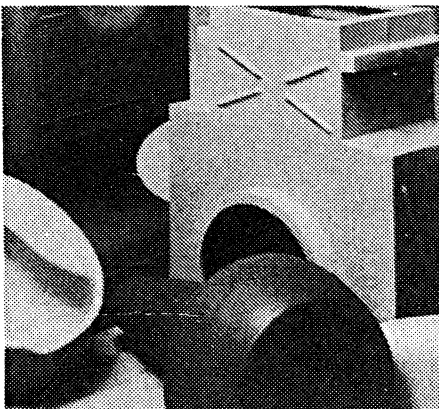
balgen



fietscar van Curver

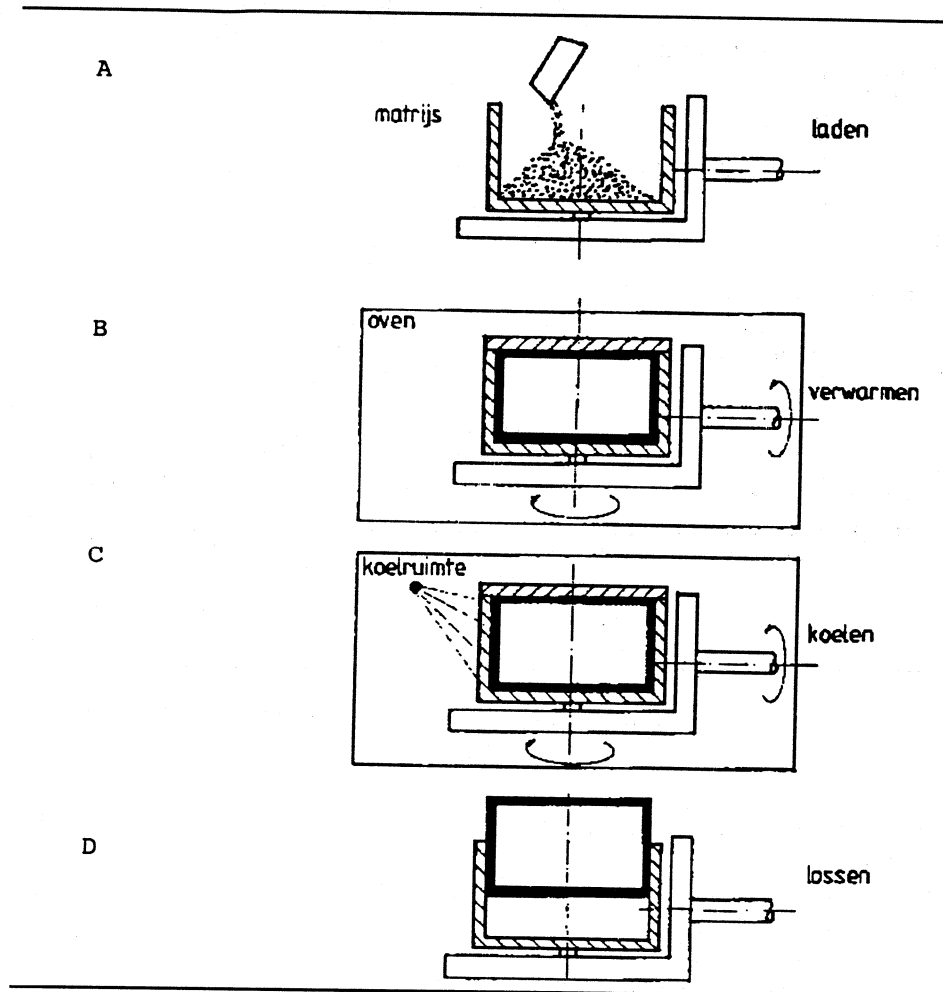


surfplank



Figuur 13.2: Voorbeelden van producten die gemaakt zijn door rotatiegieten

- C: het koelen van de matrijs;
 D: het uitnemen van het produkt uit de matrijs.

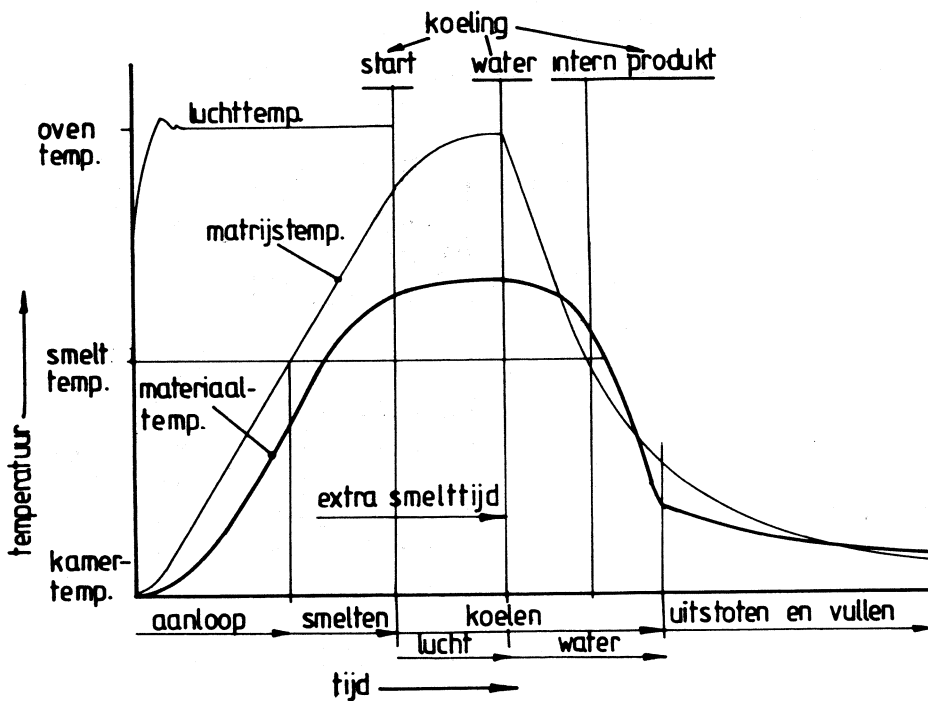


Figuur 13.3: Stappen in het rotatiegietsproces

Bij het vullen van de matrijs wordt de grondstof (poeder, vloeistof of pasta: zie paragraaf 13.5) in de geopende matrijs gebracht. Het vullen gebeurt met de hand of mechanisch.

Na het sluiten van de matrijs verwarmt men de matrijs, soms wel tot 400 à 450°C, afhankelijk van de kunststof. Tijdens het biaxiaal roteren smelt de kunststof tegen de wand van de matrijs. Het verwarmen gebeurt met een open vlam, met warme lucht, in een oven of met een vloeistof.

In figuur 13.4 is het verloop van enkele parameters tijdens de productiecyclus weergegeven. De temperatuur van de verwarmingslucht is beduidend hoger dan de smelttemperatuur van de kunststof. Na een bepaalde tijd benadert de matrijstemperatuur de temperatuur van de verwarmingslucht. De materiaalteratuur in figuur 13.4 is een gemiddelde temperatuur over de wanddikte van het produkt. Aan het buitenoppervlak van het produkt is de materiaalteratuur gelijk aan de matrijstemperatuur; verder naar binnen neemt de materiaalteratuur echter af.



Figuur 13.4: Verloop van enige procesparameters tijdens het rotatiegieten

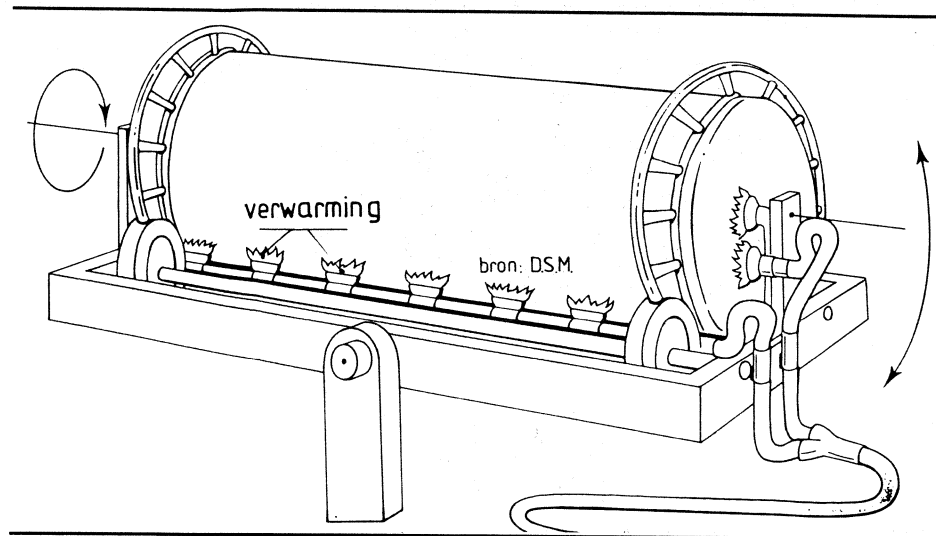
De tijd die nodig is om de grondstof te smelten hangt af van de volgende parameters:

- de geometrie van het produkt (wanddikten, oppervlakte/volume-verhouding);
- de korrelgrootte van de grondstof;
- de smelttemperatuur van de kunststof;
- de oventemperatuur;
- de verwarmingscapaciteit per eenheid van oppervlak van de matrijs.

Nadat de kunststof is gesmolten, wordt de koeling ingeschakeld. Wanneer het produkt voldoende afgekoeld is, opent men de matrijs en verwijdert men het produkt. Hierna start de cyclus opnieuw. De cyclustijd ligt doorgaans tussen 3 en 30 minuten. In extreme gevallen kan de cyclustijd tot 2 uren bedragen.

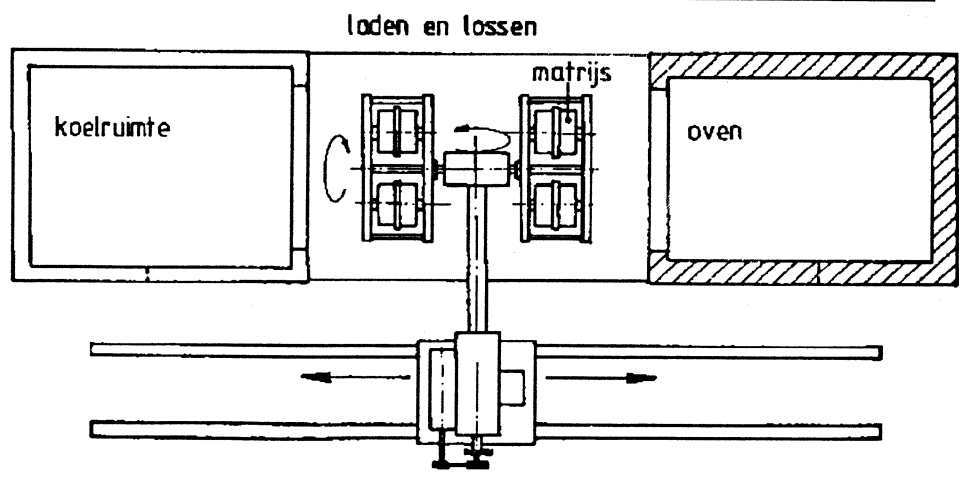
13.3 ROTATIEGIETMACHINES

Er bestaan rotatiegietmachines in verschillende soorten en maten. Voor zéér grote produkten kan men een zogenaamde Rock & Rollmachine toepassen. Hierin roteert de matrijs niet om twee assen maar om één as; om een andere as maakt de matrijs een schommelende beweging. De verwarming van de matrijs gebeurt met open gasvlammen (figuur 13.5).



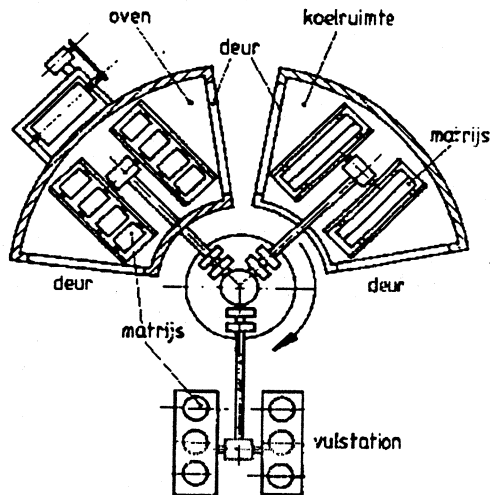
Figuur 13.5: Rock & Rollmachine

In figuur 13.6 is het schema van een éénassige rotatiegietmachine weergegeven (N.B. de machine is éénassig; de matrijs wordt onderworpen aan een twee-assige rotatie!). In de middenpositie worden de produkten uit de matrijsen verwijderd. De matrijsen worden daarna opnieuw gevuld met grondstof. Vervolgens wordt de machine naar de ovenpositie gereden. De matrijsen worden hier doorlopend geroteerd. In deze positie smelt de kunststof tegen de matrijswand. Vervolgens gaat de machine naar de koelruimte. De matrijsen blijven draaien totdat de produkten voldoende zijn afgekoeld. Hierna gaat de machine terug naar de middenpositie.



Figuur 13.6: Éénassige rotatiegietmachine

Voor grotere productie-aantallen en voor productieseries van verschillende produkten kan men de opbrengst vergroten door een drie-assige rotatiegietmachine te gebruiken (figuur 13.7). In elke stand van de machine kan men lossen en vullen, verwarmen en koelen. De cyclustijd kan men met deze machine niet verkorten. De opbrengst van de machine kan men echter toch vergroten vanwege de grotere flexibiliteit in procesvoering, vooral wat betreft het moment van wisselen.



Figuur 13.7: Drie-assige rotatiegietmachine

13.4 MATRIJZEN

Van matrijzen voor het rotatiegieten wordt geëist dat ze binnen één cyclus van 3 à 10 minuten verwarmd kunnen worden tot tenminste 300°C en weer kunnen worden afgekoeld tot kamertemperatuur. Deze functionele eis moet gerealiseerd worden door een juiste materiaalkeuze en een goede constructie. De matrijzen moeten voldoende stijf zijn, de elementen bevatten voor het bevestigen van de matrijs aan de machine en voor het sluiten van de matrijs. Ten behoeve van tijdwinst en energiebesparing moet de matrijswand gelijkmatig van dikte en dun zijn.

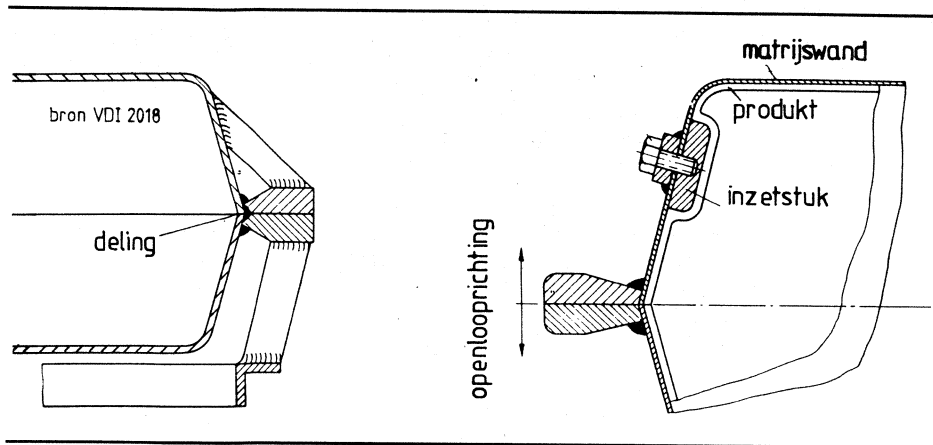
Voor rotatiegietmatrijzen komen de volgende materialen in aanmerking:

- roestvaste of koudgewalste staalplaat (≥ 2 mm dik);
- aluminiumplaat;
- aluminium gietwerk (met wanden ≥ 6 mm);
- galvanische matrijzen van een nikkel-koperlegering.

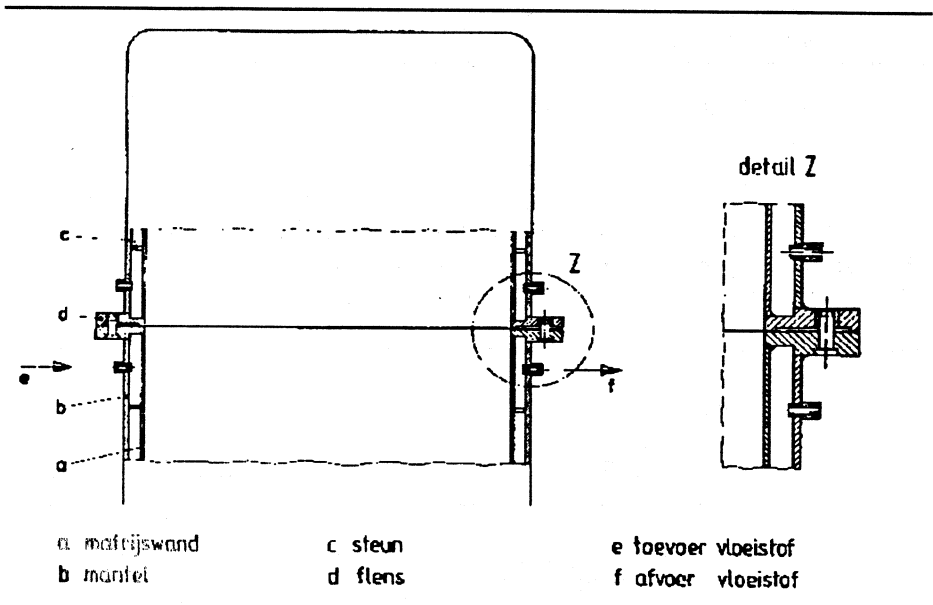
Voor grote produkten met een hoge wandstijfheid, zoals grote vaten, zijn matrijzen nodig die uit méér dan twee delen bestaan in verband met gemakkelijke lossing van het produkt uit de matrijs. Dergelijke matrijzen worden vervaardigd uit 2 tot 4 mm dikke staalplaat. De bewerkingen zijn buigen en lassen of solderen. Stelt men hogere eisen aan het produktoppervlak dan kan men overgaan op aluminiumplaat.

De voorziening voor het sluiten van de matrijs en voor de ophanging van de matrijs aan de machine mag de warmtedoorvoer door de matrijswand niet te zeer belemmeren. In de matrijs kunnen ook nog voorzieningen worden aangebracht voor niet-lossende delen (figuur 13.8).

Voor produkten met een eenvoudige vorm kan de matrijs dubbelwandig worden uitgevoerd. Tussen beide wanden wordt vloeistof gepompt voor verwarming en koeling (figuur 13.9).



Figuur 13.8: Rotatiegietmatrijzen van plaatstaal

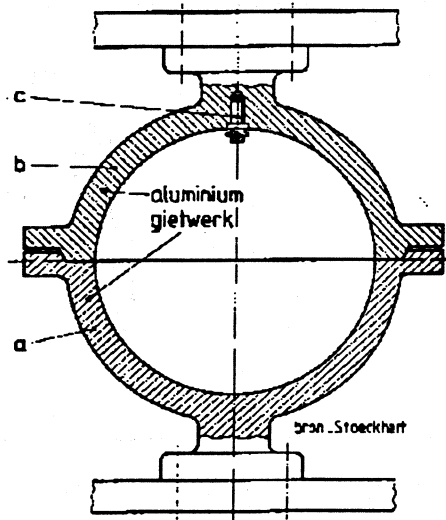


Figuur 13.9: Dubbelwandige rotatiegietmatrijs

Voor grote series complexe produkten, waarvoor méér matrijzen nodig zijn past men gegoten aluminium matrijzen toe. De ophanginrichting van de matrijs aan de machine en de sluiting van de matrijs worden meegegoten. Eventuele textuur op het produktvormend matrijsoppervlak wordt eveneens meegegoten. De goede warmtegeleiding van het aluminium staat toe dat de matrijs in wanddikte méér mag variëren dan in een stalen matrijs (figuur 13.10).

Galvanisch gevormde matrijzen hebben de volgende voordelen:

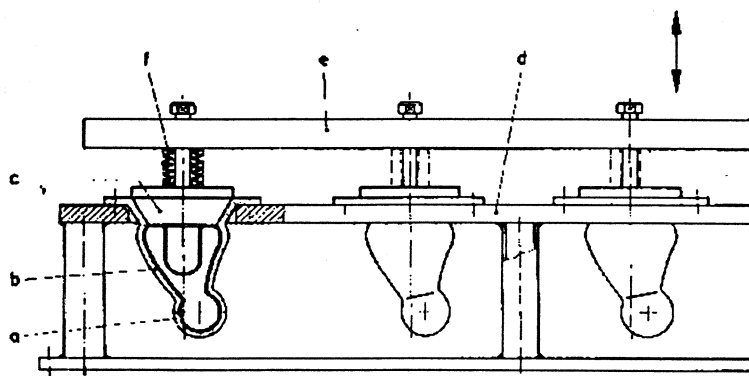
- het materiaal NiCu is corrosiebestendig;
- de matrijzen bezitten dunne wanden zonder grote verdikkingen;
- nagenoeg elke matrijsvorm is te maken;
- het oppervlak kan een hoogglans bezitten of elke gewenste textuur;
- van het moedermodel kunnen via een vormomkeermethode vele identieke matrijzen worden gemaakt.



a. ondermatrijs c. inzetstuk voor ventielopening
b. bovenmatrijs

Figuur 13.10: Rotatiegietmatrijs voor ballen

In figuur 13.11 is een galvanische matrijs weergegeven. Het model moet na het vervaardigen van de schil worden verwijderd. Hiertoe wordt het model mechanisch verspaand of chemisch opgelost.



a PVC produkt c deksel e sluitinrichting
b galvanische matrijs d frame f veren

Figuur 13.11: Rotatiegietmachine met galvanische matrijs

13.5 MATERIALEN

Rotatiegieten is een proces met een lange cyclustijd doordat de warmteoverdracht geschiedt via contact tussen de matrijswand en de gesmolten kunststof. Zodra de kunststof gesmolten is, beweegt deze niet meer ten opzichte van de wand. De verblijftijd van de kunststof in de smeltfase is lang, waardoor de materiaalkeuze enigszins beperkt is. De materialen die toegepast kunnen worden, moeten een breed temperatuurtraject hebben tussen smeltemperatuur en ontledingstemperatuur.

De meest toegepaste materialen zijn PE, PVC, PA en PC. Ongeveer $\frac{3}{4}$ van alle rotatiegegoten produkten is van PE, vooral LDPE, LLDPE en LMDPE (de eerste L in de laatste twee staat voor *linear*).

Enkele kenmerken van deze typen PE:

- hoge slagsterkte, ook bij lage temperaturen;
- goede elektrische isolatie;
- goede bestandheid tegen vele chemicaliën.

PE wordt meestal verwerkt in de vorm van droog poeder (dry blend) met een korrelgrootte tussen 100 en 800 μm .

Een ander veel gebruikt materiaal is PVC. Dit materiaal wordt verwerkt als een dry blend zoals PE of als een plastisol. Een plastisol is een dispersie van poeder in een weekmaker. Een plastisol gedraagt zich als een min of meer viskeuze vloeistof die bij een temperatuurverhoging een lage viscositeit verkrijgt. Al naar gelang de receptuur begint daarna bij verdere temperatuurverhoging het materiaal te geleren waardoor de viscositeit snel stijgt. Het materiaal wordt toegepast voor de fabricage van poppen en ballen. Met een plastisol kunnen produkten met zeer gecompliceerde contouren worden gefabriceerd.

Ook PA past men toe in het rotatiegietproces. Het uitgangsmateriaal kan een dry blend zijn. Een andere mogelijkheid is anionische polymerisatie van caprolactam. In dit proces wordt vloeibare caprolactam met een katalysator in de matrijs gegoten. Tijdens het proces polymeriseert het materiaal tot een PA6.

PC wordt vanwege zijn hoge transparantie toegepast bij het rotatiegieten van produkten voor de verlichtingssector.

13.6 ONTWERPRICHTLIJNEN

Ter verhoging van de stijfheid van platte vlakken kan men ribben meegieten. Het is dan essentieel dat het materiaal alle holtten in de matrijs volledig kan bereiken. Daarom worden ribben relatief breed gemaakt ten opzichte van van de hoogte. Hierdoor zal het poeder niet halverwege de ribhoogte aanéénkoeken waardoor de rib niet meer geheel gevuld kan worden.

Hetzelfde geldt voor de afstand tussen twee wanden. De wandafstand dient groter te zijn dan viermaal de wanddikte.

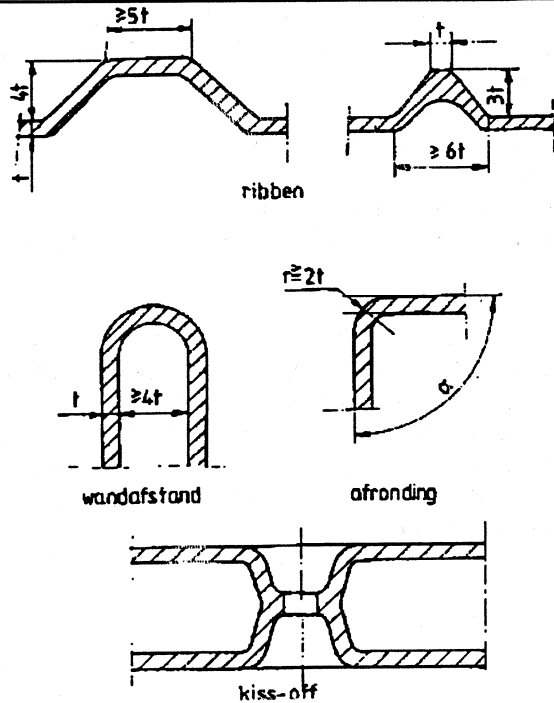
Hoeken mogen niet scherp zijn, anders worden de wanden bij de hoek poreus. De stijfheid van grote vlakken kan ook worden vergroot met zogenaamde kiss-offs, waarbij plaatselijk de wanden aanéén vloeien.

De hier besproken konstruktiedetails zijn getoond in figuur 13.12.

Zoals vermeld is rotatiegieten geschikt voor gesloten holle lichamen. Soms wordt geëist dat in een hol produkt een opening aanwezig is. Zo'n opening kan op verschillende manieren worden aangebracht (figuur 13.13).

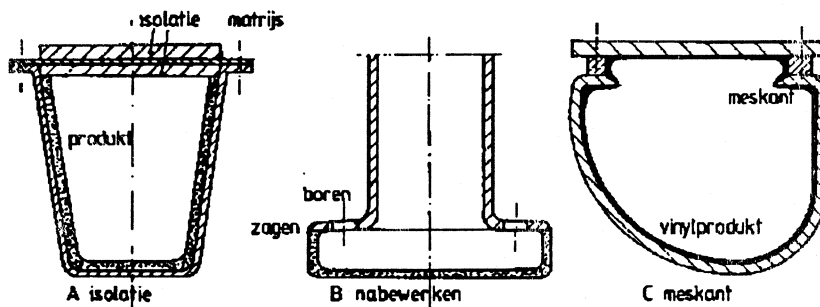
Bij de methode volgens figuur 13.13A wordt een deel van de matrijswand thermisch geïsoleerd. Hierdoor blijft dit deel koeler dan de rest van de wand. De kunststof kan op deze plaats niet smelten.

Men kan ook volgens figuur 13.13B een gesloten vat fabriceren en in een nabewerking het overtollige materiaal verwijderen.



Figuur 13.12: Konstruktiedetails van rotatiegietprodukten

Bij PVC-produkten brengt men in de matrijs een meskant aan (figuur 13.13C). Op deze meskant blijft géén gesmolten materiaal zitten. Na afloop van het proces verwijdert men het overtollige materiaal.



Figuur 13.13: Het vormen van openingen in rotatiegietprodukten

13.7 VOOR- EN NADELEN

Voordelen van het rotatiegietproces zijn:

- kleine series en prototypen kunnen door de lage matrijskosten economisch worden gefabriceerd;
- produktmatrijzen voor het rotatiegieten kosten beduidend minder dan matrijzen voor processen met hoge drukken zoals spuitgieten;
- geen bramen of ander productie-afval;
- niet-lossende produkten kunnen eenvoudig worden geproduceerd;
- zowel metalen als kunststof inserts kunnen worden meegevormd;
- de produkten zijn spanningsarm;

- de produkten kunnen naadloos zijn;
- op de machine kunnen verschillende produkten tegelijk worden geproduceerd;
- dubbele wanden zijn mogelijk;
- het is mogelijk produkten uit méér lagen te fabriceren;
- er is een grote vormvrijheid;
- met één matrijs kan men met verschillende produktwanddikten experimenteren;
- het is mogelijk zéér grote produkten te maken.

Nadelen zijn:

- grote wanddikteverschillen zijn niet mogelijk (maximaal $\pm 5\%$);
- kleine maattoleranties zijn niet mogelijk;
- niet alle kunststoffen zijn toepasbaar;
- rotatiegieten is een langzame techniek;
- rotatiegieten is arbeidsintensief.

13.8 KOSTEN

De matrijzen voor het rotatiegieten variëren in prijs van fl.5000,- tot 12.000,-. Een rotatiegietmachine met drie armen kost ongeveer fl.400.000,-. De lange cyclustijd en het feit dat het een arbeidsintensieve techniek is, maken de vervaardigingskosten hoog.

LITERATUUR

Bruins, P.F.

Basic principles of Rotational molding
Gordon and Breach, New York 1971.

Crawford, R.J. en J.A. Scott

An experimental study of heat transfer during rotational mouldings of plastics
Plastics and Rubber Processing and Applications 5 (1985) p. 239

Frados, J.

Plastic Engineering Handbook SPI,
Van Nostrand Reinhold Company, New York 1976.

Miller, E.

Plastics products design handbook part B, Rotational molding
David Ramazzotti, Marcel Dekker Inc., New York 1983.

Schaab en Stoeckert

Kunststoffmaschinenführer
Hanser Verlag München 1979.

Stoeckert, K.

Werkzeugbau für die Kunststoff Verarbeitung
Hanser Verlag, München 1979.

Tan, S.

Verwerkingstechnieken voor kunststoffen
io bo 17 - Serie io bijzonderonderwerpen deel 17
Technische Universiteit Delft, 1988.

Vossenbild, A.

Rotatiegieten
Kunststof en Rubber, 1985 nr. 4, blz. 12

Wijk, R. van der

Rotatiegieten
Kunststoffen 1986, Terugblik en toekomst, Kunststoffen en Rubber
Instituut TNO

Hoofdstuk 14: THERMOVORMEN VAN KUNSTSTOFFEN

14.1 INLEIDING

Bij thermovormprocessen wordt uitgegaan van een tussenprodukt. Het tussenprodukt kan worden vervaardigd door plaatextrusie, folieblaasextrusie, foliegieten of kalanderen. Het materiaal kan ook uit gecoëxtrudeerde of gelijmde lagen bestaan. Foliegieten wordt toegepast op acetaten en acrylaten voor luxe verpakkingen met een briljant oppervlak. Kalanderen is een proces voor vellen van hard en zacht PVC.

Het tussenprodukt wordt warm vervormd. De vervormingstemperatuur ligt tussen de glasovergangstemperatuur en de smeltemperatuur van de kunststof. De verwerking van amorfe kunststoffen zoals PVC, PS, ABS, PC en PMMA is betrekkelijk eenvoudig, omdat deze materialen een breed verwerkingstraject hebben tussen glasovergangstemperatuur en smeltemperatuur. Deelkristallijne materialen hebben een veel smaller verwerkingstraject: daarom is het verwerken van PE, PP en PA ook veel moeilijker.

Thermovormprocessen zijn op te splitsen in een aantal stappen:

- Spannen van de plaat of de folie in een frame. Dunne folie tot ongeveer 0,25 mm wordt meestal op een rol toegevoerd. Plaat met hogere dikten wordt als afzonderlijke afgesneden plaat in een frame geklemd.
- Verwarmen totdat de plaat of folie rubberelastisch wordt.
- Vormen met vacuüm, met perslucht of via mechanische weg.
- Koelen.
- Nabewerken of trimmen van de randen. Het afvalmateriaal wordt vermalen en later weer geëxtrudeerd.
- Decoreren. Verpakkingen worden meestal bedrukt, technische artikelen kunnen worden gelakt en bedrukt.

De producten die men op deze wijze fabriceert zijn in hoofdzaak verpakkingen voor de voedingsmiddelenindustrie en voor huishoudelijke artikelen, bijvoorbeeld de bekende koffiebekertjes. Er is ook een belangrijke markt voor duurzame consumptiegoederen, zoals binnendeuren van auto's en koelkasten, spatborden en beschermingskappen voor motoren, badkuipen, zwembaden, boten en surfplanken.

Omdat grote oppervlakken met zéér dunne wanden kunnen worden gefabriceerd kan thermovormen concurrerend zijn met spuitgieten, blazen en rotatiegieten. De mechanische belasting van de matrijs tijdens het fabricageproces is gering, zodat deze matrijzen goedkoper zijn dan spuitgietmatrijzen.

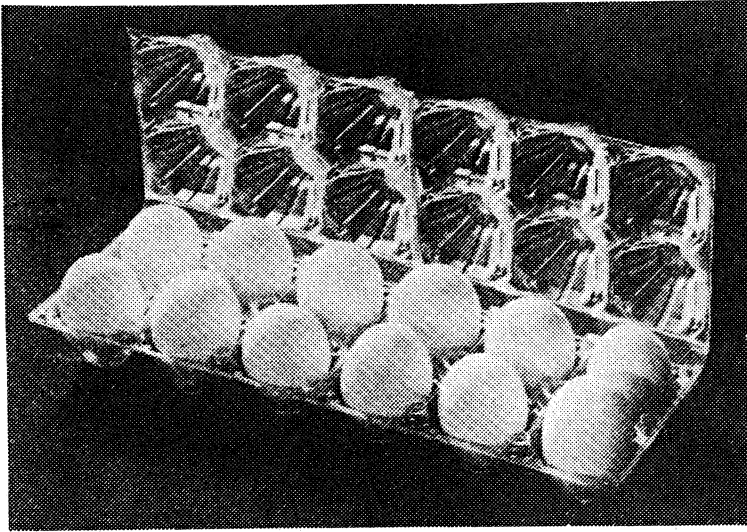
Bij thermovormprocessen worden drie typen matrijzen gebruikt:

- negatieve matrijs (holte);
- positieve matrijs (stempel);
- holte met bijbehorende stempel, zoals bij het spuitgieten.

14.2 HET VERWARMEN

Er zijn drie verschillende mogelijkheden om de plaat of folie te verwarmen:

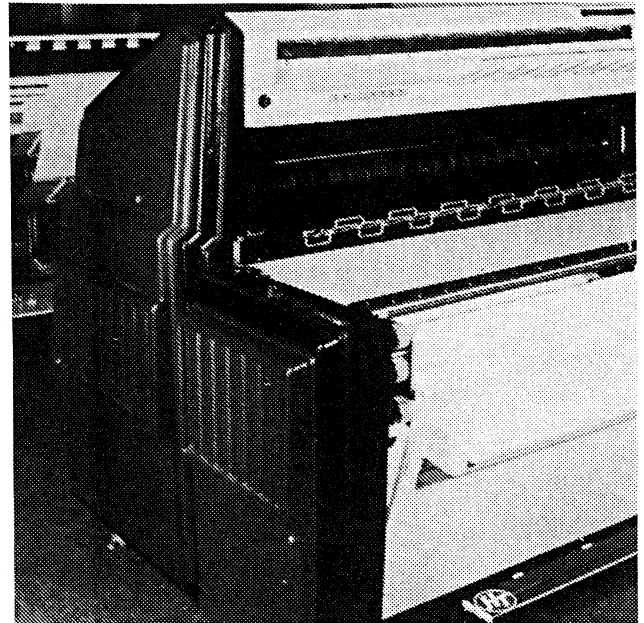
- infraroodverwarming;
- contactverwarming;
- verwarming met geforceerde convectie.



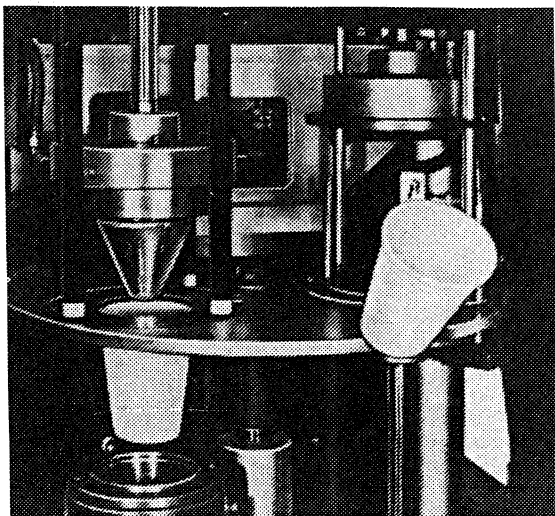
verpakking van eieren



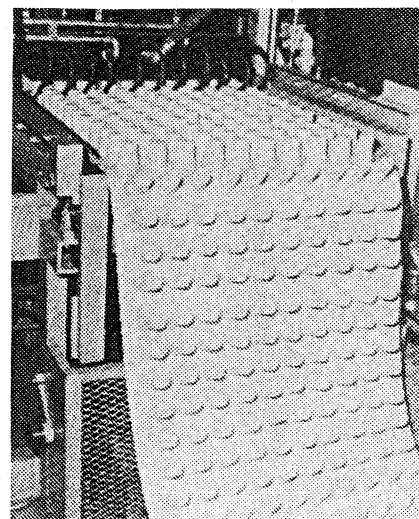
vizier



afdekpanelen voor lichtdrukmachine



koffiebekers

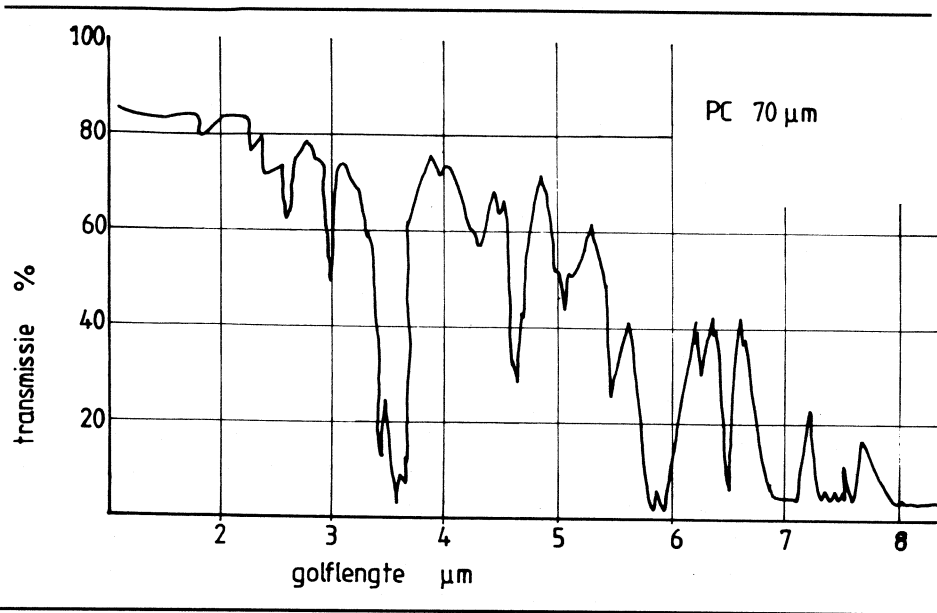


koffiebekers

Figuur 14.1: Voorbeelden van produkten die door thermovormen gemaakt zijn

Infraroodverwarming

Infraroodverwarming wordt het meest toegepast. Infraroodstraling is elektromagnetisch. De door het verwarmingselement uitgezonden infraroodstraling wordt door de folie of plaat deels geabsorbeerd; de niet-geabsorbeerde straling wordt deels doorgelaten en deels gereflecteerd. Elke thermoplast absorbeert de straling anders. De absorptie hangt af van de golflengte van de straling. In figuur 14.2 is de transmissiegraad van PC uitgezet als functie van de golflengte. In dit geval is bij golflengten van ongeveer 3,5 μm en 6 μm de absorptie van het materiaal het grootst.



Figuur 14.2: Stralingsabsorptie van PC

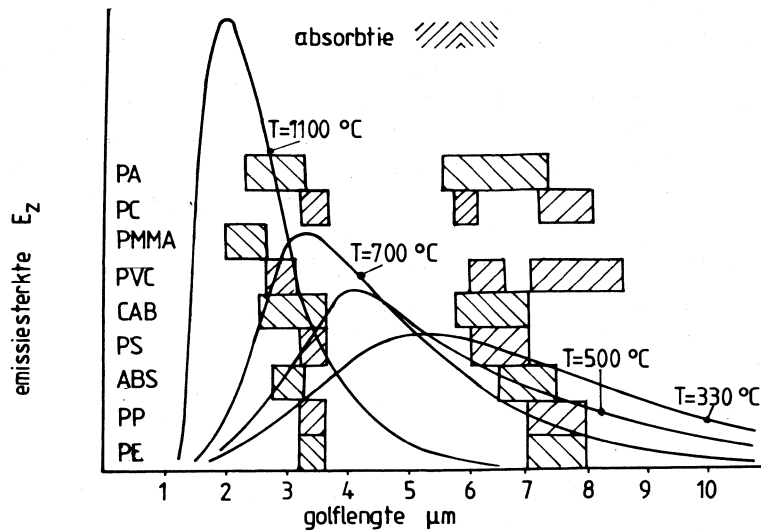
De verdeling van de golflengten van de uitgezonden straling hangt af van de temperatuur van de straler (Wet van Planck). Met toenemende temperatuur van de straler verschuift het maximum van de intensiteit naar een kleinere golflengte (Wet van Wien). De uitgezonden totale energiestroom neemt zéér sterk toe met de absolute temperatuur (Wet van Stephan-Boltzmann).

In figuur 14.3 is de verdeling van de golflengte van een straler uitgezet als functie van de temperatuur. In deze figuur zijn de absorptiegolflengten van verschillende thermoplasten opgenomen.

De meest toegepaste stralingsbronnen zijn:

- keramische stralers met een massatemperatuur van 600°C;
- kwartsstralers met een maximale temperatuur van 1050°C.

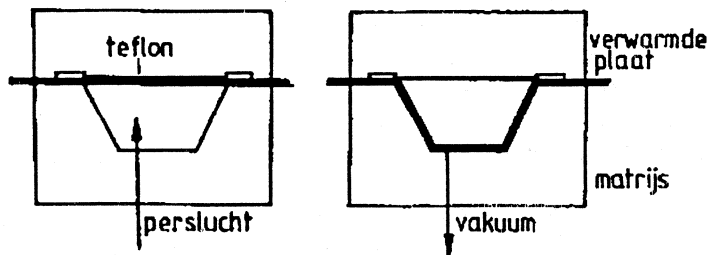
De verwarming door straling vindt in hoofdzaak plaats in de oppervlaktelaag van de kunststof. De warmte stroomt door warmtegeleiding naar het midden van de plaat. De grootte van de benodigde warmtestroom is afhankelijk van de materiaaldikte van het tussenproduct. Met toenemende plaatdikte moet de warmtestroom worden gereduceerd ter voorkóming van thermische schade aan het oppervlak. Dit heeft uiteraard invloed op de processnelheid.



Figuur 14.3: Infrarood-emissiespektra van enkele kunststoffen

Contactverwarming

Contactverwarming (figuur 14.4) wordt hoofdzakelijk toegepast voor dunne folies in automatische verpakkingsmachines die zorgen voor vormen, vullen met voedingsmiddelen en sluiten van de verpakking. Een groot voordeel bij deze verwarming is dat de verwarmingsplaat direct boven de matrijs is aangebracht, waardoor geen warmteverlies ontstaat bij transport van de folie met zijn geringe warmte-inhoud. De temperatuur van de verwarmingsplaat hangt af van de thermoplast die men wil verwerken. Het materiaal moet voldoende vormbaar zijn maar mag niet thermisch beschadigen. De verwarmingsplaat is bekleed met een laag teflon ter voorkóming van aankleven van de folie. Bij het sluiten van de matrijs wordt de folie tussen de matrijs en de verwarmingsplaat geklemd. Perslucht in de matrijs zorgt er voor dat de folie goed tegen de verwarmingsplaat ligt. Als de gewenste temperatuur bereikt is, wordt de matrijsholte vacuümgezogen. De folie wordt hierdoor tegen de matrijswand getrokken. Als een grotere aanlegkracht nodig is, wordt boven het product perslucht toegepast.



Figuur 14.4: Contactverwarming

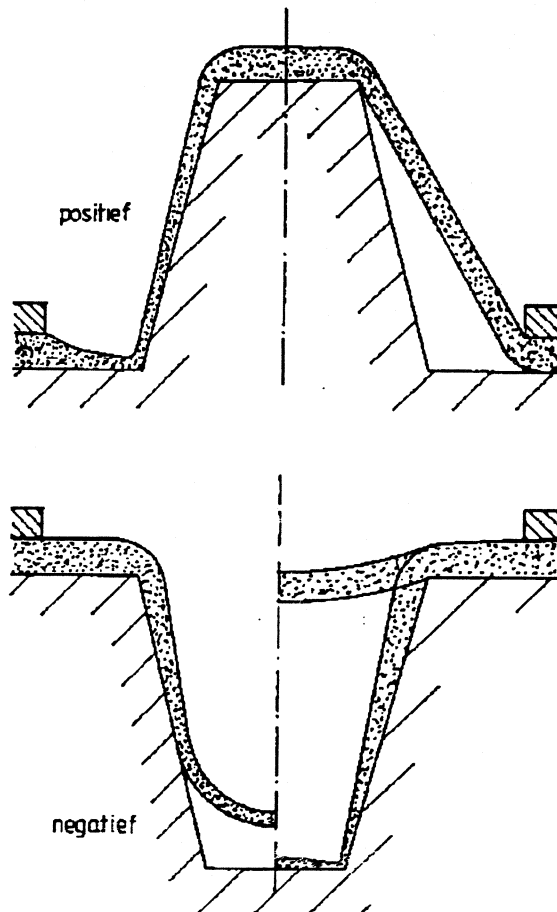
Verwarming met geforceerde convectie

Geforceerde convectie wordt toegepast op dikke platen door verwarming in een circulatie-oven. De benodigde verwarming hangt af van de maximaal toelaatbare temperatuur aan het oppervlak van de plaat. De warmte moet via geleiding naar het midden van de plaat worden gevoerd. De verwarmingstijd is evenredig met het kwadraat van de wanddikte.

14.3 HET THERMOVORMPROCES

Thermovormen kan in één of méér stappen plaatsvinden.

In de eenvoudigste situatie wordt de verwarmde plaat in één stap tegen de matrijswand getrokken. Waar de warme plaat de matrijs raakt stopt het oprekken van de plaat. Het resultaat van deze bewerking is dat het produkt een dikke wand krijgt waar de plaat de matrijs het eerst raakt en een dunne wand waar de plaat de matrijswand het laatst raakt. Het positief of negatief vormen heeft duidelijk een grote invloed op waar dikke en dunne wanden ontstaan (figuur 14.5).



Figuur 14.5: Wanddikteverschillen bij thermovormen

Er zijn vijf verschillende thermovormprocessen waarbij het produkt in één stap wordt gevormd:

- Vacuümvormen met een positieve matrijs (figuren 14.6A en 14.7). Na het klemmen en verwarmen van de plaat wordt deze over de matrijs getrokken. De kunststofplaat rekt men mechanisch op (figuur 14.7C).

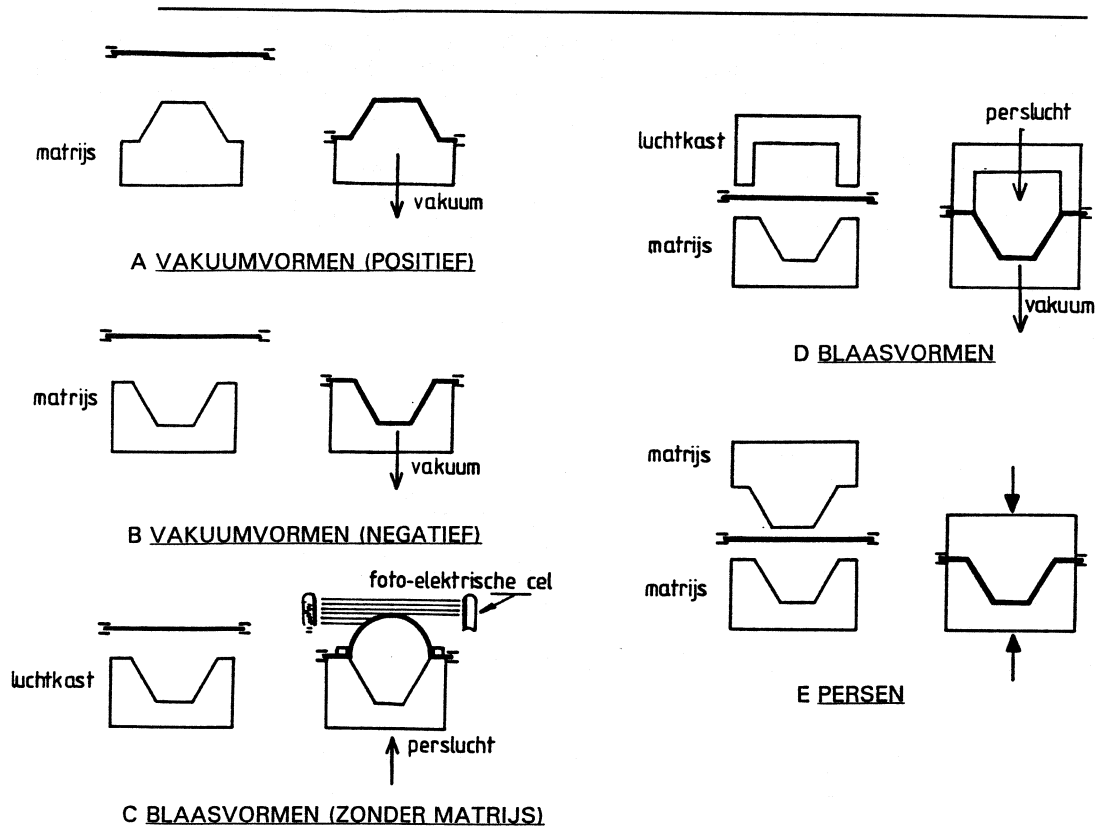
Vervolgens zuigt men de lucht tussen de plaat en de matrijs weg, waardoor de plaat in zijn geheel tegen de matrijs wordt gedrukt. Na afkoelen kan het produkt worden uitgestoten. Bij dit proces heeft het produkt een dikke bodem en dunnere zijwanden.

Bij het vormen met een positieve matrijs kan men de oppervlaktestructuur aan de *binnenzijde* van het bakvormige produkt beheersen.

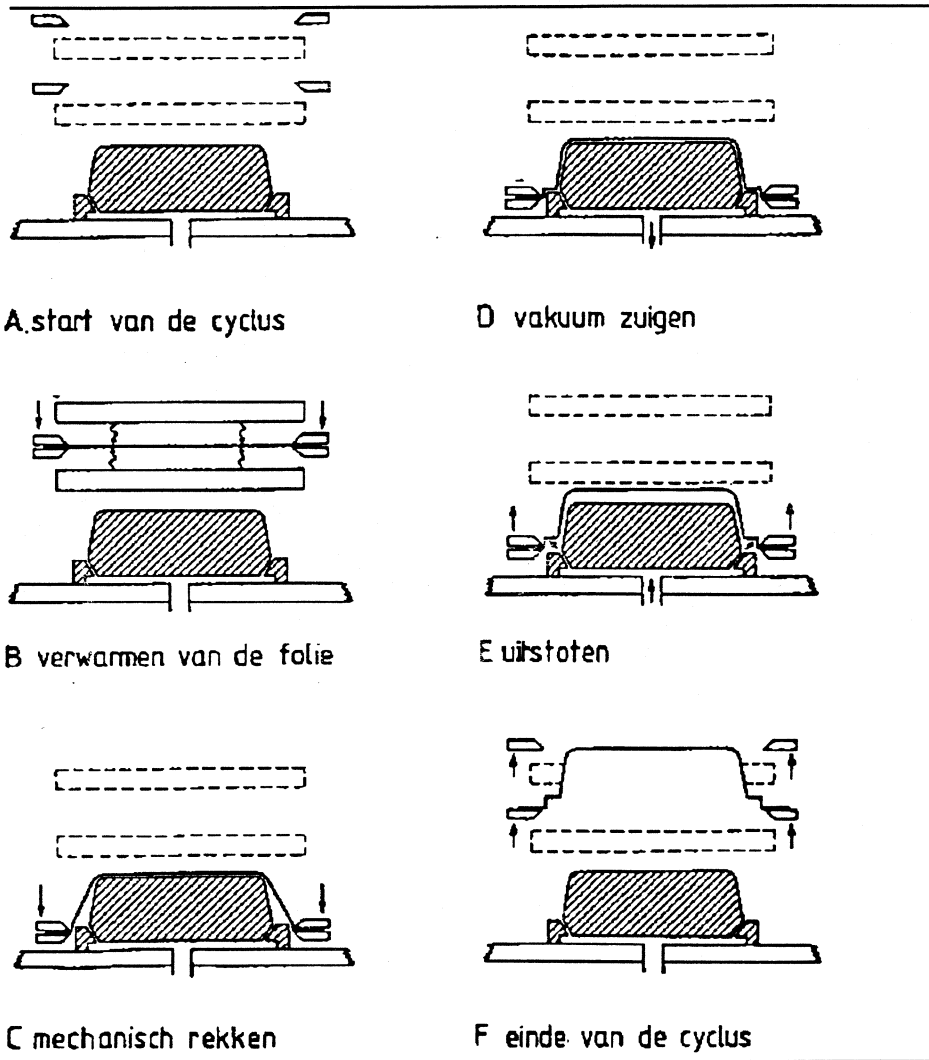
- Vacuümvormen in een negatieve matrijs (figuren 14.6B en 14.8).
De ingeklemde en verwarmde plaat wordt tegen de matrijs gedrukt (figuur 14.8C). Daarna zuigt men de matrijs vacuüm. Het drukverschil tussen binnen- en buitenzijde van de matrijs drukt de plaat tegen de matrijswand. Na afkoelen wordt het produkt uitgestoten. Bij dit proces ontstaan dunne wanden in de hoeken van de bodem.
Bij het vormen met een negatieve matrijs kan men de oppervlaktestructuur aan de *buitenzijde* van het bakvormige produkt beheersen.
- Blaasvormen zonder matrijs (figuur 14.6C).
De ingeklemde voorgewarmde plaat wordt door perslucht in een vrije vorm gerektd. De persdruk wordt geregeld door een fotocel die de hoogte van de opgeblazen bol meet. Het produkt wordt nu aan de omringende lucht met behulp van perslucht afgekoeld. Deze methode wordt gebruikt voor het vervaardigen van blisterverpakkingen en van vizieren voor veiligheidshelmen.
Bij deze methode kan men géén oppervlaktestructuur aanbrengen.
- Blaasvormen in een negatieve matrijs (figuur 14.6D).
Deze methode is vergelijkbaar met het vacuümvormen in een negatieve matrijs. Om de luchtdruk op de warme plaat te kunnen zetten is een luchtkast nodig. Blaasvormen wordt toegepast bij moeilijk vormbare materialen met een klein rubberelastisch gebied, zoals bijvoorbeeld PP en bij dikwandige produkten met een hoog gedetailleerd oppervlak. De druk van de perslucht gaat tot maximaal 1,4 MPa.
- Persen (figuur 14.6E).
Het persen wordt toegepast voor relatief stijve kunststoffen, zoals PS en thermoplastische composieten. De voorgewarmde plaat positioneert men tussen beide matrijshelften. Wanneer de matrijs sluit wordt in de holte vacuüm toegepast om de plaat tegen de wanden te persen.
Bij het persen kan men de oppervlaktestructuur aan de *buitenzijde* en de *binnenzijde* van het bakvormige produkt beheersen.

Thermovormen in méér stappen

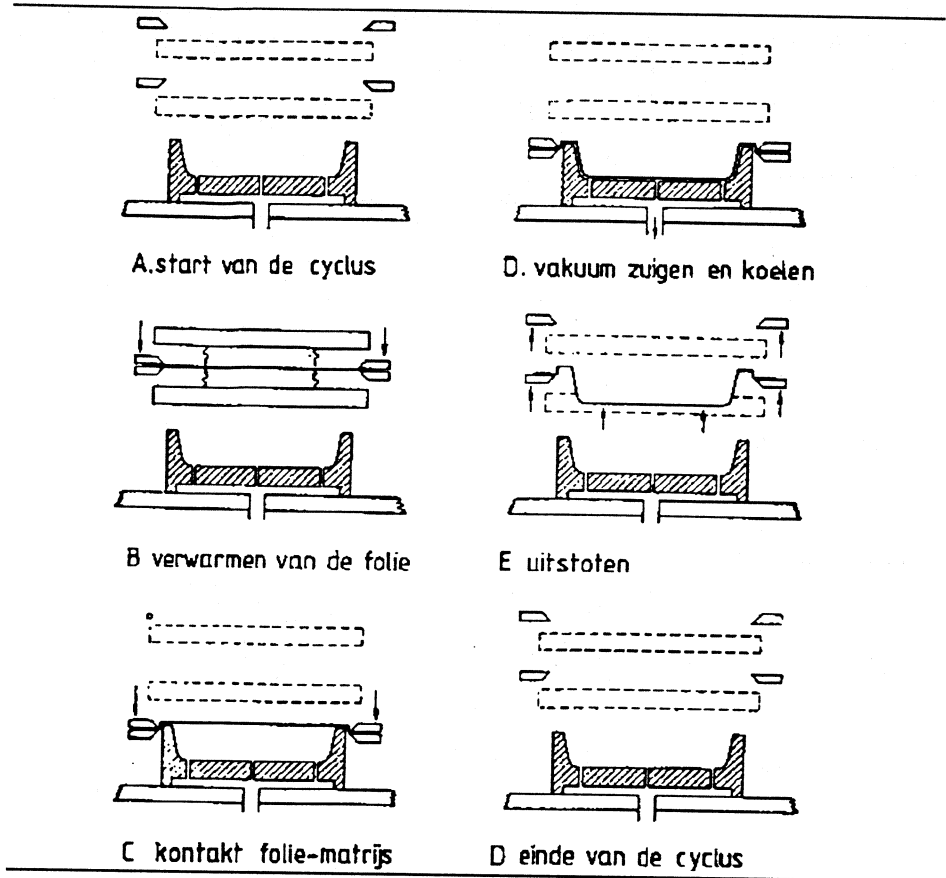
In veel gevallen, vooral bij dunwandige lage verpakkingsdoosjes, is de mate van oprekken gering en daardoor is ook het verschil tussen dikke en dunne wanden gering. Bij dikkere platen, voor complexe produktvormen en voor diepe produkten worden soms ook strenge eisen gesteld aan de wanddikteverschillen. Het thermovormen moet dan in méér stappen worden uitgevoerd. De eerste stap is doorgaans het regelmatig oprekken van de wand. In de tweede stap wordt de opgerekte plaat tegen de matrijswand aangedrukt. Enkele meerstapsprocessen zijn in figuur 14.9 weergegeven.



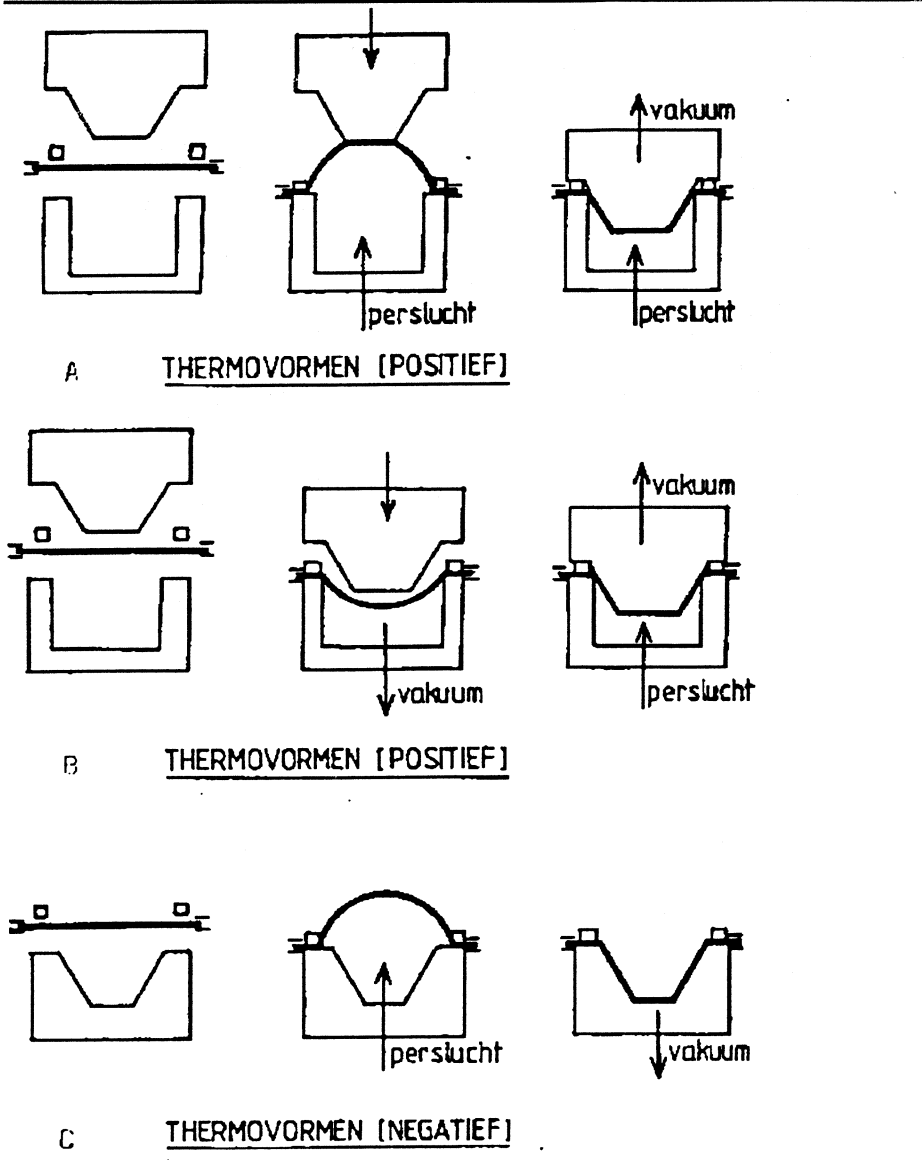
Figuur 14.6: Methoden van enkelstaps thermovormen



Figuur 14.7: Positief vacuümzuigen

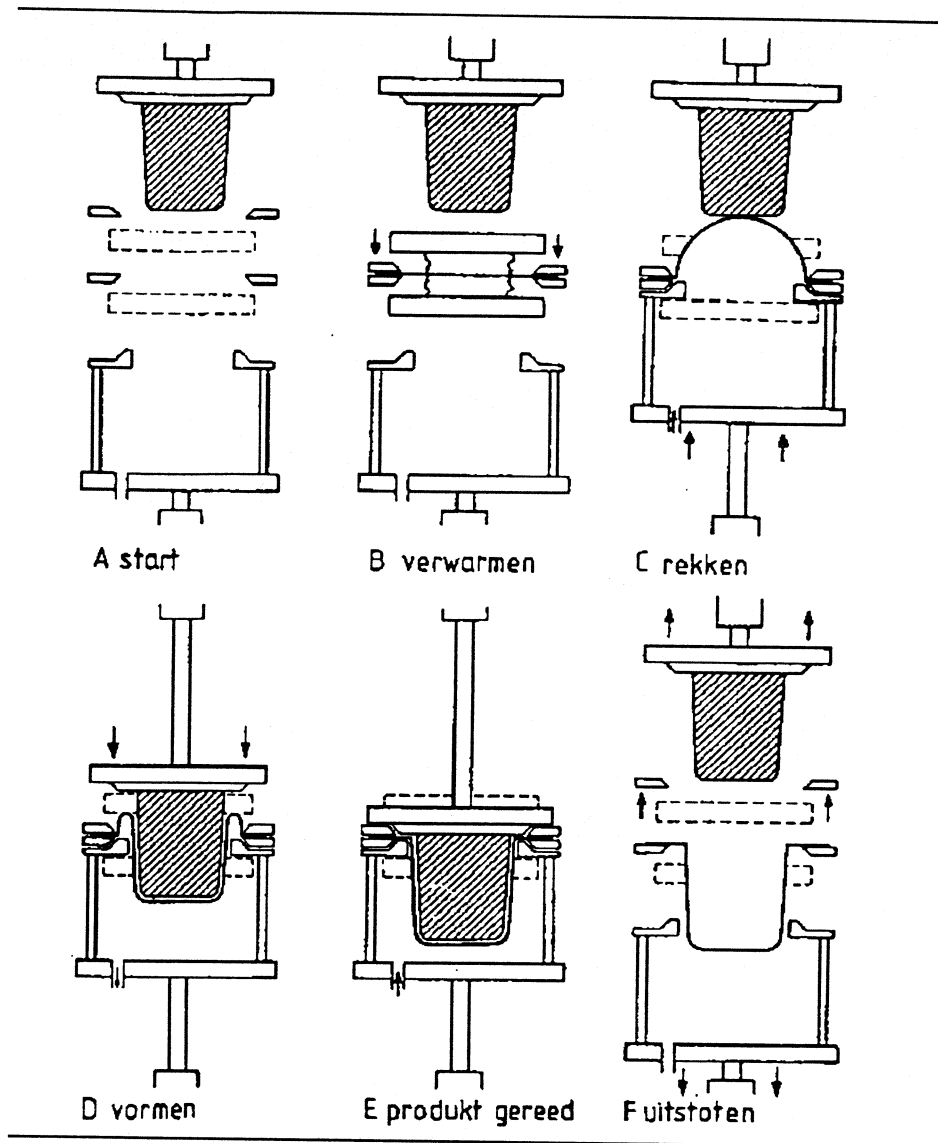


Figuur 14.8: Negatief vacuümzuigen



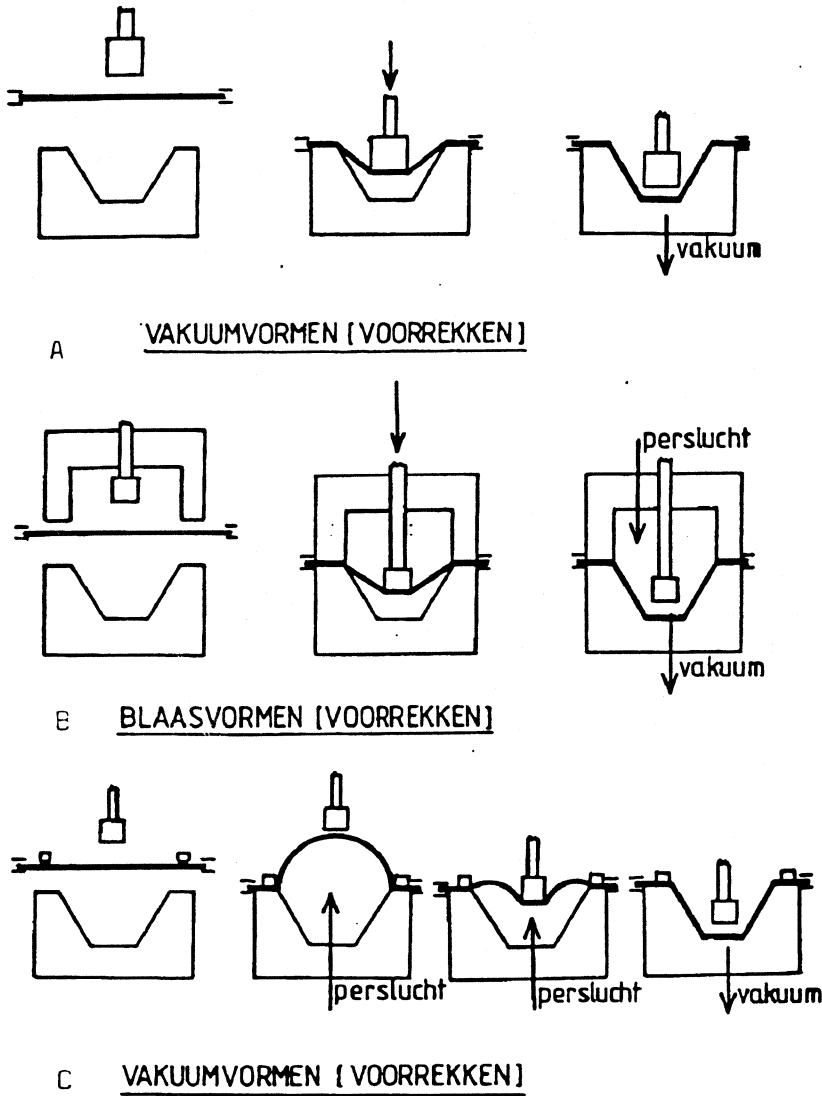
Figuur 14.9: Méérstaps vacuümvormprocessen

Bij al deze processen wordt de verwarmde plaat tot een ballon opgeblazen (figuur 14.9A en C) of tot een ballon gezogen (figuur 14.9B). Bij positief vormen wordt de matrijs in de ballon gedrukt. Met vacuüm en perslucht drukt men de rubberelastische plaat tegen de matrijswand. Bij negatief vormen zuigt men de opgeblazen ballon terug tegen de matrijswand. In figuur 14.10 is de methode van figuur 14.9A uitgewerkt.



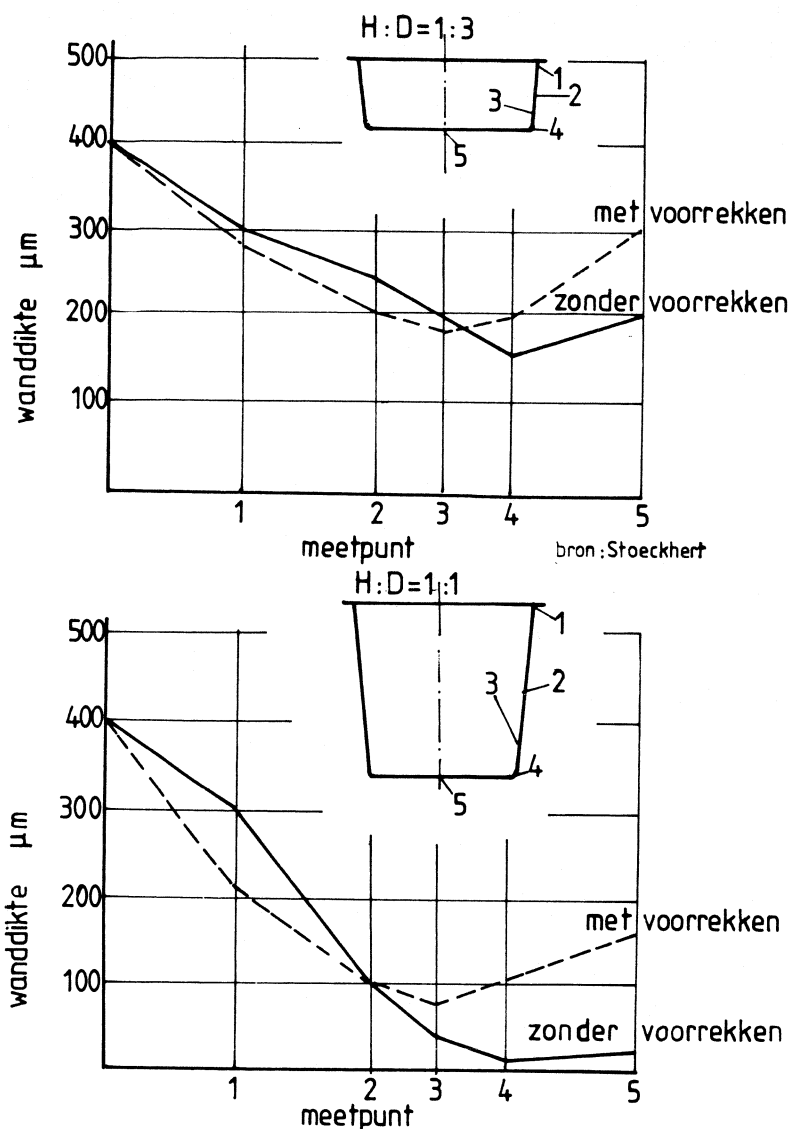
Figuur 14.10: Blaasvormen met vóórrekken

In figuur 14.11 gebeurt het voorrekken mechanisch met een stempel. In figuur 14.11A wordt een ingeklemde en verwarmde plaat in een negatieve matris gedrukt. Daarna zuigt men vacuüm, waardoor de voorgerekte plaat tegen de matriswand wordt gezogen. Voor een meer gedetailleerd oppervlak is de methode van figuur 14.11B beter. Er heerst in dit geval namelijk een hogere druk in de holte, die fijnere details beter afdruckt.



Figuur 14.11: Thermovormen met vóórrekken

Méerstepsthermovormen heeft een meer uniforme wanddikte van het produkt tot doel. In figuur 14.12 zijn diagrammen gegeven van wanddikteverschillen in een produkt na negatief thermovormen, met en zonder voorrekken. Met voorrekken van de wand wordt, bij gelijkblijvende maximum wanddikte, de minimum wanddikte groter dan zonder voorrekken, met als gevolg minder wanddikteverschillen in een produkt.

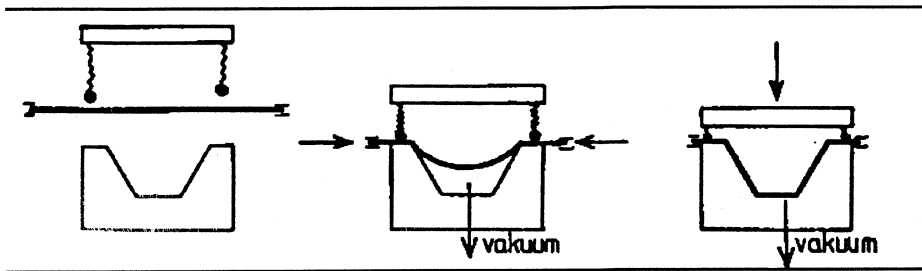


Figuur 14.12: Wanddikteverschillen bij negatief thermovormen

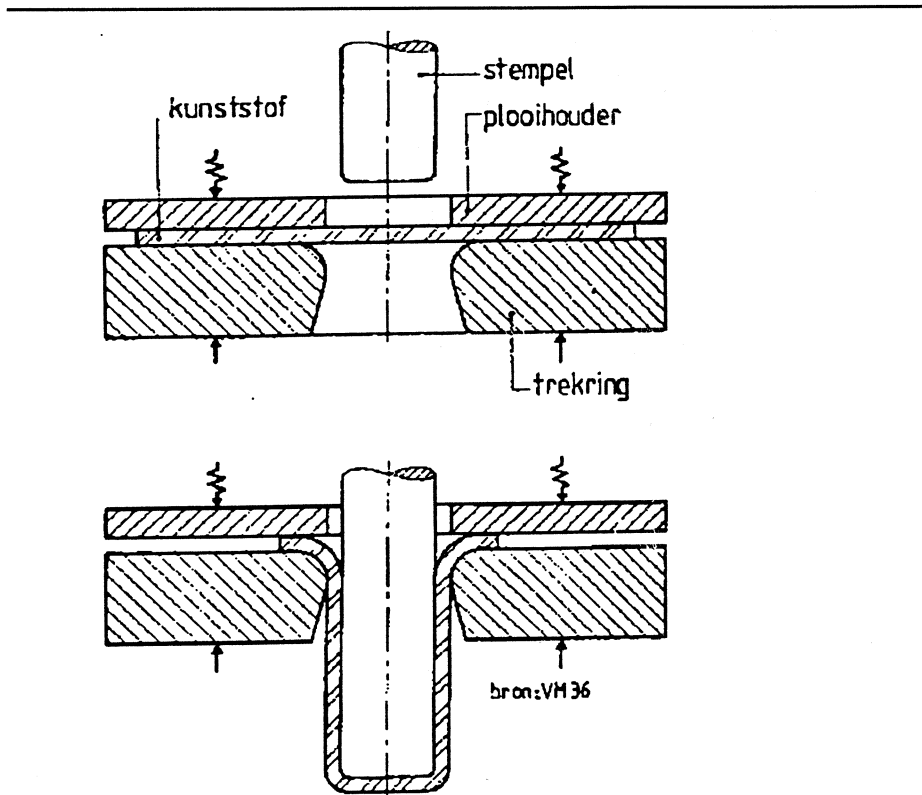
14.4 SPECIFIEKE PROCESSEN EN PRODUCTEN

Er bestaan diverse bijzondere methoden van thermovormen met specifieke toepassingen. Één hiervan is dieptrekken (figuur 14.13 en 14.14). In figuur 14.13 is de voorgewarmde plaat niet vast ingeklemd. Hierdoor kan de plaat naar de holte bewegen. Door vacuümzuigen van de holte wordt de plaat in de holte getrokken.

Een andere procesvariant is getoond in figuur 14.14: deze methode heeft veel gemeen met het dieptrekken van metalen. Doordat de kunststofplaat tussen de plooihouder en de trekkring doorslijpt krijgt het produkt een gelijkmatiger wanddikte dan bij vacuümzuigen.

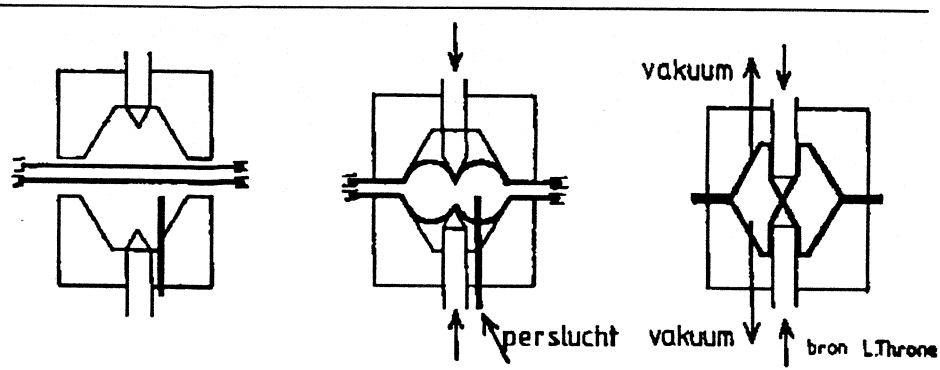


Figuur 14.13: Dieptrekken van kunststofplaat



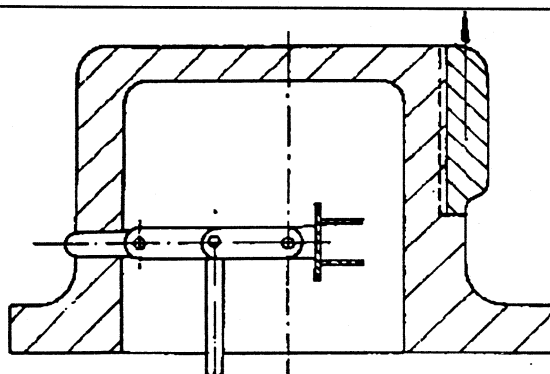
Figuur 14.14: Dieptrekken van ingeklemde kunststofplaat

Een methode voor het vormen van holle produkten is getoond in figuur 14.15. Twee kunststofplaten worden in een spanraam gescheiden verwarmd. Na de verwarmingsfase worden de platen tussen twee negatieve matrijzen geklemd. Door één van de kunststofplaten wordt een blaaspijp gestoken waarmee de platen in de beide holten worden geblazen. De randen van de platen worden door de matrijshelften op elkaar gedrukt en aanéén gelast. De holle ruimte kan worden opgevuld met een PUR-schuim. Met deze techniek worden onder andere surfplanken gefabriceerd. Deze methode is concurrerend met rotatiegieten en met sandwich-sputten (zie het hoofdstuk *Schuimen van kunststoffen*).

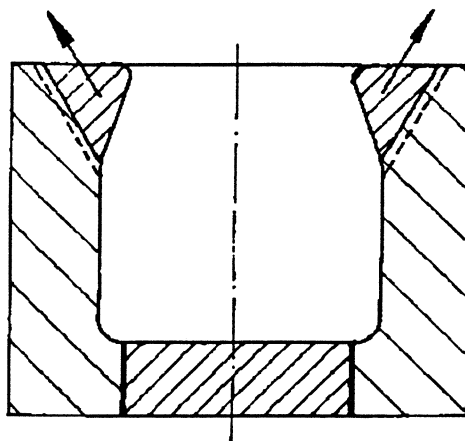


Figuur 14.15: Blazen

Bij het spuitgieten van kleine series produkten hebben de matrijstkosten een groot aandeel in de kostprijs van het produkt. Omhullingen voor elektronische apparaten kunnen vaak goed worden geproduceerd met een thermovormproces. De benodigde matrijzen zijn goedkoper dan spuitgietmatrijzen. In de thermovormmatrijzen kunnen ook schuiven worden aangebracht voor het vormen van niet-lossende delen (figuur 14.16 en 14.17).



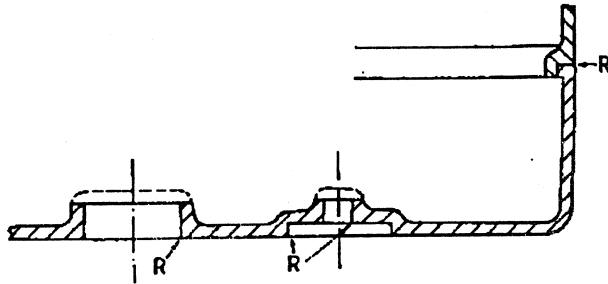
Figuur 14.16: Positieve thermovormmatrijs met losse delen



Figuur 14.17: Negatieve thermovormmatrijs met losse delen

Wanneer hoge eisen worden gesteld aan het buitenoppervlak van het produkt of wanneer op dit oppervlak een textuur moet worden aangebracht, zal het produkt worden gefabriceerd in een negatieve matrijs.

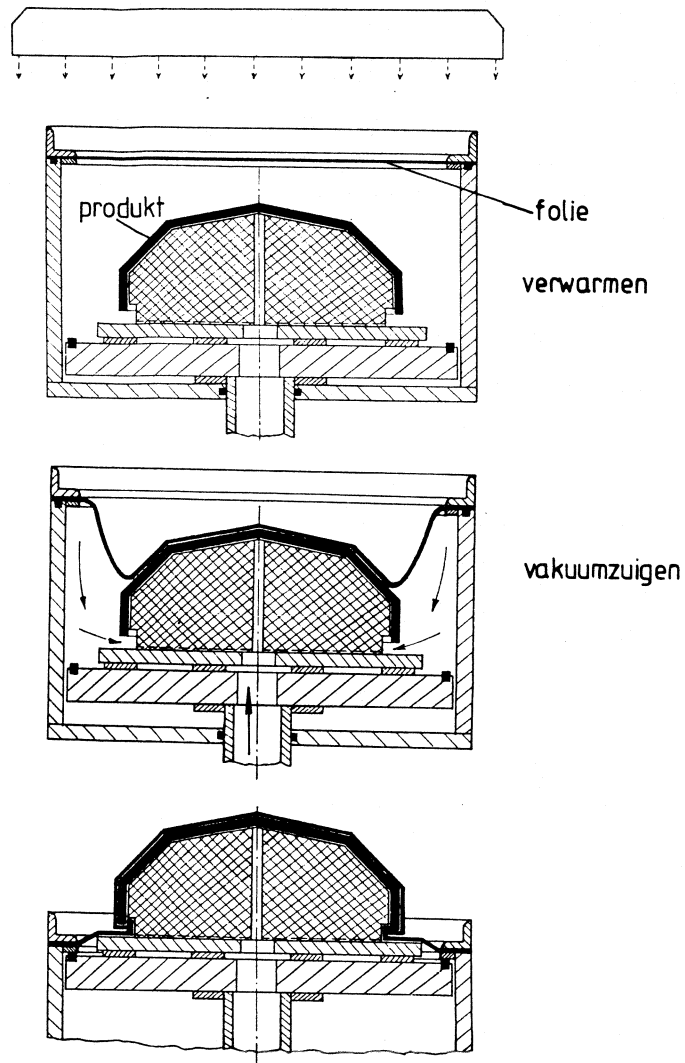
Alle openingen, verdiepingen en ook koelsleuven kunnen worden meegevormd (figuur 14.18). De randen van de huishelften kunnen passend op elkaar worden gemaakt. Het overtollige materiaal wordt in een nabewerking weggefreed.



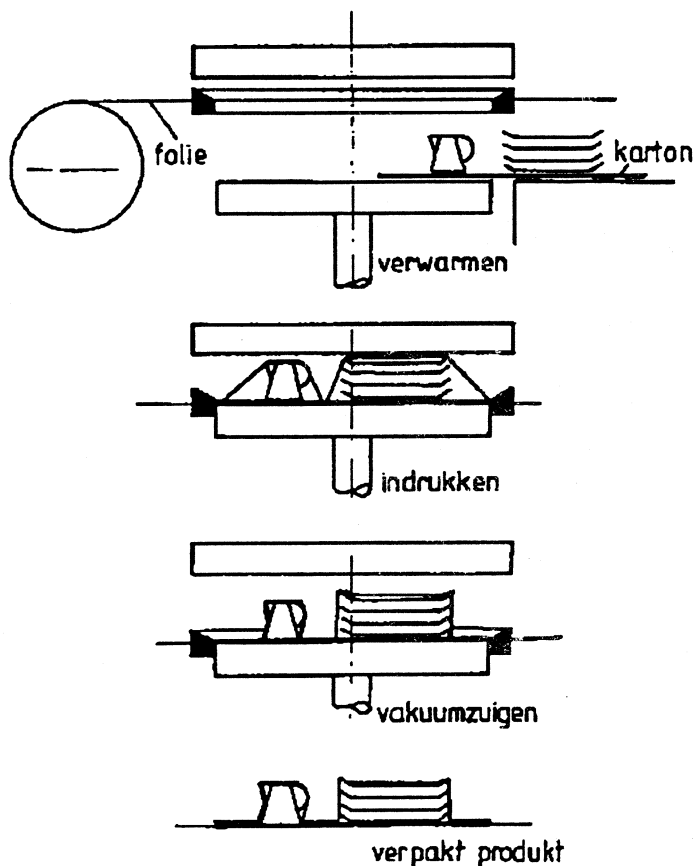
Figuur 14.18: Vacuümzuigen van omhullingen

Voor het bekleden van produkten van kunststof of hout met een PVC-sierfolie kan thermovormen worden toegepast (figuur 14.19). Het produkt wordt op een matrijs gelegd in de thermovormmachine. De folie wordt ingeklemd, verwarmd en om het produkt gezogen. Voor een goede hechting smeert men beide delen in met een lijm of met een klefmiddel.

Voor de vervaardiging van skinverpakking (figuur 14.20) worden de te verpakken artikelen aangevoerd op een plaat karton. De rand van het karton is zondig van een lijmlaag voorzien. De kunststoffolie wordt boven het produkt verwarmd. Na bereiken van de juiste temperatuur wordt de folie op het karton gedrukt. De lucht wordt weggezogen zodat de folie zéér nauw om het produkt trekt. Bij PP-folie is géén lijmlaag nodig: de folie hecht mechanisch voldoende aan het karton.



Figuur 14.19: Bekleden met zacht PVC



Figuur 14.20: Vervaardiging van skinverpakking

14.5 NABEWERKEN VAN HET GEVORMDE PRODUKT

Er zijn diverse mogelijkheden om thermovormproducten te scheiden van de omliggende kunststof.

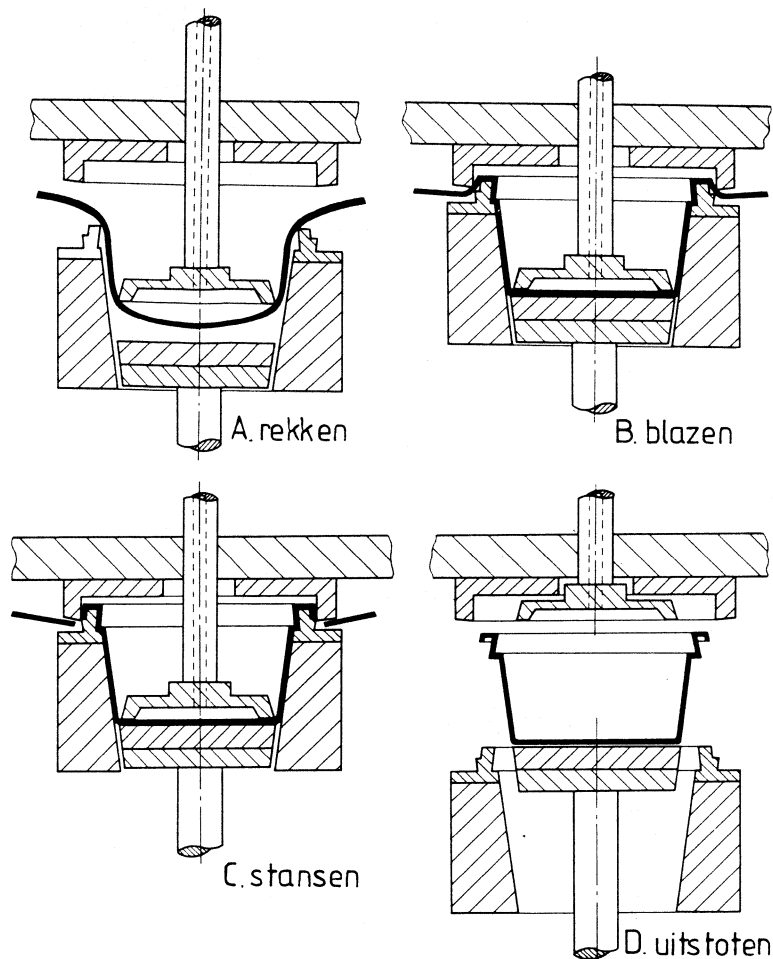
Dunne producten, zoals verpakkingsartikelen worden direct na het vormgevingsproces uitgestanst. Het stansen gebeurt in de matrijs zelf of direct na het ontvormen (dus buiten de matrijs). In figuur 14.21 is een methode weergegeven waarbij na het vormen het overtollige materiaal in de matrijs wordt afgeknipt. De producten worden in stapels afgevoerd. Het afvalmateriaal wordt afzonderlijk opgerold.

Dikwandige producten worden afgewerkt in één of méér afzonderlijke afwerkmachines.

In figuur 14.22 zijn een aantal afwerktechnieken weergegeven, zoals zagen, frezen, stansen, snijden en knippen.

Geavanceerde snijmethoden zoals waterstraalsnijden, lasersnijden en gloeidraadsnijden worden waar nodig ook wel toegepast. Moderne meerassige CNC-bestuurde portaalfreesmachines kennen zéér korte bewerkingstijden en frezen tegenwoordig met hoge snelheden contouren, gaten en sleuven.

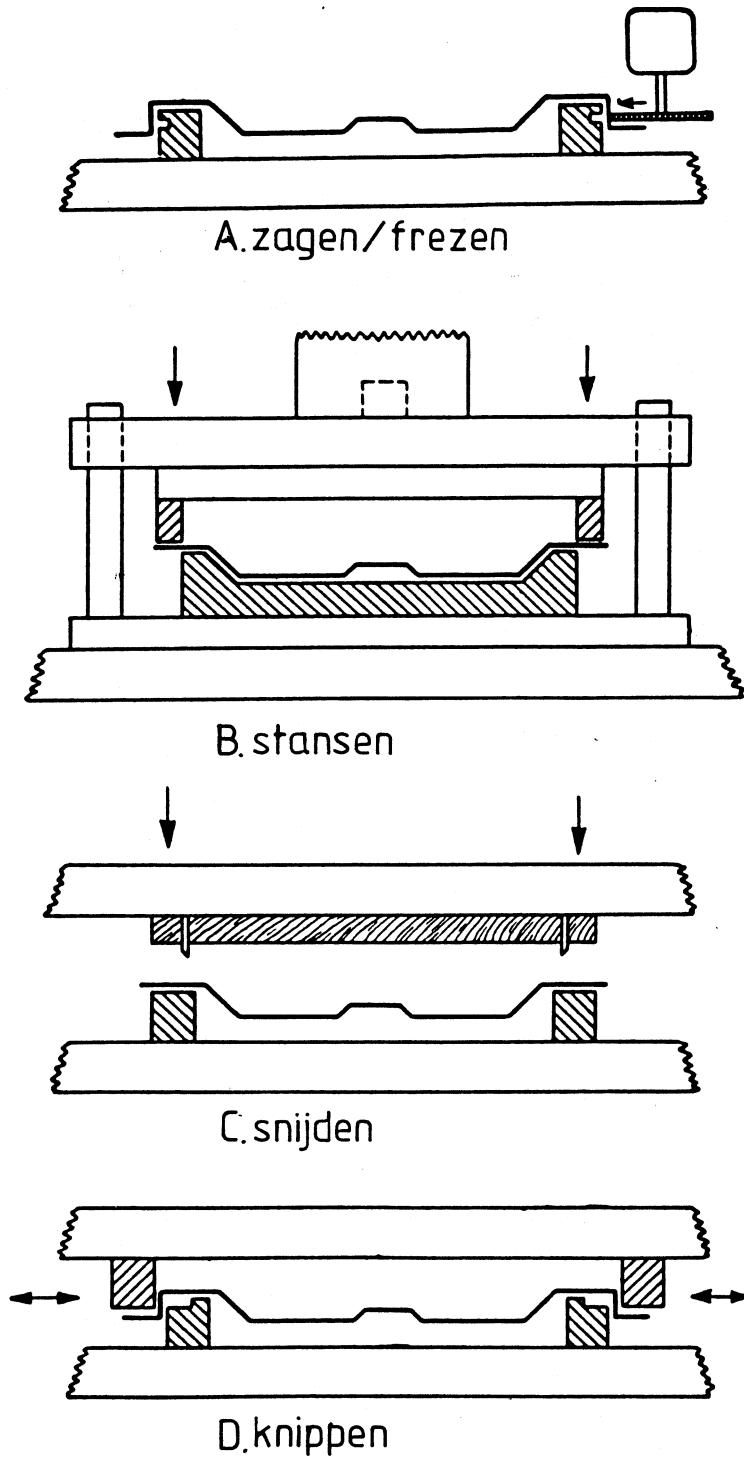
Daarna volgt het monteren van onderdelen door lassen en lijmen, het monteren van metalen inserts, het bedrukken en het aanbrengen van transfers.



Figuur 14.21: Thermovormen en stansen

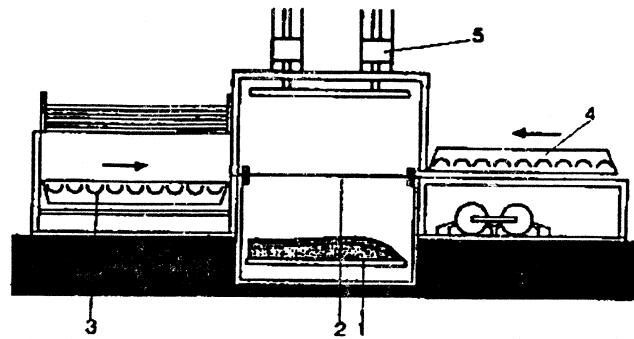
14.6 THERMOVORMMACHINES

Grote vlakke producten en producten met dikke wanden worden op tafelvormmachines geproduceerd. De verticaal beweegbare vormtafel dient als opspantafel voor een positieve of een negatieve matrijs. De verwarming van de kunststofplaten gebeurt met stralingselementen aan beide zijden van de plaat. De intensiteit van de verwarming wordt met regelapparatuur zó ingesteld dat alle zones ongeveer dezelfde temperatuur bezitten. De machines zijn uitgerust met een hydraulisch of pneumatisch werkende stempel voor het strekken van de kunststofplaat (figuur 14.23). Na het vormen wordt het produkt gekoeld. Hiertoe zijn in de matrijs kanalen voor koelwater aangebracht. Boven het produkt wordt koellucht tegen de matrijs geblazen. Deze machines hebben vormplaten met afmetingen van 300 x 250 mm tot 9 x 3 m. Ter vergroting van de produktie hebben sommige machines twee vormtafels en een stel verwarmingsplaten. Ook worden rondlopers met verschillende bewerkingsstations toegepast voor produktieverhoging.



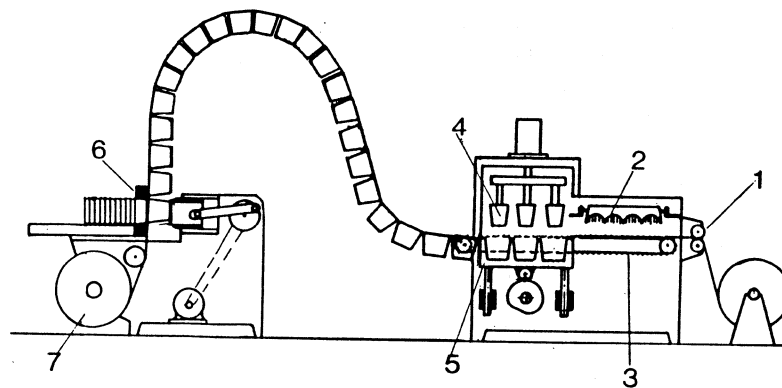
Figuur 14.22: Nabewerken van thermovormprodukten

-
- 1 matrijs
 - 2 kunststofplaat
 - 3 verwarming
 - 4 verwarming
 - 5 rekstempel



Figuur 14.23: Thermovormmachine voor grote platen

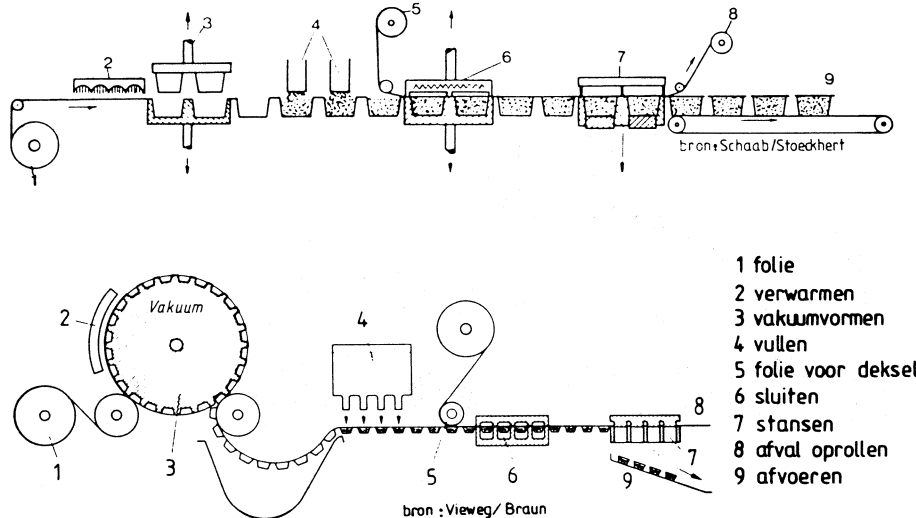
Bij verpakkingsautomaten wordt de folie in rollen aangevoerd. Een transportsysteem brengt de folie tussen de verwarmingsplaten. Vlakke verpakkingen kunnen in één keer negatief worden gevormd. Diepe producten worden gevormd na vóórstrekken van de folie. Het uitstanen en stapelen gebeurt in het schema van figuur 14.24 op een aparte machine. Het nadeel van deze werkwijze is dat de kans bestaat dat het product niet concentrisch wordt uitgestanst.



- 1 folie-invoer
- 2 verwarming
- 3 transportketting
- 4 rekstempel
- 5 matrijs
- 6 stans
- 7 afval

Figuur 14.24: Vormautomaat met stansmachine

In melkfabrieken en in de fruitverwerkende industrie worden vormmachines gebruikt waarin de verpakking na het vormen wordt gevuld en dichtgeseald (figuur 14.25). In deze machines wordt contactverwarming als folieverhitting toegepast.



Figuur 14.25: Schema van een vorm- en vulstation

14.7 THERMOVORMMATERIJZEN

De matrijsconstructie en de materiaalkeuze van de matrijs wordt vooral bepaald door:

- de te verwerken kunststof;
- de seriegrootte;
- de complexiteit van het produkt;
- de vereiste maatnauwkeurigheid;
- de vereiste oppervlaktekwaliteit;
- de produktafmetingen.

In vergelijking met andere verwerkingstechnieken is thermovormen zéér geschikt voor het fabriceren van prototypen en kleine series technische produkten. Dit geldt vooral voor vacuümvormen, omdat bij deze techniek de krachten op de matrijs klein zijn. Voor kleine series en voor prototypen komen de volgende matrijsmaterialen in aanmerking:

- *Hout*
 Hout is één van de méést toegepaste matrijsmaterialen voor kleine series van relatief ondiepe produkten. Met een droge hardhoutkwaliteit kan een standtijd worden gehaald van 500 stuks.
- *Gips*
 Voor zéér kleine series tot 50 stuks van produkten met een gedetailleerde oppervlaktestructuur is gips een aantrekkelijk materiaal. Gips moet worden verstevigd met gaas of met jute. De matrijs moet goed droog zijn voordat deze in gebruik kan worden genomen. Bij het maken van een negatieve matrijs kan voor gips worden uitgegaan van een positief model. Bij positief thermovormen moet men éénmaal een vormomkering toepassen.

- *Epoxy*
Koudhardende harsen met vulstof worden toegepast voor thermovormmatrijzen. Als vulstof wordt een metaalvulling toegepast om de warmtegeleiding te verhogen.
- *Aluminium*
Tegenwoordig maakt men meestal gegoten aluminiummatrijzen in plaats van epoxymatrijzen. Niet te ingewikkelde vormen kunnen relatief goedkoop worden gegoten. De warmtegeleiding is aanmerkelijk beter dan van epoxyhars.

Voor grote series worden de matrijzen meestal gemaakt van metaal, onder andere zink, aluminium en staal. Staal wordt toegepast wanneer in het gereedschap de produktranden moeten worden afgestampt.

14.8 VOOR- EN NADELEN

Voordelen van het thermovormproces zijn:

- de lage investeringen;
- het proces is geschikt voor zowel zeer kleine series (bijvoorbeeld boten) als zeer grote series (bijvoorbeeld koffiebekertjes);
- het is een flexibel proces;
- het is mogelijk om zeer dunwandige constructies te maken;
- niet-lossende produktvormen zijn mogelijk (matrijs met schuiven en inzetstukken).

Nadelen zijn:

- er is geen goede detaillering mogelijk;
- de maximale diepte is beperkt;
- de wanddikte is niet constant en slechts beperkt beïnvloedbaar.

14.9 ONTWERPRICHTLIJNEN

Bij het ontwerpen van thermovormproducten moet rekening worden gehouden met de volgende richtlijnen:

- de grootte van de produkten kan variëren tussen 10 en 7500 mm en tussen 0,001 en 100 kg;
- de maximale diepte (hoogte) is gelijk aan 0,5 maal de breedte;
- de minimale afrondingsstraal is gelijk aan twee maal de plaatdikte;
- het aanbrengen van textuur via de mal is alleen op de bodem mogelijk;
- de benodigde lossingshoek bij positief vormen ligt tussen de 2 en 3°;
- De keuze van de matrijs hangt af van de oppervlakte-eisen en de plaats waar de grootste wanddikte komt:
 - binnenkant glad: negatieve matrijs
 - buitenkant glad: positieve matrijs
 - grootste wanddikte bij inklemming: negatieve matrijs
 - grootste wanddikte op de bodem: positieve matrijs.

14.10 KOSTEN

De kostprijs wordt voornamelijk bepaald door de grootte van het produkt, de cyclustijd en de matrijskosten.

De prijs van een thermovormmachine varieert van 50.000 tot 165.000 gulden voor een machine met een werkoppervlak van respectievelijk 500x300 en 2500x1500 mm. Wanneer wordt uitgegaan van een afschrijvingsduur van 7 jaar, komt dit neer op een machine-uurtarief van respectievelijk fl.17,30 en fl.61,20. De cyclustijd van een produkt in kleine serie bedraagt 1,5 tot 15 minuten. Bij

volautomatische productie in meervoudige matrijzen kan de cyclustijd per produkt teruglopen tot 1 seconde. Matrijzen kosten afhankelijk van het materiaal fl.400,- tot 6700,- (voor hout) en fl.1800,- tot 19.000,- (voor aluminium). Het percentage afvalmateriaal bedraagt 5 tot 10%.

VRAGEN

- 1) *bij § 14.2:* Waarom is contactverwarming niet geschikt voor opwarmen van een dikke plaat voorafgaand aan thermovormen?
- 2) *bij § 14.2:* Welk medium ondervindt convectie bij verwarming met geforceerde convectie voorafgaand aan thermovormen?
- 3) *bij § 14.3:* Noem drie belangrijke verschillen tussen het blaasvormen zoals beschreven op de bladzijden 14.6 en 14.7 en het blaasvormen zoals beschreven in hoofdstuk 12.
- 4) *bij § 14.3:* Wat is de aanvankelijke plaatdikte in de figuren 14.12?
- 5) *bij § 14.4:* Noem twee belangrijke verschillen tussen het blaasvormen zoals getoond in figuur 14.15 en het blaasvormen zoals beschreven in hoofdstuk 12.

LITERATUUR

- Plastics Engineering Handbook*, p. 688 en p. 273
Joel Frados SPI 1976, Van Nostrand Reinhold
- Brinken, F. *Untersuchungen zur Wärmeübertragung beim Thermoformen von Thermoplasten*; Dissertatie RWTH Aachen, 1979.
- Dominginghaus *Kunststoffe II T8*, VDI, Düsseldorf
- Gomez, L. *Engineering with rigid PVC*; Marcel Dekker, New York, 1984.
- Groebel, H. *Der Einsatz Keramischer Infrarotstrahler bei der Erwärmung thermoplastischer Kunststoffe* *Plastverarbeiter* 27 (1976) nr. 8
- Gross, H. *Untersuchungen zum Thermoformen Teilkristalliner Thermoplasten*; Dissertatie RWTH Aachen, 1983.
- Höger, A. *Warmformen von Kunststoffen, Kunststoff-Verarbeitung Folge 18*; Carl Hanser, München 1971.
- Menges, G. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*; Hanser, 1979.
- Neitzert, W.A. *Thermoforming of thin-walled-parts*; *Plastverarbeiter* 30 (1979) nr. 9 tot 35 (1984) nr. 3
- Stoekchert, K. *Werkzeugbau für die Kunststoff-Verarbeitung*; Carl Hanser, München, 1979.
- Stoekchert, S. *Kunststoffmaschinen Führer*, Carl Hanser, München, 1979.
- Tan, S. *Verwerkingstechnieken voor kunststoffen*; io bo 17 - Serie io bijzonderonderwerpen deel 17; TU Delft, 1988.
- Thiel, A. *Grundzüge der Vakuumformung*; Zechner und Hüthig, 1967.
- Throne, J.L. *Thermoforming*; Hanser Publishers Munich, 1987.

Hoofdstuk 15: VLAKSTAMPEN

15.1 INLEIDING

Een van de eenvoudigste vormen van plaatbewerkingen is het *vlakstampen*, vaak ook wel *ponsen* of *stansen* genoemd.

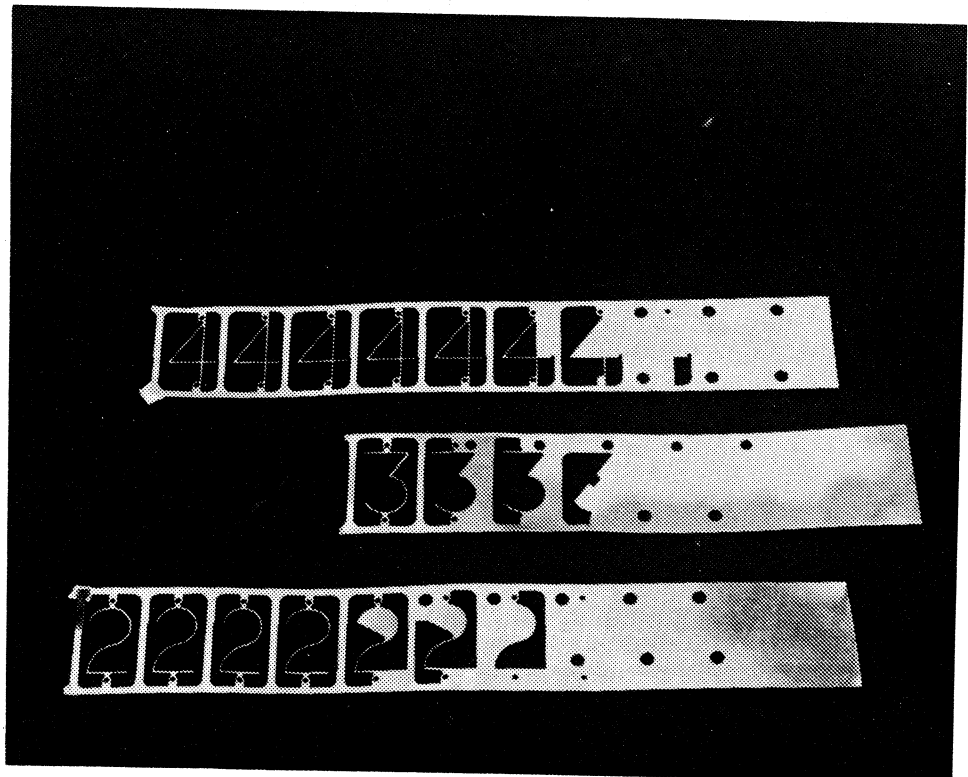
Het is een scheidende bewerking, waar met behulp van een ponsnippel en een snijplaat gedeelten uit een plaat worden gesneden. Het ponsnippel wordt door de plaat geduwd tot het te verwijderen plaatdeel volledig is losgesneden. Het losgesneden gedeelte valt door een gat in de snijplaat weg.

Het proces wordt gebruikt voor het uitsnijden van zowel gaten als contourlijnen en wordt dan respectievelijk gatponsen en uitsnijden genoemd.

Toepassingen

Het proces wordt al eeuwen gebruikt, vaak met behulp van kleine handpersen. Lang bestaande toepassingen zijn bijvoorbeeld het maken van tandwieltjes voor uurwerken en ponsbanden voor het aansturen van draaiorgels. Dergelijke banden werden ook gebruikt voor het overbrengen van informatie van en naar computers.

Het ponsen is geschikt voor zeer kleine series tot massafabricage.



Figuur 15.1: Enkele gestampte produkten

Voorbeelden van produkten uit metalen plaat zijn:
sluitringen, bladveren bouwbeslag, meccano-constructiedelen,

aansluitpinnen voor transistoren, onderdelen van fietskettingen, fijnmechanische onderdelen zoals tandwielen en hefboompjes in uurwerken en foto-toestellen.

Naast metaal kunnen ook andere materialen verwerkt worden, zoals papier, karton, kunststof, textiel, leer en rubber. Bij deze materialen wordt het stampen bijvoorbeeld gebruikt voor het vervaardigen van uitslagen van dozen, legpuzzelstukjes, delen van schoenen en kleding.

In figuur 15.1 zijn een aantal voorbeelden van gestampde cijfers voor een gasontladingsdisplay te zien.

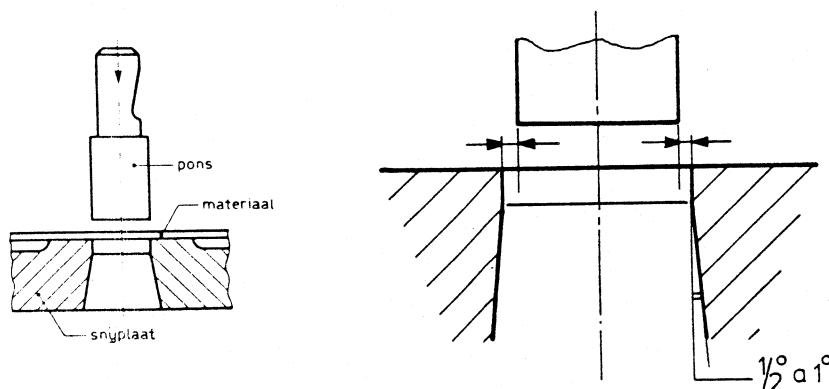
15.2 HET PROCES

In figuur 15.2 is schematisch het principe van het vlakstampen weergegeven. Als eerste wordt het plaatmateriaal tussen de *ponsnippel* en de *snijplaat* gebracht. Door de persslag wordt het gedeelte onder de ponsnippel uitgesneden. Dit gedeelte valt door de snijplaat naar beneden, de rest blijft op de snijplaat liggen.

Bij het *uitsnijden* (figuur 15.3a) wordt het werkstuk uit het omliggende materiaal gesneden en valt hierna door de snijplaat uit het gereedschap.

Bij het *gatponsen* (figuur 15.3b) worden in het werkstuk gaten gemaakt. Het werkstuk blijft op de snijplaat liggen en het afval valt door de snijplaat naar buiten. Beide bewerkingen worden vaak uitgevoerd aan hetzelfde produkt.

De bewerkingen worden vaak uitgevoerd op uitgangsmateriaal in de vorm van strook of band, omdat deze eenvoudig door het gereedschap kunnen worden gevoerd en het proces gemechaniseerd kan worden.

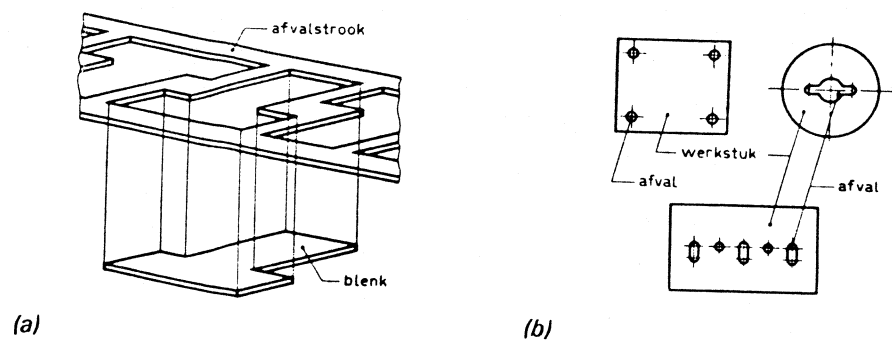


Figuur 15.2: Ponsnippel en snijplaat

Tussen het ponsnippel en de snijplaat moet een *snijpleet* aanwezig zijn. Deze is noodzakelijk om het materiaal goed door te kunnen snijden. Hierop komen we terug in paragraaf 15.3.

Door de *afschuining* aan de snijplaat kan het uitgesneden gedeelte wegvallen. Bij het loskomen van de delen materiaal hebben deze namelijk de neiging om door elastische terugvering iets uit te zetten: het uitgesneden gedeelte zou vast komen te zitten in de snijplaat.

Ook moeten maatregelen worden genomen om te voorkomen dat het materiaal om het ponsnippel vastklemt. Om deze reden wordt het gereedschap uitgevoerd met een *afstroopplaat*.



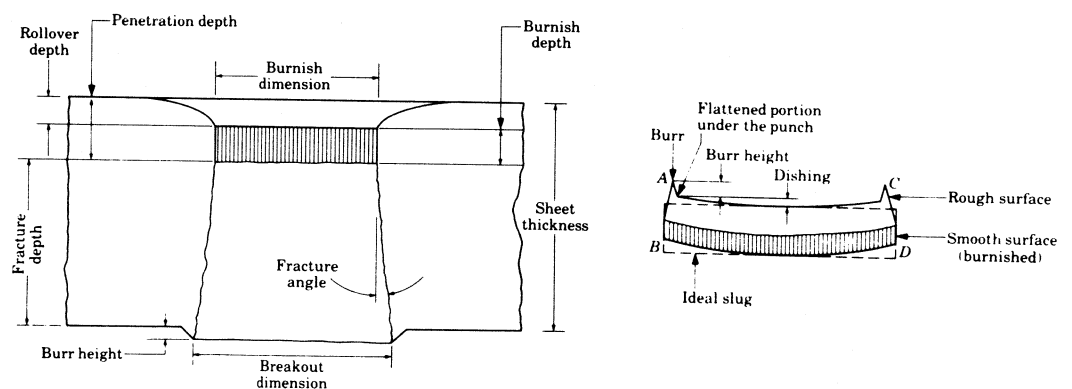
Figuur 15.3: (a) Het uitsnijden van een werkstuk, en (b) het ponsen van een gat in het werkstuk

Snijmechanisme

De door het ponsen ontstane rand bestaat uit twee gedeelten (figuur 15.4): een gedeelte dat afgerond en glad is en een gedeelte dat enigszins ruw is en onder een hoek ten opzichte van het plaatoppervlak staat. Dit heeft te maken met het mechanisme van het ponsen, dat in twee fasen verdeeld kan worden.

Eerst zal, wanneer de nippel naar beneden komt, zuiver plastische vervorming optreden. Hierdoor ontstaan de afronding en het rechte gedeelte van de rand.

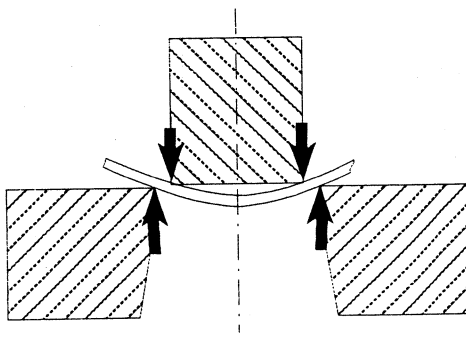
Wanneer de spanningen in het materiaal hoger worden zullen er door afschuiving scheuren onder een hoek ontstaan. Door deze scheuren wordt het oppervlak ruw. Wanneer het proces goed wordt beheerst, liggen de scheuren in elkaars verlengde en wordt de ruwheid niet al te groot. Wanneer deze scheuren niet in elkaars verlengde liggen, zal het oppervlak zeer ruw zijn.



Figuur 15.4: Het karakteristieke uiterlijk van een geponste rand

Bij het ponsen zal enige braamvorming optreden. Deze zal toenemen naarmate het gereedschap langer in gebruik is.

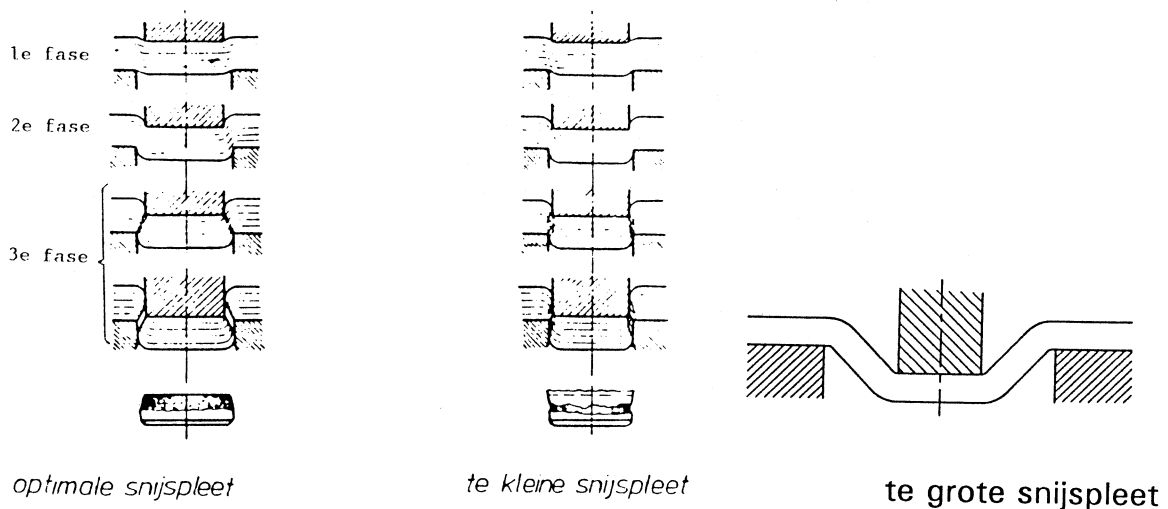
Een andere afwijking van de ideale vorm is het kromtrekken van het uitgeponste gedeelte. Door aanwezigheid van de snijspleet liggen de krachten op het werkstuk niet in elkaars verlengde en ontstaat er een moment op de plaat, die hierdoor zal vervormen (figuur 15.5).



Figuur 15.5: Kromtrekken van de ponsdop

15.3 PROCESVARIABLEN

De voornaamste procesvariabelen zijn: de breedte van de snijspleet, de snelheid van het ponsen, de vorm van het gereedschap en de snijkraft.



Figuur 15.6: Het snijden met een goede en een te kleine snijspleet.

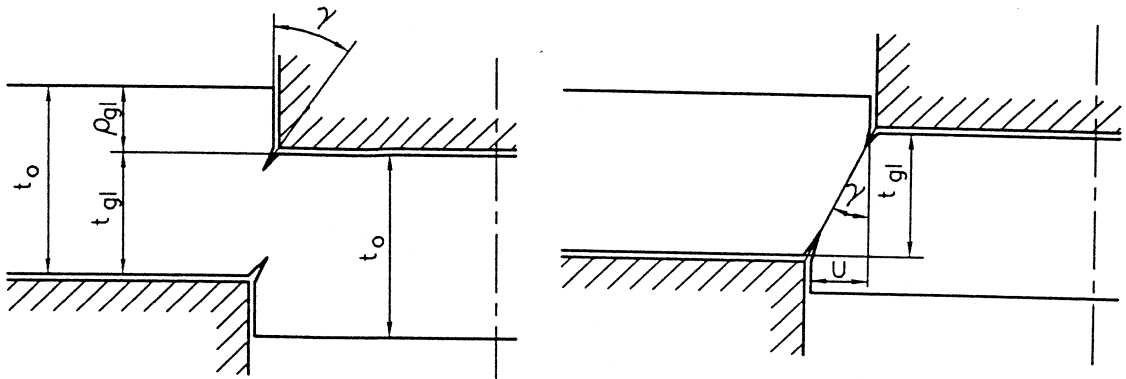
Snijspleet

Door de breedte van de snijspleet wordt bepaald of de scheuren al dan niet in elkaars verlengde komen te liggen. Wanneer de spleet te klein is, wordt het materiaal rafelig uitgesneden, wat een slordige rand en een grotere slijtage van het gereedschap geeft. Wanneer de snijspleet te groot wordt genomen, ontstaat het zogenaamde 'dieptrekeffect': het materiaal wordt, voordat het scheurt, in de snijplaat gedrukt. Ook hier wordt de rand ruwer en er ontstaan grote bramen aan het produkt. In figuur 15.6 is de invloed te zien van de breedte van de snijspleet.

Bepaling van de optimale snijspleet

In figuur 15.7 is het materiaal tijdens het snijden vereenvoudigd weergege-

ven. De optimale breedte van de snijspleet U is afhankelijk van de hoogte t_{gl} waarop het scheurvormen begint en de hoek γ waaronder de scheuren ontstaan.



Figuur 15.7: Scheurvorming tijdens het ponsen

De snijspleet is optimaal als:

$$U = t_{gl} \cdot \tan \gamma \quad (\text{formule 15.1})$$

De hoogte waarop het scheuren begint wordt gegeven door:

$$t_{gl} = t_0 e^{-\left(\frac{2/3\sqrt{3}n - \epsilon_0}{\sqrt{3/n}}\right)} \quad (\text{formule 15.2})$$

Waarin:

- t_{gl} : de hoogte waarop het scheuren begint (mm)
- t_0 : de materiaaldikte (mm)
- n : de versterkingsexponent
- ϵ_0 : de voordeformatie

De richting van de scheuren kan berekend worden met:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{e^{(n - 1/2\sqrt{3}\epsilon_0)} - 1}{e^{(n - 1/2\sqrt{3}\epsilon_0)} + 1}\right) \quad (\text{formule 15.3})$$

Substitutie in formule 15.1 geeft:

$$U = e^{-\left(\frac{2/3\sqrt{3}n - \epsilon_0}{\sqrt{3/n}}\right)} \cdot \left(\frac{e^{(n - 1/2\sqrt{3}\epsilon_0)} - 1}{e^{(n - 1/2\sqrt{3}\epsilon_0)} + 1}\right) \cdot t_0 \quad (\text{formule 15.4})$$

Vaak wordt de snijspleet uitgedrukt als een gedeelte van de plaatdikte:

$$U = \alpha \cdot t_0 \quad (\text{formule 15.5})$$

Waarin α het gedeelte uit formule 15.4 is dat wordt bepaald door het plaatmateriaal.

$$\alpha = e^{-\frac{\frac{2}{3}\sqrt{3}n - \epsilon_0}{\sqrt{3/n}}} \cdot \left(\frac{e^{(n - \frac{1}{2}\sqrt{3}\epsilon_0) - 1}}{e^{(n - \frac{1}{2}\sqrt{3}\epsilon_0) + 1}} \right) \quad (\text{formule 15.6})$$

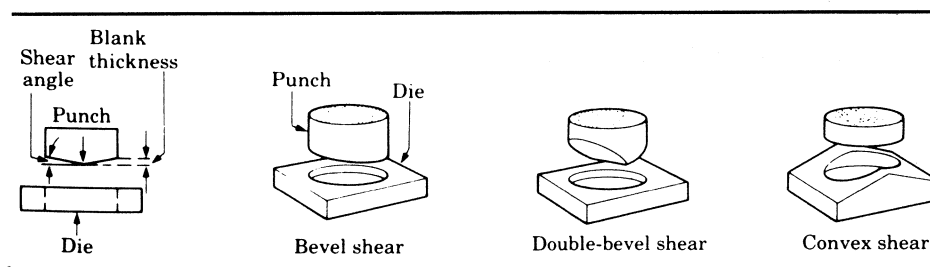
Meestal ligt de snijspleet in de orde van grootte van 7 tot 12 % van materiaaldikte t_0 .

Snelheid van het ponsen

De breedte van de deformatie-zone is afhankelijk van de snelheid van de ponsnippel. Bij een toenemende snelheid kan de warmte, die door de plastische vervorming vrijkomt, minder ver afgevoerd worden. Hierdoor wordt de breedte van de deformatie-zone smaller en het afgeschoven oppervlak minder ruw.

Vorm van het gereedschap

In de schematische voorstelling is de ponsnippel vlak weergegeven. Dit is ook de eenvoudigste vorm. Vaak zal men echter het ponsnippel of de snijplaat afschuinen (figuur 15.8). Hierdoor wordt de benodigde slag van de pers langer en de maximale snijkraft kleiner. Tevens wordt het proces hierdoor stiller.



Figuur 15.8: Verschillende vormen van de nippel om de ponskracht te verminderen

Door slijtage van het gereedschap kunnen er grotere bramen aan het werkstuk ontstaan. De snijranden van zowel plaat en matrijs moeten regelmatig geslepen worden.

Snijkraft

Voor het uitzoeken van een type pers is het belangrijk te weten hoe groot de maximale snijkraft is en het moment waarop deze kracht optreedt.

Maximale snijkraft

De maximale snijkraft kan berekend worden met de onderstaande formule:

$$P_{max} = \ell \cdot t_0 \cdot \sigma_t \cdot C$$

Waarin:

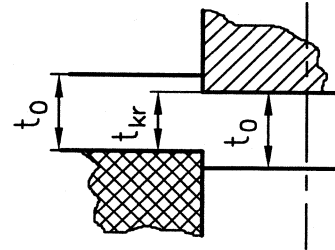
- P : ponskracht (N)
- ℓ : totale snijlengte (mm)
- t_0 : plaatdikte (mm)
- σ_t : treksterkte van het te snijden materiaal (N/mm²)
- C : constante, afhankelijk van het materiaal (-)

Omdat bij het ponsen eigenlijk sprake is van afschuiving in plaats van rek, zou het beter zijn om τ_B te gebruiken in plaats van σ . De waarde C is ingevoerd om dit verschil op te vangen. Gemiddeld neemt men $C = 0,8$, dus in feite $\tau_B = 0,8\sigma_t$. Voor brosse materialen met een hoge treksterkte neemt men $C = 0,7$ en voor zachte materialen met een hoge rek $C = 0,9$.

Plaats waar de maximale snijkracht optreedt

In figuur 15.9 is het verloop van de kracht in de tijd weergegeven. De hoogte waarbij de maximale snijkracht optreedt wordt t_{kr} genoemd. Deze kan berekend worden met:

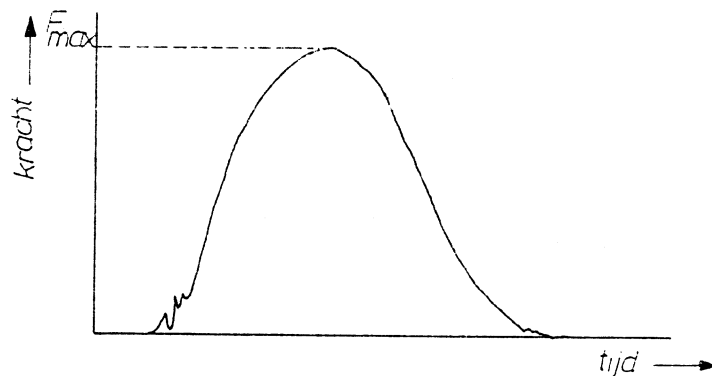
$$t_{kr} = t_0 e^{\frac{(n-\epsilon_0)}{\sqrt{3/n}}}$$



Figuur 15.9a Hoogte bij maximale snijkracht.

Waarin:

- t_{kr} : hoogte waarop de snijkracht het maximum F_{max} bereikt
- t_0 : plaatdikte (mm)
- n : verstevigingsexponent
- ϵ_0 : voordeformatie



Figuur 15.9: Kracht / tijd- diagram van het ponsen.

We kunnen nu drie situaties onderscheiden:

- $t_{gl} < t_{kr}$ Er treedt scheurvorming op nadat de maximale snijkracht gepasseerd is.
- $t_{gl} = t_{kr}$ Er treedt scheurvorming op op het moment dat de maximale snijkracht wordt bereikt.
- $t_{gl} > t_{kr}$ Er treedt scheurvorming op voordat de maximale snijkracht bereikt is.

De scheurvorming zal meestal optreden bij $t_{gl} = t_{kr}$ of bij $t_{gl} < t_{kr}$. Het blijkt verder dat het moment van scheuren afhankelijk is van de snijspleet: bij een grotere snijspleet zal eerder inscheuring ontstaan.

15.4 VERSCHIJNINGSVORMEN

Er zijn veel vormen van het ponsen, die vaak hun eigen benaming hebben. De meeste technieken verschillen nauwelijks van het gatponsen of uitponsen en hebben dus vrijwel dezelfde karakteristieken en mogelijkheden.

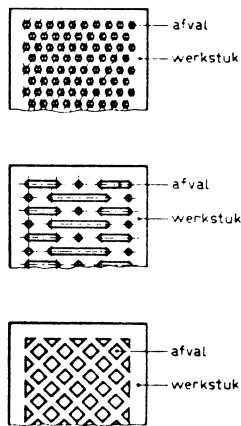
In een aantal gevallen echter worden er hoge eisen aan het produkt gesteld.

Men kan de randen dan verbeteren met *naponsen* of een andere techniek gebruiken, het *fijnponsen*.

Enkele vormen van stampbewerkingen

Perforeren

Dit is het maken van een doorlopend regelmatig patroon in een strook plaatmateriaal (figuur 15.10).



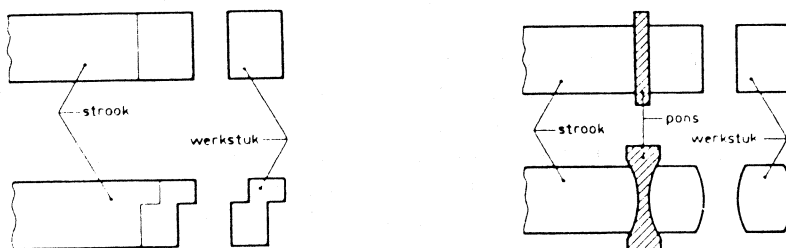
Figuur 15.10: Geperforeerde plaat

Afsnijden

Bij het afsnijden of afkappen gebruikt men een strook die de breedte van het produkt heeft (figuur 15.11). Hierbij ontstaat geen afval.

Doorsnijden

Een soortgelijke bewerking is het doorsnijden of doorkappen (figuur 15.12): het wegponsen van de verbinding tussen twee werkstukken.

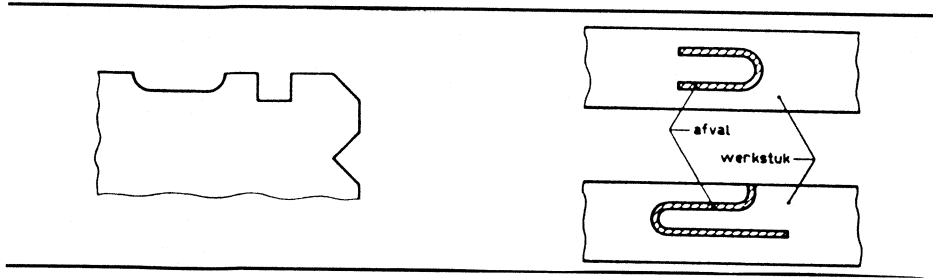


Figuur 15.11 (links): Afsnijden van produkten

Figuur 15.12 (rechts): Doorsnijden van produkten

Uithoeken

Met een pons worden stukken uit de hoeken of de rand van een plaat gesneden.



Figuur 15.13(links): Uithoeken van plaat

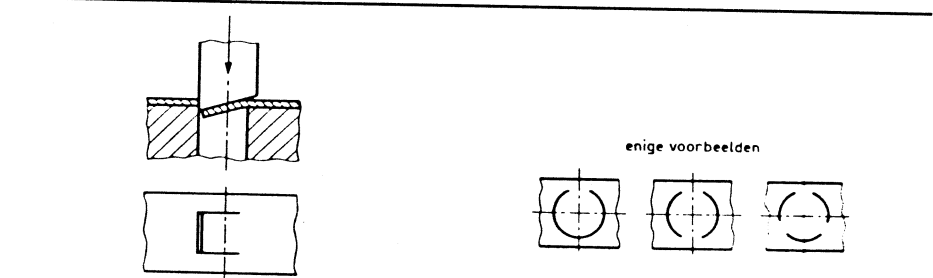
Figuur 15.14(rechts): Het vrijponsen van een gedeelte

Vrijponsen

Het gedeeltelijk vrijmaken van een plaatgedeelte heet vrijponsen (figuur 15.14).

Lossnijden

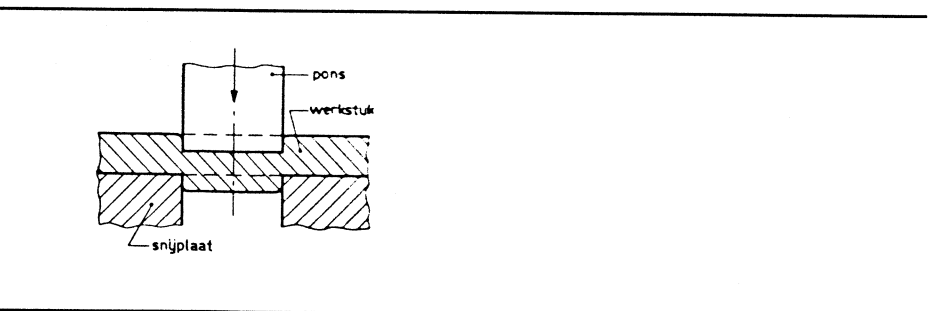
Deze bewerking lijkt weer op de vorige. De pons heeft hier echter geen gesloten snijrand en snijdt slechts een gedeelte van de vorm los.



Figuur 15.15: Lossnijden van materiaal

Nokponsen

Bij deze bewerking krijgt stopt de nippel boven de plaat in plaats van helemaal door het materiaal te snijden. Hierdoor ontstaan kleine verhogingen in de plaat, die bijvoorbeeld gebruikt kunnen voor centrering bij de montage.

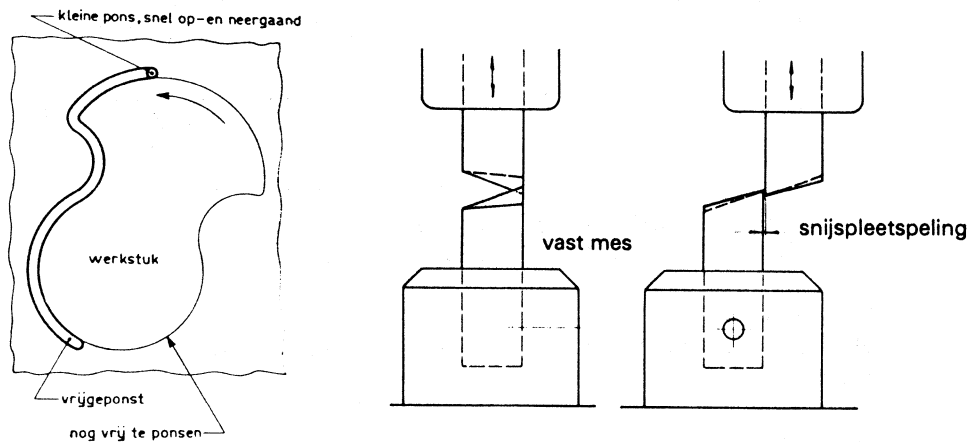


Figuur 15.16: Nokponsen

Knabbelen

Een willekeurig gevormd gat wordt uitgesneden door een snel op en neer bewegend ponsje (figuur 15.17). Dit is een bewerking waar de vorm van het gemaakte gat niet de door de vorm van het gereedschap wordt bepaald, maar door de bewegingen van de plaat ten opzichte van de pons.

Er zijn handknabbelponsen waarmee bijvoorbeeld in grote gebogen oppervlakken gaten kunnen worden gemaakt. Het knabbelponsen lijkt erg op het *knibbelen* (figuur 15.18), dat ingedeeld wordt onder snijdende bewerkingen. Ook hier wordt een willekeurige vorm uitgesneden, maar dan met twee op en neer bewegende schaarhelften.



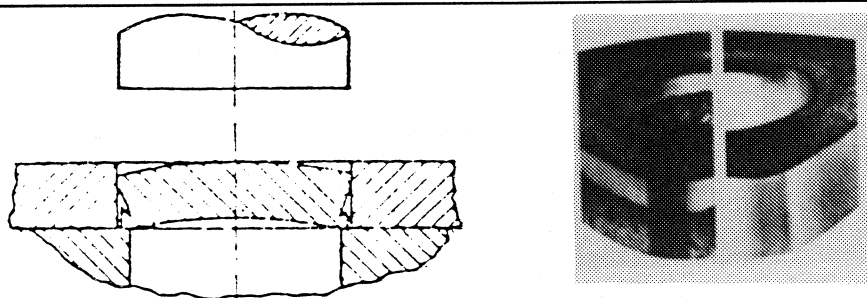
Figuur 15.17 (links): Knabbelen van een willekeurig gevormd gat
 Figuur 15.18 (rechts): Knibbelen

Naponsen

De kwaliteit van een werkstuk kan verbeterd worden door een extra ponsbewerking, het naponsen (figuur 15.19).

Hierdoor kunnen nauwere toleranties gehaald worden, is de snijrand vlakker en gladder en kan de snijrand meer loodrecht op het oppervlak komen te staan. Ook bramen kunnen hiermee worden verwijderd. De ruwheid die hiermee te bereiken is, ligt in de orde van grootte van slijpwerk.

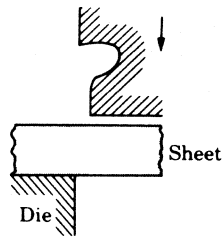
Het produkt wordt in de eerste bewerking zodanig bemeten dat er een toeslag ontstaat op de gewenste maten. Met behulp van een naponsnippel wordt de toeslag weggesneden.



Figuur 15.19: Naponsen, principe en uiterlijk van de rand

Wanneer het produkt met de holle kant naar beneden wordt ingelegd, krijgt men een beter oppervlak van de snede én een zekere terugbuiging van het materiaal. Dit laatste heeft alleen effect bij plaat dunner dan 3 mm.

Het ponsen en nasnijden van gaten kan, met een speciaal stempel, ook in één bewerking worden uitgevoerd (figuur 15.20).

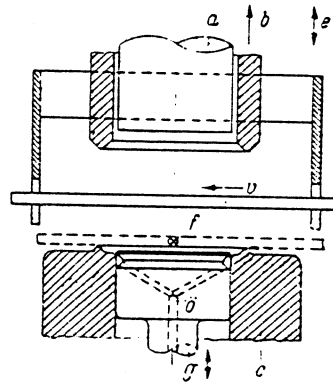


Figuur 15.20: Nippel om te ponsen en na te snijden in één slag

Fijnponsen

Door het naponsen kunnen bramen, afrondingen en doorbuiging redelijk weggewerkt worden.

Wanneer er echter zeer hoge eisen worden gesteld kan men een speciale pers en gereedschap gebruiken, waarmee vlakke producten met rechte snijranden worden verkregen. Hiermee worden veel fijnmechanische onderdelen gemaakt. Het principe is weergegeven in figuur 15.21.



Figuur 15.21: Principe van het fijnponsen

Voordat het nippel begint te snijden, wordt aan beide kanten in het materiaal een V-vormige groef gedrukt. Het materiaal dat hierdoor weggedrukt wordt, vult de afrondingen op en houdt de rand vlak. In het gat in de snijplaat is een tegenhouder aangebracht die het werkstuk vlakhoudt.

Voor het fijnponsen zijn een speciale pers en gereedschap nodig, dus het is aan te raden om eerst te kijken of toleranties met de hiervoor genoemde methoden zijn te halen.

15.5 VOOR- EN NADELEN

Voordelen

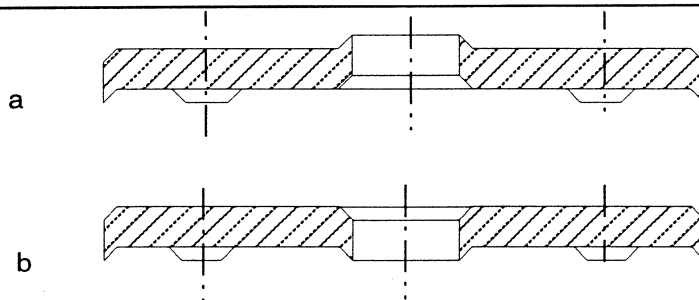
- Het proces is zeer geschikt voor de massafabricage.
- Het proces is goed te mechaniseren.
- Er kunnen hoge produktiesnelheden worden bereikt.
- Ingewikkelde contouren liggen vast in de vorm van het gereedschap en hebben geen invloed op de tijd die nodig is voor het vervaardigen van een produkt.

Nadelen

- Wijzigingen zijn meestal niet aan te brengen zonder hoge kosten.
- Zonder nabewerking zijn gesneden randen enigszins ruw en niet loodrecht op het oppervlak.
- Het materiaal is aan de randen versterkt en er zijn inwendige spanningen.
- Een uitgeponst produkt is niet vlak, maar enigszins schotelvormig.
- Er kunnen bramen aan het produkt zitten.

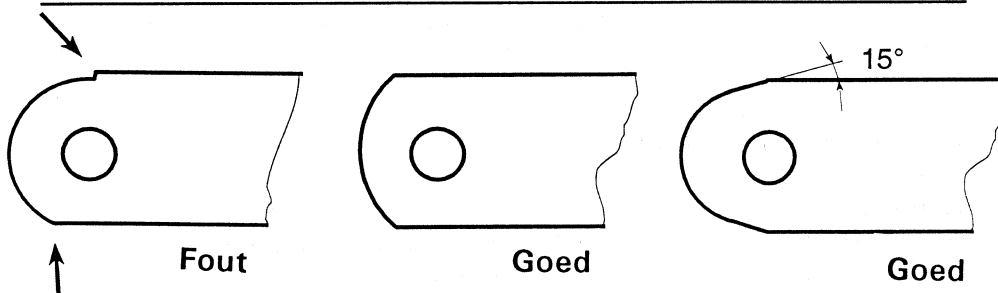
15.6 ONTWERP RICHTLIJNEN

- Houd rekening met de kant waaraan de bramen ontstaan: wanneer zowel contour als gaten worden gestampt vanaf dezelfde kant van het produkt, zullen de (scherpe) bramen aan twee kanten van het produkt voorkomen (figuur 15.22). Als het produkt een duidelijke voor- en achterkant heeft, zoals bij bijvoorbeeld afdekplaten, kan men er voor zorgen dat de bramen allemaal aan de achterkant van het produkt komen te liggen, zodat de andere kant braamvrij blijft. Om de bramen allemaal aan een kant van het werkstuk te krijgen kan men het werkstuk tussen twee bewerkingen in omdraaien, maar beter is het om een aantal gereedschappen ondersteboven in de pers te monteren.



Figuur 15.22: Bramen wanneer gaten en contour (a) van dezelfde kant worden geponst, (b) aan verschillende kanten worden geponst.

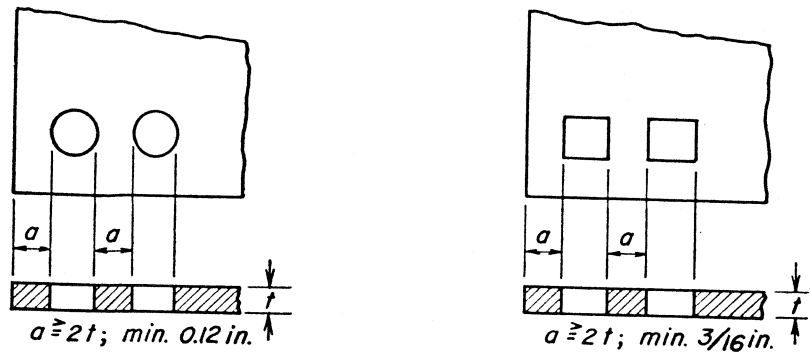
- Wanneer volgens een niet-gesloten snijlijn wordt gesneden, zoals bij het doorsnijden en bij het uithoeken, mag men de snijlijn niet door laten lopen in de rand van het werkstuk (figuur 15.23). Door toleranties op de strookbreedte en door niet goed positioneren zullen de lijnen niet helemaal aansluiten. Hierdoor zal een scherp puntje aan het werkstuk ontstaan. Bovendien kunnen er metaalsplinters ontstaan die het gereedschap beschadigen.



Figuur 15.23: Laat een geponste rand niet aansluiten op de rand van het werkstuk

- Gaten mogen niet te dicht bij de rand of naast elkaar geplaatst

worden. In figuur 15.24 worden hiervoor richtlijnen gegeven.



Figuur 15.24: Plaatsing van gaten

- De diameter voor gaten moet minimaal gelijk zijn aan de plaatdikte. Kleinere gaten zijn mogelijk, maar brengen extra kosten met zich mee.

Toleranties

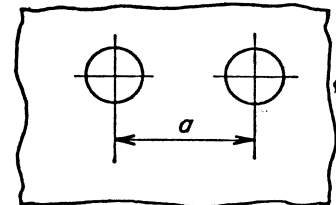
In figuur 15.24 - 26 zijn enige richtlijnen gegeven voor de toleranties die met vlakstampen haalbaar zijn.

Lengtemaat (mm)	Tolerantie (mm)
Zeer klein	± 0,05
< 75	± 0,10
75 - 150	± 0,25
> 150	± 0,40

Gatdiameter (mm)	Tolerantie (mm)
< 12	± 0,01
12 - 25	± 0,02
> 25	± 0,04

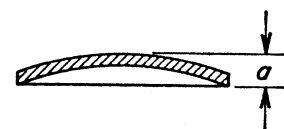
Figuur 15.24: Toleranties op lengtematen en gatdiameters

afstand tussen gaten (mm)	Tolerantie (mm)
< 50	± 0,05
> 50	± 0,10



Figuur B.25: Toleranties voor afstanden tussen gaten

Oppervlakte (mm ²)	Tolerantie (mm)
< 12	± 0,1
12 - 25	± 0,2
25 - 50	± 0,6
> 50	± 1,0



Figuur 15.26: Toleranties voor onvlakheid

LITERATUUR

Doorschot, F.

De technologie van de serie- en massafabricage

Collegediktaat io27

Technische Universiteit Delft, 1991.

Hermans, H.

Vervaardigingstechnieken 3

Collegediktaat io27

Technische Universiteit Delft, 1986.

Kalpakjian, S.

Manufacturing engineering and technology (2nd edition)

Addison-Wesley Publishing company, 1992.

Niebel, B.W., A.B. Draper en R.A. Wysk

Modern Manufacturing Process Engineering

McGraw-Hill, 1989.

Strasser, F.

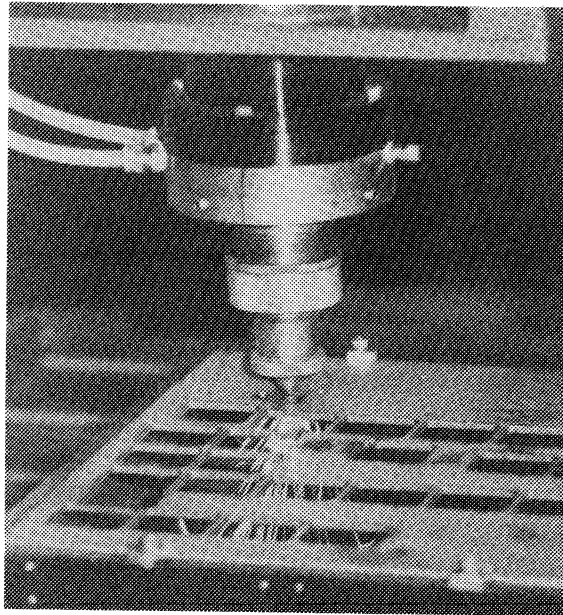
Practical design of sheet metal stampings

Chapman & Hall ltd, 1960.

Hoofdstuk 16: LASERSNIJDEN

16.1 INLEIDING

In de industrie wordt voor een groot aantal toepassingen steeds meer gebruik gemaakt van lasersystemen. Een belangrijke toepassing is het lasersnijden, maar tegenwoordig worden lasers ook steeds meer gebruikt voor het graveren en lassen van onderdelen en voor oppervlaktebehandelingen zoals harden. In dit hoofdstuk zal alleen worden ingegaan op het lasersnijden.



Figuur 16.1: Het snijden van metaalplaat met behulp van een laser

Een laser is een elektromagnetische stralingsbron, die coherent monochromatisch licht uitzendt in een evenwijdige bundel. Het licht wordt opgewekt door de gestimuleerde emissie van straling in een medium. Het woord laser is een afkorting die staat voor 'Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation'.

Om met de laserstraal te kunnen snijden, moet deze worden gefocuseerd tot een lichtcirkel waarvan de diameter slecht fracties van een millimeter bedraagt. Hierdoor wordt de intensiteit van de laserstraal zo groot, dat door smelten en verdampen van het materiaal zeer smalle en nauwkeurige gleuven kunnen worden gemaakt. Met de scherpe laserstraal kan men een groot aantal metalen en niet-metalen zoals kunststoffen, glas, hout en textiel snijden. Bij het lasersnijden is in de regel een vermogen tot 1200 W voldoende.

Binnen de wereld van de bewerkingstechnieken spelen twee typen laserbronnen een belangrijke rol: de Nd-YAG-laser en de CO₂-laser. De benaming van de lasers is gebaseerd op het actieve medium waarin het licht wordt opgewekt. De Nd-YAG-laser kan een redelijk vermogen opwekken en wordt voornamelijk gebruikt in de elektronica-industrie. Voor het zwaardere werk in de metaalindustrie worden over het algemeen CO₂-lasers gebruikt. Driekwart van de industriële lasers in Europa is van het CO₂-type.

De laserstraal kan door zijn coherentie bijna willekeurig ver worden getransporteerd. Pas op de werkplek wordt de straal gefocusseerd. De laserbron en de werkplek kunnen dus ver van elkaar worden opgesteld. Via spiegeloptica is het bovendien mogelijk met één installatie afwisselend op verschillende stations te werken en afwisselend te lassen en te snijden.

Voor het uitstansen van contouren zijn dure gereedschappen nodig, die slechts renderen bij grote aantallen. Lasersnijden biedt een economische oplossing wanneer slechts kleine aantallen zijn gevraagd. Voor kleine eenvoudig gevormde gaten is de laser echter zelfs bij lage aantallen duurder dan stampen. Het ligt daarom voor de hand om een stampinrichting te combineren met een lasergereedschap. Op zulke bewerkingscentra met een bewegend werkstuk worden de eenvoudige gaten uitgeponst en de buitencontouren en ingewikkelde vormen met de laser uitgesneden. Deze economische oplossing voor de complete bewerking van bewegende werkstukken is ook belangrijk voor kleine series, prototypen en nulseries.

Toepassingen

De meeste toepassingen van lasersnijden zijn te vinden in het gebied van het uitsnijden van onderdelen uit vlakke staalplaat. Lasersnijden is in deze gevallen een alternatief voor vlakstampen, waarmee voor kleine series of gecompliceerde geometrieën, de hoge gereedschapskosten kunnen worden vermeden.

Er bestaan echter ook andere toepassingen. Zo is het mogelijk om met een CO₂-laser glas te snijden. Deze toepassing wordt gebruikt bij het snijden van kwartsbuisjes voor lampen. Het vermogen dat voor deze toepassing nodig is, ligt tussen de 200 en 400 W. Een andere toepassing is het volledig automatisch uitsnijden van autospiegels. Door het smeltproces van de laser is de kwaliteit van de rand erg slecht, maar dit is juist een voordeel omdat men zich nu tijdens het monteren in de rubberen ring minder snel snijdt aan de randen van het glas.

Het is met behulp van een laser heel goed mogelijk om titanium te snijden, omdat dit materiaal een zeer lage ontbrandingstemperatuur en een grote gevoeligheid voor oxydatie. Snelheden die gehaald kunnen worden bij titanium van 1 mm dik zijn ongeveer 10 m/min met een laservermogen van rond de 500 W. Bij een toename van de dikte zal de snelheid rechtevenredig afnemen. Doordat titanium een zeer duur materiaal is en het lasersnijden weinig materiaal verbruikt, zal een systeem in de vliegtuigbouw zich snel terugverdienen.

Omdat het met behulp van lasersnijden mogelijk is om gecompliceerde tweedimensionaal gevormd plaatmateriaal uit te snijden, wordt deze techniek toegepast voor produkten zoals weergegeven in figuur 16.2. In het bijzonder voor prototypen en kleine series is het geschikt voor het economisch snijden van onderdelen van plaatwerkconstructies.

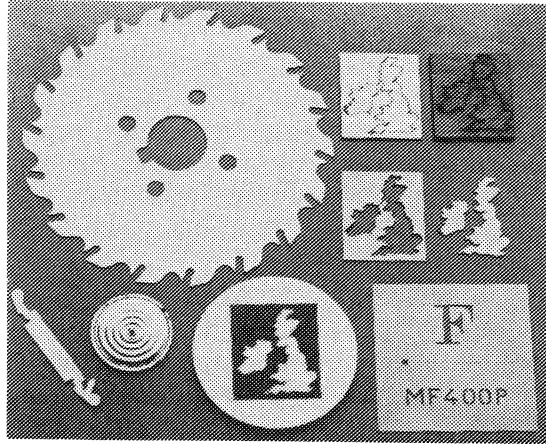
16.2 HET PROCES

Het proces van het lasersnijden bestaat uit vier stappen, namelijk:

1. Het opwekken van de laserstraal,
2. Het overbrengen naar het werkstuk,
3. Het controleren van de laserstraal,
4. Het snijden.

Stap 1: Het opwekken van de laserstraal

De laserwerking is in principe voor elke laser gelijk, maar de opbouw van de laser en het actieve lasermedium zijn bij de diverse typen lasers verschillend.



Figuur 16.2: Voorbeelden van onderdelen die met behulp van lasersnijden zijn vervaardigd

Voor het opwekken van de laserstraal wordt voor industriële toepassingen gebruik gemaakt van twee typen lasers: de Nd-YAG-laser en de CO₂-laser. Het is de verwachting dat in de nabije toekomst ook de laserdiode, die bekend is van de toepassing in CD-spelers, gebruikt gaat worden voor industriële toepassingen.

Het type laser dat het meest voor het snijden gebruikt wordt, is een continu CO₂-laser. Hierbij bestaat het actieve medium uit een gasmengsel van koolstofdioxide, stikstof en helium. Er ontstaat een laserstraal ver in het infrarode gebied, met een golflengte van ongeveer 10,6 μm . Het gemiddelde uitgangsvermogen van de laser ligt tot nu toe rond de 500 W, maar de vermogens van 3 tot 10 kW zullen in de toekomst een belangrijke rol gaan spelen. De CO₂-laser wordt vaak met continu-vermogen gebruikt, maar wanneer dit een te grote warmte-inbreng in het materiaal zou veroorzaken, kan de laser ook gepulst worden met een pulsduur van ongeveer 1 ms en een frequentie van ongeveer 150 Hz. Hierdoor daalt het gemiddelde ingebrachte vermogen.

De Nd-YAG-laser heeft als actief medium Yttrium Aluminium Granaat, waarin in zeer lage concentratie het zeldzame aardmetaal Neodymium (Nd) voorkomt. Het energieniveau-schema van de Nd-YAG-laser maakt een redelijk efficiënte laserwerking in het infrarode gebied mogelijk, met een golflengte van 1064 nm. Dit licht wordt beter geabsorbeerd dan de langere golflengte van een CO₂-laser, wat een voordeel is bij het bewerken van hoogreflecterende materialen zoals aluminium- en koperlegeringen. In tegenstelling tot een CO₂-laser kan een Nd-YAG-laser echter geen transparante materialen snijden zoals glas of kunststoffen.

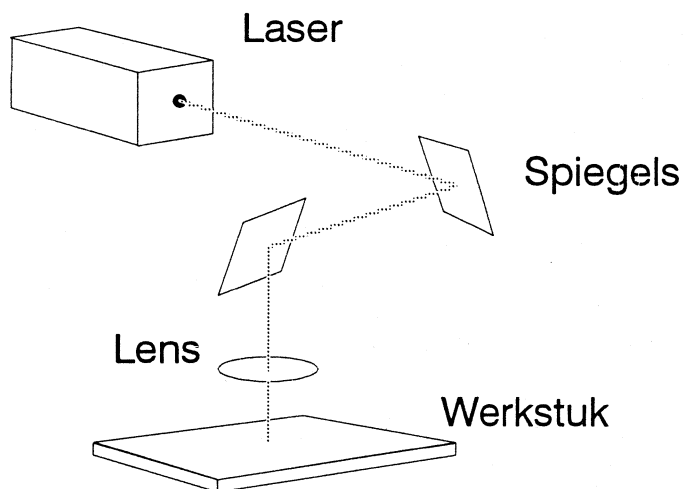
Nd-YAG-lasers hebben een lager gemiddeld uitgangsvermogen dan CO₂-lasers. De Nd-YAG-laser wordt altijd gepulst gebruikt, waarbij de pulsduur ongeveer 10 nanoseconde is, met een frequentie van ongeveer 20.000 Hz. Hierbij kunnen de piekvermogens oplopen tot tientallen megawatt. Het gevolg hiervan is dat er bij het snijden van dun materiaal slechts een kleine warmte-beïnvloede zone ontstaat.

Doordat de Nd-YAG-laser altijd gepulst wordt gebruikt, lijkt het snijden op het knabbelen, omdat wordt gesneden door gedeeltelijk overlappende gaten te maken.

Een voordeel van de Nd-YAG-laser is dat deze kan worden gebruikt in combinatie met glasvezelkabels, zodat er een grote flexibiliteit mogelijk is bij het snijden. Het is op deze manier ook mogelijk om de Nd-YAG-laser te gebruiken voor driedimensionale toepassingen. De CO₂-laser zal gezien zijn toepassingsmogelijkheden vooral in de zware metaalbewerking gebruikt worden. De CO₂-laser wordt ook gebruikt voor het snijden van organische materialen zoals kunststof, hout en papier en enkele keramische materialen.

Stap 2: Het overbrengen naar het werkstuk

De straal die uit de laser komt, moet naar het werkstuk worden geleid. Bij de Nd-YAG-laser wordt hiervoor meestal de voorkeur gegeven aan een flexibele glasvezelkabel. Wanneer deze wordt gecombineerd met een eenvoudige robot is er een grote flexibiliteit bij het snijden. De focussering vindt plaats met lenzen van normaal glas.



Figuur 16.3: Het lasersysteem bij het CO₂-lasersnijden

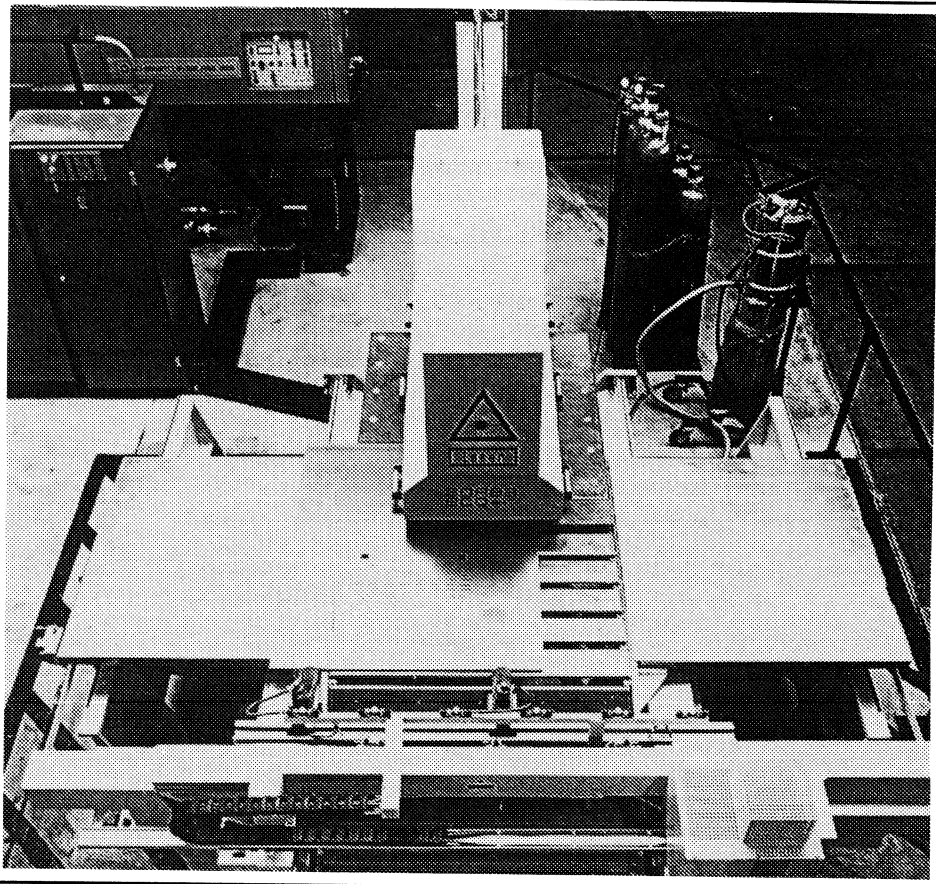
Omdat glas het licht met de frequentie van de CO₂-laser niet doorlaat, is het nodig om van speciale lenzen gebruik te maken. De glasvezeltechnologie is niet bruikbaar. In plaats daarvan moeten spiegels gebruikt worden die zijn voorzien van een reflecterende koperlaag. Dit doet duidelijk afbreuk aan de wendbaarheid van het instrument.

Bij de toepassing van een stelsel van spiegels zijn vijf variaties mogelijk:

1. *Bewegend werkstuk.* Hierbij is de optiek vastgesteld en kan de te snijden plaat in x- en y-richting worden bewogen. Dit heeft als voordeel dat de loop van de laserstraal constant blijft. Het wordt gebruikt voor kleine werkstukken en bij grote lasers. Door een extra rotatie-as toe te voegen, is de inzetbaarheid verder op te voeren, zonder dat de programmeer-inspanning ernstig toeneemt. Een dergelijke roterende as met klauwplaat maakt het snijden van ronde pijp mogelijk, terwijl ook rechthoekige buis kan worden bewerkt. De keuze voor besturing van de tafel en een vast opgestelde laseroptiek is ook het meest logisch, wanneer er gebruik wordt gemaakt van een inrichting waarop ook een stampgereedschap zit. Wanneer een bewegende laser zou worden gebruikt, zou ook de stampinrichting mee moeten bewegen.
2. *Bewegend werkstuk en bewegende laser.* De optiek kan nu in één richting worden bewogen en de te snijden plaat in de richting loodrecht

daarop. Wanneer de laser kan worden bewogen, wordt gesproken van een 'zwevende optiek'.

2. *Bewegende laser en bewegende spiegels.* Dit is optisch gezien gelijk aan het geval met het bewegende werkstuk. Het wordt gebruikt bij grotere werkstukken.
3. *Bewegende spiegels.* Dit is de meest ideale situatie, omdat het geen beperkingen stelt aan de laser of het werkstuk. Helaas levert het vaak nog mechanische of optische problemen.
4. *Bewegende spiegels en bewegend werkstuk.* Dit geeft ongeveer dezelfde resultaten als in de vorige situatie en het levert minder problemen op.



Figuur 16.4: Laseropstelling met bewegend werkstuk

Wanneer de laserstraal eenmaal in de buurt van het werkstuk komt, moet de straal gefocuseerd worden om de intensiteit van de straal te vergroten. Hiervoor wordt bij lagere vermogens gebruik gemaakt van lenzen. Wanneer er met lasers met een groter vermogen wordt gewerkt, kunnen geen lenzen worden gebruikt, omdat deze teveel warmte opnemen en ze onvoldoende kunnen worden gekoeld. In dit geval wordt er daarom gebruik gemaakt van spiegels om de straal te focuseren.

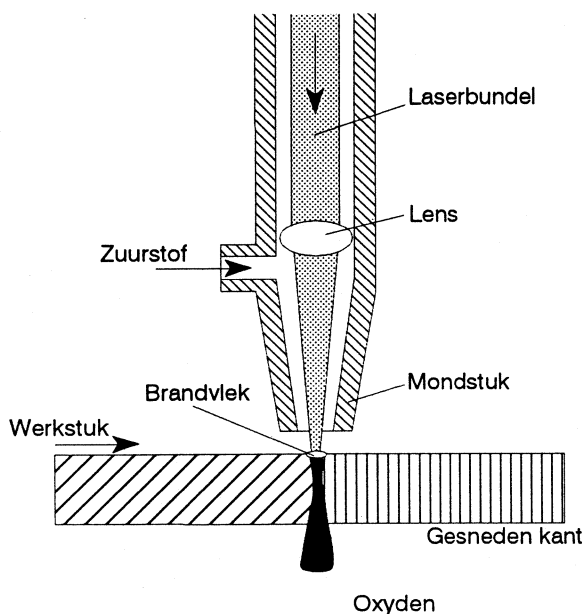
Stap 3: Het controleren van de laserstraal

Een laserstraal kan worden gekarakteriseerd met behulp van drie parameters: het vermogen, de diameter en de verdeling van de intensiteit. De parameters kunnen het beste gemeten worden aan de totale laserstraal, maar dit kan onmogelijk tijdens het proces gebeuren. Daarom is het noodzakelijk om tijdens het proces metingen aan een klein gedeelte van de laserstraal te verrichten en de parameters van de straal eventueel bij te stellen.

Stap 4: Het snijden

Bij het lasersnijden zijn drie belangrijke snijmethoden te onderscheiden:

- Het *smeltend snijden*. Hierbij wordt het materiaal met behulp van de laserstraal tot smelten gebracht en door een stroom inert gas uit de snijspleet wordt geblazen. Deze methode is bijzonder geschikt voor het snijden van brandbare materialen zoals kunststoffen.
- Het *sublimerend snijden*. Hierbij wordt het materiaal verdampt onder de inwerking van de laserstraal. Een stroom inert gas blaast de damp weg. Met deze methode kunnen staal en aluminium tot een dikte van 20 mm worden gesneden. Het sublimerend snijden kan tegelijk met het smeltend snijden voorkomen.
- Het *brandsnijden*. Hierbij wordt het materiaal tot de ontbrandingstemperatuur verhit en met de toegevoerde zuurstof verbrand. De stroom zuurstof blaast de ontstane dunvloeibare slak uit de snijspleet. De exotherme reactie levert de aanvullende energie en vergroot de snijspleet aanzienlijk. deze methode wordt hoofdzakelijk toegepast voor het snijden van staalplaat.



Figuur 16.5: Principe van het brandsnijden met een laser

De warmte-invloed op het materiaal is bij het lasersnijden veel kleiner dan bij de thermische snijmethoden, zoals snijbranden.

Wanneer men lasersnijden vergelijkt met de conventionele technieken lijkt het nog het meest op het frezen. Eerst wordt er een gat in het materiaal geboord en vervolgens wordt er vanaf dit punt een snede in het materiaal gemaakt.

Bij het lasersnijden is de freeskop vervangen door een gefocusseerde laserbundel met een energiedichtheid die ligt tussen de 10^8 en 10^{12} W/m². Het materiaal wordt zeer lokaal gesmolten en gedeeltelijk verdampt, waarna het door middel van een coaxiaal aan de gefocusseerde bundel gerichte gasstroom door het materiaal heen wordt weggeblazen. Op deze manier ontstaat een zeer smalle snede met een goede randkwaliteit.

De breedte van de snijspleet ligt in het optimale geval tussen 0,1 en 0,3 mm en de ruwheid van de snijvlakken is ongeveer 5 tot 50 µm. Deze optimale resultaten worden alleen bereikt bij een aangepaste verminderde snelheid; in andere gevallen liggen de waarden iets hoger.

De randen van het materiaal, die zijn gesneden met een laserstraal, vertonen loodrecht op het oppervlak dunne lijnen. De ruwheid van deze afgewerkte randen hangt nauw samen met het gesneden materiaal, de dikte en de laserparameters. Deze ruwheid wordt veroorzaakt door gesmolten materiaal, dat onder druk van het plaatselijke materiaal schoksgewijs door het gat naar beneden wordt geperst. Bij dikkere materialen zal de ruwheid van de randen groter zijn.

Bij het snijden van gelegeerde staalsoorten treedt vanaf een werkstukdikte van 3 mm een sterke slakvorming op. De snijspleet verbreedt zich naar onderen, waarbij een moeilijk te verwijderen braam ontstaat. Om dit te voorkomen, moet bij het reduceren van de aanzetsnelheid ook het laservermogen worden verminderd. Bij een bepaalde materiaaldikte en bij een bepaald vermogen van de laser bestaat er een nauw begrensd snelheidsgebied, waarin een optimaal resultaat bereikt kan worden ten aanzien van braamvorming, oppervlakteruwheid en grootte van de warmte-beïnvloede zone.

De eis van de constante bewegingssnelheid kan alleen vervuld worden voor normale curven. Dit is niet meer mogelijk bij het snijden van scherpe hoeken, omdat bij het snijden in een punt de versnelling van het werkstuk oneindig groot zou moeten worden.

16.3 PROCESVARIABLEN

Er kunnen bij het lasersnijden zes procesvariabelen worden onderscheiden, namelijk het laservermogen, het pulspatroon, de snijsnelheid, de diameter van de gefocusseerde bundel, de focusdiepte en het soort gas dat gebruikt wordt.

Vermogen en pulsering

CO₂-laser

Het vermogen van de CO₂-laser kent een nagenoeg traploze instelling tussen 0 en 1200 W, terwijl het normale werkgebied van 100 tot 1000 W loopt. Het vermogen waarmee gewerkt wordt, hangt sterk af van de vereiste snelheid, het materiaal, de dikte van het materiaal en het gebruikte gas. Wanneer er grote vormen moeten worden uitgesneden met een relatief eenvoudige contour wordt de laser meestal met continuvermogen gebruikt.

Bij het snijden van ingewikkelde vormen kan bij de CO₂-laser beter gebruik worden gemaakt van een gepulste laserstraal. Hierbij kan het gemiddelde

vermogen van de laser worden gecontroleerd door deze elektronisch duizenden keren per seconde aan en uit te schakelen. Hierbij blijft het vermogen van de laser tijdens de puls wel gelijk. De meest gunstige pulsduur ligt tussen de 0,1 en 1,0 ms.

Als er met een te hoog vermogen wordt gesneden, ontstaat er een te brede snede met een grote warmte-beïnvloede zone en er kan zelfs materiaal weggebrand worden. Door de laserstraal te pulseren kan er met precies de juiste hoeveelheid vermogen worden gewerkt, zodat er een perfecte snede ontstaat.

Het pulserend snijden wordt bijvoorbeeld toegepast bij het snijden van materiaal waarop een coating is aangebracht. De warmte die de laserbundel in deze vorm in het materiaal inbrengt, zal minder zijn dan bij een laser die continu werkt. De coating wordt hierdoor minder beïnvloed. De frequentie van de laser ligt rond de 150 Hz.

Nd-YAG-laser

De Nd-YAG-laser wordt altijd gepulst toegepast. De pulsduur is ongeveer 10 nanoseconde, met een frequentie van 20.000 tot 50.000 Hz. De piekvermogens kunnen oplopen tot tientallen megawatt. Het gevolg hiervan is dat er bij het snijden van dun materiaal slechts een kleine warmte-beïnvloede zone ontstaat. Met de Nd-YAG-laser wordt gesneden door gedeeltelijk overlappende gaten te maken.

Snij snelheid

In figuur 16.6 worden voor enkele materialen het laservermogen en de snij snelheid gegeven waarmee bij verschillende dikten een goede snedekwaliteit wordt verkregen. De snij snelheid kan oplopen tot 12 meter per minuut.

Diameter van de bundel en focusdiepte

Om de vermogensdichtheid van de laserstraal zodanig op te voeren dat er materiaal mee gesneden kan worden, moet de straal worden gefocusseerd tot een diameter die ligt tussen de 0,1 en de 0,5 mm. De diameter van de laserbundel en de focusdiepte bepalen samen de vorm van de laserbundel op de plaats waar deze op het werkstuk is gericht. Deze parameters zijn allebei afhankelijk van de brandpuntsafstand f van het focus-systeem. Een systeem met een korte brandpuntsafstand zal een kleinere diameter van de gefocusseerde bundel veroorzaken dan een systeem met een grote brandpuntsafstand. Alleen is de focusdiepte ook veel kleiner. Bovendien moet er bij systemen met een kleinere brandpuntsafstand rekening mee worden gehouden dat de kans op beschadiging van het focus-systeem door spatten van het werkstuk groter is.

De positie van het focuspunt ten opzichte van de te snijden plaat is afhankelijk van het materiaal. Soms moet worden gefocusseerd halverwege de plaatdikte, terwijl in andere gevallen het focuspunt drie plaatdiktes onder de plaat moet liggen.

Materiaal	Materiaal- dikte (mm)	Laser- vermogen (kW)	Snij- snelheid (m/min)
Zacht staal	3,0	0,4	1,0
	2,0	0,8	1,7
	2,0	2,0	5,0
	1,5	0,4	1,5
12% Cr staal	5,0	0,8	0,7
	6,0	2,0	2,0
	12,0	2,0	0,4
Roestvrij staal	1,5	0,4	0,5
	3,0	0,8	0,7
	3,0	2,0	3,0
Titanium	1,0	0,4	3,0
	1,0	1,5	12,0
	0,5	0,8	3,0
Hout	14,0	0,8	0,6
	25,0	2,0	2,0
Perspex	32,0	0,8	0,3
	9,0	2,0	12,0

Figuur 16.6: Laservermogen en snijsnelheid bij verschillende materialen en dikten

Het gas

De hoge vermogensdichtheid van de laserstraal is niet genoeg om een goede snede te maken. Er is ook een gasstroom nodig. Dit gas heeft meerdere functies:

- het verwijdert het gesmolten en verdampte materiaal van de snijzone;
- het heeft een koelende werking op het omliggende materiaal;
- het verzekert een effectieve overdracht van de laserstraal naar het werkstuk;
- het beschermt de optische componenten tegen dampen en spatten;

Om oxydatie van de snijkanten tegen te gaan, zal het gebruikte gas vaak een edelgas zijn. In het algemeen is helium het beste gas om te gebruiken, maar dit is erg duur. Daarom wordt er vaak met gasmengsels gewerkt.

Wanneer staal wordt gesneden, zal er een reactief gas zoals zuurstof worden toegepast. Het zuurstof wordt met een coaxiale gasstroom tot vlak boven het oppervlak van het materiaal gebracht. Het is dit gas, dat onder invloed van de laserbundel de uiteindelijke snijreactie veroorzaakt. Door de exotherme reactie die dit gas veroorzaakt zal een vijf keer grotere snelheid worden verkregen dan wanneer er met een edelgas wordt gewerkt.

De hoeveelheid gas die nodig is, verschilt van toepassing tot toepassing. Wanneer er met een lagere snelheid wordt gesneden, heeft het vloeibare materiaal meer tijd om met de atmosfeer te reageren en is er dus meer beschermingsgas nodig.

16.4 VOOR- EN NADELEN

Voordelen van het snijden met lasers zijn:

- Er kunnen gemakkelijk zeer complexe figuren worden uitgesneden met een snede van 0,1 tot 1,0 mm breed.
- Er is weinig verlies van materiaal, doordat met het zeer kleine focuspunt een smalle snede gemaakt kan worden.
- De lasersnijmethode is contactloos zodat er geen krachten op het werkstuk worden uitgeoefend.
- Rond de snede is nauwelijks invloed van warmte waar te nemen.
- De snijsnelheden kunnen zeer groot zijn.
- De hardheid van het materiaal heeft geen invloed op de snijsnelheid.
- Voor sommige toepassingen is de randafwijking direct al goed genoeg en is er geen nabewerking meer nodig.
- Wanneer er een optiek met lange brandpuntsafstanden wordt gebruikt, kunnen er meerdere lagen tegelijk worden gesneden.
- Er is geen sprake van gereedschapsslijtage.
- Het proces kan eenvoudig geautomatiseerd worden.
- Er kunnen eenvoudig wijzigingen in het ontwerp worden doorgevoerd.

Nadelen zijn:

- Er zijn zeer specifieke kennis en ervaring nodig voordat de techniek met succes kan worden toegepast.
- Er zijn grote investeringen nodig wanneer men de techniek wil gaan toepassen.
- Niet alle materialen kunnen met behulp van deze techniek gesneden worden.
- Wanneer op hoge snelheid gewerkt moet worden, wordt de bereikte kwaliteit minder.
- Laserlicht kan van invloed zijn op de ogen en huid van de mens. Schadelijke uitwerkingen kunnen zijn: vernietiging van de weefselstructuur, brandwonden en staar.

16.5 ONTWERPRICHTLIJNEN

Materiaalmogelijkheden

Niet alle materialen kunnen met een CO₂-laser worden gesneden. Koper, messing, brons en aluminium kunnen moeilijk worden gesneden vanwege hun thermische geleidingseigenschappen en hun hoge reflectie bij 10,6 µm. Slechts onder speciale omstandigheden kunnen ze worden gesneden.

Bij het snijden van materialen zoals PC, PVC en Kevlar moet er rekening mee gehouden worden dat er gevaarlijke gassen kunnen vrijkomen en dat de afwerking van de snijrand minder goed is dan normaal.

Materiaaldikte

Op dit moment kunnen van de verschillende materialen de volgende dikten worden gesneden:

- Staal tot 12 mm,
- Non-ferro-metalen tot 3 mm,
- Glas en keramiek tot 5 mm,
- Kunststoffen tot ongeveer 20 mm,
- Hout tot ongeveer 20 mm.

Snijkwaliteit

De breedte van de snijspleet ligt in het optimale geval tussen 0,1 en 0,3 mm en de ruwheid van de snijvlakken is ongeveer 5 tot 50 μm . Deze optimale resultaten worden alleen bereikt bij een aangepaste verminderde snelheid; in andere gevallen liggen de waarden iets hoger.

16.6 KOSTEN

Een CO₂-laser met een vermogen van 1 kW kost ongeveer 350.000 gulden, een 5 kW-laser ongeveer 900.000 gulden. Een Nd-YAG-laser is ongeveer twee keer zo duur als een vergelijkbare CO₂-laser, maar is in het gebruik weer veel goedkoper.

Behalve de aanschafprijs zijn er nog andere aspecten van invloed op de kostprijs, zoals:

- onderhoud,
- beschikbaarheid van software-programma's,
- beschikbaarheid van reserve-onderdelen,
- veiligheidsmaatregelen die getroffen moeten worden.

Om een kostprijsberekening uit te voeren wordt er meestal van twee meer specifieke kostenplaatsen uitgegaan, namelijk die van de kostprijs per uur en de lange-termijn-investeringen die gedaan moeten worden om het systeem binnen de produktielijn op te nemen.

Om de prijs per uur te berekenen, zal men moeten beschikken over gegevens zoals het type laser, het energieverbruik per uur, het gasverbruik per uur, de kosten van onderhoud per uur en het uurloon van de operator. In het algemeen kan een machine-uurtarief van 200 gulden worden aangehouden. Per serie moet met een insteltijd van een half uur rekening worden gehouden.

LITERATUUR

Crafer, R.C. en P.J. Oakley
Laser processing in manufacturing
Chapman & Hall, 1993.

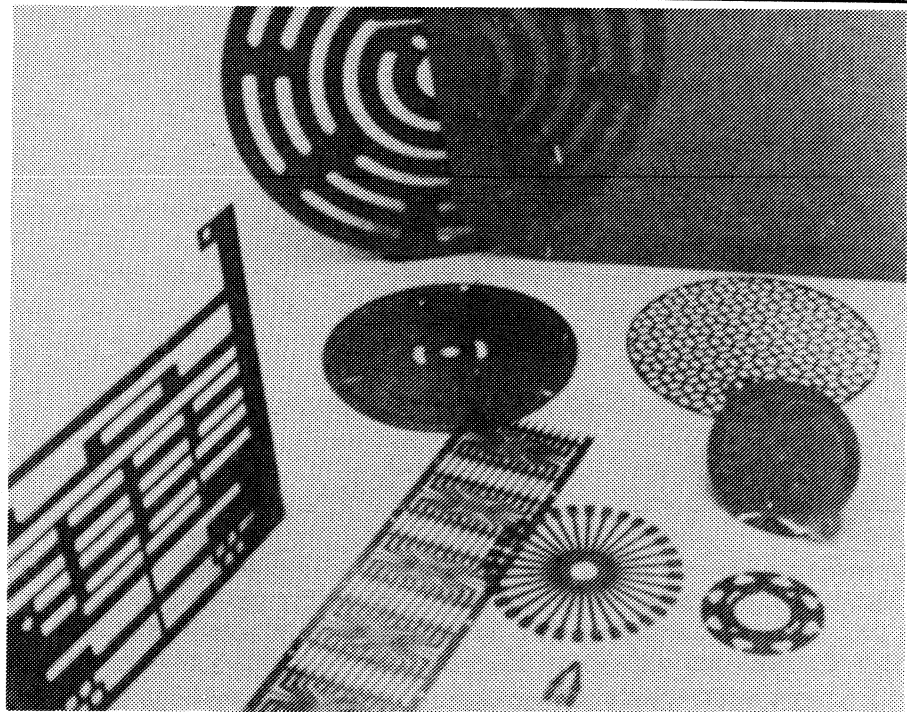
Siedsma, A.J.W. en H.J. van Elburg
Materiaalbewerking met lasers
Elsevier, 1985.

Hoofdstuk 17: FOTOCHEMISCHE BEWERKINGEN

17.1 INLEIDING

Fotocchemische materiaalbewerkingen zijn veelzijdige fabricagetechnieken, waarmee zowel zeer kleine als grotere produkten uit plaat kunnen worden gemaakt. Het zijn technieken waarmee complexe produkten met een hoge nauwkeurigheid reproduceerbaar vervaardigd kunnen worden. Een belangrijk kenmerk is dat de proceskrachten nihil zijn, zodat de produkten spanningsloos en braamvrij zijn. Met behulp van de fotocchemische materiaalbewerkingen kan snel tot productie worden gekomen, omdat het een zeer flexibele technologie is.

Alle fotocchemische bewerkingstechnieken zijn gebaseerd op hetzelfde fysisch principe. Op het werkstuk wordt een fotogevoelige laag aangebracht die de *fotoresistlaag* wordt genoemd. Deze fotoresistlaag wordt gedeeltelijk belicht, waardoor er een chemische reactie plaatsvindt in het materiaal. Hierdoor verandert de oplosbaarheid van de belichte delen van het materiaal van die van de niet-belichte delen. Met behulp van dit principe kan men de geometrie van het te vervaardigen produkt overbrengen op een fotogevoelige laag op het werkstuk. Het produkt ontstaat vervolgens door het afnemen of toevoegen van materiaal op plaatsen waar de fotoresistlaag is verdwenen. Een voorbeeld van het eerste geval is het fotocchemisch etsen, een voorbeeld van het tweede is het elektroformer. Beide technieken zullen in dit hoofdstuk worden behandeld.



Figuur 17.1: Voorbeelden van fotocchemisch vervaardigde produkten

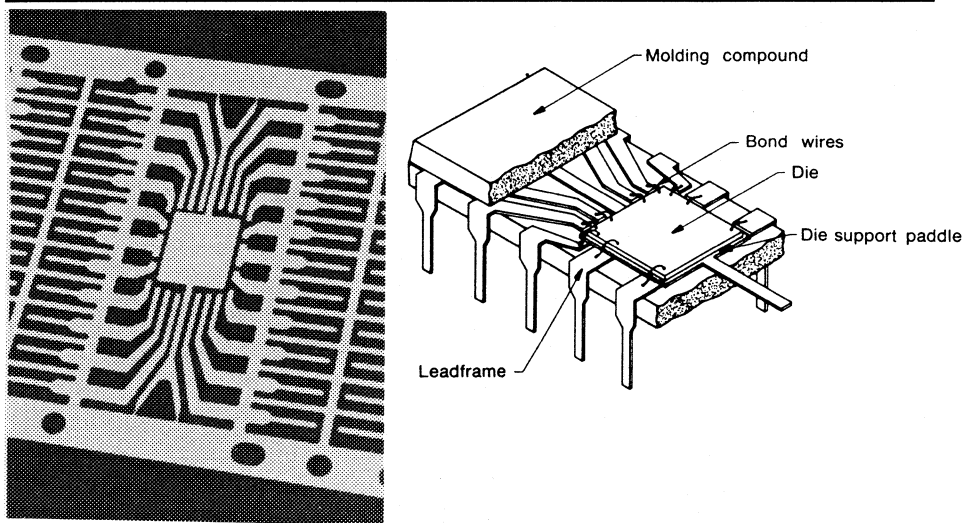
Toepassingen

De chemische bewerking van materialen is een oude techniek. Al in de vroege middeleeuwen werden de harnassen en zwaarden van de edelen verfraaid door er monogrammen en teksten in te etsen.

Met de ontwikkeling van lichtgevoelige emulsies (resists) in de jaren vijftig kwam de etstechniek pas goed voor de industrie beschikbaar. Met de opkomst van de ruimtevaart en de daardoor noodzakelijke miniaturisering is de fotografische printfabricage ontstaan. De fotochemische bewerkings-technieken zijn inmiddels geëvolueerd tot een veelzijdige fabricagetechniek met vele toepassingen.

Omdat het mogelijk is met zeer kleine afmetingen te werken, worden de fotochemische technieken veel toegepast in de elektronica-industrie. Een voorbeeld van een elektronica-onderdeel dat wordt geëtsd, is een leadframe voor een IC (integrated circuit) (figuur 17.2). De frames worden na het etsen voorzien van een IC en dan wordt een verbinding aangebracht. Vervolgens worden de frames uit de drager verwijderd en worden de pinnen omgebogen.

De fotochemische technieken worden ook toegepast in de massafabricage voor de vervaardiging van onderdelen met een groot aantal identieke perforaties, zoals scheerfolies, zoals die te vinden zijn in Braun-scheerapparaten, en schaduwmaskers voor beeldschermen.



Figuur 17.2: Voorbeeld van een geëtsd onderdeel: een IC-leadframe

17.2 HET PROCES

Het proces van de fotochemische bewerkingstechnieken kan worden verdeeld in vier stappen:

1. de fabricage van het fotomasker;
2. het aanbrengen van de fotoresistlaag;
3. het overbrengen het maskerpatroon op het materiaal;
4. het bewerken van het materiaal.

De eerste drie stappen zijn voor de opbrengende en de afnemende technieken gelijk. Pas in de vierde stap treden er verschillen op.

Stap 1: De fabricage van het fotomasker

De toleranties en minimale afmetingen van perforaties in het produkt worden bepaald door de nauwkeurigheid van het fotomasker. Het maken van een nauwkeurig fotomasker is daarom de belangrijkste processtap. De nauwkeurigheid is afhankelijk van de gebruikte fotoplotter, maar wordt ook bepaald door omstandigheden zoals de temperatuur en de vochtigheidsgraad tijdens de fabricage van het masker.

De basis voor het vervaardigen van een fotomasker is een ontwerptekening die is aangepast in verband met onderetsing. Hier wordt later nog op teruggekomen.

Aangezien er aan fotografisch vervaardigde produkten meestal extreme eisen worden gesteld voor wat betreft de afmetingen en toleranties geldt dit nog sterker voor de te maken fotomaskers. Vaak moeten de maskers toleranties hebben van enkele micrometers over de hele maskerafmeting en plaatselijk van minder dan $0,5 \mu\text{m}$. Er zijn twee mogelijkheden om deze hoge nauwkeurigheden te kunnen bereiken. De eerste is het vergroot maken van een basismasker en dit vervolgens verkleinen met een reproductiecamera, de tweede is het basismasker in één keer op ware grootte te maken met behulp van extreem nauwkeurige apparatuur.

Het vergroot maken van een basismasker

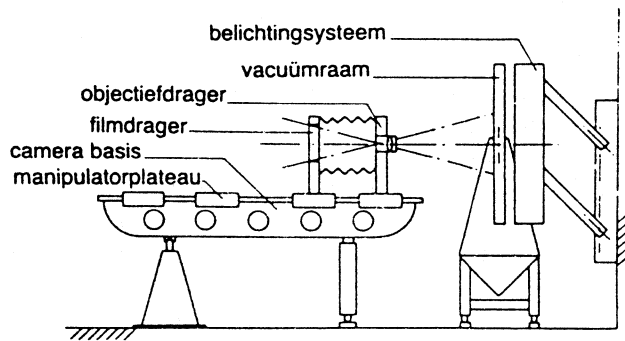
Het materiaal voor het basismasker is meestal een polyester folie. Dit materiaal wordt gekozen vanwege de goede doorzichtigheid, de hoge sterkte en scheurvastheid en de lage uitzettingscoëfficiënt. Het vergrote basismasker kan hier op worden getekend of worden afgeplakt met behulp van tape. De beste resultaten worden bereikt bij het gebruik van stripcoat-folie. Dit bestaat uit een heldere drager met daarop een ondoorzichtige afpelbare laag, waarin de gewenste vorm wordt uitgesneden. Hierbij zijn toleranties van $\pm 5 \mu\text{m}$ haalbaar.

Een nauwkeuriger en ingewikkelder basismasker is te maken met een fotoplotter. Dit apparaat schrijft met een klein lichtpunt op een fotogevoelige plaat, die na het ontwikkelen het basismasker vormt. Als de lichtbron een laser is, spreekt men over een laser-patroongenerator. Het voordeel hiervan is de veel hogere afbeeldingssnelheid.

Wanneer het basismasker gereed is, kan het worden verkleind tot het eindmasker. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een reproductiecamera. Deze kan een vaste of een variabele reductieverhouding hebben. Een nadeel van een vaste verhouding is dat het basismasker een vaste vergroting van het produkt moet zijn.

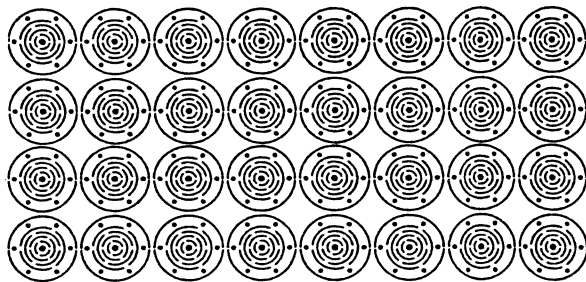
In een vacuümraam wordt het basismasker extreem vlak en exact parallel aan de filmdrager opgesteld, loodrecht op de optische as van de lens. De eisen die hier aan gesteld worden zijn zo hoog dat de afstelling van de verschillende onderdelen alleen met geavanceerde optische meetapparatuur kan gebeuren. Een groot voordeel van de reproductiecamera's met een vaste reductieverhouding is dat ze maar één keer afgesteld hoeven te worden.

Het doorvallende licht van het belichtingssysteem vergroot het contrast van het basismasker. Dit licht moet bij voorkeur monochromatisch zijn, omdat door een verschil in golflengte optische fouten in het systeem kunnen ontstaan. Groen licht is het beste, omdat het oog en de film hiervoor het meest gevoelig zijn. Door belichting en ontwikkeling van de film op de filmhouder wordt het eindmasker gemaakt.

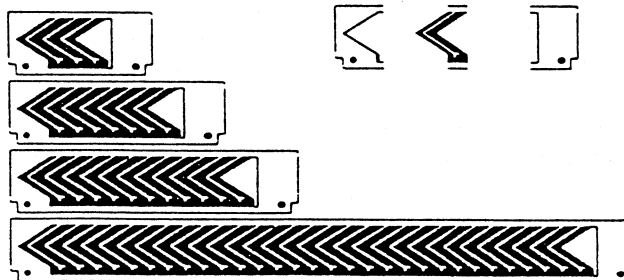


Figuur 17.3: Principe van een reproductiecamera

Wanneer een produkt is opgebouwd uit een patroon dat meerdere keren voorkomt, hoeft slechts van één patroon een basismasker te worden gemaakt. Door de film vaker te belichten en het basismasker tussen het belichten door steeds te verplaatsen kan toch het hele produkt op het eindmasker worden afgebeeld. Op dezelfde manier kunnen er meerdere produkten op het eindmasker worden afgebeeld met behulp van één basismasker (figuur 17.4).



Figuur 17.4: Meerdere produkten op één masker



Figuur 17.5: Een produkt met een terugkomend patroon dat in stappen wordt opgebouwd

Het maken van een masker op ware grootte

Omdat het gebruik van een vergroot basismasker omslachtig is en reductie nieuwe fouten introduceert, worden steeds meer maskers direct op ware grootte geschreven. Dit gebeurt met een elektronenstraal-patroongenerator of met geavanceerde fotoplotters. Hiermee worden patronen met een zeer hoge nauwkeurigheid gemaakt op een glasplaat die met een chroomlaag bedekt is. De extreem hoge resolutie van deze apparaten is mogelijk, doordat de verplaatsingen van de slede continu worden gemeten met behulp van een laserinterferometer. De kosten van deze apparaten lopen in de miljoenen en ze worden dan ook alleen toegepast wanneer dat absoluut noodzakelijk is.

Stap 2: Het aanbrengen van de fotoresistlaag

Het aanbrengen van de fotoresistlaag heeft twee functies. Ten eerste wordt er zo een fotogevoelige laag aangebracht, waardoor het masker op fotografische wijze kan worden overgebracht (in stap 3). Ten tweede heeft de laag een beschermende functie tijdens het bewerken van het materiaal (in stap 4). Voor de eerste functie moet de laag zo dun mogelijk zijn om een goede resolutie te krijgen, terwijl de laag voor de tweede functie zo dik mogelijk zou moeten zijn. De beste laagdikte voor een toepassing is dus de dikst mogelijke, waarbij de fijnste delen van het masker nog fotografisch kunnen worden weergegeven. In het algemeen is de gemiddelde laagdikte bij toepassing van vloeibare fotoresist 2 tot 5 μm en bij toepassing van droge fotoresist 10 tot 50 μm . De droge fotoresist is duurder en wordt alleen gebruikt voor speciale toepassingen.

De fotoresistmaterialen kunnen ook op een andere manier in twee soorten worden verdeeld: de positieve en de negatieve.

Bij de positieve fotoresistlaag worden de belichte delen van de laag, die niet bedekt waren door het fotomasker, weggespoeld. De delen die niet belicht zijn, blijven op het materiaal achter en vormen een fotokopie van het fotomasker. Een voordeel hiervan is dat het gemakkelijker is om een fotomasker te maken, omdat dit hetzelfde is als het te etsen produkt.

Bij de negatieve fotoresistlaag is het juist tegenovergesteld en vormen de delen die wel belicht zijn een kopie van het fotomasker. De chemische samenstelling van de laag verandert tijdens het belichten, waardoor deze harder wordt en het materiaal beter beschermd wordt. Meestal wordt negatieve resist gebruikt.

Het materiaal moet zorgvuldig worden schoongemaakt, voordat de fotoresistlaag er op kan worden overgebracht. Hierbij mag het materiaal niet beschadigd worden. Vet, mineralen en diepe krassen hebben een negatieve invloed op de hechting van de fotoresistlaag. Het dompelen in een licht zuurbad en het aanbrengen van een tussenlaag verbeteren de hechting.

Wanneer het materiaal goed schoon is, kan de fotoresistlaag worden aangebracht. Dit kan op verschillende manieren gebeuren. De eenvoudigste methoden zijn het overgieten en het onderdompelen van het materiaal. Maar hierbij is de laagdikte, die bepalend is voor de haalbare resolutie, nauwelijks te beheersen. Bovendien is een laag die door dompelen is aangebracht bovenaan dunner dan onderaan. Bij het gecontroleerd uithijzen uit een dompelbad bepalen de uithijssnelheid en de viscositeit de dikte.

Een betere beheersing van de laagdikte is te bereiken door middel van walscoating, waarbij de walsdruk de laagdikte bepaalt, en door spraycoating.

Om alle oplosmiddelen uit de resistlaag te verwijderen, wordt deze gebakken. Hierdoor neemt de lichtgevoeligheid sterk toe.

Stap 3: Het overbrengen van het maskerpatroon

Het masker en de fotogevoelig gemaakte plaat worden nu in een vacuüm-raam geplaatst, waarin ze tegen elkaar worden gedrukt. Het geheel wordt belicht met een UV-lichtbron (zie figuur 17.6). De benodigde belichtingstijd moet proefondervindelijk worden vastgesteld. De belichtingstijd (E) is afhankelijk van de dikte (T) van de fotoresistlaag volgens:

$$E = e^{(aT+b)}$$

De constanten a en b kunnen voor iedere toepassing worden bepaald met behulp van een proefstrook.

Na het belichten wordt het materiaal ontwikkeld. Bij het ontwikkelen van de fotoresistlaag worden de belichte of de niet-belichte delen weggespoeld, afhankelijk van of er een negatieve of een positieve fotoresistlaag is gebruikt. Als ontwikkelaar wordt meestal een oplossing gebruikt die speciaal voor een bepaald soort fotoresist is samengesteld. Het is belangrijk dat tijdens het ontwikkelen de juiste temperatuur wordt aangehouden. Bij een te hoge temperatuur wordt de laag die op het materiaal achterblijft poreus.

Om de hechting van de resistlaag te verbeteren en de hardheid te verhogen, wordt het werkstuk na het belichten soms nog nagebakken.

Stap 4: Het bewerken van het materiaal

Het op het materiaal overgebrachte beeld bestaat uit een met fotoresist bedekt gedeelte en een onbedekt gedeelte. Het bewerken van het materiaal kan worden opgedeeld in de afnemende technieken en de opbrengende technieken.

Voorbeelden van *afnemende* technieken zijn het chemisch etsen en het elektro-etsen. Hierbij werkt het fotoresist als een beschermlaag. Het metaal onder de laag wordt dus niet aangetast en de onbedekte delen worden opgelost.

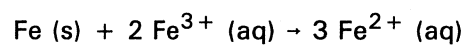
Bij de *opbrengende* technieken, zoals galvaniseren en elektroformer, gebeurt juist het tegenovergestelde. Op plaatsen waar geen fotoresistlaag zit, wordt tijdens deze processen materiaal op het werkstuk aangebracht. Beide technieken zullen hier apart worden behandeld.



Figuur 17.6: Een UV-belichtingseenheid met twee 2 kW-lichtbronnen

Afnemende technieken

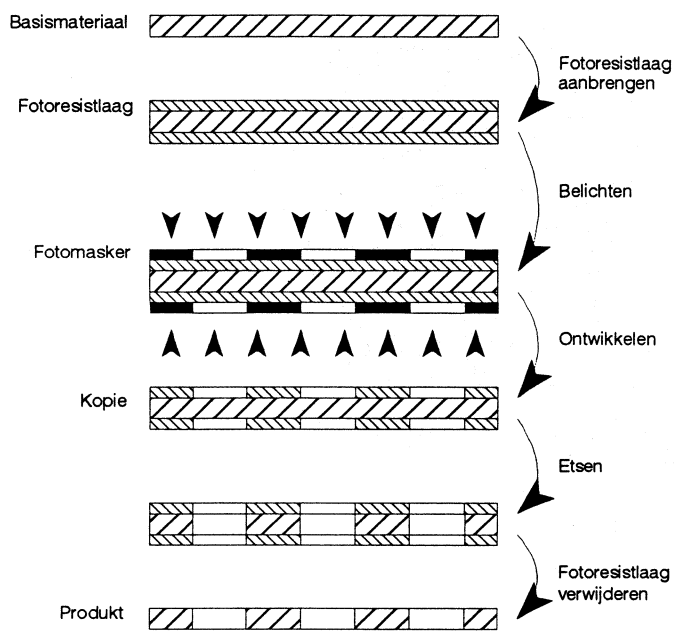
Het etsproces verschilt per materiaal en toepassing, maar vindt meestal plaats in een bad met etsmiddel. Via een redoxreactie lost het onbedekte materiaal op. Dit wordt *chemisch etsen* genoemd. Een van de belangrijkste etsmiddelen is FeCl_3 . Met ijzer reageert dit als volgt:



De reactiesnelheid (en daarmee de etssnelheid) is afhankelijk van de temperatuur van het etsbad en de concentratie van het etsmiddel aan het oppervlak van het werkstuk.

Om de uitwisseling van reactieproducten en verse etsvloeistof te verzekeren, moet de vloeistof in beweging worden gehouden door er in te roeren of er luchtballen in te blazen. Materiaal dat niet geëtst moet worden, zoals de achterkant van het werkstuk, moet goed worden afgedekt.

Na het etsen wordt de resistlaag verwijderd en het materiaal gewassen met water en gedroogd.

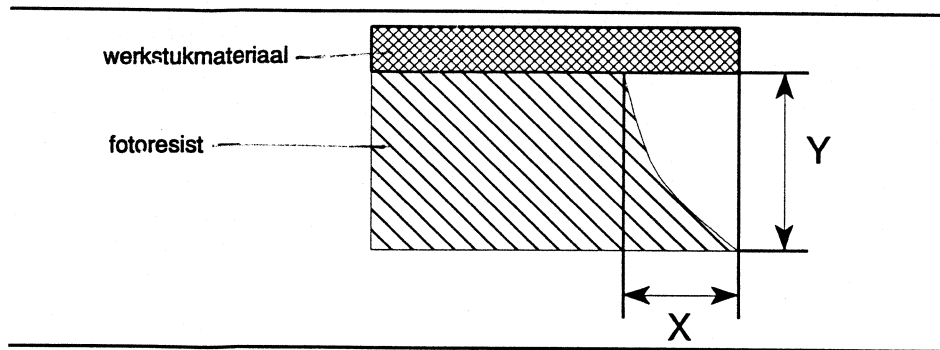


Figuur 17.7: Procesgang van het fotochemisch etsen

De machines waarin het etsproces wordt uitgevoerd zijn meestal gemaakt van kunststoffen zoals PVC. Omdat PVC ontleedt op hogere temperaturen wordt er meestal gewerkt bij een maximum temperatuur van 55 °C. Wanneer er temperaturen hoger dan 55 °C nodig zijn, wordt de machine van titaniumplaat gemaakt, maar dat is erg duur.

Bij materialen die moeilijk chemisch kunnen worden geëtsd, kan het *elektro-etsen* worden toegepast. Hierbij wordt het materiaal in een bak met een goed geleidend maar niet-reactief elektrolyt geplaatst. Het te etsen materiaal wordt als anode (+) aangesloten op een spanningsbron. Een ander materiaal wordt als kathode aangesloten. Er zal nu een ionenstroom door het elektrolyt gaan lopen. Positieve metaalionen verlaten de anode, waardoor het materiaal oplost. De ionen reageren aan de kathode, waarbij meestal een gas wordt gevormd. De maximaal toegestane stroom is afhankelijk van het oppervlak van het werkstuk en de hevigheid van de gasontwikkeling. Wanneer er teveel gasontwikkeling plaatsvindt, kan de resistlaag hierdoor tijdens het proces van het werkstuk losraken.

Een nadeel van het etsproces is het optreden van onderetsing, die kan worden vastgelegd met de etsverhouding y/x (figuur 17.8). De mate van onderetsing is afhankelijk van de etstijd, de aanwezigheid van een tussenlaag en de diepte van de etsgroef. De onderetsing zal door anisotropie van het materiaal niet in alle richtingen even groot zijn. Door middel van sproei-etsen met een etsvloeistof, die is verwarmd tot ongeveer 70 °C, wordt de etstijd verkort en verbeteren de resultaten.

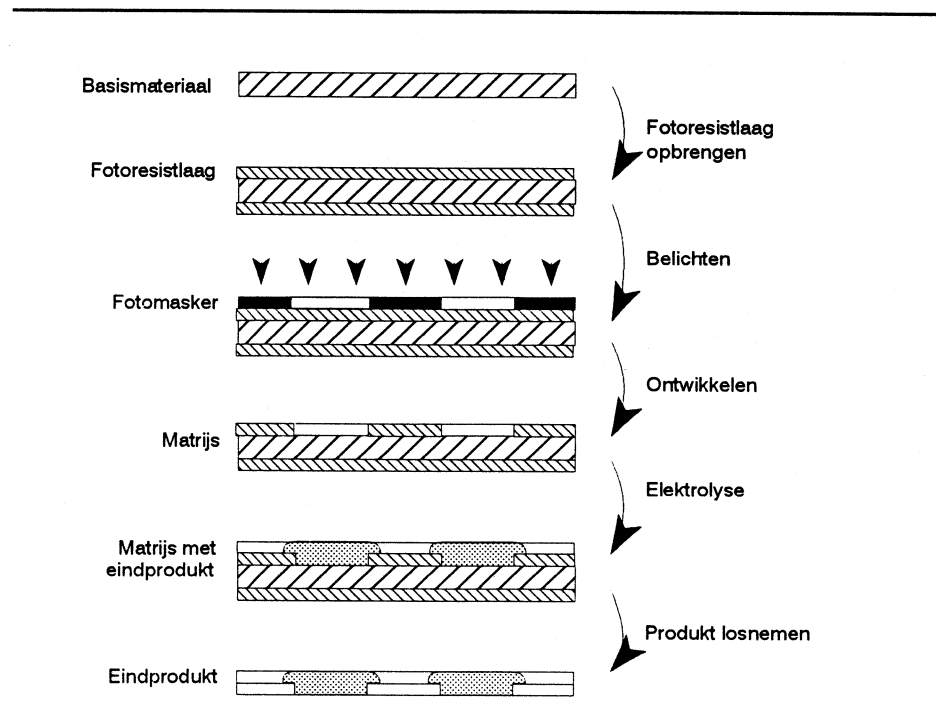


Figuur 17.8: Onderetsing met de etsverhouding y/x

Opbrengende technieken

Bij het elektroformeren gebeurt het tegenovergestelde van het elektroetsen. Door de polen in de elektro-etscel om te draaien, zullen de positieve ionen nu naar het werkstuk stromen en zich vastzetten op het onbedekte deel van het basismateriaal.

De dikte van de afgezette laag is afhankelijk van het soort materiaal dat wordt opgebracht, de grootte van het onbedekte oppervlak, de stroomsterkte en de tijd. Door gebruik te maken van bepaalde ondergrondmaterialen die slecht aan het opgebrachte materiaal hechten, kan men de geëlektroformeerde laag loshalen van de ondergrond en zelfstandig gebruiken. Materialen als staal en koper zijn geschikt als ondergrond bij het aanbrengen van lagen chroom, nikkel of roestvrijstaal.



Figuur 17.9: Procesgang van het elektroformeren

17.3 VOOR- EN NADELEN

Voordelen

De fotochemische bewerkingstechnieken hebben een aantal voordelen die deze technieken zeer populair maken. Omdat het proces niet produktgebonden is en de complexiteit van het te vervaardigen produkt niet van invloed is op de procesgang kan er zeer snel (in twee tot vijf dagen) tot produktie gekomen worden. Dit voordeel is van doorslaggevend belang bij het vervaardigen van onderdelen van produkten die in de ontwikkelingsfase zijn. Door het gebruik van prototypen kunnen hier veel produktwijzigingen voorkomen worden. Verder is het produkt na de bewerking braamvrij zodat er weinig tot geen nabewerkingen nodig zijn.

Na aanschaf van de benodigde apparatuur zijn de produktiekosten laag, zelfs al wordt het ontwerp enige malen gewijzigd. Dit in tegenstelling tot stampen, waarbij het vervaardigen van het stempel relatief duur is en het stempel bij een ontwerpwijziging geen waarde meer heeft. Het fotochemische bewerken is dus goedkoop en flexibel.

Bij een goede beheersing van het proces is er een grote reproduceerbaarheid mogelijk. Het eerste en het laatste vervaardigde produkt zijn identiek door het ontbreken van gereedschapslijtage tijdens het proces. Ook kunnen er meerdere identieke produkten in één batch worden gemaakt.

Bij de fotochemische bewerkingen zijn kleine toleranties mogelijk en er treden weinig tot geen ongewenste vervormingen op. Hierdoor is de methode uitermate geschikt voor het vervaardigen van precisie-onderdelen.

Nadelen

De fotochemische bewerkingsmethoden hebben ook nadelen. Bij grotere series wordt het stampen economisch meer aantrekkelijk, hoewel de flexibiliteit hierbij kleiner is. Bij sommige toepassingen worden de fotochemische bewerkingen uitgevoerd, omdat er geen alternatief is. In dat geval moet het langzaam verlopen van het proces op de koop toe worden genomen.

Alle verontreinigingen en oppervlaktefouten moeten van het materiaal verwijderd worden, omdat ze ongelijke etssnelheden veroorzaken, waardoor ze versterkt zijn terug te vinden in het oppervlak. Dit betekent dat er schoon en precies moet worden gewerkt in geconditioneerde ruimten, wat weer extra kosten met zich meebrengt.

Door onderetsing zijn de toleranties in het plaatoppervlak moeilijker aan te houden dan in de diepterichting. Hiermee moet bij het ontwerpen rekening worden gehouden.

Er kunnen alleen goede produkten vervaardigd worden wanneer het proces goed beheerst wordt, omdat het zo complex is. Doordat de procesparameters niet van te voren te bepalen zijn, moet er eerst een aantal produkten gemaakt worden om met behulp van de resultaten het proces bij te stellen. Hierdoor is het proces duur voor kleine aantallen precisieprodukten.

17.4 ONTWERPRICHTLIJNEN

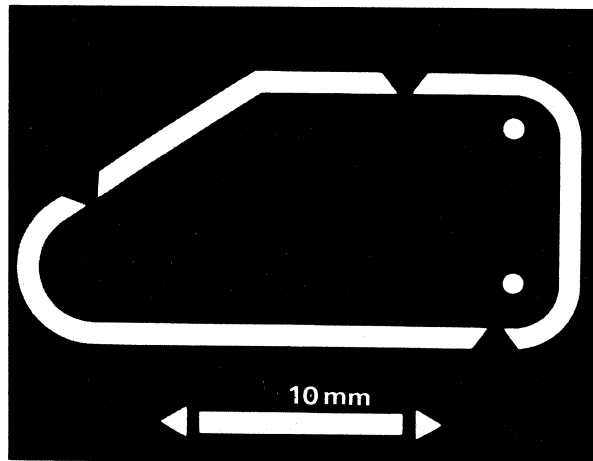
Aanpassing van het maskerontwerp

Bij het ontwerpen moet rekening worden gehouden met de onderetsing die tijdens het etsen optreedt. Hiervoor is het nodig dat de dimensies van het fotomasker worden aangepast, zodat het produkt dat gemaakt wordt, voldoet aan de specificaties. Op alle maten moet een ets-compensatie

worden toegevoegd, die afhankelijk is van het gebruikte materiaal, de materiaaldikte en het etsmiddel. Deze ets-compensatie wordt meestal geschat op basis van de dikte van het materiaal en ervaring die men heeft opgedaan bij eerdere toepassingen.

Het is belangrijk dat de etssnelheden van verschillende delen van het produkt zoveel mogelijk aan elkaar gelijk zijn. Omdat de etssnelheid afhankelijk is van de lijndikte, werkt men bij de vervaardiging van het fotomasker zoveel mogelijk met één lijndikte, de *etsbandbreedte*. De etsbandbreedte is gelijk aan of kleiner dan het kleinste onderdeel van het produkt. Wanneer het kleinste onderdeel groter is dan 1 mm wordt voor de etsbandbreedte meestal 0,8 mm genomen.

Om te voorkomen dat de werkstukken tijdens het etsen losraken van de metaalplaat en kwijtraken in het reservoir van de etsmachine en om te voorkomen dat complexe werkstukken in de war raken bij het verwijderen van de resistlaag, worden de werkstukken meestal aan de plaat vastgemaakt met behulp van driehoekjes waarvan de top aan het werkstuk vastzit. De top heeft een breedte van ongeveer 0,1 mm, zodat het werkstuk later eenvoudig uit de grote plaat kan worden gehaald. Een voorbeeld van een ontwerp met een etsband en contacthoekjes is te zien in figuur 17.10.



Figuur 17.10: Fotomasker met etsband en contacthoekjes

Materialen

Een grote hoeveelheid metalen en legeringen kan worden geëtsd, maar de resultaten zijn niet altijd even goed. Geschikte materialen voor het etsen zijn koper en koperlegeringen, nikkellegeringen, verschillende staalsoorten, molybdeen, vitrovac (een amorf materiaal dat gebruikt wordt voor magnetische opnamekoppen), aluminium, zilver en silicium.

Geschikte materialen voor het elektroformer zijn nikkel, koper, goud en zilver.

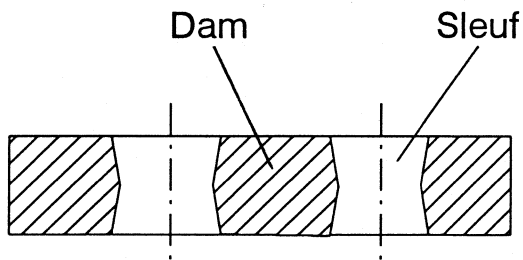
Materiaaldikte

De maximale dikte die geëtsd kan worden is afhankelijk van het materiaal en de toepassing. Hoewel 6 mm dik koper en 3 mm dik roestvrij staal succesvol kunnen worden geëtsd, wordt voor metalen meestal een maximale dikte van 1,5 mm aangehouden.

Afmetingen

De afmetingen van het produkt zijn beperkt door het etsbad en niet door de mogelijkheden van de fotografische apparatuur. Het produkt kan namelijk in meerdere stappen worden belicht. De grootste etsbaden hebben een breedte van 1000 mm.

Het proces stelt ook beperkingen aan de minimale afmetingen van het produkt. Voorbeelden zijn de sleuven en de dam in figuur 17.11. Voor de breedte van de smalste door middel van etsen te vervaardigen sleuf en dam moet ongeveer 1,1 maal de plaatdikte worden aangehouden.



Figuur 17.11: Schematische voorstelling van sleuven en een dam

Ook de minimale gatdiameter is afhankelijk van de dikte van de te bewerken plaat. Deze relatie is aangegeven in figuur 17.12.

Materiaaldikte t (μm)	Minimale gatdiameter
< 25	afhankelijk van condities
25 - 125	$\geq t$
> 125	$1,1 \cdot t - 2,0 \cdot t$

Figuur 17.12: Relatie tussen materiaaldikte en minimale gatdiameter

Toleranties

De minimaal haalbare toleranties van geëtste gaten en spleten zijn afhankelijk van de materiaaldikte. Uit figuur 17.13 blijkt dat bij het etsen van dunnere plaat een kleinere tolerantie haalbaar is. Doordat de onderetsing niet in alle richtingen even groot is ten gevolge van de anisotropie van het materiaal, zullen de haalbare toleranties niet in alle richtingen gelijk zijn.

Materiaaldikte (μm)	Minimale tolerantie (μm)
20	10
50	10
125	15
250	20
500	40
1000	80

Figuur 17.13: Minimale toleranties bij het etsen van verschillende materiaaldiktes

Bij het elektroformerem is de minimaal haalbare tolerantie nauwelijks afhankelijk van de materiaaldikte, maar vooral van de vergrotingsmogelijkheden van het fotografisch proces.

Afrondingen

Voor inwendige hoeken moet de afronding minimaal gelijk zijn aan de plaatdikte. Voor uitwendige hoeken is de kleinst toegestane afronding 0,75 maal de plaatdikte.

17.5 KOSTPRIJS

De kosten van het produkt worden bij fabricage in kleine series voor een groot deel bepaald door de vervaardigingskosten van het fotomasker. Deze kosten variëren met de complexiteit van het produkt. De kosten van het masker zijn voor etsen en elektroformerem gelijk en bedragen 100 tot 1000 gulden. De produktiekosten lopen uiteen van f 0,01 tot f 1,00 per cm². De kosten zijn afhankelijk van de nauwkeurigheid en de kwaliteitseisen van het produkt.

De rente en afschrijving van een volledig uitgeruste en op temperatuur en vochtigheid geconditioneerde doka en etsruimte vormen een belangrijk deel van de produktiekosten.

LITERATUUR

Allen, D.M.

The principles and practice of photochemical machining and photoetching

Adam Hilger - IOP Publishing Ltd., Bristol, 1986.

Taal, A.J., P.F. Wentges, B.Ch. Ledeboer, R. Welschen en S.G.A. Derlox
Fotochemische metaalbewerking

Scriptie io69 - Technologie van de massafabricage
Technische Universiteit Delft, 1994.

Hoofdstuk 18: HET BUIGEN VAN PLAAT

18.1 INLEIDING

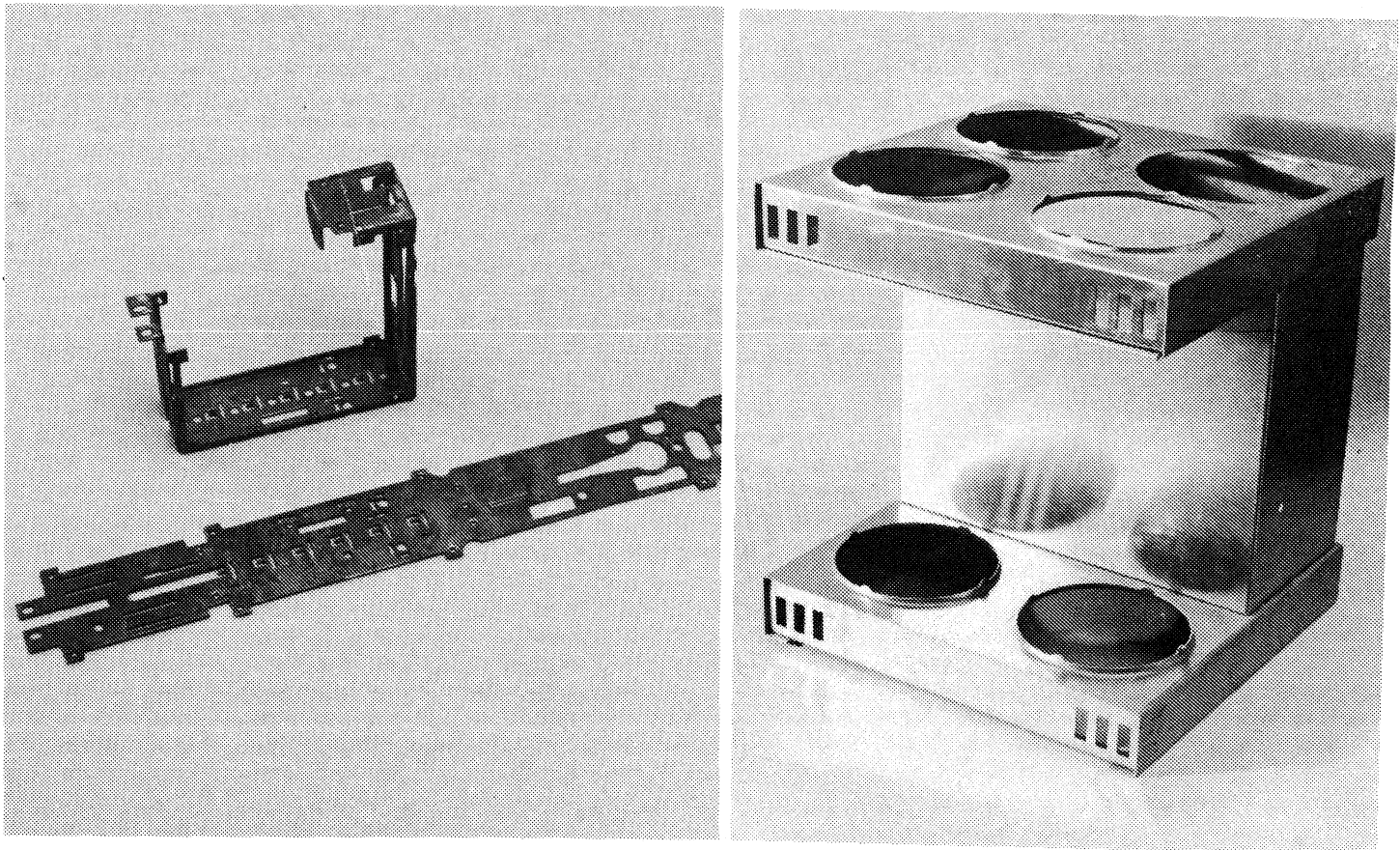
Het buigen is een veel toegepaste koudvormings-technologie, waarmee een halffabrikaat is om te vormen tot een drie-dimensionale vorm. Het buigen wordt op een pers uitgevoerd met behulp van een buigstempel.

Toepassingen

Het proces is toepasbaar voor alle plastisch te deformerende materialen. Het kan gebruikt worden voor enkelstuks tot massafabricage.

De grootte van de werkstukken kan variëren van enkele millimeters tot enkele meters.

Het proces wordt toegepast voor plaat, draad, buis, staf en profielen. In dit hoofdstuk zal echter alleen het buigen van plaatmateriaal behandeld worden. Hieronder vallen plaat en strip, waarbij men van strip spreekt als de breedte minder dan 10 maal de materiaaldikte bedraagt.



Figuur 18.1: Enkele producten die (grotendeels) gebogen zijn

Het buigen van plaat wordt toegepast voor het vervaardigen van een breed scala aan produkten, van eenvoudige beugels en profielen, onderdelen van nietmachines en perforators, penneclipsen, zaklampen, keukenkastscharnieren, tot zeer ingewikkelde doos-constructies, zoals bijvoorbeeld kantoormeubilair, behuizingen voor audio-apparatuur en wasmachines (figuur 18.1).

Enkele voorbeelden van produkten die uit andere halffabrikaten zijn gebogen:

Draad en staf:

paperclips, schroefveren, boodschappenwagens en bagagedragers (ATB's);

Buis: fietssturen en -frames (Sparta), stoelonderstellen, meubels, bagagedragers, skelterframes;

Profiel : imbus-sleutels, fietswielvelgen, tafelranden.

Materialen

De meeste goed vervormbare materialen kunnen gebogen worden.

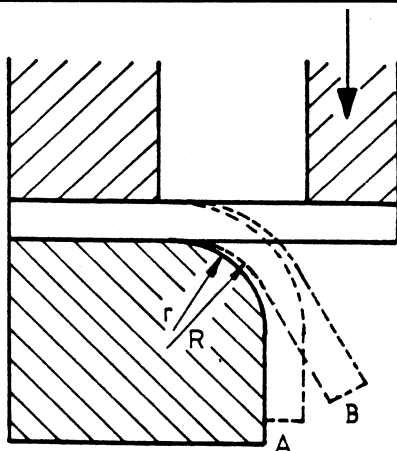
Het materiaal moet plastisch gedeformeerd kunnen worden en moet dus in een trekproef een plastische rek laten zien. Verder dient de elastische vervorming slechts een klein deel van de totale vervorming te zijn. Spreiding in de mechanische eigenschappen van het uitgangsmateriaal leidt veelal tot spreiding in het buigresultaat.

18.2 HET BUIGPROCES

Principe van het buigen

We beschouwen het buigen van een plaat (figuur 18.2). Tijdens het proces wordt een moment aangebracht op de te vervormen plaat. De spanningen die hierbij in de plaat ontstaan, moeten boven de vloeigrens van het materiaal uitkomen om een blijvende vervorming te bereiken.

De belasting wordt weggenomen wanneer de gewenste vorm van het werkstuk is bereikt. Er blijven restspanningen in het materiaal aanwezig.



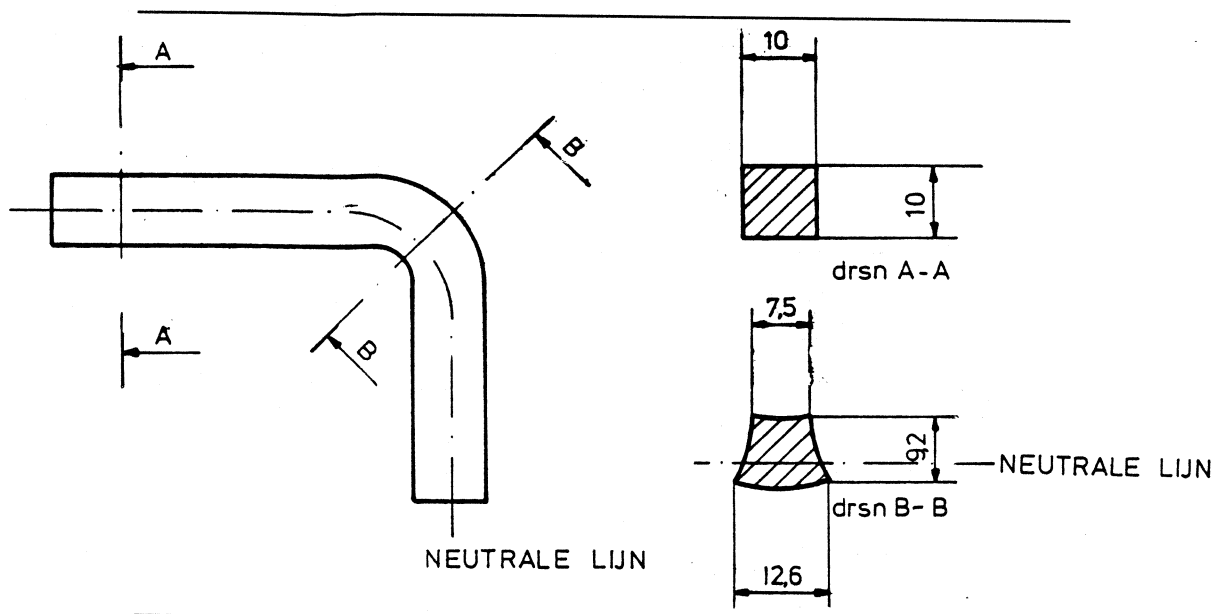
Figuur 18.2: Principe van het buigen.

In het materiaal is een lijn aan te wijzen waar geen vervorming plaatsvindt. Deze *neutrale lijn* loopt door de dwarsdoorsnede en zal voor geringe vervorming in het zwaartepunt van de doorsnede liggen.

Door het buigen worden de vezels aan de buitenzijde van de bocht gerekt en

aan de binnenzijde gestuikt. Bij een kleine buigradius zal hierdoor de dwarsdoorsnede van vorm veranderen. De neutrale lijn verschuift naar de binnenbocht toe (figuur 18.3). Voor scherpe bochten kan deze op $\frac{1}{4}$ afstand van de binnenkant komen te liggen.

Bij smalle en dikke strips zal de vervorming door het buigen duidelijk te zien zijn (figuur 18.4).



Figuur 18.3: Verplaatsing van de neutrale lijn (links)

Figuur 18.4: Vervorming van de zijkant in een bocht (rechts)

De spanning- en rekverdeling tijdens zuiver buigen

In figuur 18.5 zijn enkele stadia van het buigen te zien.

Bij geringe buiging zijn de vervormingen klein en geldt de wet van Hooke. De spanningen verlopen dus lineair in de doorsnede, evenals de rek. De vervormingen zijn elastisch en verdwijnen volledig als nu de kracht weggenomen zou worden.

Wanneer de vervormingen groter worden zal ook plastische deformatie gaan optreden. Deze begint in de buitenste vezels en schuift naar het midden toe. De wet van Hooke is in dit gebied niet meer van toepassing.

Tijdens het vervormen wordt een inwendig moment opgebouwd, dat gelijk is aan het uitwendig aangebrachte moment. Wanneer de buigkracht wordt weggenomen, zal het uitwendig moment wegvallen. Het inwendig moment moet dan gelijk aan 0 worden om evenwicht te krijgen. Er ontstaat een spanningsverdeling zoals die te zien is in figuur 18.5b. Deze spanningsverdeling blijft aanwezig in het produkt.

Voor de elastische zone ($-pd < x < pd$) geldt:

$$\sigma_z = \Delta_z \cdot E \quad (1)$$

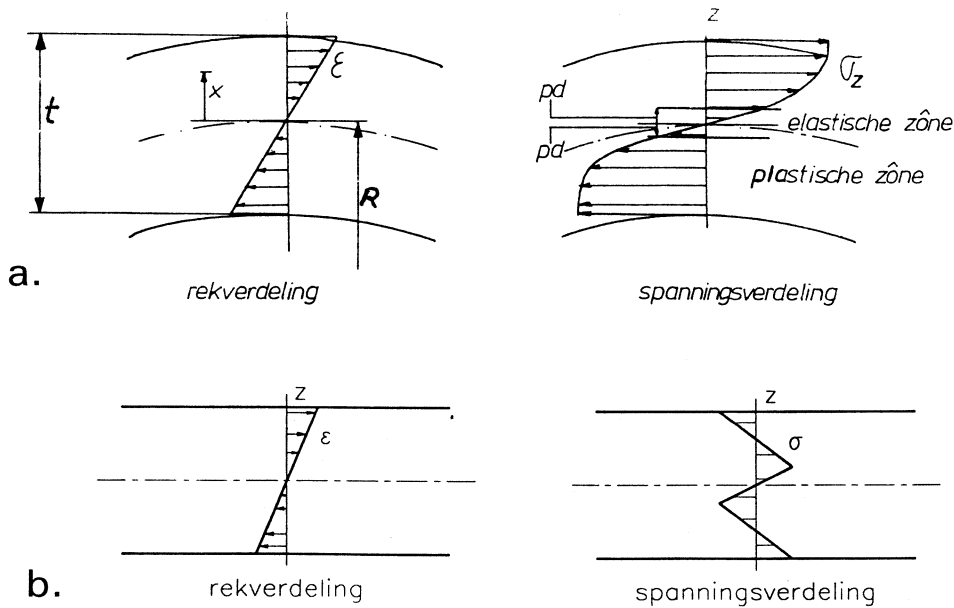
$$\Delta_z = \frac{x}{R} \quad (2)$$

uit (1) en (2) volgt:

$$\delta_z = \frac{x \cdot E}{R}$$

Waarin:

- σ_z : spanning op hoogte x vanaf de neutrale lijn (N/mm²)
- Δ_z : rek op hoogte x vanaf de neutrale lijn
- E : elasticiteitsmodulus (N/mm²)
- R : Straal tot de neutrale lijn (mm)
- t : Materiaaldikte (mm)
- x : Afstand van de neutrale lijn (mm)



Figuur 18.5: (a) Rek en buigspanning tijdens het buigen; (b) Blijvende rek en spanningen na het wegnemen van de buigkracht

$$\sigma_z = C (\ln(1 + \Delta_z))^n$$

Voor de plastische zone ($-\frac{1}{2}t < x < -pd$ en $pd < x < \frac{1}{2}t$) geldt: Waarin:

- C : Materiaalconstante (N/mm²)
- n : verstevigingsexponent

Terugvering

De vervorming is voor een gedeelte plastisch en voor een gedeelte elastisch. Hierdoor zal bij het ontlasten van het werkstuk terugvering optreden (figuur 18.6).

Bij vroeger theoretisch onderzoek ging men uit van een ideaal plastisch materiaal. De hoek γ die ontstaat na terugvering van het materiaal, kan berekend worden met:

$$\gamma = 180^\circ - (180^\circ - \theta)(1 - 3p + 4p^3)$$

Voor plaat en draad geldt:

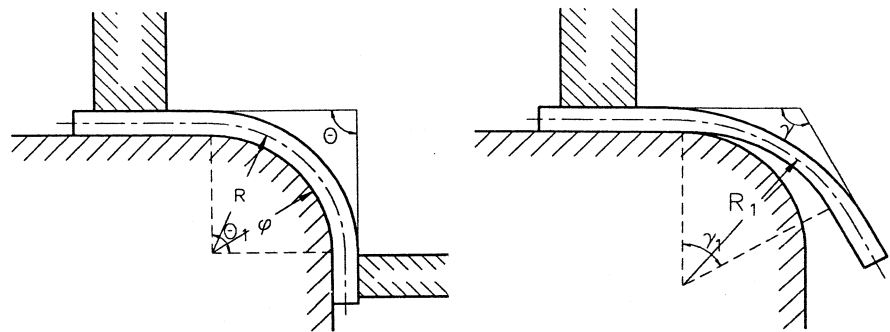
$$p = \left(\frac{\rho}{t} + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\sigma_{tmax}}{E}$$

Voor strip:

$$p \approx \left(\frac{\rho}{t} + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\sigma_{tmax}}{E}$$

Waarin:

- γ : hoek na terugvering
- θ : hoek van het gereedschap
- ρ : straal van het gereedschap (mm)
- t : materiaaldikte (mm)
- σ_{tmax} : treksterkte (N/mm²)
- E : elasticiteitsmodulus (N/mm²)



Figuur 18.6: Terugvering

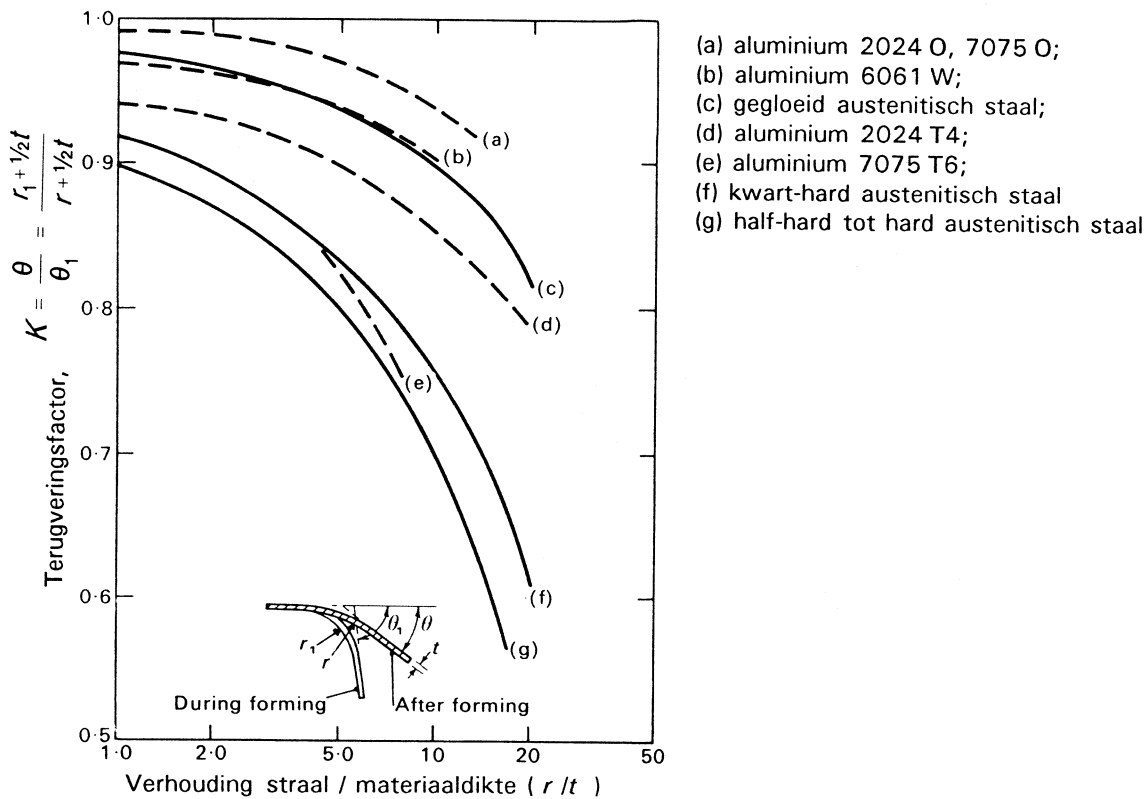
De terugvering en de verandering van de buigradius voor verstevigend materiaal zijn bij benadering te bepalen met de terugveringsfactor K :

$$K = \frac{\theta}{\theta_1} = \frac{r_1 + \frac{1}{2}t}{r + \frac{1}{2}t}$$

Waarin:

- r_1 en r : de straal vóór en na het wegnemen van de buigkracht
- θ_1 en θ : de hoek voor en na het wegnemen van de buigkracht

De waarde van K wordt voor enkele veel voorkomende materialen gegeven in figuur 18.7.



Figuur 18.7: K-waarde voor enkele materialen

Invloed van de materiaalschappen en de geometrie op de terugvering

In figuur 18.8 zijn de variabelen gegeven die invloed hebben op de terugvering.

Variabele	Variabele wordt:	Terugvering wordt:
Buigradius (ρ)	groter	meer
Materiaaldikte (t)	groter	minder
Elasticiteitsmodulus (E)	groter	minder
Vloeispanning (σ_v)	groter	meer
Verstevigingsexponent (n)	groter	meer
Voordeformatie (ε_0)	groter	meer
Materiaalconstante ©	groter	meer

Figuur 18.8: Invloed van de toename van de variabelen op de terugvering

Compensatie van de terugvering

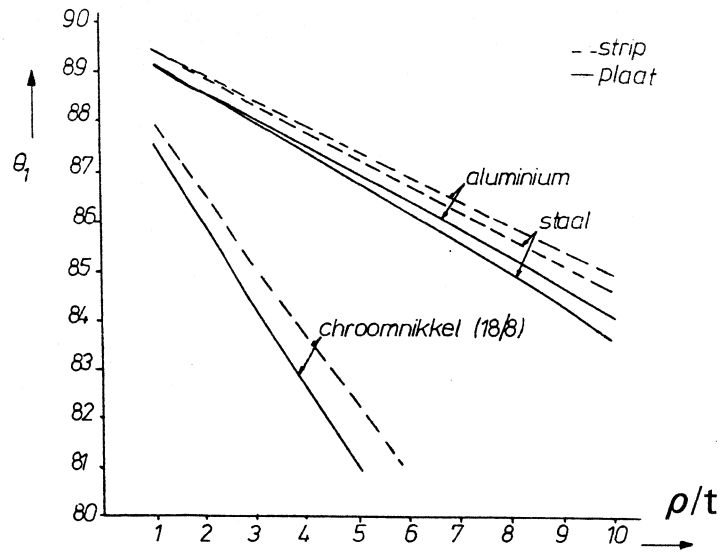
Er zijn een aantal methoden om de terugvering te compenseren:

- Verder doorbuigen;
- Het aanbrengen van een trekspanning tijdens het buigen;
- Een kleinere buigradius nemen.

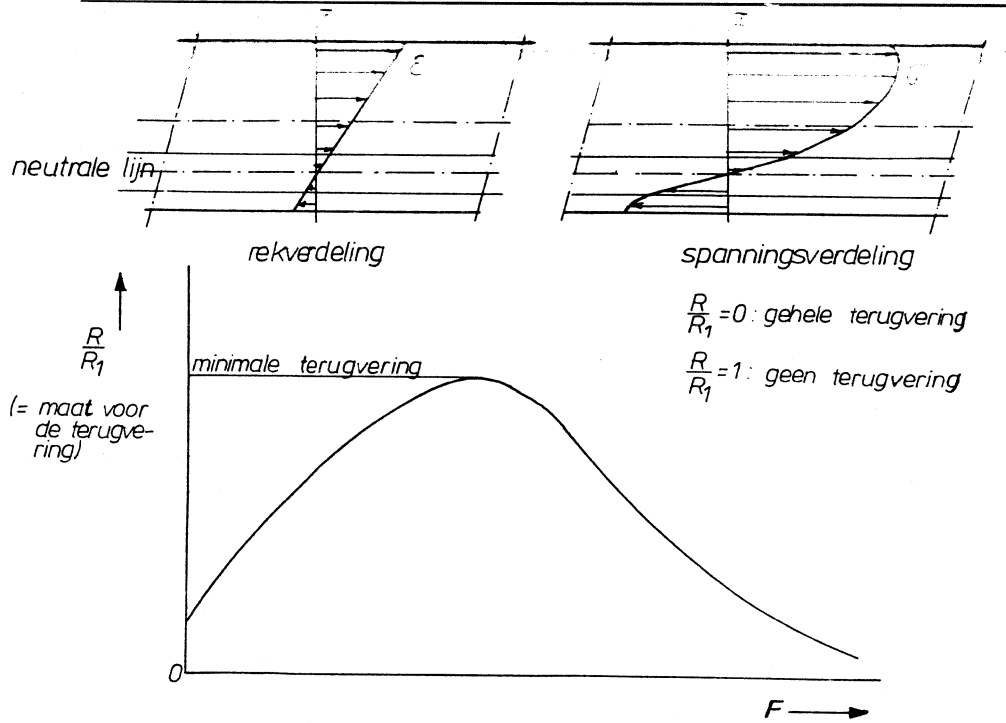
Verder doorbuigen

Men kan de een paar graden te ver doorbuigen. Wanneer het werkstuk uit de buigmatrijs wordt genomen, zal het iets terugveren, zodat de gewenste hoek ontstaat. In figuur 18.9 is voor een aantal materialen de benodigde

gereedschapshoek uitgezet om een hoek van 90° te verkrijgen.



Figuur 18.9: Benodigde gereedschapshoek θ_1 , om na ontlasting een hoek van 90° te krijgen



Figuur 18.10 (boven): Rek en spanningsverdeling bij het buigen met een extra trekkkracht

Figuur 18.11 (onder): Terugvering als functie van de trekkkracht

Buigen met een extra trekkkracht

Wanneer men buigt terwijl er een trekkkracht aanwezig is, zal de terugvering kleiner zijn. Door deze trekkkracht worden de spanningen in het materiaal hoger en is het aandeel elastische vervorming in de totale vervorming dus kleiner. De neutrale lijn verplaatst zich naar de binnenbocht, waardoor het plastisch vervormde gebied vrijwel geheel aan de buitenkant komt te liggen (figuur 18.10). In figuur 18.11 is de terugvering uitgezet als functie van de

trekkracht.

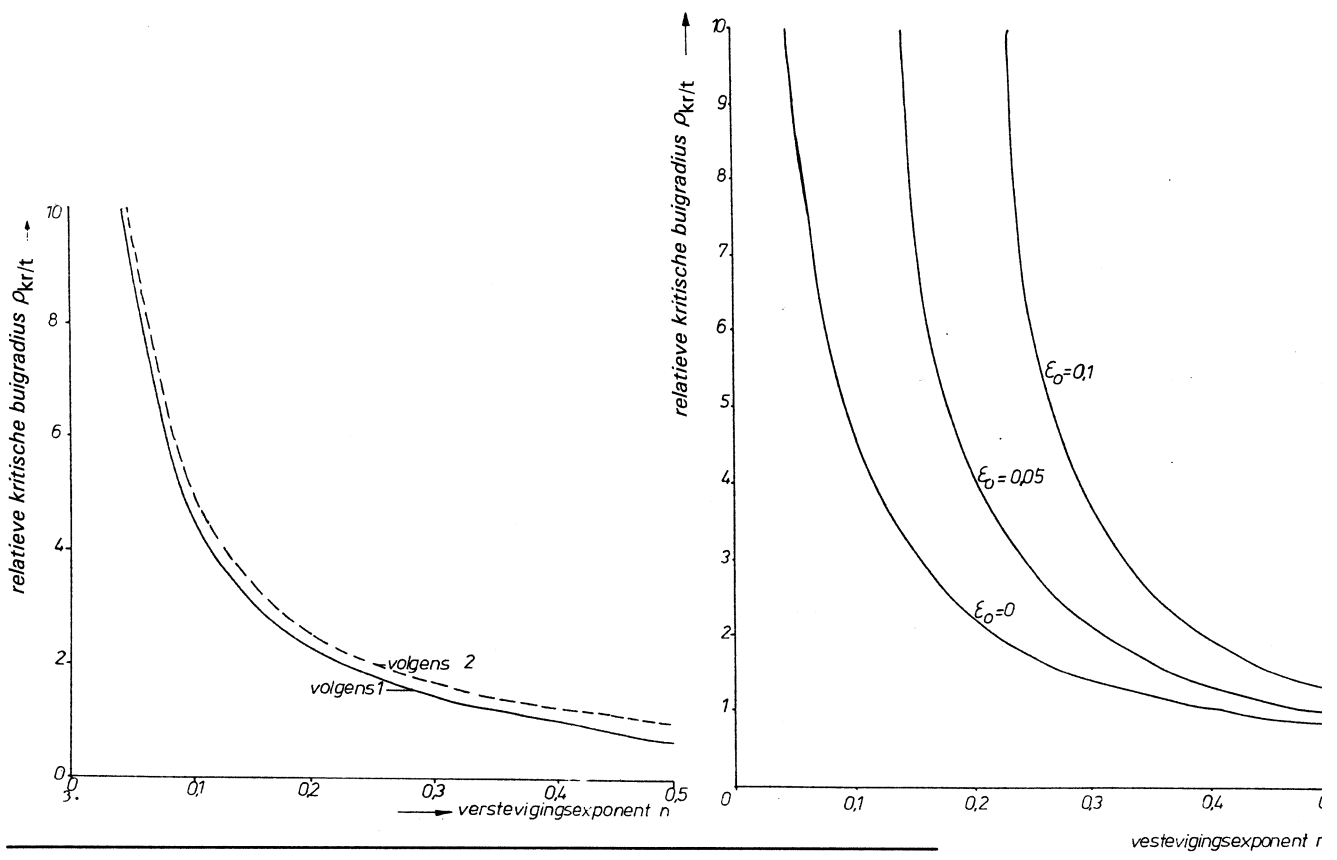
Buigen met een kleine buigradius

De terugvering kan verminderd worden door de buigradius kleiner te nemen. Deze kan echter niet onbeperkt klein genomen worden, omdat dan de maximum toelaatbare spanning overschreden wordt.

Kritisch buigen

Het zodanig buigen dat de spanning, waarbij in een trekproef de insnoering begint, net niet gehaald wordt, heet *kritisch buigen*.

Bij buigingen over een kleinere radius dan de kritische radius ontstaat de zogenaamde sinaasappelheid. Het produkt krijgt hierdoor een slecht uiterlijk en het risico van corrosie wordt vergroot. Wanneer de grens van het kritisch buigen ver wordt overschreden ontstaan scheuren en uiteindelijk breuk.



Figuur 18.12 (links): De relatieve kritische buigradius volgens de twee formules

Figuur 18.13 (rechts): De relatieve kritische buigradius als functie van n , voor verschillende voordeformaties

De kritische buigradius voor plaatmateriaal kan bepaald worden met de volgende formule:

$$\frac{\rho_{kr}}{t} = \frac{1}{2(e^{(n - \epsilon_0\sqrt{3})} - 1)} \quad (1)$$

Waarin:

ρ_{kr} : kritische buigradius (mm)

t : materiaaldikte (mm)
 n : verstevigingsexponent
 ε_0 : voordeformatie

De formule kan vereenvoudigd worden tot:

$$\frac{\rho_{kr}}{t} = \frac{1}{2n} \quad (2)$$

Hiervoor wordt aangenomen dat:

$$\varepsilon_0 = 0$$

$$e^x \approx 1 + x$$

In figuur 18.12 zijn deze twee formules voor verschillende waarden van de waarden van de verstevigingsexponent getekend. Wanneer er geen voordeformatie is, verschillen deze formules niet veel. Anders wordt het wanneer er wel voordeformatie is, bijvoorbeeld door koudgewalste plaat te gebruiken (figuur 18.13). De kritische buigradius wordt groter bij een grotere voordeformatie.

In de figuur 18.14 zijn richtlijnen gegeven voor de kritische buigradius bij een aantal materialen.

Materiaal	Kwaliteit	
	Geen voordeformatie	Voordeformatie
Aluminiumlegeringen	0	6·t
Koper	0	4·t
Messing	0	2·t
RVS	0,5·t	6·t
Laaggelegeerd koolstofstaal	0,5·t	4·t
Titanium	0,7·t	3·t

Figuur 18.14: De minimale buigradius in verhouding tot de plaatdikte. Een waarde 0 houdt in dat het materiaal dubbelgevouwen kan worden.

Walsrichting

Bij gewalst plaatmateriaal doen zich evenwijdig aan en loodrecht op de walsrichting grote verschillen voor in de materiaaleigenschappen. Men noemt dit verschijnsel anisotropie. In koudgewalste plaat is de anisotropie groter dan in warmgewalst materiaal. Paralel aan de walsrichting zal de kritische buigradius groter zijn dan loodrecht hierop.

Berekening van de perskracht

In deze paragraaf worden een aantal formules gegeven voor het berekenen van de benodigde perskracht. Het zijn empirische formules die geen exactheid geven, maar wel geschikt zijn voor een snelle schatting.

De verschillende buigmethoden die hier genoemd zijn, worden in de volgende paragraaf behandeld.

Voor het buigen in een V-vormige matrijs, zonder dat het materiaal onder in de vorm extra wordt samengedrukt, geldt:

$$P_v = \frac{1,2 b \cdot t^2 \sigma_{tmax}}{w}$$

Waarin:

- P : de buigkracht voor een V-matrijs (N)
- b : de breedte van het materiaal (mm)
- t : de plaatdikte (mm)
- σ_{tmax} : de treksterkte van het materiaal (N/mm²)
- w : grootte van de matrijsopening (figuur 18.16) (mm)

Wanneer aan het einde van de persslag wel wordt samengedrukt, wordt met ongeveer 3 x deze kracht gerekend:

$$P' = 3 \cdot P_v$$

Bij het U-buigen zonder drukkussen, waarbij een iets gebolde bodem ontstaat, is de perskracht:

$$P = 0,4 t \cdot b \cdot \sigma_{tmax}$$

De tegenwerkende kracht van het drukkussen is ongeveer 1/4 van de buigkracht, dus de totale buigkracht bij gebruik van een uitwerper wordt:

$$P' = 1\frac{1}{4} P = 0,5 t \cdot b \cdot \sigma_{tmax}$$

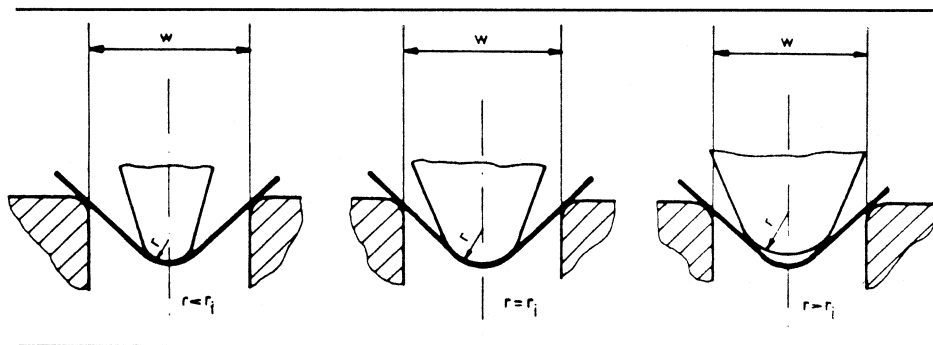
Voor het afbuigen van een lip geldt:

$$P = 0,2 t \cdot b \cdot \sigma_{tmax}$$

18.3 BUIGMETHODEN

Vrij buigen

De eenvoudigste methode om het materiaal in vorm te brengen is het *vrij buigen* (figuur 18.15). Hierbij wordt het te vervormen materiaal op twee opleggingen geplaatst en door een stempel gebogen. Deze methode is niet erg nauwkeurig en er ontstaat een grote buigradius.



Figuur 18.15: vrij buigen van plaat

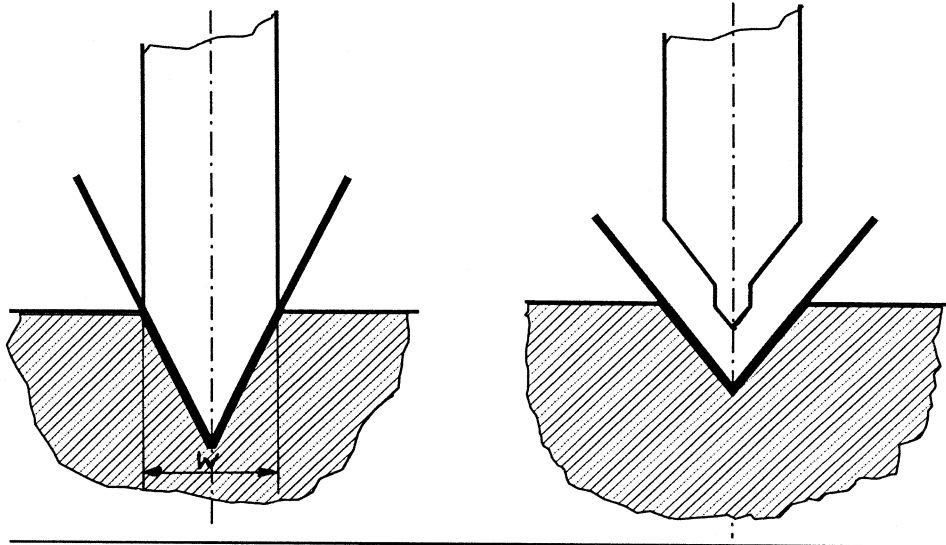
De afronding en de hoek aan het product zijn afhankelijk van veel factoren, waaronder plaatdikte, materiaal, stempelafronding en hoogte van het indrukken. Hierdoor kan de radius aan het werkstuk anders zijn dan de radius aan de stempel.

Omdat de afronding groot blijft in verhouding tot de plaatdikte zal een groot

deel van de vervorming elastisch zijn en voor een behoorlijke terugvering zorgen.

Zadelbuigen

Een nauwkeuriger methode voor het buigen van een hoek is het *zadel-* of *V-buigen* (figuur 18.16). Het materiaal wordt met behulp van een stempel in de vorm van het zadel gedrukt.



Figuur 18.16 (links): Het zadelbuigen

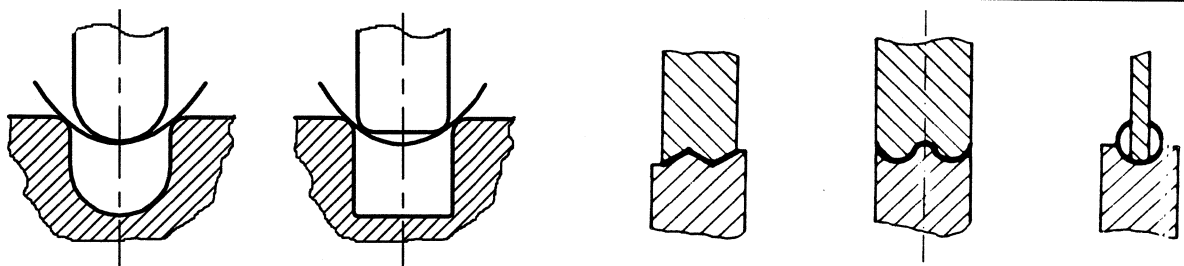
Figuur 18.17 (rechts): Zadelbuigen met verhoogde druk in de buigzone

Bij deze methode wordt de terugvering vaak verkleind door verhoogde druk in de buigzone aan te brengen. Hiervoor zit een extra punt aan het stempel (figuur 18.17): de druk wordt aan het eind van de persslag door de punt overgebracht op de buigzone, in plaats van door het hele oppervlak van de V-vorm.

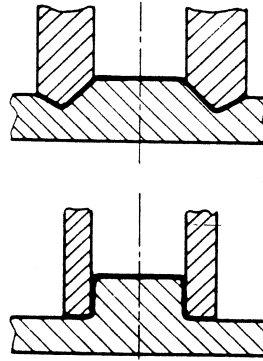
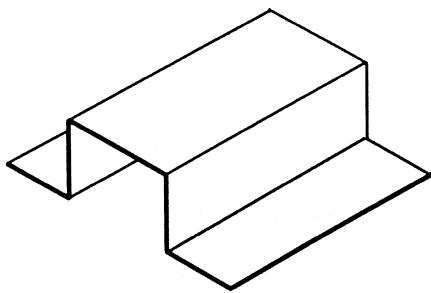
Matrijsbuigen

Voor het buigen van meerdere hoeken of afrondingen kan het *matrijsbuigen* (figuur 18.18) toegepast worden. Het werkstuk wordt ingesloten tussen stempel en matrijs, die een op elkaar passende vorm hebben.

Deze methode kan gebruikt worden voor het buigen van U- of Z-vormige delen, of voor het buigen van bijvoorbeeld cilindrische delen of gesloten profielen in twee of drie bewerkingen. Omdat de pers slechts één bewegingsrichting heeft, zal een produkt als in figuur 18.19 in twee stappen moeten worden gemaakt.



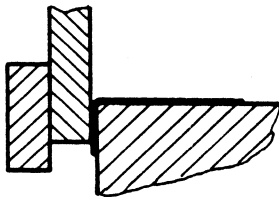
Figuur 18.18: Matrijsbuigen (U-buigen, Z-buigen en rondbuigen in twee bewerkingen)



Figuur 18.19.a: Een produkt met vier buigingen, b en c: de stappen om het produkt te vormen.

Af buigen

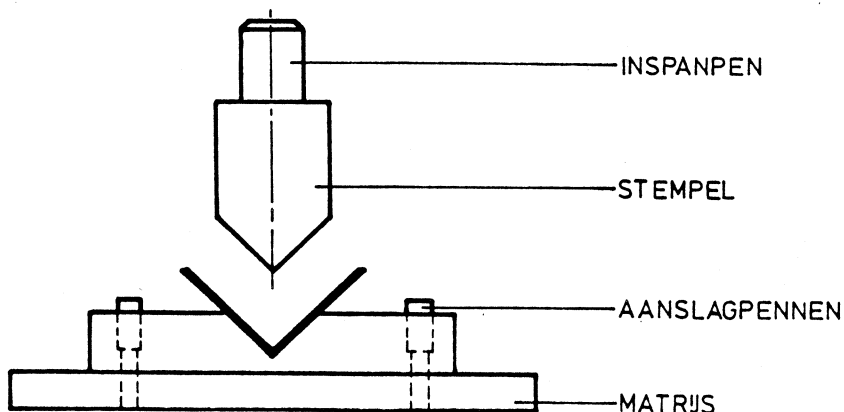
Een andere veelgebruikte methode om een U-vorm, een hoek of een lip te vervaardigen is het *af buigen* (figuur 18.20). Het werkstuk ligt op een blok en wordt door een buignippel omgebogen. Het buignippel zal ondersteund moeten worden omdat bij het buigen een zijwaartse kracht ontstaat.



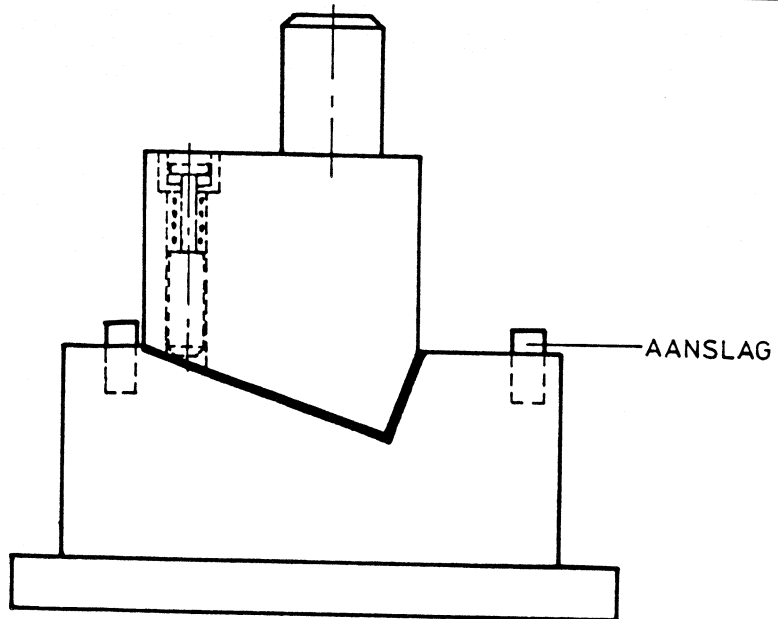
Figuur 18.20: Het af buigen

18.4 HET GEREEDSCHAP

In deze paragraaf zal iets dieper worden ingegaan op de uitvoering van het buiggereedschap. We gaan uit van reeds op maat gesneden blenks die in het gereedschap ingelegd worden.



Figuur 18.21: Het buigen van een hoek met gelijke benen



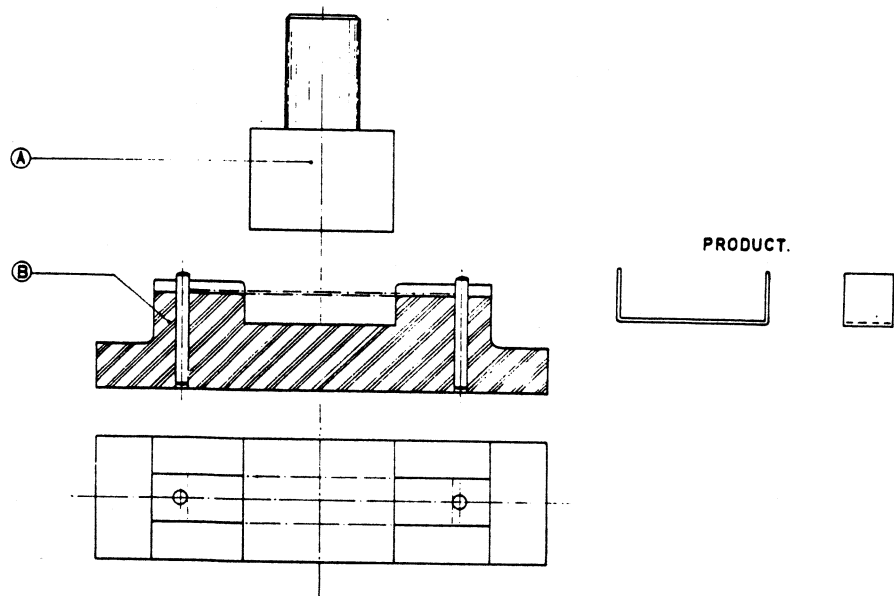
Figuur 18.22: Het buigen van een hoek met ongelijke benen

Voor het maken van een hoek met twee even lange benen kan men een gereedschap gebruiken dat nauwelijks afwijkt van de schematische voorstelling van het zadelbuigen. Het werkstuk wordt tussen twee aanslagpennen ingelegd

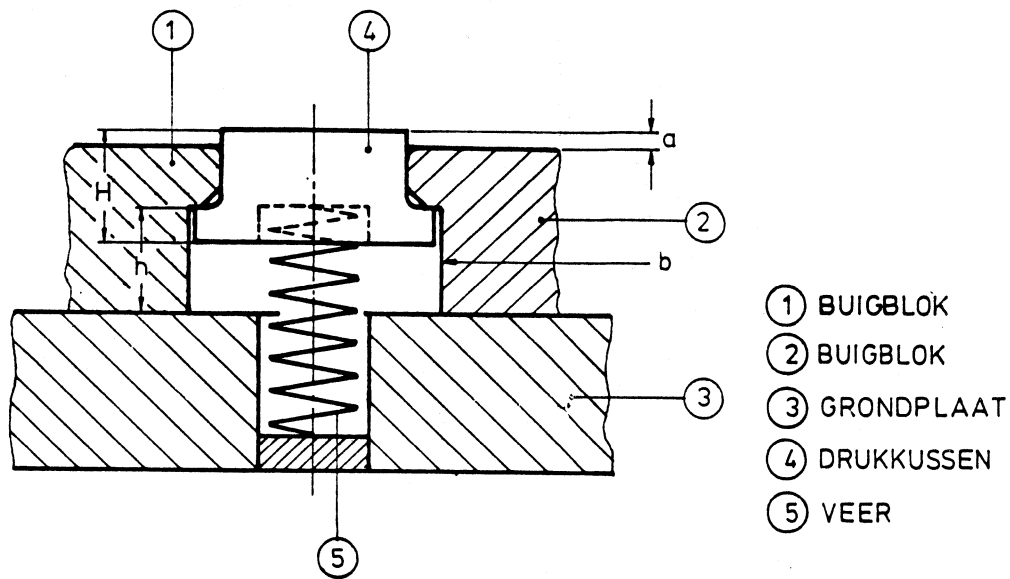
(figuur 18.21) en kan worden gebogen. Door de symmetrisch verdeelde belasting is er geen kans op verschuiven van het werkstuk.

Moeilijker wordt het maken van een hoek met twee ongelijke benen. De belasting is hier niet meer symmetrisch en het werkstuk kan gaan verschuiven zodra het buigen begint.

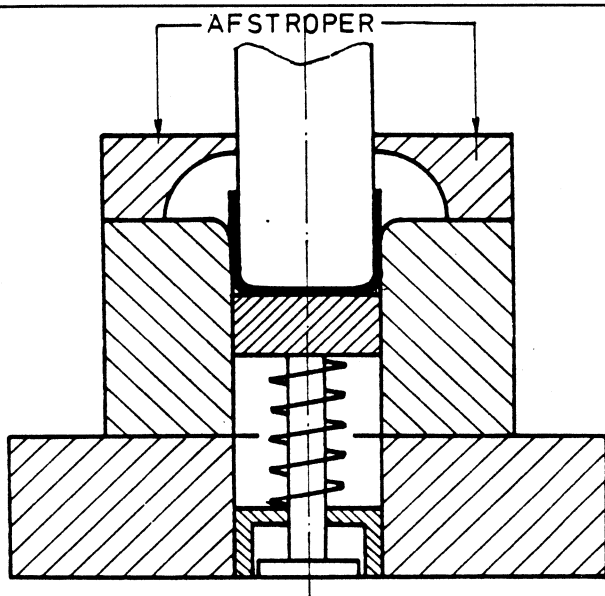
Om dit te voorkomen kan men de opstelling van figuur 18.22 gebruiken: het materiaal wordt door een pen aangedrukt vóórdat het buigen begint.



Figuur 18.23: Eenvoudig gereedschap voor matrijsbuigen



Figuur 18.24: Gereedschap met een drukkussen



Figuur 18.25: Gereedschap met een afstroeper

Een U-vorm kan in een zeer eenvoudig gereedschap worden gebogen (figuur 18.23), maar dit geeft problemen met het uitnemen van het produkt. Het materiaal zal door het terugveren tegen de zijanten gaan klemmen. Meestal zijn de gereedschappen dan ook uitgerust met een uitwerper. Deze uitwerper kan bovendien het horizontale gedeelte van het werkstuk vlakhouden. Men noemt het dan een *drukkussen* of een *tegenhouder*.

De constructie van een gereedschap met een drukkussen wordt gegeven in figuur 18.24. Het drukkussen wordt omhooggehouden door een veer. De bovenkant van het kussen steekt 0,1 à 0,2 mm boven het buigblok uit om ervoor te zorgen dat het materiaal al bij het begin van het buigen ondersteund wordt.

Aan het einde van de persslag komt de onderzijde van het drukkussen tegen de grondplaat. Hierdoor wordt het horizontale gedeelte van het werkstuk nog

eens extra vlak gedrukt. Wel moet er gelet worden op de instelling van de pers: wanneer de slag te lang is bestaat er kans op breuk van de pers.

Het gebogen werkstuk kan ook om de stempel gaan klemmen. In dat geval brengt men een afstroper aan (figuur 18.25).

18.5 VOOR- EN NADELEN

Voordelen

- In een aantal gevallen is er geen produktspecifiek gereedschap nodig, waardoor het buigen voor kleine series is te gebruiken.
- Het is een snel proces, met goede reproduceerbaarheid, dus geschikt voor massafabricage.
- De wanddikte van een gebogen werkstuk is vrijwel constant.

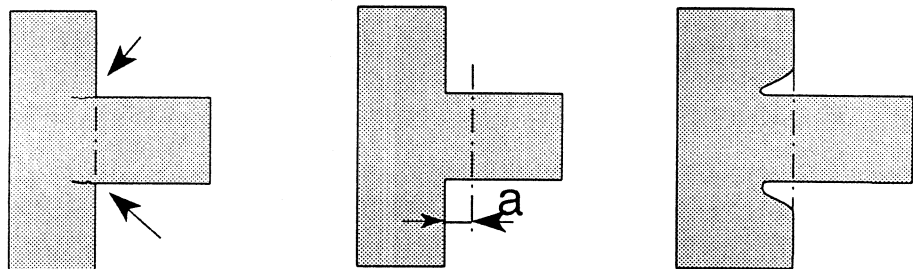
Nadelen

- In het materiaal blijven spanningen aanwezig.
- De buigradius kan niet onbeperkt klein zijn.
- Een buighoek is afhankelijk van vele factoren en daarom moeilijk te controleren.

18.6 ONTWERPRICHTLIJNEN

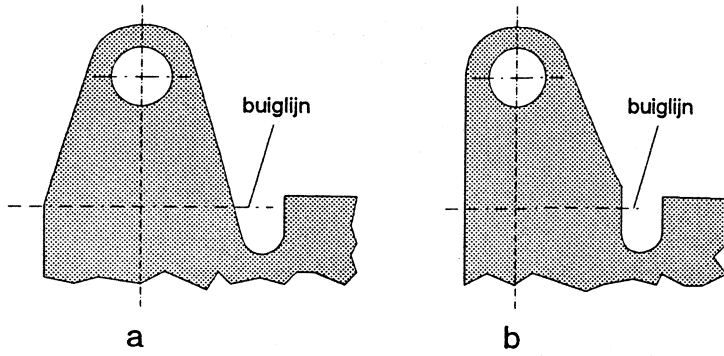
Plaats van de buiglijn

De buiglijn mag niet geplaatst worden op de overgang van een brede naar een smalle zone. Hierdoor kunnen er scheuren ontstaan (figuur 18.26.a). Voor een goede buiging moet een minimale afstand $a = 2t$ aangehouden worden tot het brede deel (figuur 18.26.b). Er kunnen insnijdingen aangebracht worden wanneer de buiglijn op de rand moet liggen (figuur 18.26.c).



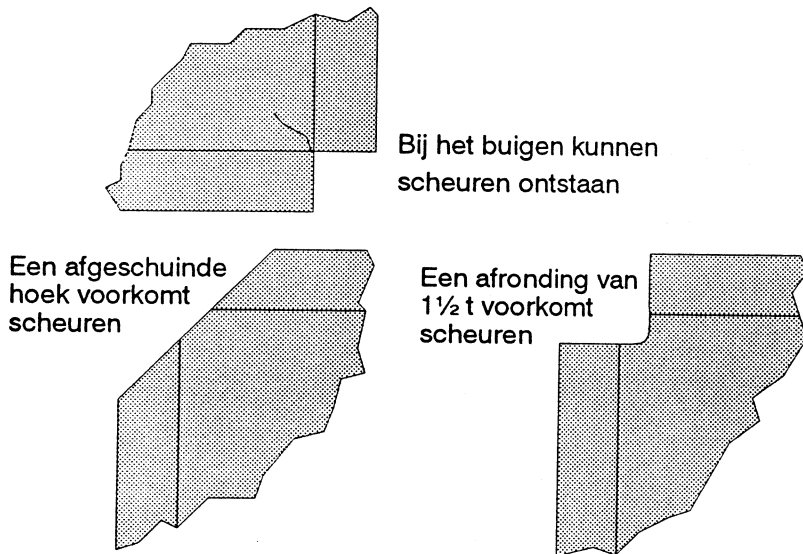
Figuur 18.26: (a) Scheurvorming als een buiglijn op over een rand loopt, (b) verplaatsing van de buiglijn, (c) insnijdingen om de buiglijn op zijn plaats te houden.

Het is aan te raden om de buiglijn onder een hoek van 90° te plaatsen ten opzichte van de contour (figuur 18.27).



Figuur 18.27: Plaatsing van de buiglijn ten opzichte van de contourlijn

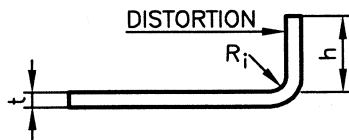
Bij werkstukken, waarvan twee buiglijnen loodrecht op elkaar staan, kan scheurvorming in de hoeken optreden (figuur 18.28). Dit kan voorkomen worden door de hoeken af te snijden of door een afronding in de hoek toe te passen (figuur 18.28.b en c).



Figuur 18.28: (a) Scheurvorming bij twee loodrecht op elkaar staande buiglijnen, (b), (c) en (d) oplossingen om dit te voorkomen.

Hoogte van de rand

De hoogte van een gebogen rand moet minimaal $(R_i + 3t)$ bedragen (figuur 18.29). Een kleinere hoogte zal door een tweede bewerking gerealiseerd moeten worden.

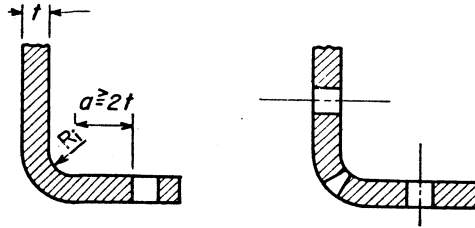


Figuur 18.29: Hoogte van een gebogen rand

Het plaatsen van gaten en sleuven

Gaten en sleuven kunnen niet te dicht bij de buiglijn geplaatst worden: zij worden door de buigbewerking vervormd.

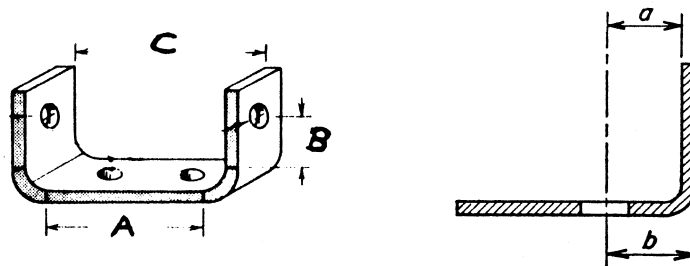
Om dit te voorkomen dient de rand van een gat op een minimale afstand $a = R_i + 2t$ van de buiglijn te liggen (figuur 18.30a). Wanneer een gat dicht bij de buiglijn moet liggen moet het na de buigbewerking uitgeponst worden. Dit geeft wel verhoogde kosten. Wanneer men vervormingen accepteert kan men het gat op de buiglijn plaatsen (figuur 18.30b).



Figuur 18.30: (a) Plaatsing van een gat ten opzichte van de buiglijn; (b) vervorming van een gat op de buiglijn

Maattoleranties

Wanneer men een tolerantie geeft ten opzichte van de buitenkant van een hoek moet men rekening houden met de variaties in de plaatdikte. Het is daarom beter om alle maten tot het gebogen vlak of tot de buiglijn op te geven.



Figuur 18.31: Maattoleranties bij het buigen

Maat C kan een tolerantie hebben van tussen de $\pm 0,5$ mm en de ± 1 mm, bij een hoogte van ongeveer 25 mm. Deze onnauwkeurigheid wordt grotendeels veroorzaakt door de terugvering van het materiaal en neemt lineair toe bij een grotere hoogte.

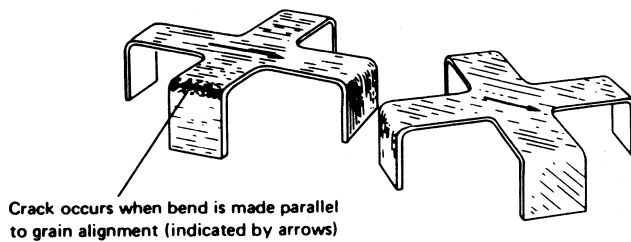
Wanneer in dit geval nauwkeuriger toleranties gewenst zijn, moet de terugvering gecompenseerd worden door bijvoorbeeld het kalibreren van de hoogte en de breedte van het werkstuk.

Wanneer men twee lippen met gaten tegelijk afbuigt, zal de positionering van de blenk grote invloed hebben op de maatnauwkeurigheid: een verschuiving zorgt ervoor dat het ene gat te hoog en het andere gat te laag wordt geplaatst. Bij een nauwkeurigheid van $\pm 0,4$ mm kunnen de gaten dus met een nauwkeurigheid van $\pm 0,8$ mm ten opzichte van elkaar geplaatst worden. Wanneer de gaten worden gebruikt voor bijvoorbeeld het lageren van een as, zullen de toleranties meestal ontoelaatbaar groot zijn. Door het gebruik van zoekers (zie hoofdstuk #volgstampels) kan een nauwkeurigheid van $\pm 0,25$ mm ten opzichte van de buiglijn gehaald worden. Als deze toleranties nog te ruim zijn zal men de gaten achteraf moeten aanbrengen, wat extra kosten met zich meebrengt.

Ligging van de buiging ten opzichte van de walsrichting

Het beste kan loodrecht op de walsrichting gebogen worden, of onder een

hoek wanneer er twee buiglijnen zijn (figuur 18.32). Vooral voor harde en brosse materialen (verenstaal) is dit bijna de enige mogelijkheid om te buigen. Wanneer men bij deze materialen een grote buigradius aanhoudt kan men wel zonder (zichtbare) fouten in de walsrichting buigen, maar door belastingen tijdens het gebruik kan het produkt alsnog gaan scheuren.



Figuur 18.32: Buigen ten opzichte van de walsrichting

LITERATUUR

- Doorschot, F.
De technologie van de serie- en massafabricage
Collegedictaat io27
TU Delft, 1991.
- Hermans, H.
Vervaardigingstechnieken 3
Collegedictaat io27
TU Delft, 1986.
- Kalpakjian, S.
Manufacturing engineering and technology (2nd edition)
Addison-Wesley Publishing company, 1992.
- Niebel, B.W., A.B. Draper en R.A. Wysk
Modern Manufacturing Process Engineering
McGraw-Hill, 1989.
- Strasser, F.
Practical Design of sheet metal stampings
Chapman & Hall Ltd, 1960
- Watkins, M.T.
Metal Forming II, Pressing and related processes
Oxford University Press, 1975

Hoofdstuk 19: DIEPTREKKEN

19.1 INLEIDING

Dieptrekken is een omvormbewerking waarbij een uit plaatmateriaal gesneden *blenk* of *platine* tot een dunwandig, vaak 'bekervormig' produkt wordt vervormd. Dit gebeurt door de blenk met een stempel in een trekkring te drukken. In tegenstelling tot de hiervoor behandelde buigbewerkingen is het mogelijk om cilindrische en doosvormige produkten te maken met dubbelgekromde oppervlakken en een in zichzelf gesloten buiglijn.

In één stap kan het materiaal maar beperkt vervormd worden. De mate van vervorming wordt aangegeven door de *trekverhouding*, de verhouding tussen de diameter van de blenk en de diameter van de gevormde beker $\beta = D/d$. Wanneer de vervorming te groot wordt kan het proces meerdere keren uitgevoerd worden. Het in de eerste trek vervaardigde werkstuk wordt het uitgangsmateriaal voor de volgende trek. Het proces wordt dan *volgtrekken* genoemd.

Toepassingen

Het diepproces is ontstaan nadat het mogelijk was om plaat te produceren met een glad oppervlak en een gelijkmatige dikte.

Het proces is voor het eerst gedemonstreerd op een vakbeurs in Neurenberg in 1879.

Met het dieptrekproces zijn kleine produkten te maken, zoals hulzen voor munitie, frisdrankblikjes, bekens, schalen en pannen voor huishoudelijk en medisch gebruik, behuizingen voor elektromotoren en fietsdynamo's, reflectoren voor lampen.

Voorbeelden van grotere produkten zijn keukenaanrechten, badkuipen, carrosseriedelen zoals spatborden en deuren, brandstoftanks en gascontainers.

Materialen

De meest gebruikte dieptrekmaterialen zijn: aluminium en aluminiumlegeringen, messing, koper, staal en roestvaststaal. Deze materialen kunnen in normale handelskwaliteit of in een speciale dieptrekkwaliteit aangeleverd worden. De laatste laten een grotere plastische vervorming toe, maar zijn ook duurder.

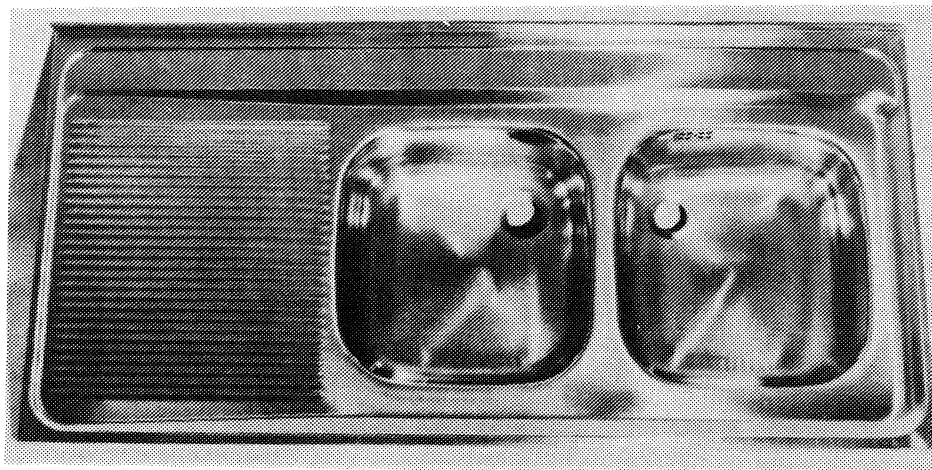
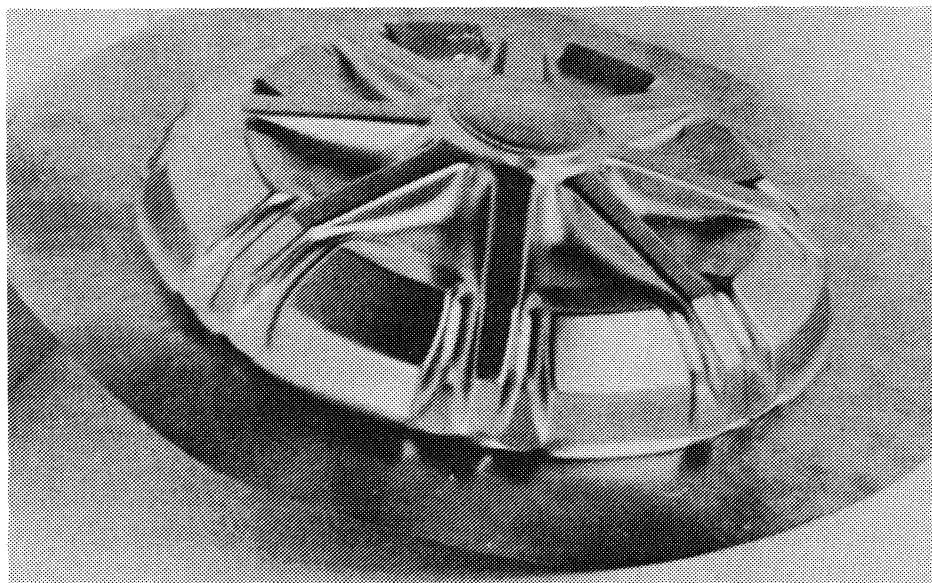
Het proces wordt vooral voor metalen gebruikt. Voor thermoplastische kunststofplaat kunnen soortgelijke produktvormen worden bereikt met het thermovormproces.

19.2 HET DIEPTREKPROCES

Principe

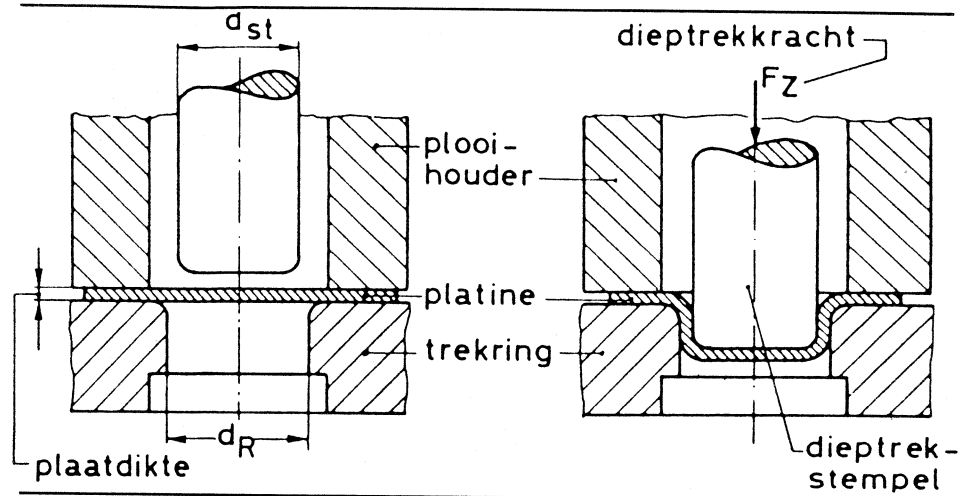
In figuur 19.2 is principe van het dieptrekproces weergegeven voor het vervaardigen van een eenvoudige beker.

Een blenk met doorsnede D wordt op de *matrijs* of *trekkring* gelegd en door de veerbelaste *plooihouder* aangedrukt. Vervolgens wordt de blenk



Figuur 19.1: Enkele voorbeelden van dieptrekprodukten

met de *stempel* in de trekking geduwd, waardoor een beker met doorsnede d wordt gevormd. De blenk glijdt tijdens het proces onder de plooihouder uit. Vaak wordt het proces gestopt voordat de blenk geheel door de trekking is geduwd. Hierdoor ontstaat een bus met het restant van de blenk als een vlakke bovenrand.

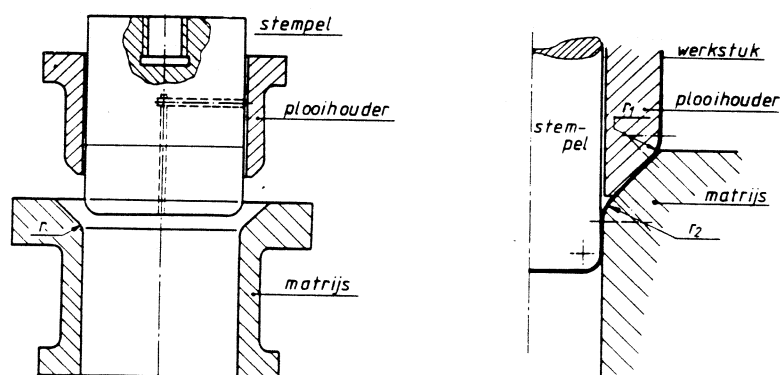


Figuur 19.2: Schematische voorstelling van het dieptrekproces

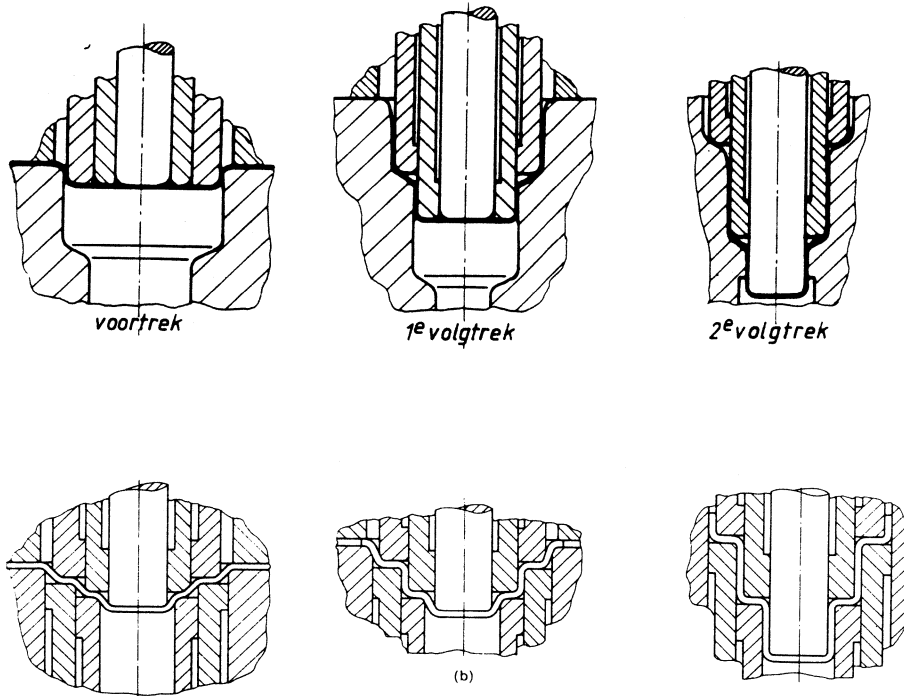
Het bovenvlak van de matrijs gaat via een afronding over in de verticale wand van de opening. Deze afronding, waarover het materiaal de trekking in getrokken wordt, is de *trekradius*. De afronding aan het stempel is de *stempelafronding*. De ruimte tussen de stempel en de matrijs, waartussen het materiaal beweegt, is de *trekspleet*.

Volgtrekken

Bij het volgtrekken wordt in de eerste trek uit een blenk een ondiepe beker gemaakt. Deze wordt in een volgende trek vervormd tot een smallere en hogere beker. Dit gaat door tot de gewenste vorm is bereikt. Het proces is schematisch weergegeven in figuur 19.3.



Figuur 19.3: Principe van het volgtrekken.



Figuur 19.4: Volgtrekken in één gereedschap, met afzonderlijk bediende plooihouders

Figuur 19.5: 'Simultaan' dieptrekken.

Het volgtrekken kan in meerdere slagen uitgevoerd worden, met voor iedere slag een gereedschap. Dit kan op een volgpers uitgevoerd worden, met een transfermechanisme om de bekertjes naar het volgende gereedschap te vervoeren (zie hoofdstuk 23).

Het is ook mogelijk om in één slag meerdere trekken uit te voeren met een speciaal geconstrueerd gereedschap, een z.g. compleetstempel. Dit wordt schematisch weergegeven in figuur 19.4 en figuur 19.5.

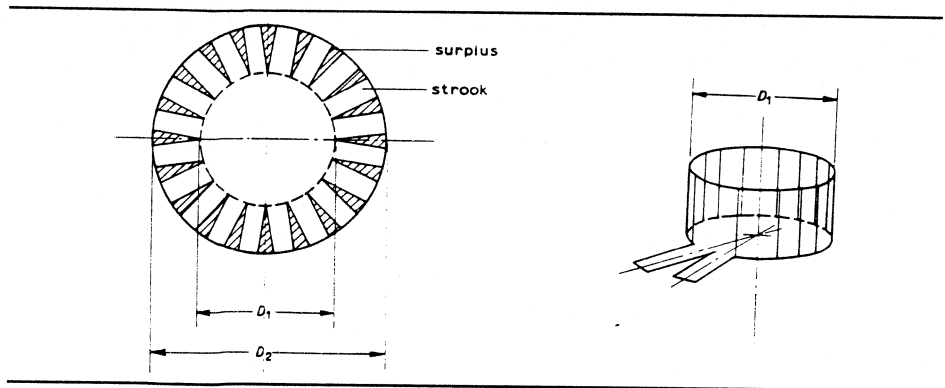
Mechanisme van het dieptrekken

Bij het dieptrekken wordt het materiaal plastisch vervormd. Het materiaal dat aan de rand van de blenk zit komt door het dieptrekken aan de rand van de beker te zitten. De omtrek van de blenk is veel groter dan de omtrek aan de rand van de beker. In feite is er dus overtollig materiaal, zoals in figuur 19.6 is aangegeven. Om de diameter van de blenk te reduceren moet het materiaal vervormd worden.

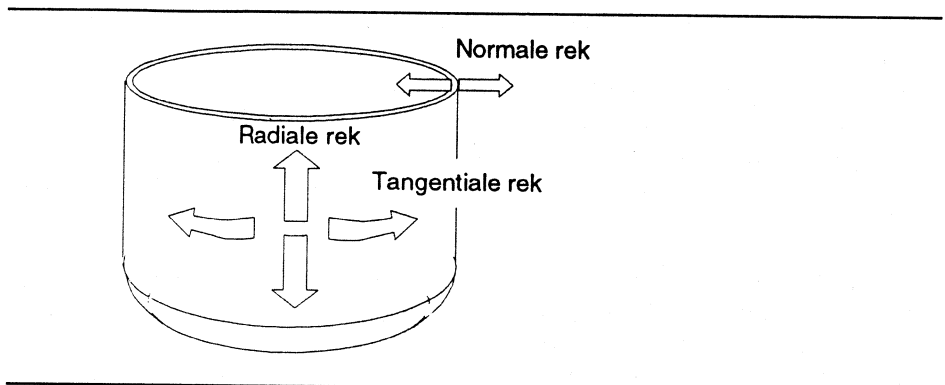
Het materiaal kan vervormen in tangentiële richting, in radiale richting en in normale richting (loodrecht op de wand). We spreken over respectievelijk *tangentiale*, *radiale* en *normale* rek (figuur 19.7). omschrijving.

Men kan goed nagaan hoe deze rekken door het vervormen verlopen door op een blenk een patroon van concentrische cirkels en stralen aan te brengen (figuur 19.8) en te kijken hoe dit patroon tijdens het proces vervormd wordt.

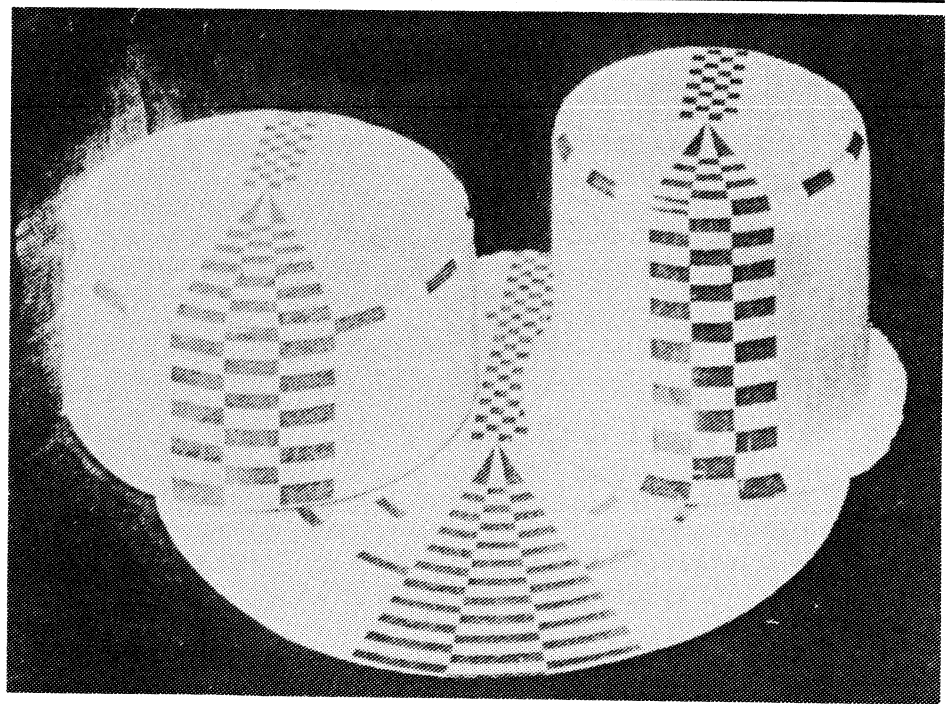
De gehele buitendiameter is vervormd tot de diameter van het bekertje, maar dat geldt ook voor alle concentrische cirkels die in de wand van het bekertje zijn terechtgekomen.



Figuur 19.6: Oppervlakte van een 'opengeknijpte' beker en de blenk.



Figuur 19.7: Tangentiale, Radiale en Normale rek



Figuur 19.8: Blenk en beker met patroon

De *tangentiale rek* in de buitenste vezel, aan de rand van de blenk, wordt:

$$\varepsilon_t = \frac{\pi d - \pi D}{\pi D} = \frac{d - D}{D}$$

Waarin:

- ε_t : Tangentiale rek
- D : Diameter van de blenk (mm)
- d : Diameter van het produkt (mm)

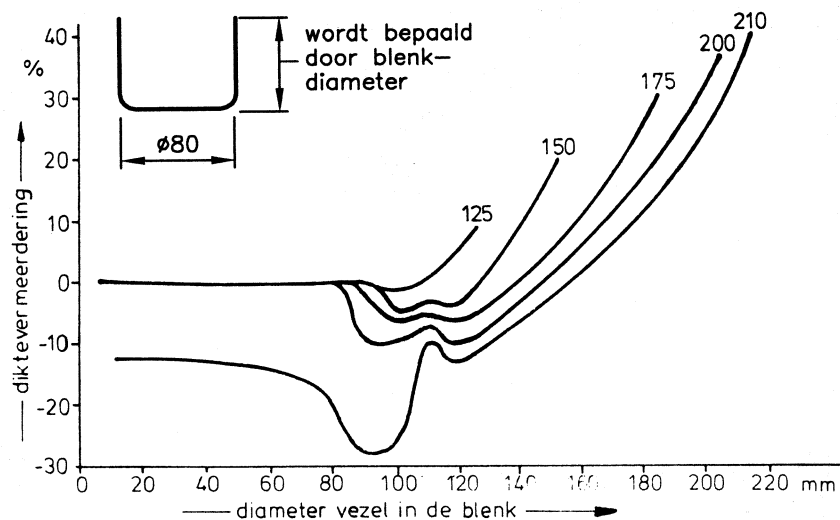
Wanneer de blenk diameter D tweemaal zo groot is als de produkt diameter d , is de rek -50 %. De vezel op de rand wordt in dit geval gestuikt tot de helft van zijn oorspronkelijke lengte. De concentrische cirkels in de blenk worden naar binnen toe steeds kleiner, de negatieve rek dus ook.

De afstand tussen twee concentrische cirkels verandert ook bij de vervorming. Dit is de *radiale rek*. Deze ligt in dit geval in de orde van grootte van +50% in de nabijheid van de rand van de bus.

De wanddikte van de bus is meestal niet constant. Nabij de bodem is de wand vaak dunner dan het uitgangsmateriaal. Aan de rand van de bus is de wanddikte in dit geval 40 % groter dan de dikte van het uitgangsmateriaal.

In figuur 19.9 is aangegeven hoe de wanddikte in een diepgetrokken produkt verloopt. Duidelijk is te zien dat de vezels die meer in de buurt van de rand van de beker liggen ook meer gestuikt zijn.

Er zijn twee insnoeringen te zien, vlak boven de afronding van de bodem. Dit zal het zwakste punt van het produkt zijn: bij te hoge belasting zal het produkt hier gaan scheuren.



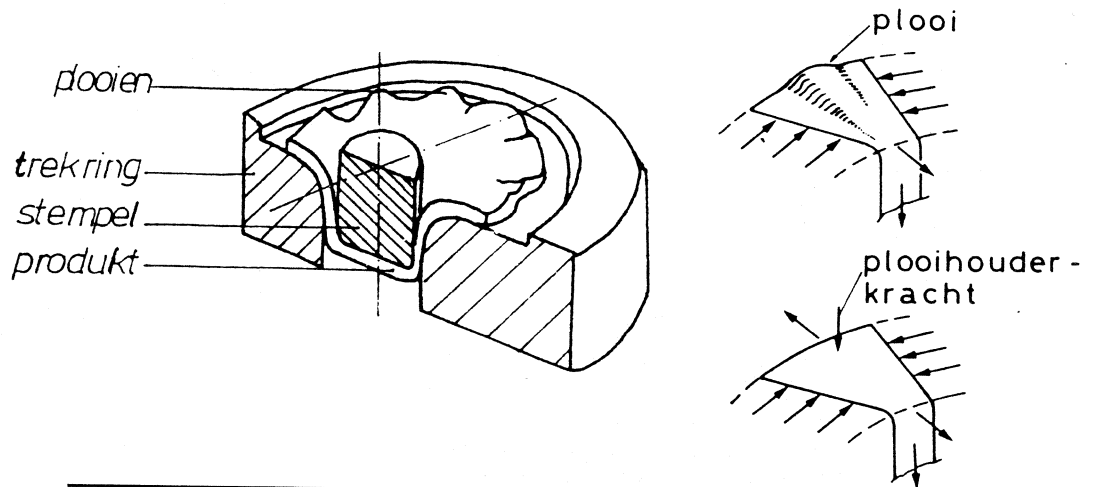
Figuur 19.9: Verandering van de wanddikte door het dieptrekproces

Ploivorming

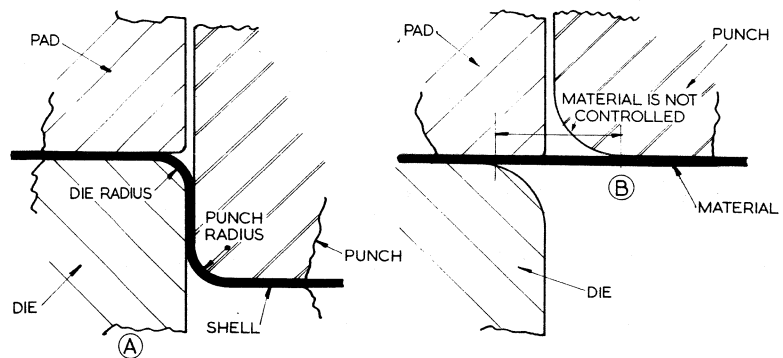
Wanneer de stempel de plaat in de trekking drukt, worden de vezels in tangentiële richting samengedrukt. Hierdoor hebben ze de neiging om uit te gaan knikken en zullen er plooien in de plaat gevormd worden

(figuur 19.10). Dit proces kan gedemonstreerd worden door een vel papier in een glas te duwen.

Om deze plooivorming te voorkomen rust men het dieptrekgereedschap uit met een ring, die de blenk tegen de trekkring aandrukt. Deze *plooihouder* zorgt ervoor dat het materiaal vlak gehouden wordt zodat de vezels alleen gestuikt kunnen worden.



Figuur 19.10: Plooivorming



Figuur 19.11: Door grote afrondingen wordt een gebied niet ondersteund en kunnen er secundaire plooien gevormd worden

Naast deze belangrijkste oorzaak zijn er nog een aantal andere oorzaken waardoor plooien gevormd kunnen worden.

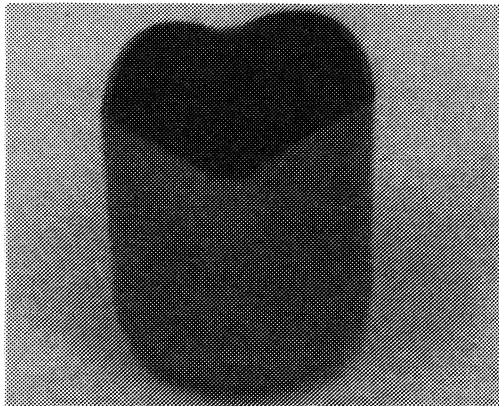
- Plooien op de trekradius, die ontstaan door een te grote matrijsafronding.
- De zogenaamde 'secundaire plooien'. Deze ontstaan doordat het gebied waar het materiaal plastisch vervormt, niet wordt ondersteund door de matrijs (figuur 19.11). Dit komt onder andere

voor bij conische produkten en produkten met een grote afronding aan de bodem. Deze plooiën kunnen soms voorkomen worden door met een tweede plooihouder te werken.

- Plooiën die achteraf ontstaan in een brede flens: de vervorming is grotendeels plastisch, maar ook voor een gedeelte elastisch. Wanneer de plooihouderkracht weggenomen wordt, zullen de gestuikte vezels voor een gedeelte terugveren en zal de flens uit gaan knikken.

Oorvorming

Na het dieptrekken is de rand van het gevormde produkt niet vlak, maar onregelmatig (figuur 19.12). Deze *oorvorming* wordt veroorzaakt doordat het materiaal niet in alle richtingen dezelfde eigenschappen heeft. Dit wordt *anisotropie* genoemd en kan ontstaan door bijvoorbeeld het walsproces. Vooral zachte materialen zoals aluminium zijn gevoelig voor oorvorming.



Figuur 19.12: Oorvorming

19.3 PROCESVARIABLEN

De procesvariabelen die bij het dieptrekken een rol spelen zijn:

- de dieptrekverhouding
- de plooihouderdruk
- de trekradius
- de stempelafronding
- de trekspleet
- de dieptreksnelheid
- de smering

Dieptrekverhouding

Men kan niet onbeperkt dieptrekken: voor een grote vervorming zijn er grote spanningen in het materiaal nodig en kunnen er scheuren optreden.

Voor cilindrische produkten werkt men vaak met de verhouding tussen blenk- en produktdiameter. De verhouding $D/d = \beta$ wordt de *dieptrekverhouding* genoemd.

De maximaal te bereiken verhouding wordt bij benadering gegeven door de formule:

$$\beta_{\max} = \beta_{d=0} - \frac{d}{800t}$$

Waarin:

d : de stempeldiameter (mm)
 t : de plaatdikte (mm)

Daarbij is $\beta_{d=0}$ de maximale dieptrekverhouding teruggerekend op de theoretische waarde $d/t = 0$, oftewel $d = 0$.

Voor enkele veel voorkomende materialen wordt de waarde van deze grootte gegeven figuur 19.13.

Materiaal	Dieptrekverhouding $\beta_{d=0}$
Staal, dieptrekkwaliteit	2,10
Staal, handelskwaliteit	2,00
Messing, dieptrekkwaliteit	2,10
Aluminium, zacht	1,90
Roestvast staal	1,90
Aluminium, gelegeerd	1,80
Zink	1,65
Magnesium	1,50

Figuur 19.13: Maximale dieptrekverhouding voor enkele materialen

De volgtrekverhouding

Wanneer de verhouding D/d groter wordt dan β_{\max} is meer dan één trekgang nodig voor de fabricage van het gevraagde produkt.

De hiervoor berekende waarden kunnen ook voor de eerste trek bij het volgtrekken gebruikt worden.

$$D/d_1 = \beta_0$$

Bij het volgtrekken wordt de beker verder verkleind en kunnen we spreken van de volgtrekverhouding: de verhouding tussen de diameters van de beker vóór en na de volgtrek.

$$d_n/d_{n+1} = \beta_n$$

In figuur 19.14 zijn richtlijnen voor toelaatbare trekverhoudingen gegeven, voor goed diep te trekken materialen.

Trek- verhouding	Stempeldiameter / plaatdikte (d/t)					
	24-33	33-53	53-90	90-190	190-400	400-800
β_0	2,08-2,00	2,00-1,89	1,89-1,80	1,80-1,72	1,72-1,65	1,65-1,59
β_1	1,39-1,34	1,34-1,32	1,32-1,28	1,28-1,26	1,26-1,24	1,24-1,23
β_2	1,32-1,28	1,28-1,26	1,26-1,25	1,25-1,24	1,24-1,22	1,22-1,19
β_3	1,25-1,22	1,22-1,19	1,19-1,18	1,18-1,16	1,16-1,15	1,15-1,14
β_4	1,25-1,22	1,22-1,19	1,19-1,18	1,18-1,16	1,16-1,15	1,15-1,14

Figuur 19.14: Volgtrekverhoudingen voor een goed te dieptrekken materiaal

Deze waarden worden lager bij het toenemen van het aantal trekgangen: door de vervormingen treedt versterking op en wordt het moeilijker om in een volgende trek een grote reductie van de diameter te bereiken. Men kan het aantal trekken verminderen door het werkstuk te gloeien tussen de trekken. Hierdoor treedt rekristallisatie op en wordt de versterking ongedaan gemaakt. Er kan een hogere dieptrekverhouding worden bereikt. Deze is voor $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 1,60$.

Het gloeien is een dure bewerking. Voor kleine series kan het toch rendabel zijn omdat er minder gereedschappen nodig zijn.

Voor produkten met een grote diameter/diepte-verhouding kan het echter noodzakelijk zijn omdat zonder gloeien maar een beperkt aantal keren getrokken kan worden (figuur 19.15). In figuur 19.16 zijn de gloeitijden en -temperaturen voor enkele veelvoorkomende materialen aangegeven.

Materiaal	Aantal trekgangen zonder gloeien
Dieptrekstaalplaat	3-4
Aluminium	4-5
Messing	2-4
Roodkoper	1-2
Roestvrij staal	4
Magnesium-legeringen	1
Titaan-legeringen	1

Figuur 19.15: Aantal trekgangen dat gemaakt kan worden zonder tussendoor te gloeien

Materiaal	Gloeitemperatuur (°C)	Gloeitijd (min.)	Afkoeling
Dieptrekstaal	760-780	20-40	In lucht, afgesloten ruimte
RVS	1150-1170	30	In luchtstroom of water
Messing	650-700	15-30	In lucht
Al, AlMg, AlMn	300-350	30	Vanaf 250°C in lucht
AlCu	350-400	30	Vanaf 250°C in lucht

Figuur 19.16: Gloeitemperatuur en tijd voor enkele materialen

De plooihouderdruk

Dit is de druk die door de plooihouder wordt aangebracht op de blenk.

Wanneer de plooihouderdruk te klein is zal er plooivorming optreden. Wanneer de druk te groot wordt genomen zal de stempelkracht zo groot worden dat de spanningen in het plaatmateriaal de breukspanning overschrijden en kunnen er scheuren ontstaan.

De vereiste plooihouderdruk kan berekend worden met:

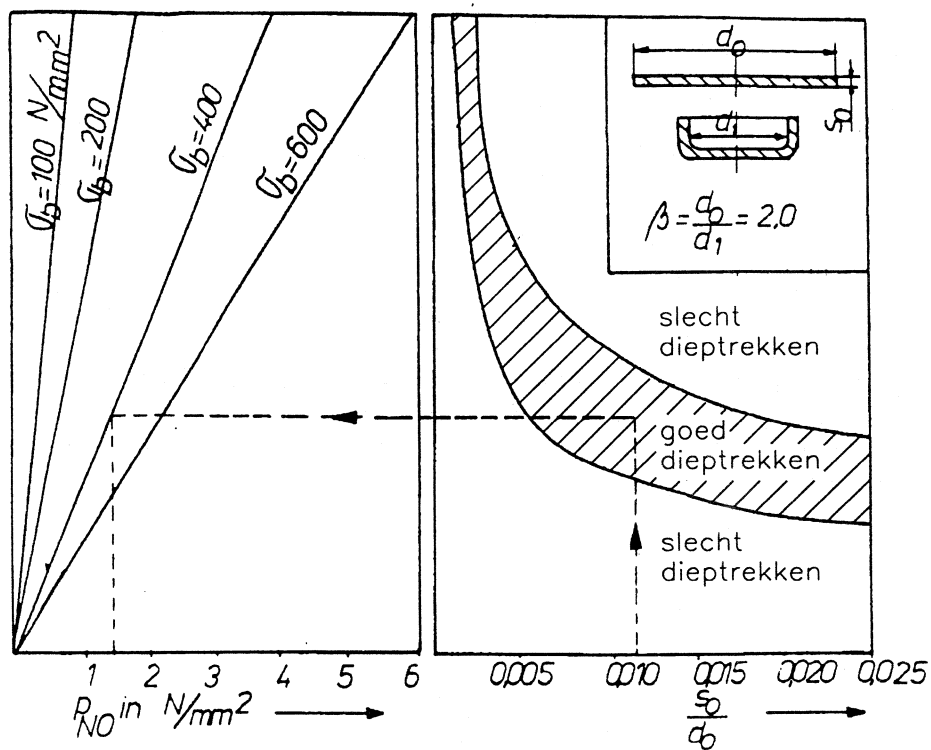
$$p_{NO} = \frac{2}{3} \cdot 10^{-3} \cdot ((\beta - 1)^3 + 0,005 \cdot \frac{D_0}{t_0}) \cdot \sigma_{tmax}$$

Waarin:

p_{NO} : initiële plooihouderdruk (N/mm²)

- β : dieptrekverhouding D_0 / d
- D_0 : blenk diameter (mm)
- t_0 : materiaaldikte (mm)
- σ_{tmax} : treksterkte (N/mm²)

Deze formule is, bij de dieptrekverhouding $\beta = 2$, voor verschillende waarden van σ_t grafisch uitgezet in figuur 19.17.



Figuur 19.17: Bepaling van de benodigde plooihouderdruk bij $\beta = 2$

De trekradius

Het plaatmateriaal wordt zoveel gerekt dat het in het vloeigebied komt. In deze fase kan het over de rand over de trekradius heen vloeien. Deze radius kan niet te klein genomen worden: de rek in de vezels wordt dan te groot en bestaat er kans op breuk.

Wanneer de radius te groot wordt genomen is er een groot gebied waar de blenk niet wordt ingeklemd en kunnen er secundaire plooiën worden gevormd. Dit laatste is met een tweede plooihouder te verhinderen.

Uit figuur 19.18 is de waarde voor de trekradius te bepalen.

Vorm van het te trekken product	Relatieve materiaaldikte $t / D \cdot 100$		
	2,0 - 2,1	1,0 - 0,3	0,3 - 0,1
• Zonder flens	$6 - 8 \cdot t$	$8 - 10 \cdot t$	$10 - 15 \cdot t$
• Met flens	$10 - 15 \cdot t$	$15 - 20 \cdot t$	$20 - 30 \cdot t$

Figuur 19.18: De trekverhouding voor verschillende blenk diameter/plaatdikte-verhoudingen

De stempelafronding

De vorm van de stempel komt bij benadering overeen met de binnenzijde van het produkt. Een te kleine afronding geeft kans op breuk, bij een te grote afronding bestaat er kans op plooivorming.

Romanovski stelde de volgende tabel op (figuur 19.19).

Relatieve materiaaldikte $t / D \cdot 100$		
$> 0,6$	$0,6 - 0,3$	$< 0,3$
$r_{st} = r_t$	$r_{st} = 1,5 \cdot r_t$	$r_{st} = 2 \cdot r_t$

Figuur 19.19: Waarden voor de stempelafronding

Waarin:

r_{st} : stempelafronding
 r_t : trekradius

De trekspleet

De trekspleet is nodig omdat het materiaal enige dikte heeft en tussen stempel en matrijs moet passen. Een te grote trekspleet zorgt voor plooivorming en bij een te kleine trekspleet kan het materiaal gaan scheuren. De grootte van de trekspleet kan worden bepaald met:

$$s = t_0 \sqrt{\frac{D_0}{d}}$$

Waarin:

s : de breedte van de trekspleet (mm)
 t_0 : de plaatdikte (mm)
 D_0 : diameter van de blenk (mm)
 d : diameter van het produkt (mm)

Men gaat er hier van uit dat de grootste materiaalverdikking die tijdens het proces optreedt (aan de rand van de blenk) nog moet kunnen passeren in de spleet.

Wrijving en smering

Bij vervorming beweegt het materiaal tussen plooihouder en trekking en ondervindt daarbij wrijving. Ook bij de beweging van het materiaal om de trekradius treedt wrijving op. De wrijving verhoogt de dieptrekkkracht en daardoor de kans op scheuren, bovendien zal het gereedschap grotere slijtage vertonen. De wrijving wordt beïnvloed door de ruwheid van het gereedschap en de blenk en door de smering.

In de volgende tabel zijn voor diverse materialen en smeermiddelen de wrijvingscoëfficiënten gegeven.

Wanneer men met de maximale dieptrekverhouding wil dieptrekken, moet smering tussen de stempel en het werkstuk zoveel mogelijk worden vermeden: door wrijving wordt de dieptrekkkracht voor een groot gedeelte door de stempelwand overgebracht, in plaats van alleen door de bodem van het werkstuk. Om deze reden wordt de stempelkop soms ruw gemaakt.

Smeermiddelen	Materiaal		
	Staal	Aluminium	Aluminium- legering
Geen	0,18-0,20	0,25	0,22
Minerale olie	0,14-0,16	0,15	0,16
Met vulstoffen (krijt, grafiet)	0,06-0,10	0,10	0,08-0,10

Figuur 19.20: Invloed van smeermiddelen op de wrijvingscoëfficiënt

De dieptreksnelheid

Dit is de snelheid waarmee de stempel op de blenk door de trekking duwt. Wanneer niet al te kritische werkstukken vervaardigd worden, is de snelheid niet zo van belang. Wanneer de dieptrekverhouding echter dicht bij de maximale dieptrekverhouding komt en er kans op insnoering ontstaat, dan wordt de dieptreksnelheid wel van belang. Lagere snelheden hebben minder uitval tot gevolg. De maximale dieptreksnelheid kan men volgens Ruhmann bepalen met:

$$v_{\max} = 33,3 \cdot (1 + \beta) \cdot \sqrt{(D_0 - d_{st})}$$

Waarin:

- v_{\max} : maximale snelheid (mm/sec)
- β : dieptrekverhouding
- D_0 : blenk diameter (mm)
- d_{st} : stempeldiameter (mm)

Of volgens Romanovski:

Materiaal	Snelheid (mm/sec)
Aluminium	900
Aluminiumlegeringen	150-200
Messing	1000
Koper	750
RVS	100-150
Staal	300

Figuur 19.21: Snelheden van de dieptrekkers

19.4 BEREKENINGEN AAN DIEPTREKPRODUKTEN

Dieptrekkkracht

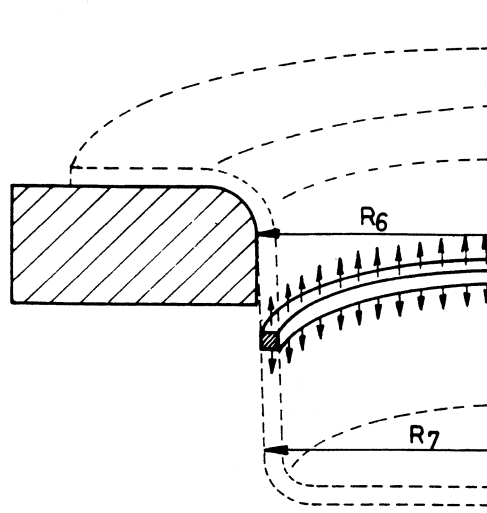
De stempelkracht levert de arbeid die nodig is om:

- de diameter van de blenk geheel of gedeeltelijk te reduceren tot de afmetingen van het holle lichaam,
- het materiaal om de matrijsafroning te buigen,
- het materiaal na het passeren van de matrijsafroning weer recht te buigen,
- de wrijving tussen blenk en plooihouder, trekrand en stempel te overwinnen.

Men kan de maximaal optredende kracht op twee manieren benaderen. Er kan worden uitgegaan van de maximale kracht die de wand van het werkstuk kan overbrengen, of van de kracht die nodig is om de vervormingen te bewerkstelligen. In dit laatste geval komt men terecht bij de tak van toegepaste mechanica die zich bezig houdt met de plastische vervorming van metalen. Dit zal niet in dit dictaat behandeld worden.

De methode waarbij wordt uitgegaan van de kracht in de wand kan gebruikt worden om snel inzicht te krijgen in de hoogst te verwachten perskracht. De methode is echter niet zo nauwkeurig omdat er een paar veronderstellingen worden gebruikt waarvan de gevolgen niet geheel te overzien zijn.

Aangenomen wordt dat de kracht die nodig is voor de vervorming, volledig door de wand wordt overgebracht (figuur 19.22)



Figuur 19.22: In de wand van het produkt bevinden zich trekspanningen

De wand blijft nog juist heel wanneer de maximale dieptrekverhouding wordt bereikt. De kracht die de wand kan overbrengen wordt gegeven door:

$$P = \pi d t_0 \sigma_t$$

Waarin : t_0 = de plaatdikte van de blenk
 σ_t = de trekspanning in het materiaal

Hier wordt dus geen rekening gehouden met verandering van de wanddikte. Het maximum wordt bereikt wanneer $\sigma_t = \sigma_{tmax}$. Dit treedt op bij $\beta = \beta_{max}$.

Men vindt op deze wijze de dieptrekkkracht als:

$$P = \frac{\beta - 1}{\beta_{max} - 1} \cdot \pi d t_0 \sigma_{tmax}$$

Bepaling van de blenk diameter

Zoals al in figuur 19.6 te zien was, is de diameter van de blenk niet gelijk aan de diameter van de beker plus de hoogte van de rand.

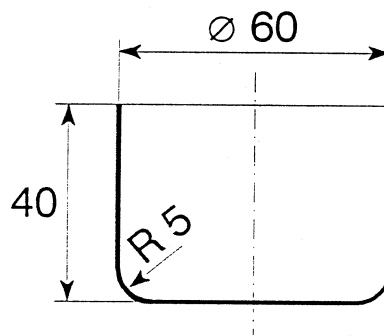
Om indicatie te kunnen krijgen over de grootte van de blenk worden er twee vereenvoudigingen ingevoerd:

- De dikte van het materiaal verandert niet tijdens het proces en is gelijk aan de dikte van de blenk.
- De wanddikte is klein ten opzichte van de andere maten, het verschil tussen in- en uitwendige maten van het produkt wordt verwaarloosd.

Het volume van het werkstuk en de blenk moeten gelijk zijn: er gaat immers geen materiaal verloren. Bij gelijkblijvende materiaaldikte zijn beide oppervlakken gelijk.

Voorbeeld

Bereken de benodigde blenk diameter voor de beker afgebeeld in figuur 19.23.



Figuur 19.23: Door het dieptrekken te vervaardigen beker

We verwaarlozen de afronding tussen bodem en wand. De oppervlakte van de beker is dan gelijk aan de oppervlakte van de bodem en die van de wand. Deze is gelijk aan de oppervlakte van de blenk:

$$\frac{1}{4}\pi D^2 t_0 = \frac{1}{4}\pi d^2 t_0 + \pi d h t_0 \Rightarrow D = \sqrt{d^2 + 4 d h}$$

waarin

- D : de blenk diameter,
- d : de stempeldiameter (= binnendiameter van het produkt)
- h : hoogte van het produkt
- t_0 : dikte van het uitgangsmateriaal.

Wanneer de wanddikte niet te verwaarlozen is zou men bij de binnendiameter 2 maal de halve plaatdikte op moeten tellen om bij de neutrale lijn uit te komen.

Uit de berekening volgt:

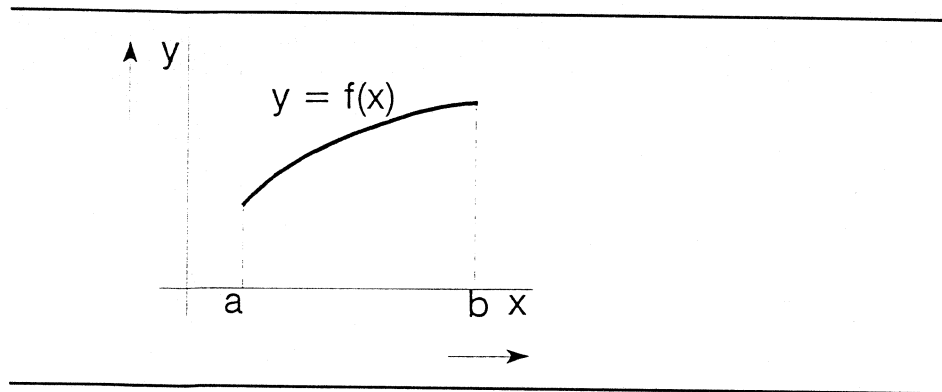
$$D = \sqrt{60^2 + 4 \cdot 60 \cdot 40} \approx 115 \text{ mm}$$

In figuur 19.24 zijn de oppervlakken gegeven voor een aantal elementen waaruit een meer complexe vorm kan worden samengesteld.

	AREA OF BODY 'A' =	DIA. OF BLANK 'D' =		AREA OF BODY 'A' =	DIA. OF BLANK 'D' =
	$\frac{\pi d^2}{4} + \pi d h$	$\sqrt{d^2 + 4 d h}$		$\frac{\pi}{4}(d_1^2 + 4 h^2) + \pi f \frac{d_1 + d_2}{2}$	$\sqrt{d_1^2 + 4 h^2} + \frac{2 f (d_1 + d_2)}{D}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 h + \pi f \frac{d_1 + d_2}{2}$	$\sqrt{d_1^2 + 4 d_1 h + 2 f (d_1 + d_2)}$		$\frac{\pi}{4}(d^2 + 4 h^2) + \pi d h_2$	$\sqrt{d^2 + 4 (h_2^2 + d_1 h_2)}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)$	$\sqrt{d_1^2 + 4 d_1 h + d_2^2 - d_1^2} = \sqrt{d_2^2 + 4 d_1 h}$		$\frac{\pi}{4}(d_1^2 + 4 h^2) + \pi d_1 h_2 + \pi f \frac{d_1 + d_2}{2}$	$\sqrt{d_1^2 + 4 (h_2^2 + d_1 h_2) + \frac{f^2}{2} (d_1 + d_2)}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)$	$\sqrt{d_1^2 + 4 (d_1 h_2 + d_2 h_2)}$		$\frac{\pi}{4}(d_1^2 + 4 h^2) + \pi d_1 h_2 + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)$	$\sqrt{d_1^2 + 4 (h_2^2 + d_1 h_2)}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) + \pi d_1 h_2 + \pi f \frac{d_2 + d_3}{2}$	$\sqrt{d_1^2 + 4 (d_1 h_2 + d_2 h_2) + \frac{f^2}{2} (d_2 + d_3)}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi s \frac{d_1 + d_2}{2}$	$\sqrt{d_1^2 + 2 s (d_1 + d_2)}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) + \pi d_1 h_2 + \frac{\pi}{4}(d_3^2 - d_2^2)$	$\sqrt{d_1^2 + 4 (d_1 h_2 + d_2 h_2) + \frac{f^2}{2} (d_2 + d_3)}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi s \frac{d_1 + d_2}{2} + \pi f \frac{d_2 + d_3}{2}$	$\sqrt{d_1^2 + 2 s (d_1 + d_2) + f (d_2 + d_3)}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) + \pi d_1 h_2 + \frac{\pi}{4}(d_3^2 - d_2^2)$	$\sqrt{d_1^2 + 4 (d_1 h_2 + d_2 h_2) + \frac{f^2}{2} (d_2 + d_3)}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi s \frac{d_1 + d_2}{2} + \frac{\pi}{4}(d_3^2 - d_2^2)$	$\sqrt{d_1^2 + 2 s (d_1 + d_2) + \frac{f^2}{2} (d_2 + d_3) + d_3^2 - d_2^2}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)$	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi s \frac{d_1 + d_2}{2} + \pi d_1 h$	$\sqrt{d_1^2 + 2 s (d_1 + d_2) + 2 d_1 h}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi f \frac{d_2 + d_1}{2}$	$1.414 \sqrt{d_1^2 + f (d_2 + d_1)}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \frac{\pi}{2} (d_1 + 1.274 r) + \pi d_1 h$	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 r d_1 + 8 r^2}$ OR $\sqrt{d_1^2 + 2.28 r d_1 - 0.56 r^2}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 h$	$1.414 \sqrt{d_1^2 + 2 d_1 h}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \frac{\pi}{2} (d_1 + 1.274 r) + \pi d_1 h$	$\sqrt{d_1^2 + 4.57 r d_1 + 2 r^2 + \pi d_1 h}$ OR $\sqrt{d_1^2 + 4.4 (h + 0.57 r) - 0.56 r^2}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)$	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4 d_1 h}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \frac{\pi}{2} (d_1 + 1.274 r) + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)$	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 r d_1 + d_2^2 + 2 f (d_2 + d_1)}$ OR $\sqrt{d_1^2 + 2.28 r d_1 + 0.56 r^2 - 0.56 r^2}$
	$\frac{\pi d_1^2}{4} + \pi d_1 h + \pi f \frac{d_1 + d_2}{2}$	$1.414 \sqrt{d_1^2 + 2 d_1 h + f (d_1 + d_2)}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \frac{\pi}{2} (d_1 + 1.274 r) + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) + \pi f \frac{d_1 + d_2}{2}$	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 r d_1 + d_2^2 + 2 f (d_2 + d_1) + \frac{f^2}{2} (d_1 + d_2)}$ OR $\sqrt{d_1^2 + 2.28 r d_1 + 0.56 r^2 - 0.56 r^2}$
	$\frac{\pi}{4}(d^2 + 4 h^2)$	$\sqrt{d^2 + 4 h^2}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \frac{\pi}{2} (d_1 + 1.274 r) + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) + \pi f \frac{d_1 + d_2}{2}$	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 r d_1 + d_2^2 + 2 f (d_2 + d_1) + \frac{f^2}{2} (d_1 + d_2)}$ OR $\sqrt{d_1^2 + 4.4 (h + 0.57 r) + \frac{f^2}{2} (d_1 + d_2) - 0.56 r^2}$
	$\frac{\pi}{4}(d_1^2 + 4 h^2) + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)$	$\sqrt{d_1^2 + 4 h^2}$		$\frac{\pi d_1^2}{4} + \frac{\pi}{2} (d_1 + 1.274 r) + \pi d_1 h + \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) + \pi f \frac{d_1 + d_2}{2}$	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 r d_1 + d_2^2 + 2 f (d_2 + d_1) + \frac{f^2}{2} (d_1 + d_2)}$ OR $\sqrt{d_1^2 + 4.4 (h + 0.57 r) + \frac{f^2}{2} (d_1 + d_2) - 0.56 r^2}$

Figuur 19.24: Tabel voor de berekening van de blenkdiameter uit elementen

Oppervlakken die ontstaan door rotatie om de hartlijn van een willekeurige kromme (figuur 19.25), kunnen met behulp van de integraalrekening worden berekend.



Figuur 19.25: De kromme $y = f(x)$

De oppervlakte van een omwentelingslichaam dat ontstaat door rotatie van de kromme $y = f(x)$ om de x -as wordt:

$$A = 2\pi \int_a^b y \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

De benodigde blenk diameter kan dan gevonden worden uit:

$$D^2 = 8 \int_a^b y \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

Door de veronderstellingen zal de werkelijke waarde afwijken van wat er berekend wordt en is deze waarde slechts geschikt voor een voorcalculatie. In het algemeen zal met deze berekeningen een royale blenk diameter worden bepaald.

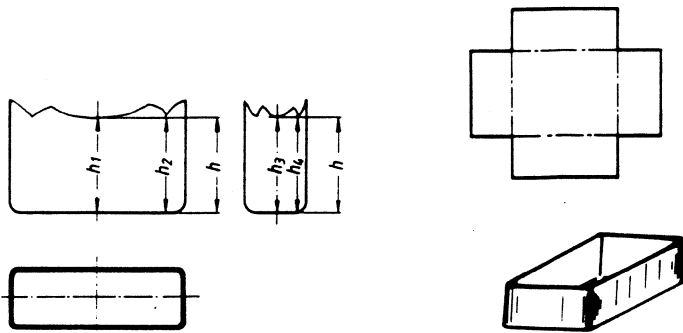
Voor de produktie zal men via uitproberen de juiste diameter van de blenk bepalen. Voor grote series is het aantrekkelijk om dit nauwkeurig te doen: een kleinere diameter van de blenk bespaart immers veel materiaal.

Rechthoekige en vierkante produkten

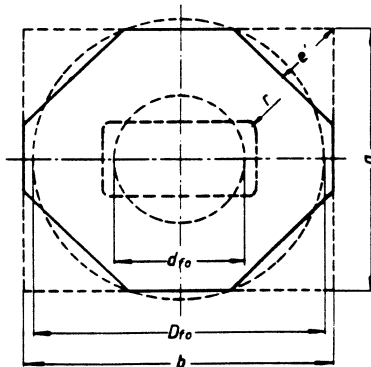
De vervaardiging van rechthoekige produkten zal hier slechts zeer kort besproken worden.

Wanneer men van een rechthoekig doosje van figuur 19.26 (afmetingen $l \cdot b \cdot h$) de uitslag maakt heeft men een plaat nodig met afmetingen van $(l + 2h) \cdot (b + 2h)$. Hierbij zijn alle afrondingen verwaarloosd. Wanneer men deze plaat als blenk zou gebruiken blijft er materiaal in de hoeken over. Bij het dieptrekken wordt dit materiaal voor een gedeelte in de zijkanten weggedrukt en voor een deel komt dit in de hoogte terecht waarbij oren worden gevormd.

De oren kunnen verkleind worden door de hoeken onder een hoek van 45° uit de blenk te snijden (figuur 19.27).



Figuur 19.26: Rechthoekig doosje met uitslag



Figuur 19.27: Experimenteel bepaalde vorm met afgeknipte hoeken

D_{fo} en d_{fo} zijn fictieve diameters van cirkels met hetzelfde oppervlak als de bodem en de benodigde blenk. Het produkt dat nu gevormd wordt heeft oren, maar het laagste punt bij de hoeken is even hoog als het laagste punt op de rechte zijden.

Er zijn andere, moeilijk te bepalen, vormen voor de blenk waarbij minder oorvorming optreedt. Het voordeel dat men met deze vormen kan verkrijgen is niet zo groot. Daarom worden deze methoden hier niet behandeld.

Als het produkt een flens heeft, is het mogelijk om het teveel aan materiaal eenvoudig weg te snijden.

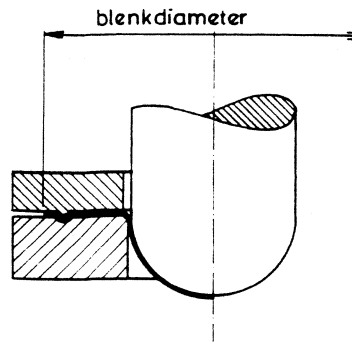
19.5 ANDERE VORMEN VAN DIEPTREKKEN

Strekvormen

Dit proces wordt gebruikt voor het vormen van lage, 'ondiepe' produkten met grote afrondingen, zoals veel carrosseriedelen. Deze produkten kunnen moeilijk met het normale dieptrekproces vervaardigd worden, omdat een groot gebied waarin het materiaal plastisch vervormt niet voldoende ondersteund wordt. Hierdoor kunnen er plooien optreden.

Bij het strekvormen wordt de vorm (grotendeels) uit het rekken van het materiaal verkregen. Er treedt vermindering van de wanddikte op. De plooihouderdruk wordt hoger genomen of de blenk wordt volledig door de plooihouder ingeklemd (figuur 19.28). Bij het strekvormen blijft de rand van de blenk dus op zijn plaats en bij het dieptrekken komt deze rand tijdens het proces steeds verder naar binnen.

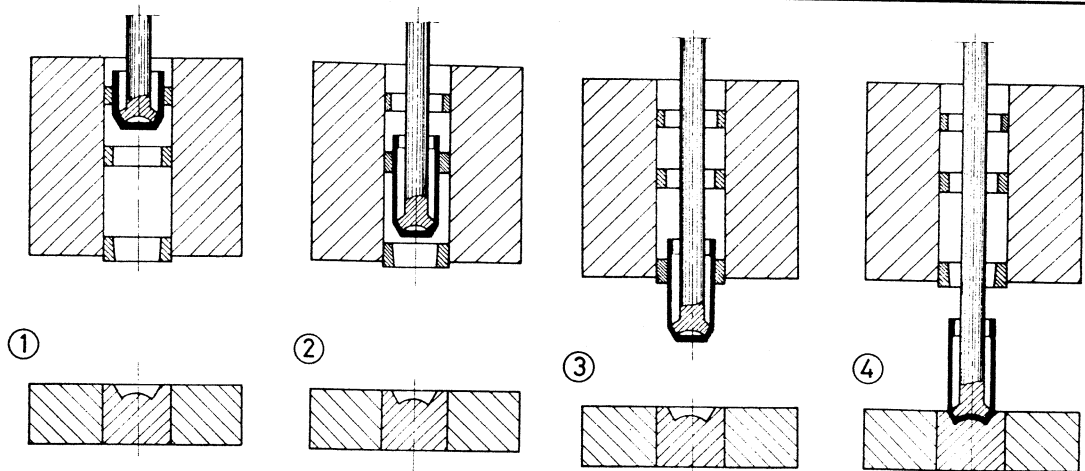
Bij de fabricage van carrossiedelen vindt er vaak een vervorming plaats, die het midden houdt tussen dieptrekken en strekvormen.



Figuur 19.28: Streckvormen

Duntrekken

Bij het duntrekken wordt de trekspleet bewust te klein gemaakt: de wanddikte wordt hierdoor verminderd en er kan in één trek een hoger produkt gevormd worden. Dit proces wordt vooral gebruikt voor lange en dunne busen, zoals spuitbussen.



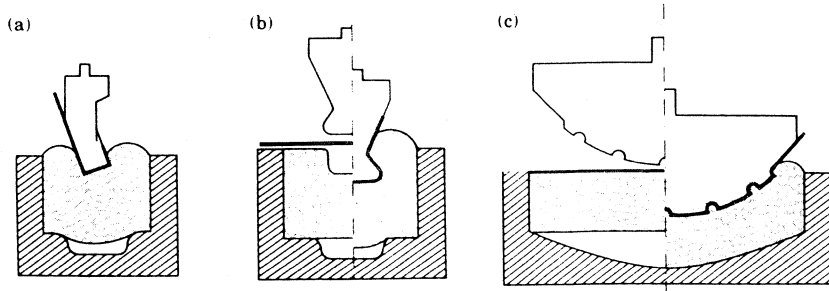
Figuur 19.29: Duntrekken

Rubbervormen

De blenk kan in plaats van in een starre matrijs ook in een elastisch materiaal worden gedrukt (figuur 19.30).

Hierdoor wordt het werkstuk volledig ondersteund en wordt secundaire ploovorming vermeden. Door het gebruik van elastisch gereedschap wordt het mogelijk om niet-lossende vormen te maken.

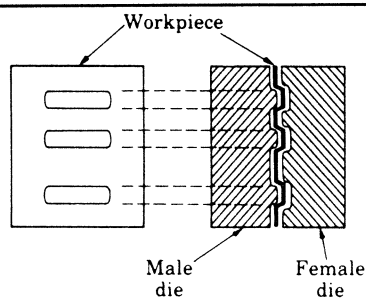
Een ander voordeel vormen de lagere kosten ten opzichte van dieptrekgereedschap: één helft van het gereedschap wordt vervangen voor een eenvoudig elastisch gedeelte.



Figuur 19.30: Rubbervormen

Reliëfpersen

Voor het aanbrengen van relatief kleine, niet al te diepe nippels en rillen op een grotere plaat kan het reliëfpersen worden gebruikt (figuur 19.31). Bij dit proces wordt het plaatmateriaal tussen een stempel en een matrijs in vorm geperst. Er is geen plooihouder aanwezig, de vervorming wordt grotendeels uit het rekken van het materiaal verkregen.



Figuur 19.31: Reliëfpersen

19.6 BIJKOMENDE BEWERKINGEN

Naast de eigenlijke bewerking, het dieptrekken, zijn er nog een aantal andere bewerkingen nodig: fabricage van de blenks, smering, trimmen en eventueel kalibreren.

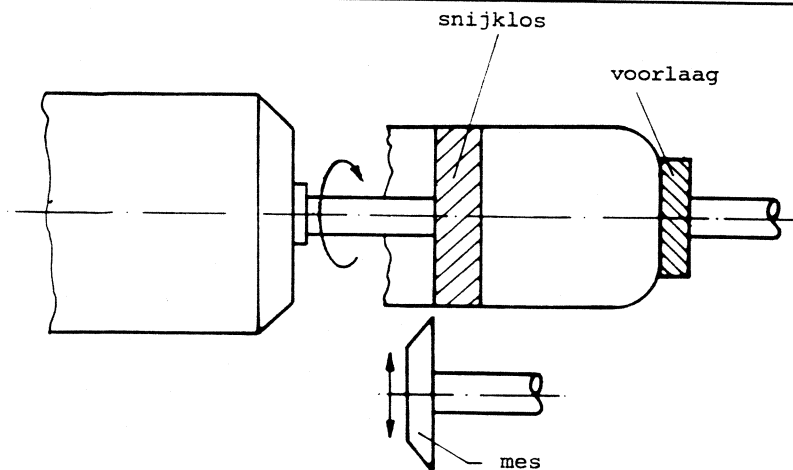
Fabricage van de blenks

Er zijn verschillende methoden om de blenks te verkrijgen. Men zal de eerste blenks voor de aanloopserie vaak met een rondschaar maken, om de afmetingen te kunnen optimaliseren. Pas daarna wordt geïnvesteerd in een kostbaar gereedschap om de blenks uit te snijden. Met een snijgereedschap kunnen de blenks uit stroken of band gesneden worden. Voor kleinere series kan men de blenks laten toeleveren.

Trimmen

Bij doorgetrokken produkten zal de rand door oorvorming onregelmatig zijn. Om een vlakke rand te krijgen is dus nog een nabewerking nodig. Deze bewerking wordt *trimmen* genoemd en kan voor dunwandige produkten onder andere uitgevoerd worden op een speciaal hiervoor geconstrueerde machine (figuur 19.32).

Het werkstuk wordt op een *snijklos* geschoven. Op een slede is een rond mes aangebracht dat naar binnen kan bewegen. Hierdoor wordt de bovenzijde van het produkt vlak afgesneden.



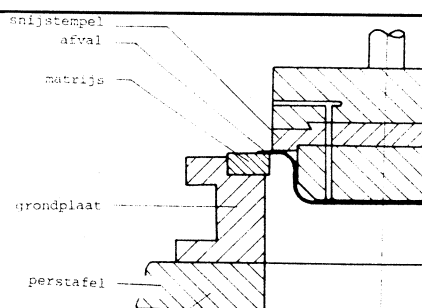
Figuur 19.32: Trimmen

Voor het trimmen moet voldoende materiaal aanwezig zijn omdat anders metaalsplinters kunnen ontstaan. Deze zijn moeilijk uit het gereedschap te verwijderen en door compressie van deze splinters wordt de levensduur van het gereedschap korter.

Daarom wordt er een toeslag genomen van ongeveer anderhalf maal de materiaaldikte van het werkstuk, met een minimum van 3 mm.

Wanneer men een flens aan het werkstuk laat zitten, kan men met behulp van een snijstempel trimmen (figuur 19.33)). Hierdoor wordt het ook mogelijk om niet ronde werkstukken te trimmen.

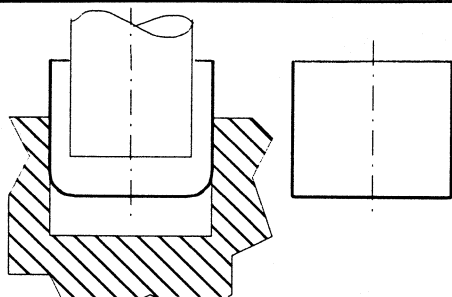
Het is overigens mogelijk om de flens en de overgang tussen flens en beker vrijwel volledig af te snijden. Het snijstempel loopt dan vlak langs de wand van het werkstuk. Dit is een vrij slordige bewerking: het is goed zichtbaar dat de overblijvende rand niet diepgetrokken, maar afgeschoven is.



Figuur 19.33: Trimmen van een werkstuk met behulp van een snijstempel

Kalibreren

Voor het dieptrekproces zijn behoorlijke afrondingen aan het werkstuk noodzakelijk. Wanneer deze afrondingen niet in het produkt mogen zitten zijn ze met een extra bewerking, het *kalibreren*, te verkleinen. Dit is schematisch afgebeeld in figuur 19.34.



Figuur 19.34: Het kalibreren van een werkstuk.

Er treedt hier een vergroting van het oppervlak op. Deze vergroting zal voor een gedeelte komen uit het rekken van het materiaal, maar ook worden de boven- en onderkant van het produkt respectievelijk iets naar beneden en boven getrokken. De mate waarin dit optreedt is niet eenvoudig te berekenen. Daarom kunnen lengtes van wanden die niet te trimmen zijn beter niet van al te nauwe toleranties worden voorzien.

19.7 VOOR- EN NADELEN

Voordelen:

- In vergelijking met de buigbewerkingen heeft men met het proces een grote vormvrijheid.
- Het is mogelijk om dubbelgekromde oppervlakken te maken.
- Het proces is geschikt voor grote series.
- Het proces is goed te automatiseren.
- Bij zuiver dieptrekken vindt nauwelijks wanddiktevermindering plaats.

Nadelen:

- Er kunnen inwendige spanningen in het produkt blijven zitten.
- De wanddikte is niet gelijkmatig.
- De rand is door oorvorming onregelmatig en zal vaak nabewerkt moeten worden.

19.8 ONTWERPRICHTLIJNEN

- De vorm moet in de persrichting lossend zijn.
- De verhouding tussen de hoogte en de diameter mag niet te groot genomen worden, om het aantal trekken niet te groot te laten worden en om tussentijds gloeien te besparen. Wanneer men zeer hoge produkten wil vervaardigen kan men beter duntrekken of slagextruderen.
- Door het aanbrengen van een flens kan men kosten op het trimmen besparen, omdat men een snijstempel kan gebruiken. Er is wel een grotere blenk nodig.
- Houdt rekening met de afrondingen: als de trekradius en stempelafroning zonder bezwaar in het produkt kunnen blijven zitten bespaart men op het kalibreren.
- Wanneer er een grote flens aan het produkt zit, kan deze gaan plooien door elastische terugvering. Door één of enkele rillen aan te brengen wordt dit voorkomen.

LITERATUUR

- Doege, E. e.a.
Tiefziehen
Deutsche Gesellschaft für Metallkunde e.V., 1975.
- Doorschot, F.
De technologie van de serie- en massafabricage
Collegediktaat io27
TU Delft, 1991.
- Hermans, H.
Vervaardigingstechnieken 3
Collegediktaat io27
TU Delft, 1986.
- Kalpakjian, S.
Manufacturing engineering and technology (2nd edition)
Addison-Wesley Publishing company, 1992.
- Lange, K.
Lehrbuch der Umformtechnik
Band 3 Blechumforming
Springer-Verlag, 1975
- Niebel, B.W., A.B. Draper en R.A. Wysk
Modern Manufacturing Process Engineering
McGraw-Hill, 1989.

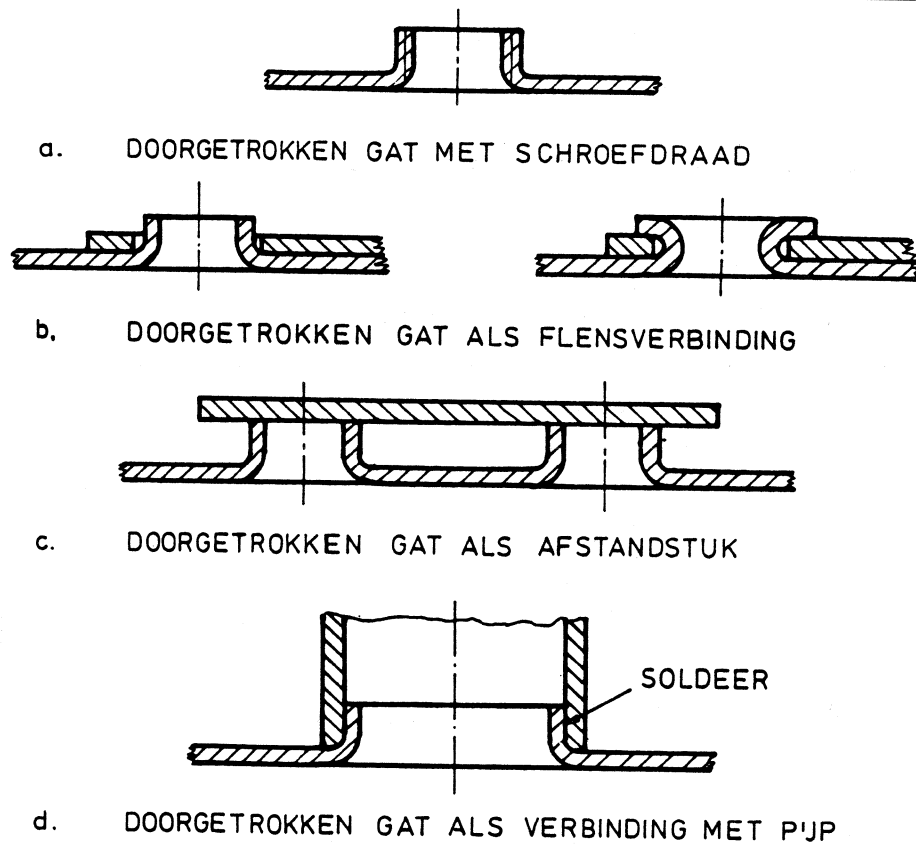
Hoofdstuk 20: KRAAGTREKKEN

20.1 INLEIDING

Kraagtrekken is een bewerking die onder de buigbewerkingen gerekend wordt. Deze bewerking wordt ook wel het *doortrekken van gaten* of *dimpelen* genoemd. Met het proces worden gaten voorzien van een opstaande rand die de *kraag* wordt genoemd.

Toepassingen

In figuur 20.1 zijn enkele toepassingen gegeven van doorgetrokken gaten. Deze toepassingen berusten voornamelijk op het vergroten van het oppervlak van de wand in een gat. Zo zijn bijvoorbeeld in de kraag meer gangen schroefdraad aan te brengen dan in de dikte van de vlakke plaat mogelijk was.



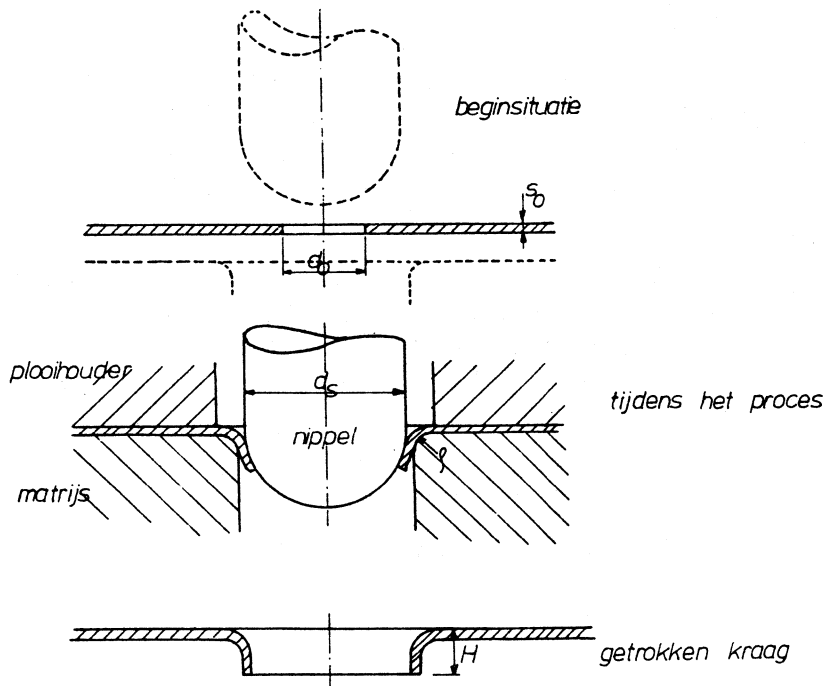
Figuur 20.1: Toepassingen van doorgetrokken gaten

20.2 HET PROCES

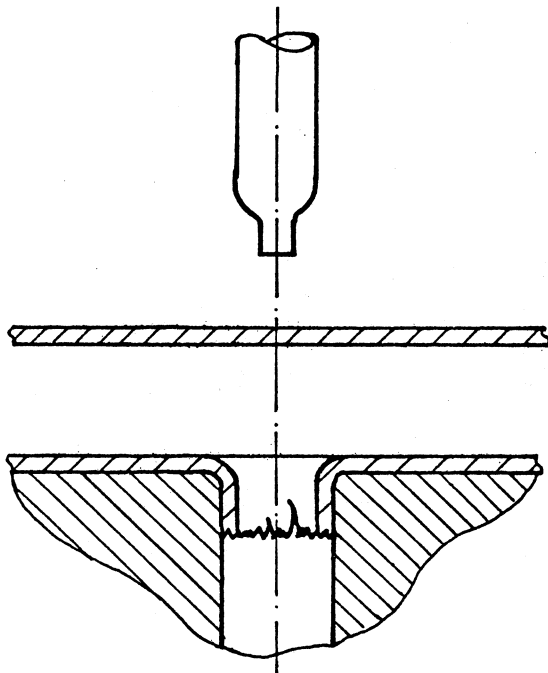
Het proces bestaat uit twee stappen. In de eerste stap wordt een gat gemaakt met doorsnede d_o . Dit kan gebeuren door te ponsen of te boren.

Bij de tweede stap, het eigenlijke kraagtrekken, wordt een stempel met

een diameter d_s door het voorgeponste of voorgeboorde gat gedrukt. Hierdoor wordt het materiaal in tangentiële richting gerekt. Het werkstuk wordt door een matrijs ondersteund (figuur 20.2).



Figuur 20.2: Principe van het kraagtrekken



Figuur 20.3: Het ponsen en kraagtrekken in één bewerking

Als er lage eisen worden gesteld aan de kwaliteit van de kraag kan het voorponsen of voorboren achterwege blijven. Men kan dan een procesgang besparen. In dat geval wordt het gat uitgeponst door de punt van de stempel (figuur 20.3). De rand van de kraag zal rafelig zijn, omdat er tijdens het ponsen van het gat geen ondersteuning van een snijplaat is.

Grensdooortrekverhouding

Men kan geen onbeperkt hoge kraag maken: de maximaal bereikbare vervorming wordt beperkt door de maximaal toelaatbare materiaalspanningen.

De maximaal te bereiken vervorming wordt weergegeven door de *grensdooortrekverhouding* $\beta_{max} = d_s/d_o$.

Waarin

$d_{s\ max}$: maximale diameter van de stempel
 d_o : diameter van het gat

Deze β_{max} kan met behulp van de onderstaande formule bepaald worden:

$$\beta_{max} = e^{(2n - \epsilon_0)} - \frac{2t_0}{d_0}$$

Waarin:

β_{max} : grensdooortrekverhouding
 n : verstevigingsexponent
 ϵ_0 : voordeformatie
 t_0 : materiaaldikte (mm)
 d_0 : gatdiameter (mm)

Wanneer er scheurtjes of bramen aan de rand van het gat zitten moet een veiligheidsfactor op de bovenstaande formule worden genomen. Wanneer scheurvorming geen bezwaren oplevert, kan men een grotere trekverhouding nemen. In figuur 20.4 worden voor enkele materialen de maximale trekverhoudingen gegeven.

Materiaal	Trekverhouding $\beta_{max} = d_s/d_o$		
	Gladde rand	Kleine scheuren	Scheurvorming
Staal, dieptrekkwaliteit	2,5	2,6 - 3,9	> 4,0
Staal, handelskwaliteit	2,4	2,5 - 3,7	> 3,8
Aluminium	2,3	2,4 - 3,4	> 3,5
Messing	2,4	2,4 - 3,9	> 4,0
Zink	1,9	2,0 - 2,9	> 3,0

Figuur 20.4: Maximale haalbare trekverhouding voor enkele materialen

De kraaghoogte

De hoogte van de kraag kan men berekenen met:

$$H = \frac{d_s - d_o}{2} + 0,43 \cdot p + 1,22 \cdot t_0$$

Waarin:

- H : hoogte van de kraag (mm)
- d_s : stempeldiameter (mm)
- d_o : gatdiameter (mm)
- ρ : afrondingsstraal aan het gereedschap (mm)
- t_o : materiaaldikte (mm)

De kracht voor het kraagtrekken

De kracht kan worden bepaald met de empirische formule:

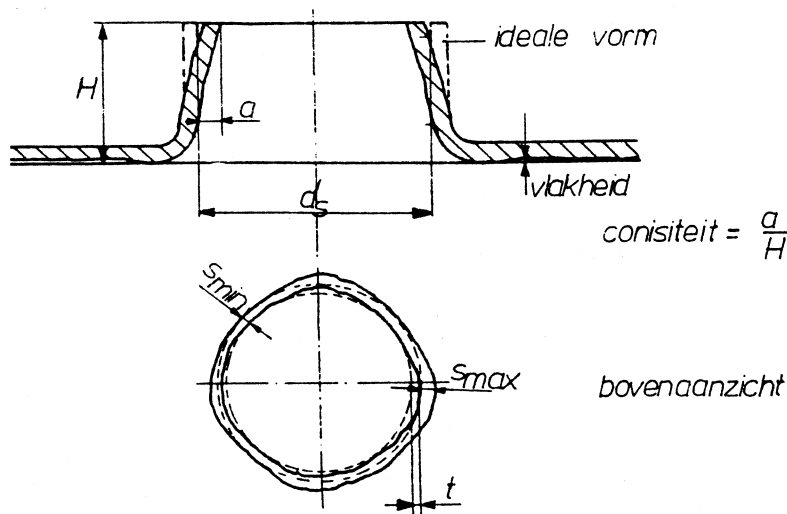
$$P_k = 0,7 t (d_m - d_o) \sigma_{tmax}$$

Waarin:

- P_k : kracht voor het kraagtrekken (N)
- d_o : diameter van het voorgeponste gat (mm)
- d_m : de matrijsopening (mm)
- t : plaatdikte (mm)
- σ_{tmax} : treksterkte van het materiaal (N/mm²)

Afwijkingen van de ideale vorm

Als de stempel uit het gat wordt teruggetrokken, zal het materiaal enigszins terugveren. Dit heeft drie gevolgen: de kraag zal een conische vorm krijgen, het gat zal niet geheel rond zijn en het eindvlak zal iets naar binnen buigen (figuur 20.5). Omdat de rek aan de rand het grootst is, zal deze wand hier iets dunner worden.



Figuur 20.5: Uiterlijk van een getrokken kraag

Kwaliteit van het gat

De kwaliteit van de rand en de hoogte van de kraag zijn sterk afhankelijk van de afwerking van het voorgeponste gat. Wanneer deze ruw is of wanneer er bramen aanwezig zijn, kunnen er door spanningsconcentraties gemakkelijk scheuren ontstaan.

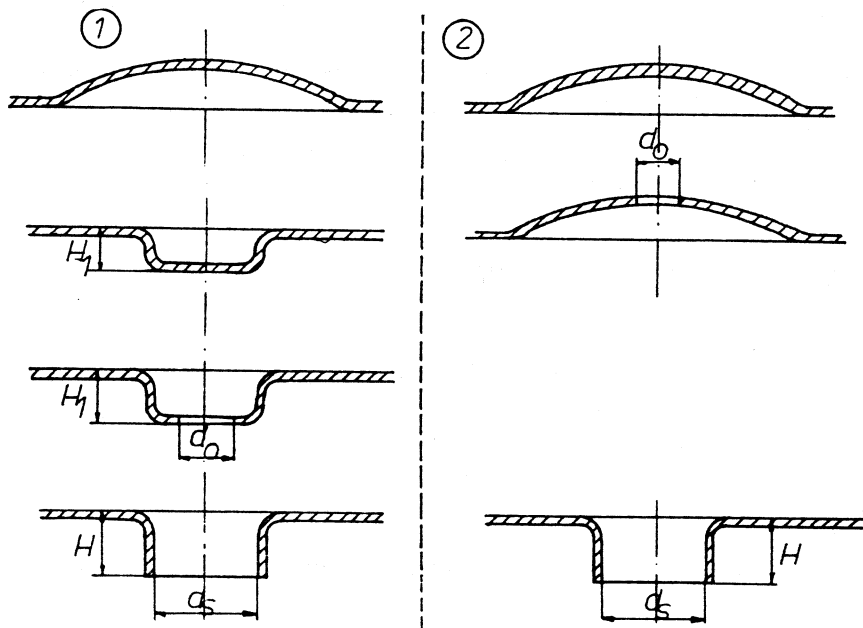
Hierdoor wordt het moeilijk om de maximale grensdoortrekverhouding te bereiken. Geboorde gaten geven betere resultaten dan geponste gaten, maar het boren is een dure bewerking.

Gaten die in één bewerking geponst en doorgetrokken worden, geven slechte resultaten. De kosten zijn echter minimaal.

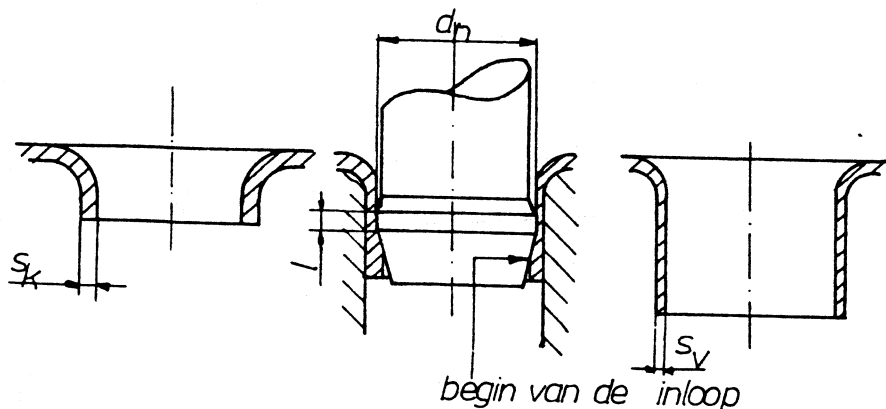
Hogere kragen

Er bestaan twee mogelijkheden om een hogere kraag te krijgen dan de maximale grensdoortrekverhouding toelaat:

- Men kan de rek uit een groter gebied halen. Figuur 20.6 geeft een tweetal mogelijkheden van deze methode. Er moet wel voldoende materiaal in de buurt zijn dat vervormd kan worden.
- Wanneer de rek niet uit het nabijgelegen gebied kan worden gehaald, zal men de wand achteraf verdunnen. Hierbij wordt het materiaal uitgesmeerd over de hoogte van de kraag. De kraag wordt dan dunner en langer. Deze methode wordt het *verjongen van de kraag* genoemd. Het proces is schematisch weergegeven in figuur 20.7. De spleetbreedte tussen de stempel en de matrijs bepaalt hoe de dikte van de wand en de hoogte van de kraag worden. De coniciteit en de onregelmatigheid van de wanddikte zijn geringer bij een verjongde kraag (figuur 20.8).

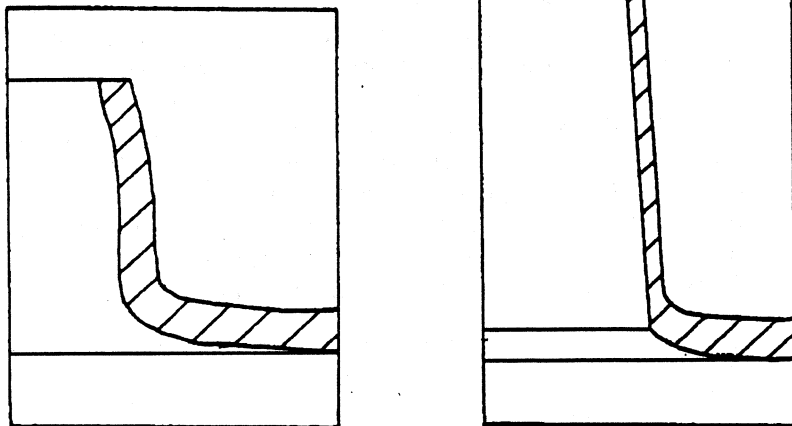


Figuur 20.6: Een groter gebied voor de rek



Figuur 20.7: Het verjongen van de kraag

Onder: conventioneel
getrokken kraag
Rechts: verlongde kraag



Figuur 20.8: Verschil tussen een conventioneel getrokken en een verjongde kraag

20.3 VOOR- EN NADELEN

Voordelen

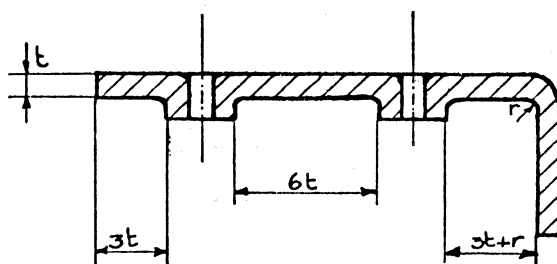
- Het werkbare oppervlak kan op een goedkope manier vergroot worden (goedkoper dan een bus inzetten).
- Het is gemakkelijk in volgstampels toe te passen en het is dus geschikt voor de massafabricage.

Nadelen

- De kraag is conisch en daardoor minder geschikt voor lagering.

20.4 ONTWERPRICHTLIJNEN

- Bij het kraagtrekken moet men rekening houden met de plaatsing van de gaten. In figuur 20.9 is een overzicht van de minimale onderlinge afstanden gegeven.



Figuur 20.9: Richtlijnen voor de plaatsing van doorgetrokken gaten

- Houdt rekening met de maximale kraaghoogte: deze kan door enkele behandelde methoden hoger gemaakt worden, maar dit betekent extra stappen en dus extra kosten.

- Wanneer men schroefdraad aanbrengt, of wanneer de kraag zich aan de achterkant van het werkstuk bevindt, zal de afwerking vaak niet zo belangrijk zijn. In dat geval kan men in één stap ponsen en kraagtrekken.
- Houdt rekening met de coniciteit: wanneer men bijvoorbeeld een as wil lageren, zal de coniciteit vaak ongewenst zijn en zal men moeten nabewerken.

LITERATUUR

Doorschot, F.

De technologie van de serie- en massafabricage

Collegediktaat io27

Technische Universiteit Delft, 1991.

Hermans, H.

Vervaardigingstechnieken 3

Collegediktaat io27

Technische Universiteit Delft, 1986.

Hoff, L van der, en J.Lobée

Doorgetrokken gaten

Scriptie io69 - De technologie van de massafabricage

Technische Universiteit Delft, 1982.

Hoofdstuk 21: KRALEN

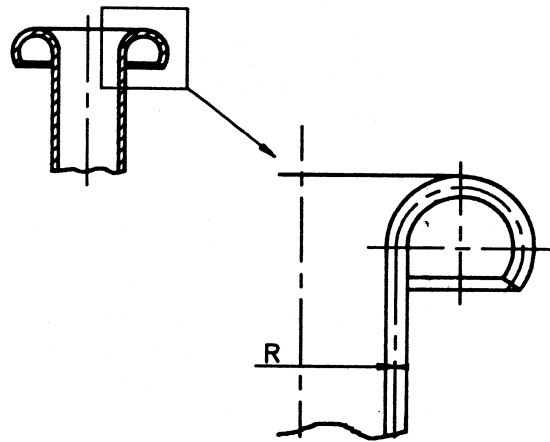
21.1 INLEIDING

Het kralen is een proces waarmee de randen van een werkstuk in een cirkelvormige doorsnede (de *kraal*) kunnen worden gebogen (figuur 21.1).

De buiglijn bij het kralen kan zowel recht als gekromd zijn. Een voorbeeld van de toepassing van kralen met een rechte buiglijn zijn de reeds genoemde scharnieren. In dit hoofdstuk zal verder worden ingegaan op het kralen van gekromde lijnen. Hierbij is het werkstuk bijvoorbeeld een diepgetrokken produkt of een buis.

Het kralen kan voor een aantal toepassingen gebruikt worden:

- Een gekraalde rand kan de stijfheid van een produkt vergroten.
- Een scherpe rand aan het produkt kan weggewerkt worden.
- Een kraal kan gebruikt worden om twee losse onderdelen aan elkaar te bevestigen, bijvoorbeeld met holnieten.
- Een kraal kan gebruikt worden om een onderdeel door een ander onderdeel te leiden, bijvoorbeeld bij schoenogen en zeilringen.
- Door een onderdeel te kralen kan het aan een ander onderdeel worden bevestigd, bijvoorbeeld in deurscharnieren.

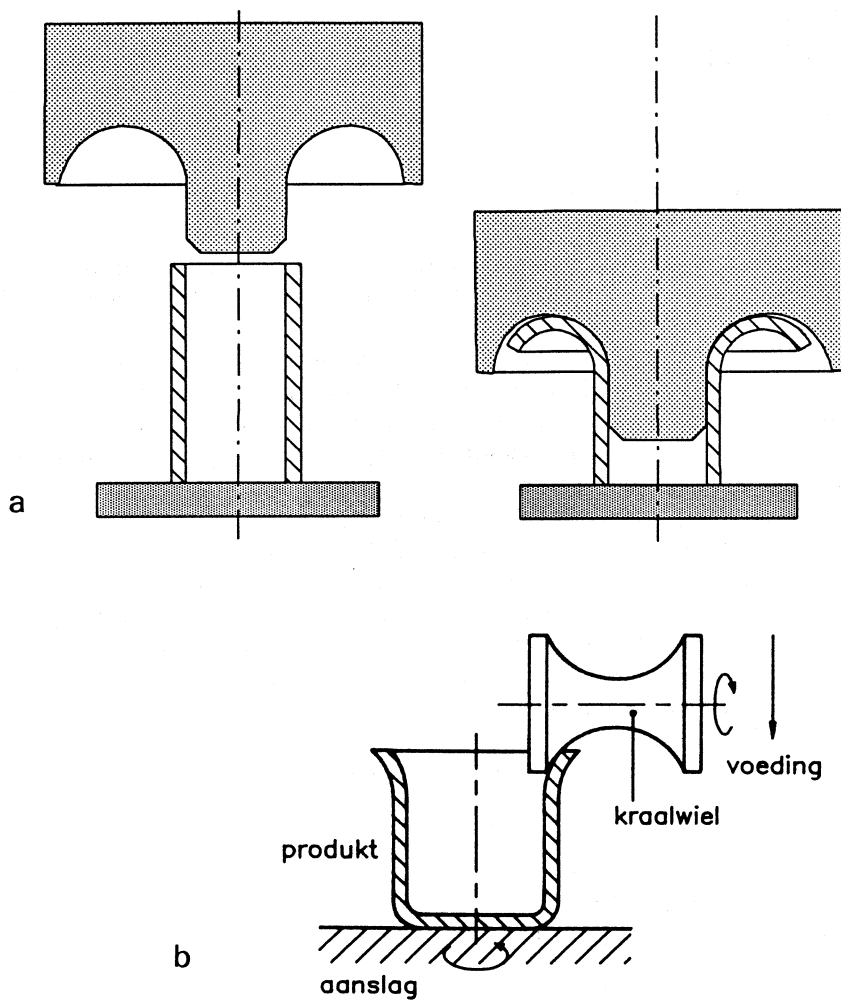


Figuur 21.1: Een gekraalde rand

21.2 HET KRAALPROCES

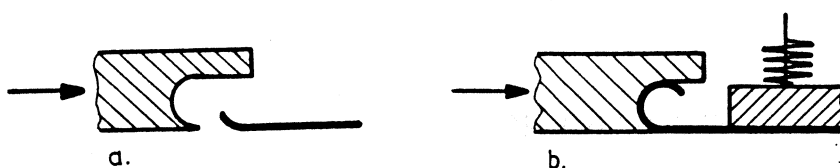
Het aanbrengen van de kraal kan op twee manieren gebeuren, namelijk met stampgereedschap op een pers of met een kraalwiel op een draibank (figuur 21.2).

In de meeste gevallen wordt de kraal op een pers in één slag aangebracht op de manier die is aangegeven in figuur 21.2a. Om verschuiving te voorkomen moet het werkstuk hierbij goed ingeklemd worden.



Figuur 21.2: Het aanbrengen van een kraal op een pers (a) of een draaibank (b)

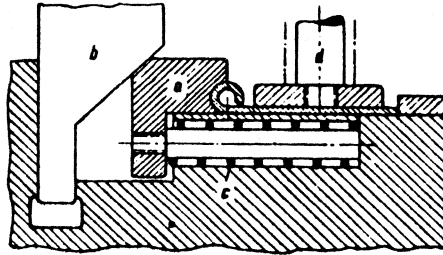
Het kralen op een pers kan ook in twee bewerkingen worden uitgevoerd. In de eerste stap wordt dan met een gewone buigbewerking een kant voorgezet, waarna deze in de tweede stap met een kraalstempel in de gewenste vorm wordt gebogen (figuur 21.3).



Figuur 21.3: Het maken van een kraalrand in twee stappen

Wanneer gekraald wordt om een rechte buiglijn en de te kralen rand horizontaal ligt, zoals gebruikelijk is bij gebruik van volggereedschap, moet de kraalstempel ook in horizontale richting bewegen. Dit komt bijvoorbeeld voor bij het kralen van scharnieren. De beweging van de kraalstempel wordt van de verticale persrichting afgeleid door het gebruik van

wiggen (figuur 21.4). Door de neergaande beweging van de stempel B, wordt het onderdeel A naar rechts geschoven. Door deze laatste beweging wordt de kraal gevormd. Veer C zorgt ervoor dat A weer naar links wordt geschoven. Onderdeel D is de neerhouder.

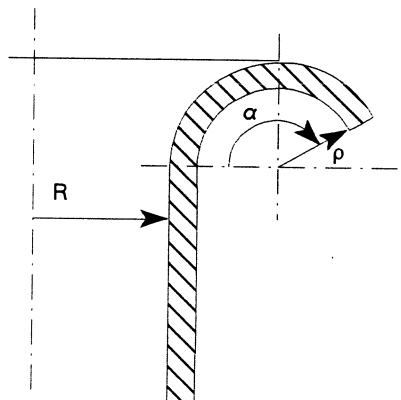


Figuur 21.4: Het kralen op een pers met behulp van een wig

Bij het kralen moet de braamzijde van het werkstuk altijd aan de binnenzijde van de kraal komen te liggen, omdat aan deze zijde de laagste spanningen optreden. Bovendien zal het kraalgereedschap zo minder snel slijten en zal het eindproduct er beter uitzien.

21.3 PROCESVARIABLEN

Bij het kralen wordt uitgegaan van een rond werkstuk met een straal R . Van dit werkstuk wordt de rand gekraald met een straal ρ over een hoek α (figuur 21.5).



Figuur 21.5: De afmetingen van een gekraalde rand

Arbeid, kraalkracht en optimale kraalstraal

Bij het kralen wordt het materiaal eerst op een grotere diameter gebracht (rek) en vervolgens op een kleinere diameter (stuik). De arbeid die nodig is om de kraal te maken, kunnen we opgebouwd denken uit de volgende delen:

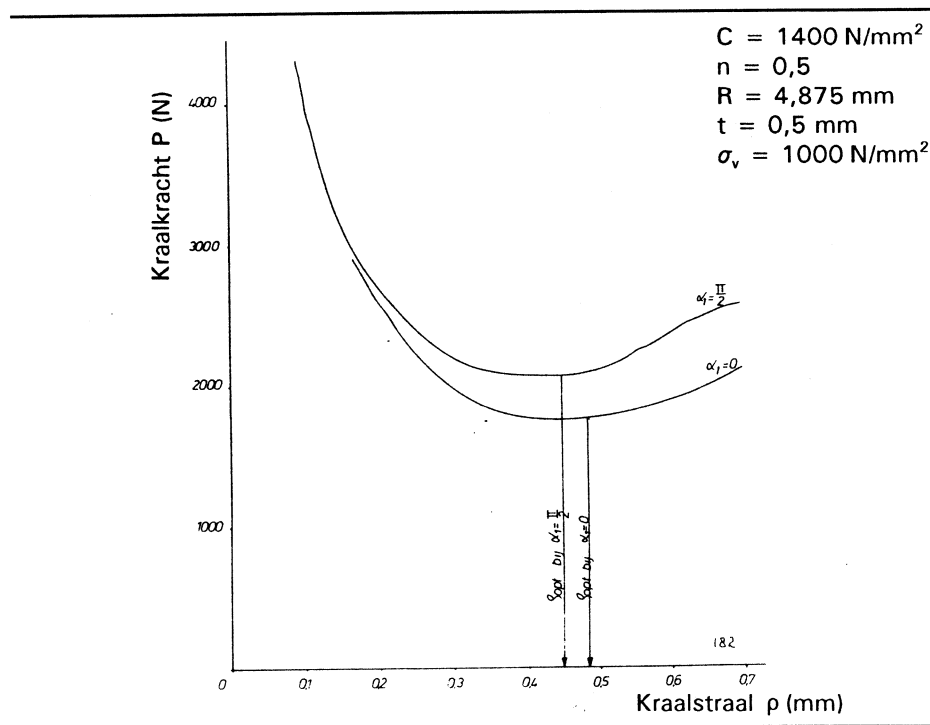
- arbeid die nodig is voor het rekken en stuiken van het materiaal;
- arbeid die nodig is om een blijvende buiging te veroorzaken;
- arbeid die nodig is om de wrijving tussen het materiaal en het gereedschap te overwinnen.

De laatste kan ten opzichte van de eerste twee verwaarloosd worden. De genoemde arbeiden moeten door de machine worden opgebracht. De kracht die nodig is voor het kralen kan dan als volgt worden berekend:

$$P_k = 2\pi C t (\sqrt{4/3})^{n+1} \left(\frac{R}{n+1}\right) \left[\frac{\rho}{R} (1-\cos\alpha)\right]^{n+1} + \left(\frac{\pi\sigma_v R t^2}{2\rho}\right)$$

Waarin: P_k : kraalkracht (N)
 C : materiaalconstante (N/mm²)
 t : materiaaldikte (mm)
 n : verstevigingsexponent
 R : gemiddelde straal van het produkt (mm)
 ρ : gemiddelde straal van de kraal (mm)
 α : hoek van de kraal (°)
 σ_v : vloeispanning (N/mm²)

Zoals uit deze formule blijkt, is P_k alleen afhankelijk van ρ en α , alle materiaalgrootheden liggen immers vast. Nemen we bijvoorbeeld een materiaal met de volgende eigenschappen: $C = 1400$ N/mm², $t = 0,25$ mm, $n = 0,5$, $R = 4,875$ mm en $\sigma_v = 1000$ N/mm², dan krijgen we de krommen van figuur 21.6.



Figuur 21.6: De kraalkracht P_k als functie van de kraalstraal ρ

Met behulp van bovenstaande formule kunnen we de optimale ρ bepalen. Dit is de waarde voor ρ waarbij de minimale kracht optreedt. Er geldt dan $dF/d\rho = 0$.

$$\rho_{opt.} = \left(\frac{\sigma_v t}{4 C \left(\frac{4}{3}\right)^{n+1} \left(\frac{1-\cos\alpha}{R}\right)^{n+1}} \right)^{\frac{1}{2+n}}$$

Waarin $\rho_{opt.}$ de optimale straal van de kraal is.

Deze formules gelden echter alleen voor $0 < \alpha < 180^\circ$. Wordt α groter dan 180° dan neemt de kraalkracht zeer snel toe en daarmee de kans op beschadiging van het produkt. Een kraalhoek groter dan 230° dient vermeden te worden.

Rek en rekreserve

Het is van belang om te weten of het werkstuk voldoende *rekreserve* heeft. Hiermee wordt bedoeld dat het werkstuk tijdens vorige bewerkingen pas zover is gerekt, dat het materiaal nog voldoende kan rekken om de gewenste kraal te maken. Hiervoor is het nodig om te bepalen hoeveel het materiaal tijdens het kralen rekt. Het blijkt dat de maximale effectieve rek $\bar{\varepsilon}$ bij het kralen gelijk is aan:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{4}{3}} \log\left(\frac{R+2\rho}{R}\right)$$

Verder geldt:

$$\bar{\varepsilon} = \ln(1+\Delta)$$

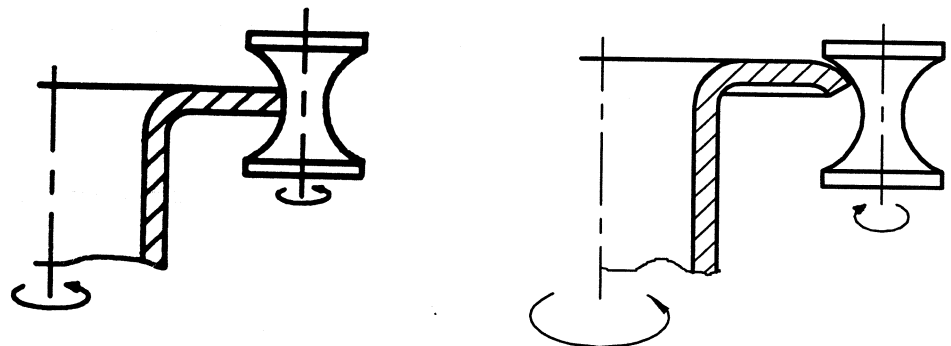
Hierin is Δ de maatrek.

Uit deze twee formules volgt dat de rekreserve die het materiaal nog moet hebben vóór het kralen, gelijk is aan:

$$\Delta = \left[\left(\frac{R+2\rho}{R} \right)^{\sqrt{\frac{4}{3}}} - 1 \right] \times 100\%$$

Geldt bijvoorbeeld dat $R = 4,875$ mm en $\rho = 0,44$ mm, dan is de effectieve rek 21%. Voor een diepgetrokken produkt betekent dit dat het materiaal na de laatste dieptrekbehandeling nog een rekreserve moet hebben van 21% om de gevraagde kraal te kunnen maken.

Een methode om de invloed van de rekreserve te verminderen, is in plaats van de rekmethode de zogenaamde stuikmethode toe te passen (figuur 21.7).



Figuur 21.7: Het maken van een kraalrand door middel van de stuikmethode

Een andere methode om voldoende rekreserve te hebben, is het gloeien van het materiaal. Dit gebeurt meestal voor de laatste twee dieptrekgangen.

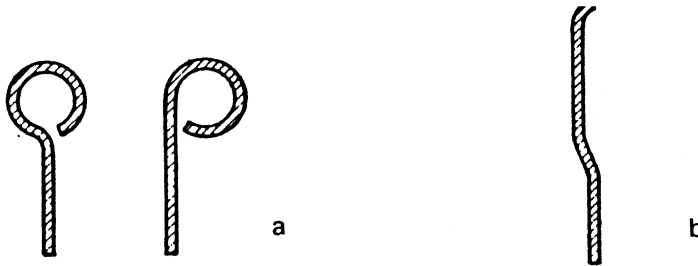
21.4 ONTWERPRICHTLIJNEN

Materiaal

Het kralen kan succesvol worden toegepast bij de materialen die ook geschikt zijn voor het dieptrekken. Het wordt het meest gebruikt voor aluminium, koper, messing, zink en enkele staalsoorten. Goud, zilver en platina zijn ook geschikt, maar worden alleen voor speciale toepassingen gebruikt.

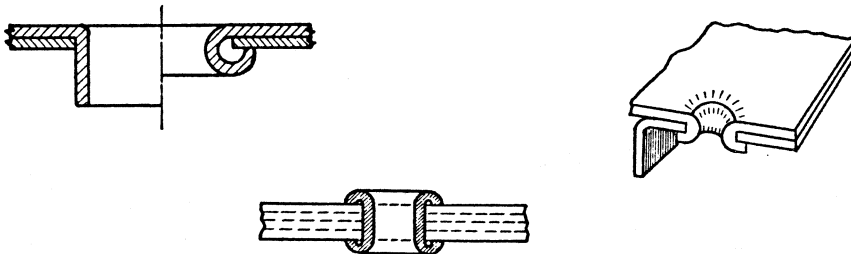
Uitvoeringsvormen

Er zijn twee mogelijkheden voor de uitvoering van de kraal aan de rechte rand van een plaat (figuur 21.8). De eerste uitvoering is duurder dan de tweede, omdat bij deze vorm een extra bewerking noodzakelijk is.



Figuur 21.8: Twee mogelijke vormen van de kraal (a) en de vorm van de aanzet voor de eerste kraal (b)

In figuur 21.9 is aangegeven hoe twee onderdelen aan elkaar kunnen worden verbonden met behulp van een kraal.



Figuur 21.9: Het verbinden van twee onderdelen met behulp van kralen

Afmetingen

De relatie tussen de afmetingen van de kraal, de materiaalgrootheden en de kraalkracht wordt gegeven door de formule op bladzijde 21.3.

Rekreserve

Wanneer er bij het kralen van een reeds bewerkt werkstuk wordt uitgegaan, moet er op worden gelet dat het materiaal nog voldoende rekreserve heeft. De rek tijdens het kralen kan berekend worden met behulp van de formule op bladzijde 21.5.

Rechte buiglijn

Voor het kralen van rechte buiglijnen moet de binnendiameter liggen tussen $2\frac{1}{2}$ tot 8 maal de materiaaldikte. Hoe beter het materiaal vervormbaar is, des te kleiner kan de binnendiameter zijn.

LITERATUUR

Doorschot, F.

De technologie van de serie- en massafabricage

Collegediktaat io27

Technische Universiteit Delft, 1991.

Hermans, H.

Vervaardigingstechnieken 3

Collegediktaat io27

Technische Universiteit Delft, 1986.

Selling, T.

Buigen van metaalplaat

Literatuuronderzoek I.V.14

Technische Hogeschool Delft, 1982.

Strasser, F.

Practical design of sheet metal stampings

Chapman & Hall Ltd., Londen, 1960.

Hoofdstuk 22: PLETTEN

22.1 INLEIDING

Pletten is een vorm van koud vrije-vorm-smeden. Het is geen technisch hoogwaardige bewerking, maar verdient voor veel toepassingen de voorkeur vanwege de lage proceskosten en de goede reproduceerbaarheid. Bij het pletten wordt een halffabrikaat tussen twee matrijshelften over een bepaalde lengte platgeslagen. De nauwkeurigheden die voor de verschillende toepassingen gewenst zijn, kunnen sterk uiteenlopen. Voor de eenvoudige borging van een wielje van een speelgoedauto zijn de eisen veel minder hoog dan voor toepassingen waarbij de plet essentieel is voor de werking van een produkt, zoals in reed-relais.

Toepassingen

In de elektronica-industrie wordt veelvuldig dun materiaal in grote series geplet. Op veel kleinere schaal gebeurt dit bijvoorbeeld bij diverse bevestigingsmiddelen, haak- en breinaalden en handvatten. De borging van wielen van speelgoedauto's gebeurt ook vaak met behulp van een plet. De scharnieren die aan het uiteinde van de baleinen van een paraplu zitten, zijn meestal geplet. Hierbij wordt op de plet nog een ponsbewerking uitgevoerd.

22.2 HET PLETPROCES

Bij het pletten wordt het werkstuk door middel van koude smeden gedeeltelijk platgeslagen. Er zijn verschillende uitvoeringsvormen van het pletproces. Deze zijn getoond in figuur 22.1. Voor de theoretische achtergronden van het pletproces die in de volgende paragraaf worden behandeld, zal steeds worden uitgegaan van het pletten van draad.

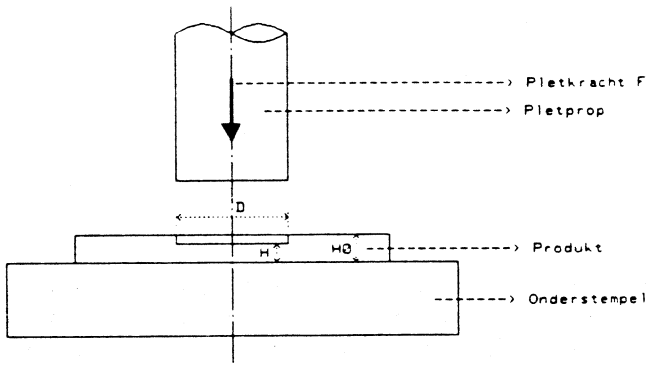
Bij het pletten is de voorbereiding voor het proces zeer kort, omdat het gereedschap meestal heel eenvoudig is. Om produkten te leveren die aan de gewenste specificaties voldoen, is het voldoende om een simpele matrijs te maken en enkele proefslagen uit te voeren.

Er worden beperkingen gesteld aan de grootte van de plet, omdat de spanningen bij steeds groter wordende vervormingen steeds sterker toenemen, waardoor het contactvlak van het gereedschap steeds harder dient te zijn. Hierdoor wordt het steeds moeilijker of zelfs onmogelijk om nog een geschikt hardmetaal te vinden.

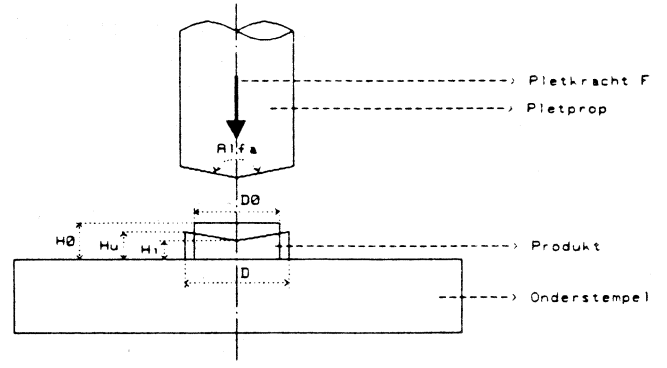
22.3 PROCESVARIABLEN

Bij de beschrijving van het pletten gaan we uit van een draad met een diameter d , die wordt platgeslagen tot een dikte h . De breedte van de plet noemen we a . De lengte l van de plet verandert nauwelijks, zodat er gesteld kan worden dat het oppervlak van de doorsnede voor en na het pletten ongeveer gelijk zijn. Hieruit volgt voor de breedte van de plet:

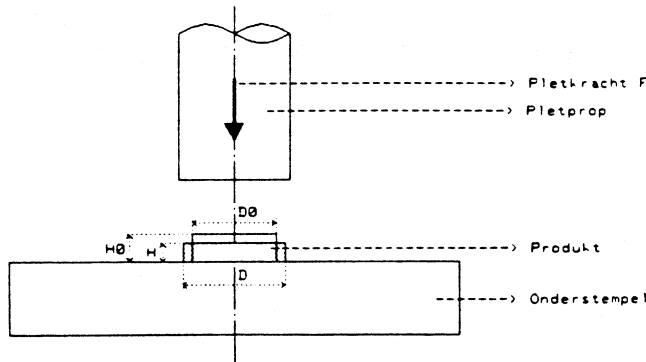
$$\frac{\pi}{4}d^2 = ah \quad \Rightarrow \quad a = \frac{\pi d^2}{4h}$$



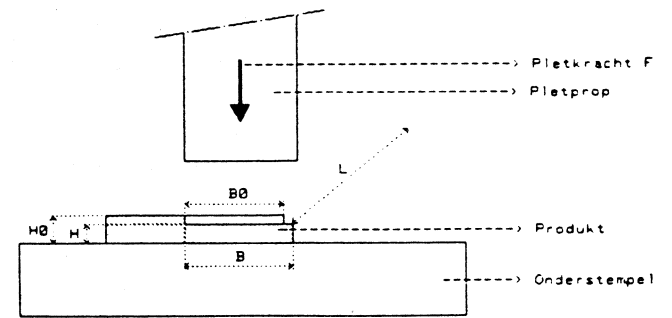
RONDE PLET IN PLAAT



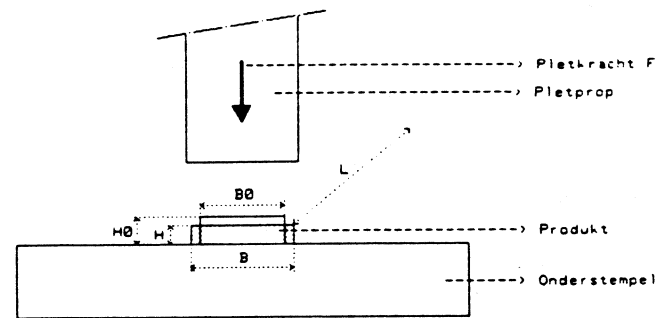
DAKSTEMPEL IN RONDE PROP



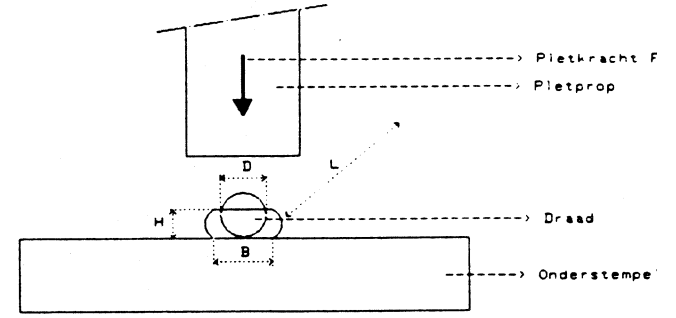
RONDE PLET



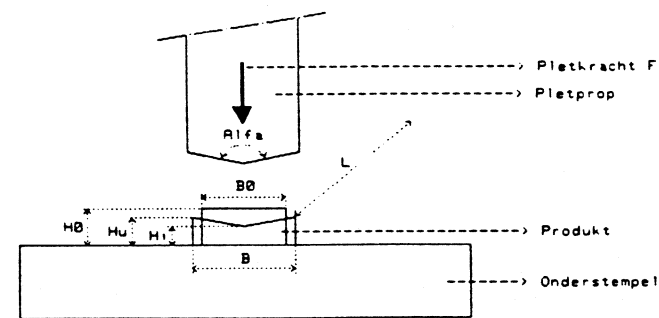
PLETTEN RAND AAN STRIP



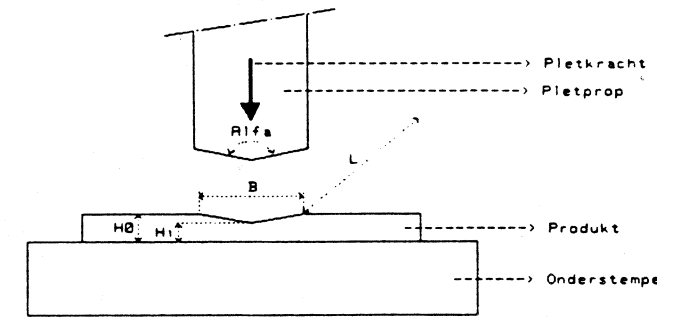
PLET IN STRIP



PLETTEN VAN DRAAD

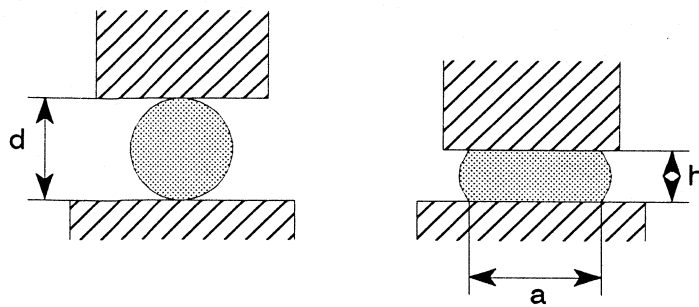


DAKSTEMPEL IN STRIP



DAKSTEMPEL IN STRIP (gedeeltelijk)

Figuur 22.1: Verschillende vormen van pletten

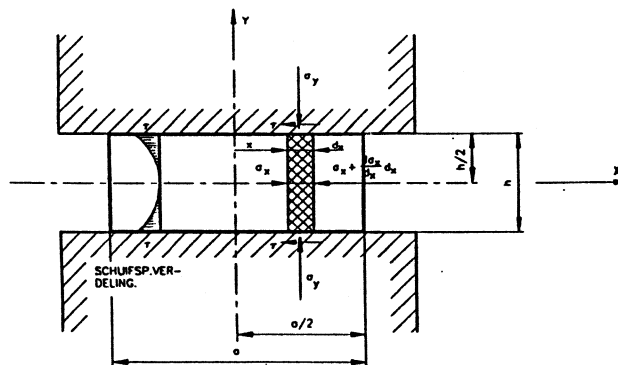


Figuur 22.2: Het pletten van draad

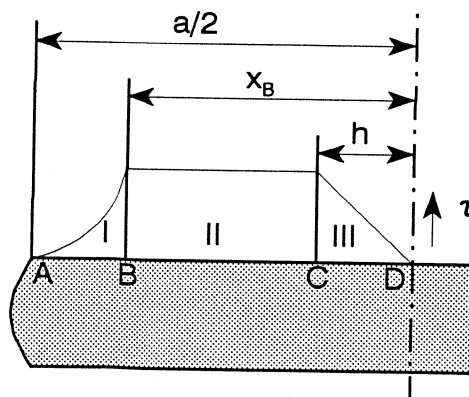
De plasticiteitsconstante k hangt af van het materiaal dat verwerkt wordt. Een benadering van k kan worden verkregen met behulp van de formule:

$$k = \sigma_t / \sqrt{3}.$$

Hierin is σ_t de treksterkte van het materiaal. De dimensie van k is N/mm^2 .



Figuur 22.3a: Spanningen in dwarsdoorsnede van de plet



Figuur 22.3b: De schuifspanningsverdeling in één helft van de plet

Spanningstoestand

Wanneer het verloop van de schuifspanning aan het contactvlak tussen de matrijs en het werkstuk wordt bekeken, dan kunnen er drie gebieden onderscheiden worden (figuur 22.3a en 22.3b).

Gebied I

Omdat σ_y van A naar B toeneemt, zal ook τ toenemen.

Er geldt: $\tau = \pm \mu \sigma_y$

$$\sigma_y = 2 \cdot k \cdot l^{\frac{\mu}{h}(a-2x)}$$

Met: $x_b < x < a/2$

Gebied II

Hier vloeit het materiaal door de optredende schuifspanning.

Er geldt: $\tau = \pm k$

$$\sigma_y = \frac{k}{\mu} \left[1 + \frac{2\mu}{h} (x_b - x) \right]$$

Met: $h < x < x_b$ en: $x_b = \frac{a}{2} + h \frac{\log(2\mu)}{2\mu}$

Gebied III

In D staat het materiaal stil ten opzichte van het gereedschap. Als er geen beweging is, treedt er ook geen schuifspanning op. Dus moet in D gelden dat $\tau=0$. Aangenomen wordt dat τ lineair afloopt en dat de breedte van gebied III gelijk is aan h . Deze aannamen hebben geen grote invloed op het eindresultaat.

Er geldt: $\tau = \pm k \cdot x / h$

$$\sigma_y = \frac{k}{\mu} \left[1 + \frac{2\mu}{h} (x_b - h) \right] + k \left(1 - \frac{x^2}{h^2} \right)$$

Met: $0 < x < h$ en: $x_b = \frac{a}{2} + h \frac{\log(2\mu)}{2\mu}$

Stel dat $\mu=0,5$ dan is:

$$x_b = \frac{1}{2} a + h \log(1) = \frac{1}{2} a.$$

We kunnen de formules voor σ_y in de drie gebieden nu als volgt schrijven:

Gebied I $\frac{\sigma_y}{k} = 2$ (gebied I is gereduceerd tot een punt)

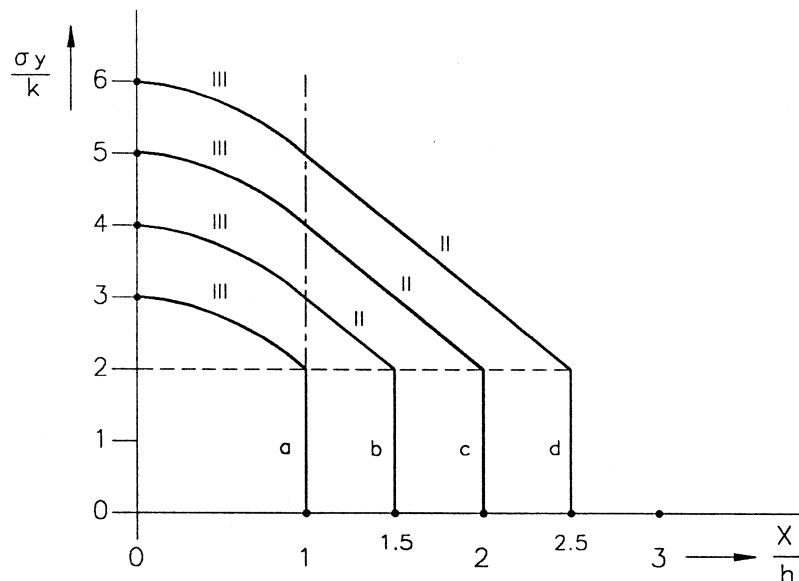
Gebied II $\frac{\sigma_y}{k} = 2 \left[1 + \frac{a}{2h} - \frac{x}{h} \right]$ met $h < x < \frac{a}{2}$ of $1 < \frac{x}{h} < \frac{a}{2h}$

$$\text{Gebied III} \quad \frac{\sigma_y}{k} = 2 \left[1 + \frac{a}{2h} - 1 \right] + \left(1 - \frac{x^2}{h^2} \right) = \frac{a}{h} + 1 - \frac{x^2}{h^2}$$

$$\text{met } 0 < x < h \quad \text{of} \quad 0 < \frac{x}{h} < 1$$

Deze formules zijn in een dimensieloze vorm geschreven door σ_y te delen door k . Hierdoor zijn de formules algemener geworden.

In figuur 22.4 is voor verschillende waarden van a/h de dimensieloze spanning σ_y/k getekend als functie van x/h . In de grafiek is duidelijk te zien dat de maximale normaalspanning steeds optreedt in gebied III voor $x=0$.



Figuur 22.4: De dimensieloze spanning σ_y/k als functie van x/h

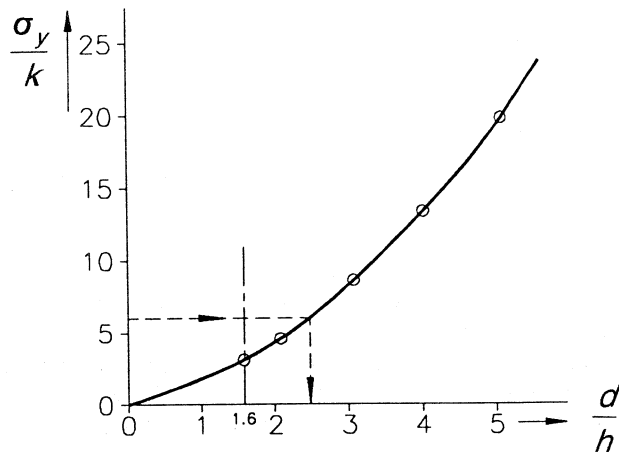
In gebied III

$$\frac{\sigma_y}{k} = \frac{1}{\mu} \left[1 + \frac{2\mu}{h} (x_b - h) \right] + \left(1 - \frac{x^2}{h^2} \right) \quad \text{met } x_b = \frac{a}{2} + h \frac{\log 2\mu}{2\mu}$$

Wanneer we invullen dat: $x=0$, $\mu=0,5$ en $a=\pi d^2/4h$, dan wordt dit:

$$\left(\frac{\sigma_y}{k} \right)_{\max} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{h} \right)^2$$

Deze relatie is weergegeven in figuur 22.5. Uit deze grafiek kan de spanning worden afgelezen bij een gewenste pletverhouding, zodat het gereedschapsmateriaal bepaald kan worden. Wanneer het gereedschapsmateriaal bekend is, kan men met behulp van deze grafiek de maximale pletverhouding bepalen.



Figuur 22.5: De spanning σ_y/k als functie van de pletverhouding d/h

Voorbeeld

Stel dat we Cr-Ni-staal willen pletten. Hiervoor geldt: $k\sqrt{3} = 1000$ N/mm². Dus: $k=600$ N/mm².

We gebruiken een hardmetaal met een σ_d van 4000 N/mm². Voor de veiligheid laten we geen hogere drukspanning toe dan 3600 N/mm². Dan geldt:

$$\frac{\sigma_y}{k} \leq \frac{3600}{600} = 6$$

Uit de grafiek in figuur 22.5, waarin σ_y/k tegen d/h is uitgezet, volgt dat we maximaal mogen pletten met een verhouding $d/h \leq 2,5$. Als d/h groter is, wordt het gereedschap overbelast en zal het sneller slijten. Deze fout wordt in de praktijk nogal eens gemaakt.

Pletkracht

Bij het kiezen van een pers voor het pletproces is het van belang om de benodigde pletkracht te weten. Deze kan worden bepaald door de gevonden formules voor σ_y over x te integreren. Bij het pletten over een lengte l bedraagt de benodigde pletkracht P :

$$P = \frac{2 \cdot k \cdot l \cdot h}{\mu} \left[\frac{1}{2\mu} - 1 + \frac{x_b}{h} + \mu \left(\frac{x_b}{h} \right)^2 - \frac{\mu}{3} \right]$$

waarin $x_b = \frac{a}{2} + h \frac{\log 2\mu}{2\mu}$

Voor $\mu=0,5$ geldt: $x=1/2a$, zodat de formule voor de pletkracht wordt:

$$P = 4k\ell h \left[0,5 \left(\frac{a}{2h} \right)^2 + \left(\frac{a}{2h} \right) - \frac{0,5}{3} \right]$$

Uit deze formule blijkt dat de pletkracht zeer snel toeneemt bij iets grotere vervormingen. Dit komt doordat bij iets grotere vervormingen het vloeiende materiaal zich door een steeds kleinere opening naar buiten moet verplaatsen over een steeds grotere afstand.

22.4 VOOR- EN NADELEN

De voordelen van het pletproces zijn:

- Het proces is spaanloos, er is dus geen afval.
- Het proces heeft een korte cyclustijd.
- Het materiaal krijgt door versteviging een grote sterkte.
- Het proces is op een eenvoudige pers uitvoerbaar.
- Het pletten is een schone bewerking, zonder smering.
- Het proces kan met een eenvoudige, goedkope matrijs worden uitgevoerd.

De nadelen zijn:

- De benodigde pletkracht kan snel oplopen.
- Materiaal, matrijs en machine stellen beperkingen aan de maximale pletverhouding.
- Bij grotere materiaaldikte loopt de produktiesnelheid snel achteruit.
- De versteviging kan ongewenst zijn.
- Het materiaal kan bij grotere pletverhoudingen bros worden.

22.5 ONTWERPRICHTLIJNEN

Maximale pletverhouding

De maximale pletverhouding wordt bepaald door het materiaal van het werkstuk en het gereedschap. De manier waarop de maximale pletverhouding kan worden bepaald, is aangegeven in het voorbeeld op de vorige bladzijde.

Pletkracht

Wanneer men voor een bepaalde toepassing een pers kiest, is het belangrijk om de benodigde pletkracht te weten. Deze kan worden uitgerekend met de formule die gegeven is op de vorige bladzijde. Als men slechts de beschikking heeft over één pers kan met deze formule de maximale afmetingen van de plet bepalen.

Materiaal

Aan het materiaal worden enkele eisen gesteld. Wanneer het materiaal te hard is, is de kans groot dat het scheurt tijdens het pletten. Dit kan voorkomen worden door het materiaal voor de pletbewerking te verwarmen.

Toleranties

De gewenste nauwkeurigheid is afhankelijk van de toepassing. Wanneer men rekening houdt met de relatie tussen de procesvariabelen, zoals die in paragraaf 22.3 zijn behandeld, zijn nauwkeurigheden van 0,1 mm haalbaar.

22.6 KOSTPRIJS

Een eenvoudige matrijs waarmee series tot 100.00 stuks kunnen worden gehaald, kost 2000 tot 4500 gulden.

Bij gebruik van een excenterpers kan een produktiesnelheid gehaald worden van 80 tot 100 stuks per minuut. Hierbij is het wel noodzakelijk dat er gebruik gemaakt wordt van een automatische aanvoerinrichting.

Bij het pletten kan op de materiaalkosten worden bespaard, doordat er geen afval ontstaat.

LITERATUUR

- Aarts, J., P. Adams, R. Slagter en R. Sniijders
Het pletten van draad
Scriptie io69 - De technologie van de massafabricage
Technische Universiteit Delft, 1989.
- Doorschot, F.
De technologie van de serie- en massafabricage
Collegediktaat io27
Technische Universiteit Delft, 1991.

Hoofdstuk 23: PERSEN

23.1 INLEIDING

Veel processen worden uitgevoerd met behulp van een pers. Deze persen zijn er in zeer veel uitvoeringen, omdat door de processen vaak specifieke eisen aan de pers wordt gesteld.

Veelal bestaat in iedere uitvoeringsvorm een reeks persen van verschillende afmetingen, waarbij met de afmetingen ook de beschikbare perskracht toeneemt. Zo komt bijvoorbeeld de enkelvoudige kniehefboomers voor als een handbediende pers met een maximale kracht van enige honderden Newtons, maar ook als zware gemechaniseerde pers voor krachten tot ver boven 1 MN.

In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste soorten persen behandeld worden.

23.2 BOUWWIJZE

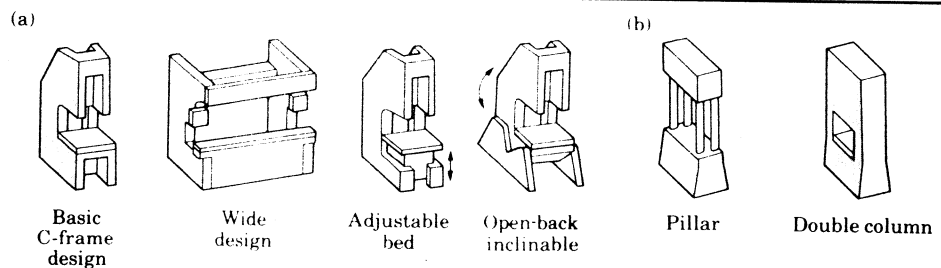
Een pers bevat een stilstaande *tafel* en een bewegende *stoter* of *slede*. Hieraan worden de delen van het gereedschap bevestigd, met behulp van gestandaardiseerde aansluitingen, meestal T-gleuven.

Men spreekt bij hydraulische persen meestal van een slede en bij de (snellere) mechanische persen van een stoter.

De pers wordt mechanisch, hydraulisch of pneumatisch aangedreven.

De persen kunnen worden ingedeeld naar de bouwwijze van het frame (figuur 23.1):

- C-frame
- Portaalframe
- Kolomframe



Figuur 23.1: Verschillende typen frames

Het C-frame is goed toegankelijk, zodat het gereedschap gemakkelijk te vervangen is. Het C-frame zal echter verder uitveren dan de andere twee, waardoor de gereedschapshelften schuin ten opzichte van elkaar komen te staan. Dit kan overigens grotendeels opgevangen worden door de geleiding tussen de twee helften van het gereedschap: de leipennen. Meestal worden de lichtere persen uitgevoerd met een C-frame en de zwaardere met één van de andere vormen. De C-frame persen worden gebruikt tot een perskracht van 4 MN en de portaal-frame persen tot 10 MN.

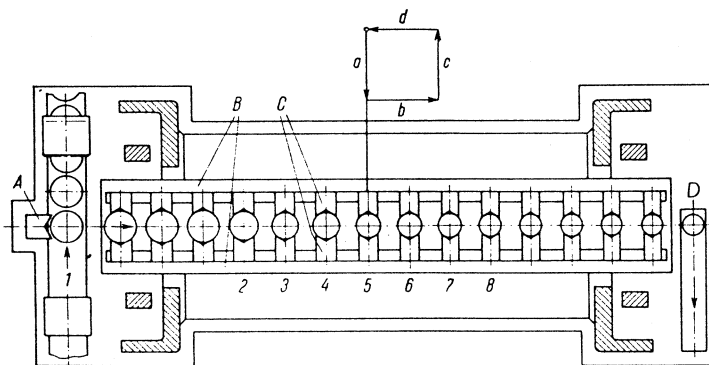
Enkelvoudige persen

De persen die in dit hoofdstuk beschreven worden zijn enkelvoudige persen: ze hebben één bewegende stoter of slede en een stilstaande tafel.

Meervoudige persen

Voor een aantal processen, zoals sinteren, dieptrekken en fijnponsen, zijn vaak twee of meer onafhankelijk van elkaar aan te brengen krachten nodig. Hiervoor zijn persen vaak meervoudig geconstrueerd. Deze *meersledenpersen* bevatten twee of meer stoters of sleden.

In een aantal gevallen worden verscheidene bewerkingen na elkaar uitgevoerd op één pers. Men maakt dan meestal gebruik van een *transferpers*. Deze lijkt sterk op de enkelvoudige persen, alleen heeft hij een extra brede doorgang waardoor er meerdere gereedschappen gemonteerd kunnen worden. Deze persen zijn uitgevoerd met een transfermechanisme, waardoor de werkstukken tussen de bewerkingen door onder het volgende gereedschap gebracht worden (figuur 20.2).



Figuur 20.2: Transferapparaat voor het doorvoeren van dieptrekwerkstukken

23.3 AANDRIJFMECHANISME

Persen zijn op te delen naar het aandrijfmechanisme. Dit zijn:

- de mechanische persen;
- de hydraulische persen;
- de pneumatische persen.

In de serie- en massafabricage worden de mechanische en de hydraulische persen het meest toegepast. Pneumatische persen worden vaker voor onderzoek, montage en in werkplaatsen gebruikt.

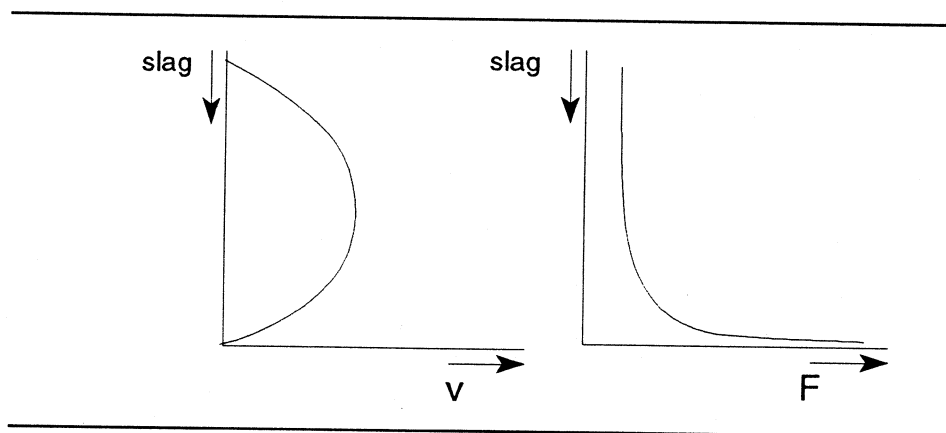
Mechanische persen

De mechanische persen zijn in te delen naar het principe waarmee de kracht overgebracht wordt. De verschillende soorten mechanische persen zijn: kruk- en excenterpersen, nokpersen, schroefpersen, kniehefboompersen en tandheugelpersen.

De tandheugelpers wordt met de hand aangedreven en alleen voor kleinere krachten gebruikt. De kruk-, excenter- en nokpersen worden vrijwel altijd door een elektromotor aangedreven. De schroef- en kniehefboompersen kunnen zowel met de hand als met een motor aangedreven worden.

Meestal zijn de persen uitgerust met een vliegwiel. De kinetische energie die de motor tijdens de omhooggaande slag aan het draaiende vliegwiel toevoegt, kan gebruikt worden in de neergaande slag. Hierdoor kan bij een gelijkblijvende motor een grotere perskracht geleverd worden.

In tegenstelling tot de hydraulische persen zijn de snelheid en de kracht niet constant, maar afhankelijk van de positie van het mechanisme (figuur 23.3).



Figuur 23.3: Snelheid- en krachtskarakteristiek van een mechanische pers

De persen worden beperkt door de slag: ze zijn *slaggebonden*. De lengte van de slag is bij de meeste persen in te stellen.

De kracht is afhankelijk van de stand van het mechanisme en kan extreem hoog worden in de buurt van het onderste punt van de slag.

De mechanische persen kunnen hierdoor overbelast raken. Daarom moet men uitkijken met twee starre delen die op elkaar komen. Als de slag iets te lang wordt ingesteld, wordt de stoter geblokkeerd. De krachten zullen zeer hoog oplopen en er kan er een onderdeel in de pers of het gereedschap breken. De mechanische persen worden daarom vaak met een beveiliging tegen overbelasting uitgerust.

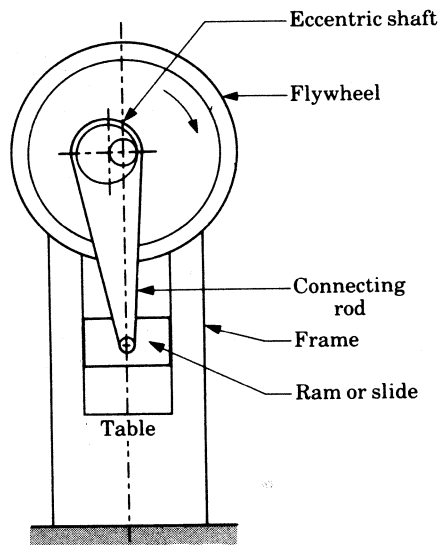
De mechanische persen zijn sneller dan de hydraulische persen en worden daarom veel gebruikt voor de massafabricage.

Kruk- en excenterpersen

Bij deze persen wordt de kracht door middel van een kruk of een excentriek-as overgebracht (figuur 23.4). De excenterpersen hebben een verstelbare slag en zijn zeer universeel.

De persen hebben de hoogste snelheid halverwege de slag en de hoogste perskracht aan het eind van de slag.

Excenterpersen kunnen geleverd worden tot een kracht van 1 MN.



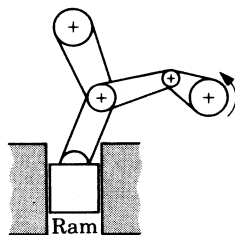
Figuur 23.4: Principe van een kruk- en een excenterpers

Kniehefboompersen

Bij deze persen wordt de kracht overgebracht door een kniehefboom-mechanisme (figuur 23.5). Met een stel hefbomen in de vorm van een iets gebogen knie, kunnen grote krachten worden uitgeoefend door deze knie recht te buigen. De grootste kracht ontstaat wanneer beide hefbomen bijna in elkaars verlengde liggen.

De kniehefboompersen kan geen grote slag maken, maar heeft een meer gedrongen constructie dan de meeste andere persen.

Kniehefboompersen worden gebouwd met een nominale perskracht van 500 N tot 16 MN.



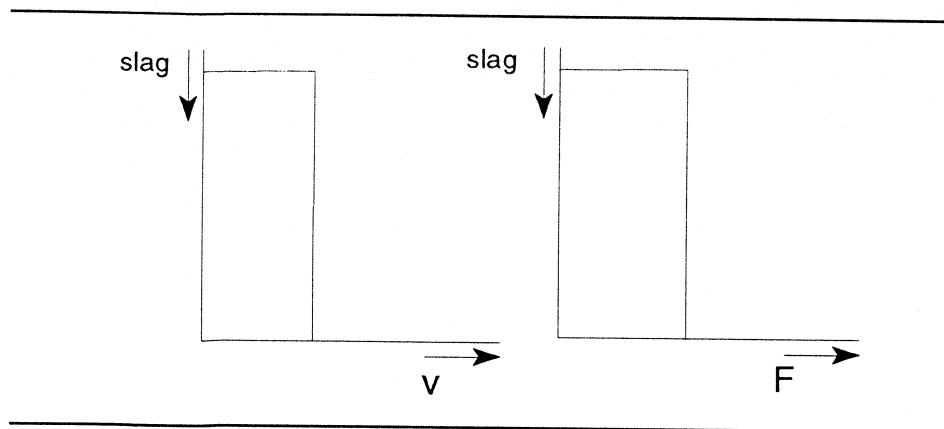
Figuur 23.5: Principe van een kniehefboompers

Hydraulische persen

Deze persen werken met een constante snelheid en kracht (figuur 23.6). Ze zijn *krachtgebonden*: de pers stopt als de vereiste kracht de capaciteit overschrijdt.

De snelheid en de lengte van de slag kunnen over een groot gebied ingesteld worden. In vergelijking met de mechanische persen zijn hydraulische persen langzamer en duurder in aanschaf, maar ze vergen minder onderhoud.

De hydraulische persen zijn bij uitstek geschikt voor bewerkingen waarbij een zeer lange slag gemaakt moet worden. In dat geval zullen ze meestal een horizontale bewegingsrichting hebben.



Figuur 23.6 (links): Snelheid- en krachtskarakteristiek van een hydraulische pers

Figuur 23.7 (rechts): Principe van een hydraulische pers

Een hydraulische pers bestaat meestal uit een frame met twee of vier kolommen, de hydraulische pomp wordt door een elektromotor aangedreven (figuur 23.7).

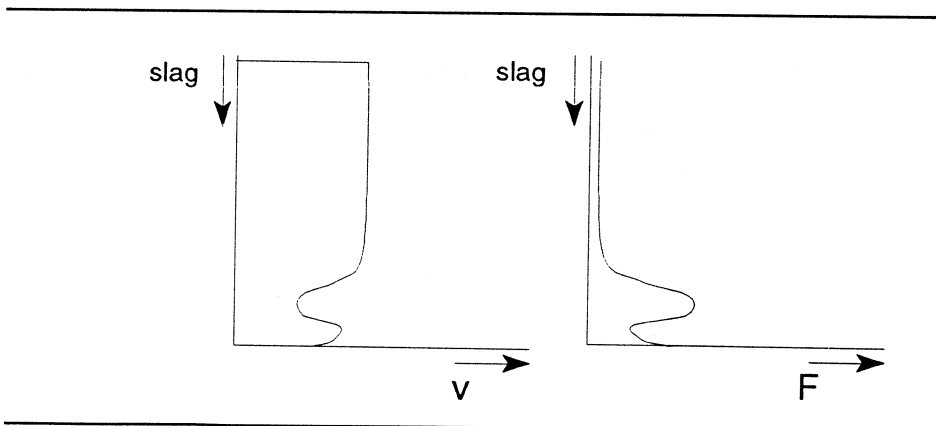
Er zijn hydraulische persen gebouwd die een kracht van 100 MN en meer kunnen leveren.

Pneumatische persen

Pneumatische persen zijn meestal als tafelpers uitgevoerd en worden vrijwel altijd op een reeds aanwezig perslucht circuit aangesloten.

De persen zijn moeilijk beheersbaar: als de kracht toeneemt neemt de snelheid af (figuur 23.8).

De kracht die pneumatische persen kunnen opbrengen, ligt meestal tussen de 100N en de 25 kN.



Figuur 23.8: Snelheid- en krachtskarakteristiek van een pneumatische pers

23.4 RICHTLIJNEN VOOR DE KEUZE

Bij de keuze van een type pers voor een bepaald proces moet gelet worden op:

- Perskracht (N)
- Slag (mm)
- Productiesnelheid (slagen/min)
- Inbouwruimte

- Daglicht (mm)
- Opspanvlak (mm²)

Perskracht

De perskracht is genormaliseerd en wordt ingedeeld in een voorkeursreeks van oplopende kracht:

1 - 1,6 - 2,5 - 4 - 6,4 kN en tienvouden daarvan.

De hydraulische en de pneumatische persen kunnen de door leveranciers vermelde maximale kracht over de hele lengte van de slag opbrengen.

Mechanische persen kunnen dat niet. Voor deze persen zal de maximale kracht geleverd worden in het onderste punt.

Voor een proces als stampen zal de bewerking dan ook zoveel mogelijk aan het eind van de slag plaatsvinden.

De door de leverancier vermelde waarde (de nominale kracht) wordt meestal 30° voor het onderste dode punt geleverd.

Vooraf voor bewerkingen waar een grote slag gemaakt moet worden, zoals dieptrekken, zal de beschikbare kracht aan het begin duidelijk lager zijn dan aan het eind van de slag.

Slaglengte

De benodigde slaglengte wordt bepaald door het werkstuk. In een aantal gevallen moet het werkstuk ook nog uitgenomen kunnen worden. De slaglengte zal hierdoor groter moeten zijn dan voor het proces noodzakelijk is.

De lengte van de slag moet bij mechanische persen vaak nauwkeurig ingesteld worden: wanneer het onderste dode punt van de pers bereikt wordt, keert de stoter om. Dit in tegenstelling tot de hydraulische pers, die door kan gaan tot de gevraagde perskracht gelijk wordt aan de ingestelde perskracht.

Stotersnelheid

Dit is de snelheid waarmee de stoter naar beneden beweegt. De snelheid kan van belang zijn: vaak zal het mechanisme van een proces veranderen wanneer een bepaalde snelheid overschreden wordt. Zo zal bij dieptrekken scheurvorming optreden en wordt bij vlakstampen de rand juist beter boven een bepaalde snelheid.

Produktiesnelheid

De produktiesnelheid is het aantal slagen dat de pers per tijdseenheid kan maken. Het zou beter zijn om van frequentie te spreken.

Er zijn inmiddels persen die een zeer hoge produktiesnelheid kunnen leveren, tot zo'n 2300 slagen per minuut. De produktiesnelheid wordt alleen ten volle benut als de werkstukken voldoende snel aan- en afgevoerd kunnen worden.

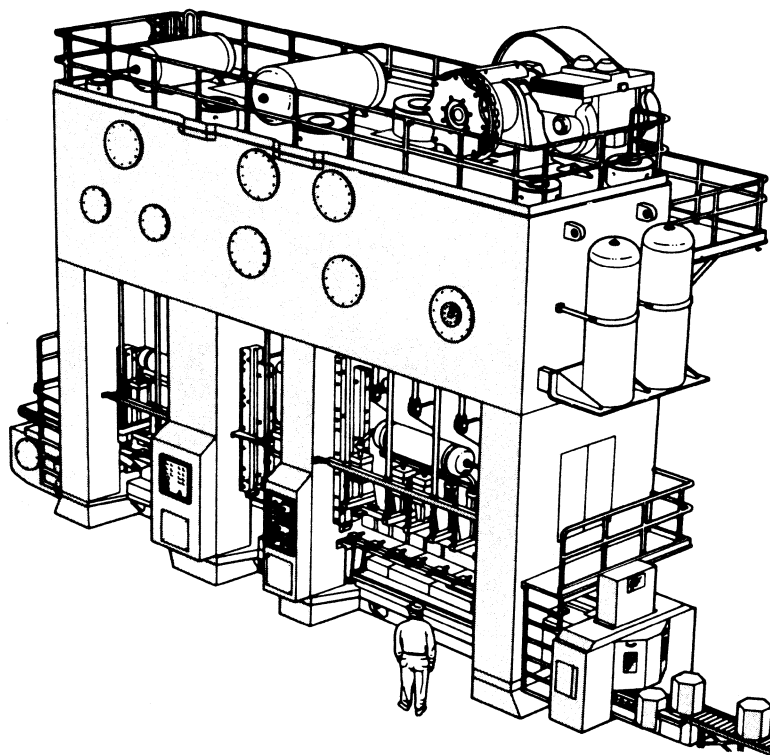
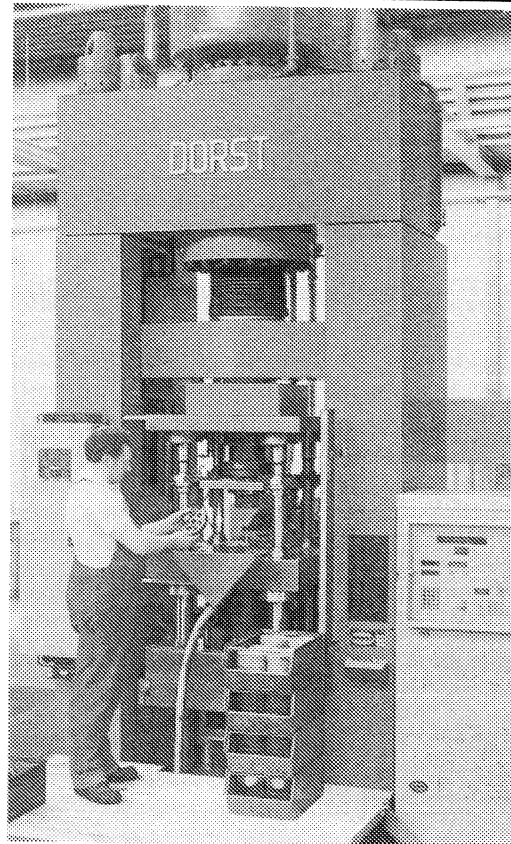
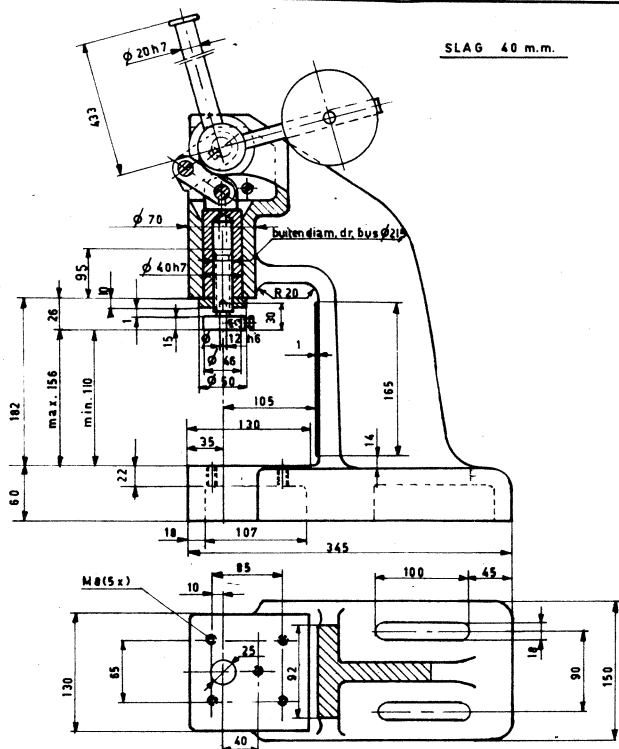
Inbouwruimte

Persen met grotere inbouwmaten zijn meestal ook zwaarder en duurder. Soms is dus niet de perskracht, maar de inbouwmaten die het gebruik van een grotere pers noodzakelijk maken.

Het daglicht is de hoogte tussen de onderkant van de stoter en de bovenkant van de tafel, wanneer de stoter zich in het *onderste* punt van de slag bevindt.

Het opspanvlak is het oppervlak van de tafel (lengte · breedte).

Tot slot worden hier nog enkele voorbeelden van persen gegeven (figuur 20.9)



Boven:
Handpersje, werkt
met kniehefboommechanisme

Rechtsboven:
Pers voor sinterdelen

Rechts:
Zware pers voor carrosseriedelen

Figuur 23.9: Enkele typen persen

LITERATUUR

Doorschot, F.

De technologie van de serie- en massafabricage
Collegediktaat io27
Technische Universiteit Delft, 1991.

Hermans, H.

Vervaardigingstechnieken 3
Collegediktaat io27
Technische Universiteit Delft, 1986.

Kalpakjian, S.

Manufacturing engineering and technology (2nd edition)
Addison-Wesley Publishing company, 1992.

Niebel, B.W., A.B. Draper en R.A. Wysk

Modern Manufacturing Process Engineering
McGraw-Hill, 1989.

Sligte, J.G.

Spaanloos omvormen van metalen - deel 1
Agon Elsevier, 1974.

Waller, J.A.

Press tools and presswork
Portcullis Press Ltd, 1978.

Hoofdstuk 24: GEREEDSCHAPPEN

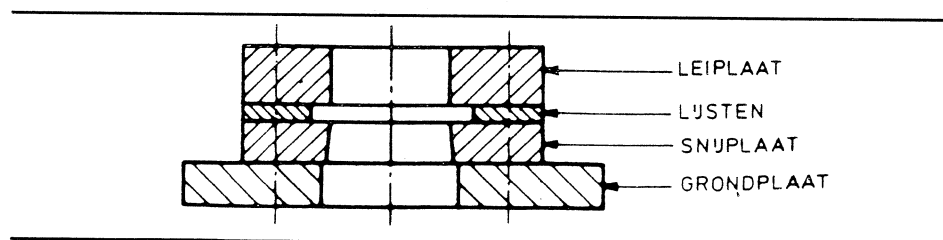
24.1 INLEIDING

In de voorgaande hoofdstukken zijn een aantal technieken voor de bewerking van plaatmateriaal behandeld. Deze kunnen voor eenvoudige produkten afzonderlijk of na elkaar gebruikt worden. In dit hoofdstuk zal iets dieper worden ingegaan op de uitvoering van het stampgereedschap. We zullen in dit hoofdstuk eerst aandacht besteden aan de opbouw van enkelvoudig gereedschap, waarmee één bewerking wordt uitgevoerd.

Voor grote produkten kunnen de bewerkingen onder verschillende persen worden uitgevoerd, waarbij de werkstukken met de hand of met een transfermechanisme tussen de verschillende stations worden vervoerd. Wanneer er echter een gecompliceerd produkt gemaakt moet worden, neemt het aantal benodigde bewerkingen al snel toe. Wanneer men in een voldoende grote serie produceert, is het verstandig om deze verschillende bewerkingen in één gereedschap te combineren. Dit kan door gebruik te maken van een *completeestempel* of een *volgstempel*. Deze worden later in dit hoofdstuk behandeld.

24.2 ENKELVOUDIG GEREEDSCHAP

Het gereedschap voor het uitsnijden van een vorm bestaat uit een *ponsnippel* met de contour van de vorm en een *snijplaat* waarin een gat met een overeenkomstige vorm is aangebracht. Het buiggereedschap bestaat uit een *buignippel* en eventueel een *buigblok*. De pons- en de buignippel zijn meestal bevestigd aan de op- en neergaande slede van de pers. Om te zorgen dat de bewegende gereedschapshelft nauwkeurig gepositioneerd wordt ten opzichte van de onderplaat wordt gebruik gemaakt van *leipennen*.



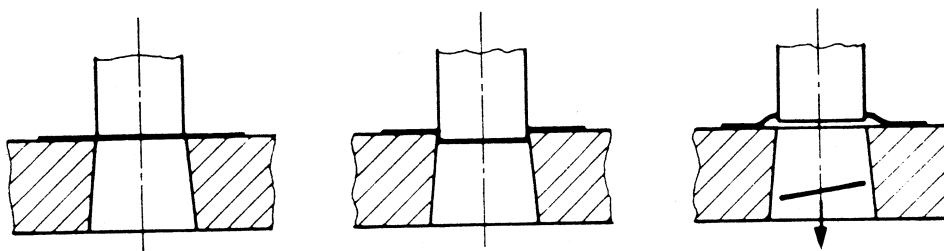
Figuur 24.1: Opbouw van de onderstempel

Voor de geleiding van de ponsnippels wordt gebruik gemaakt van een *leidingplaat* of *leiplaat*. De passing tussen de pons en de leiplaat moet dan glijdend zijn en zo nauwkeurig dat de snijspleet tussen pons en snijplaat binnen de toleranties blijft.

Tussen leiplaat en snijplaat moet enige ruimte overgehouden worden om een strook plaatmateriaal aan te kunnen brengen. Hiervoor worden de *lijsten*, die de *strookgeleiding* verzorgen, aangebracht. Om de strook gemakkelijk door te voeren moet deze enige speling hebben ten opzichte van de geleiding. Als de speling echter te groot wordt kan de pons te dicht op de rand van de strook snijden. Vaak wordt de maximale strookbreedte plus 0,1 mm voor de breedte van de geleiding genomen.

Wanneer hierdoor de toleranties in het produkt overschreden worden kan men één lijst verend maken. Deze drukt de strook tegen de andere lijst. Voor de hoogte neemt men meestal 1,5 maal de plaatdikte. Doorgaans wordt in het verlengde van de geleiding een ondersteuning voor de strook aangebracht.

Wanneer de pons op het materiaal komt, volgt eerst een indrukking van het materiaal, daarna wordt het materiaal doorgescheurd. Het overblijvende plaatmateriaal heeft de neiging om terug te veren en zal rondom de ponsnippel vast gaan zitten. Het materiaal zal bij de teruggaande slag van de pers met de pons mee omhoog willen komen (figuur 24.2).



Figuur 24.2: Vastklemmen van materiaal om de pons

Om dit te voorkomen moet het materiaal van de ponsnippel worden afgestroopt. In een gereedschap met een leiplateau vervult deze de afstroopfunctie. Wanneer de leiplateau ontbreekt, biedt het toepassen van een afstroopplaat, die minder nauwkeurig mag zijn dan een leiplateau, een oplossing. Omdat de kracht voor het afstroepen hoog kan oplopen (tot zo'n 10 % van de snijkracht), mag de afstroopplaat niet te dun zijn uitgevoerd.

Vooraf bij het verwerken van dunne plaat kan het overblijvende materiaal gemakkelijk beschadigen. Wanneer de strook nog verder verwerkt moet worden, kan er in plaats van een vaste plaat een verende opstelling gebruikt worden. Deze plaat zal het te stansen materiaal vastklemmen vóór de pons snijdt en blijft dit doen totdat de pons door het gemaakte gat teruggetrokken is.

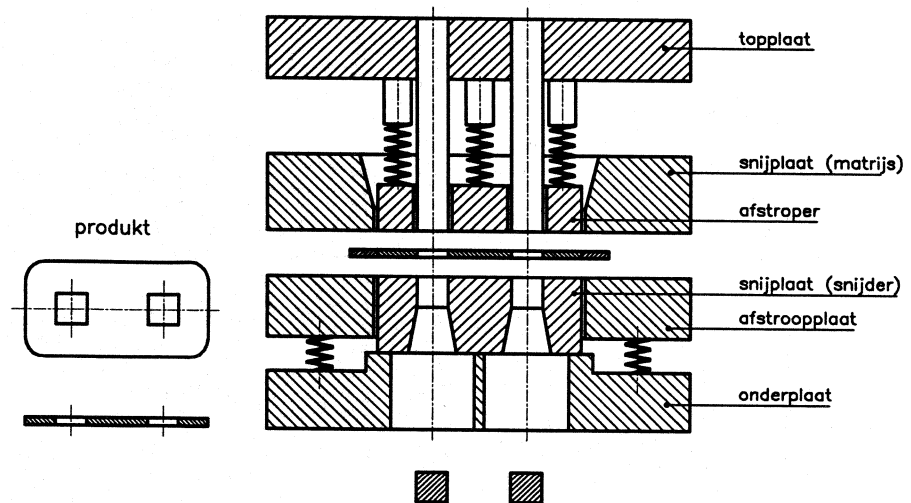
De snijplaat zou rechtstreeks op de perstafel gemonteerd kunnen worden. Dit is echter niet gebruikelijk en in een aantal gevallen niet handig. Men gebruikt een *grondplaat*, waarop snijplaat, lijsten en leiplateau worden bevestigd. De grondplaat hoeft niet, zoals het snijstempel, gehard te worden en kan daardoor gemakkelijker bewerkt worden.

24.3 COMPLEETSTEMPELS

In een *compleetstempel* worden een aantal bewerkingen aan het produkt op één plaats in het gereedschap samengebracht. Hierdoor ontstaat een compact en goedkoop gereedschap dat in een pers met een klein opspanvlak kan worden ondergebracht. Een voordeel van deze bouwwijze is dat op eenvoudige wijze hoge nauwkeurigheden kunnen worden gehaald omdat de fouten, die ontstaan door het verplaatsen van het produkt naar opvolgend gereedschap, geheel worden vermeden.

De beperking van deze constructie ligt in het aantal bewerkingen dat op één plaats kan worden samengebracht. Al snel wordt het punt bereikt dat zoveel nippels en snijplaatdelen op een klein oppervlak moeten

worden samengebracht dat de sterkte en de vervaardiging van het gereedschap onoplosbare problemen opleveren. Wanneer betrouwbare oplossingen niet meer zijn te realiseren, wordt overgestapt op het gebruik van volgstampels.



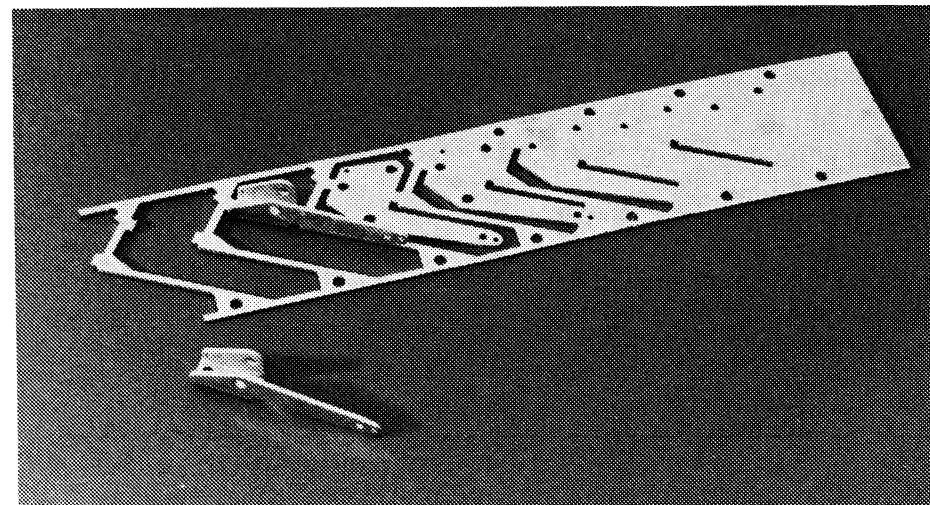
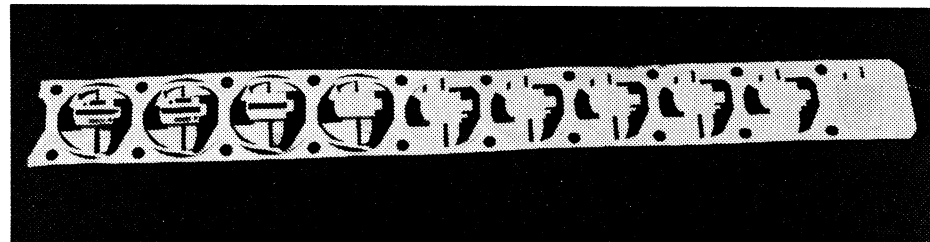
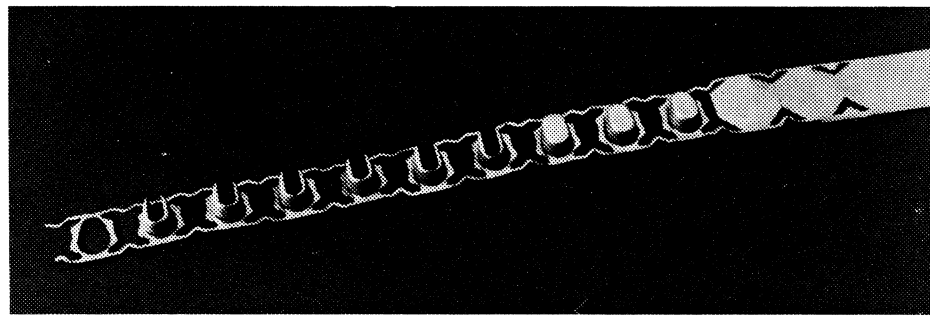
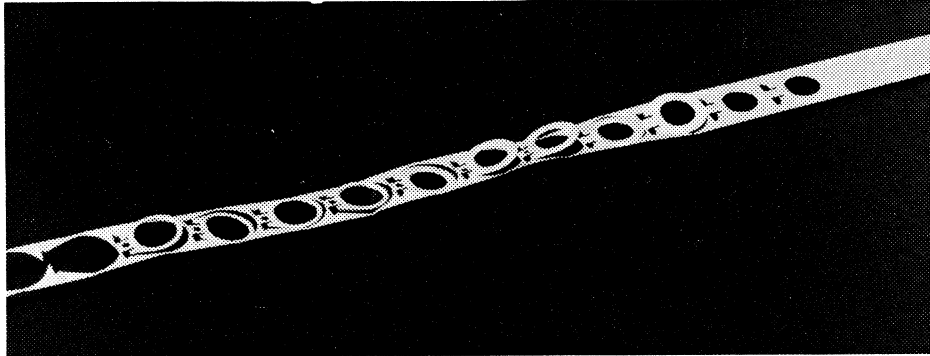
Figuur 24.3: Compleetstempel

24.4 VOLGSTEMPELS

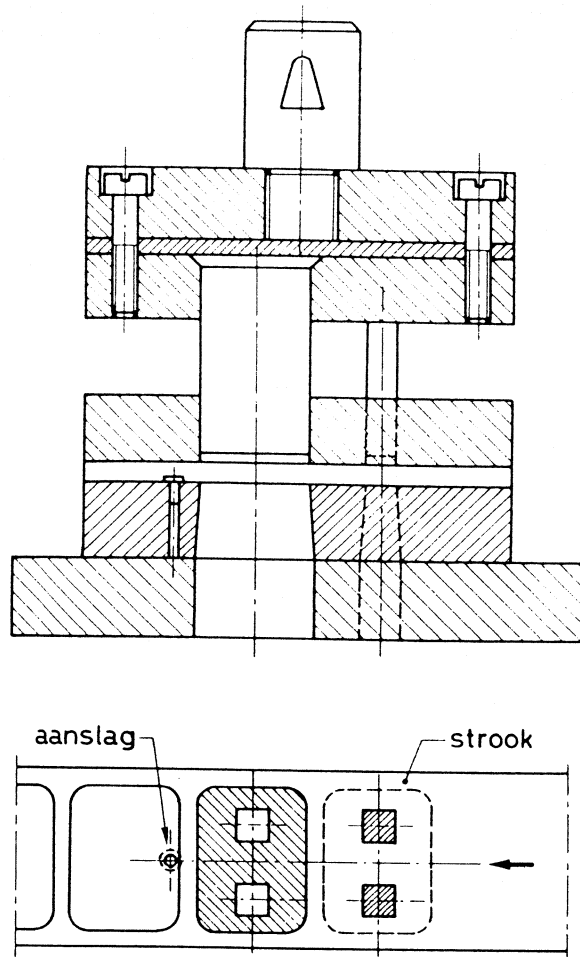
In een *volgstempel* zijn de verschillende bewerkingen die nodig zijn voor het vervaardigen van een produkt achter elkaar geplaatst in één gereedschap. Alle nippels worden tegelijk naar beneden gebracht en alle bewerkingen worden dus gelijktijdig uitgevoerd, maar iedere bewerking vindt plaats op een ander werkstuk. De te bewerken strook schuift tussen iedere slag van de pers één plaats op, zodat een produkt stap voor stap ontstaat. Dit principe is te zien in figuur 24.5. Als eerste bewerking worden de twee gaten geponst. Hierna wordt de strook over één opschuiflengte verplaatst en tenslotte wordt het produkt over de omtrek uitgesneden. Het produkt valt naar beneden en wordt daar opgevangen.

Er zijn vele soorten volggereedschap: voor het vervaardigen van volledig vlakke produkten gebruikt men *vlakstampgereedschappen*, wanneer men een gebogen produkt heeft, spreekt men van een *stamp-buig-gereedschap* en voor het uitsnijden en vervolgens dieptrekken van een blenk heeft men *dieptrekgereedschappen*. Tal van andere soorten zijn ontstaan doordat het volggereedschap zich leent voor het vormen van combinaties uit tal van verschillende koudvervormingstechnieken.

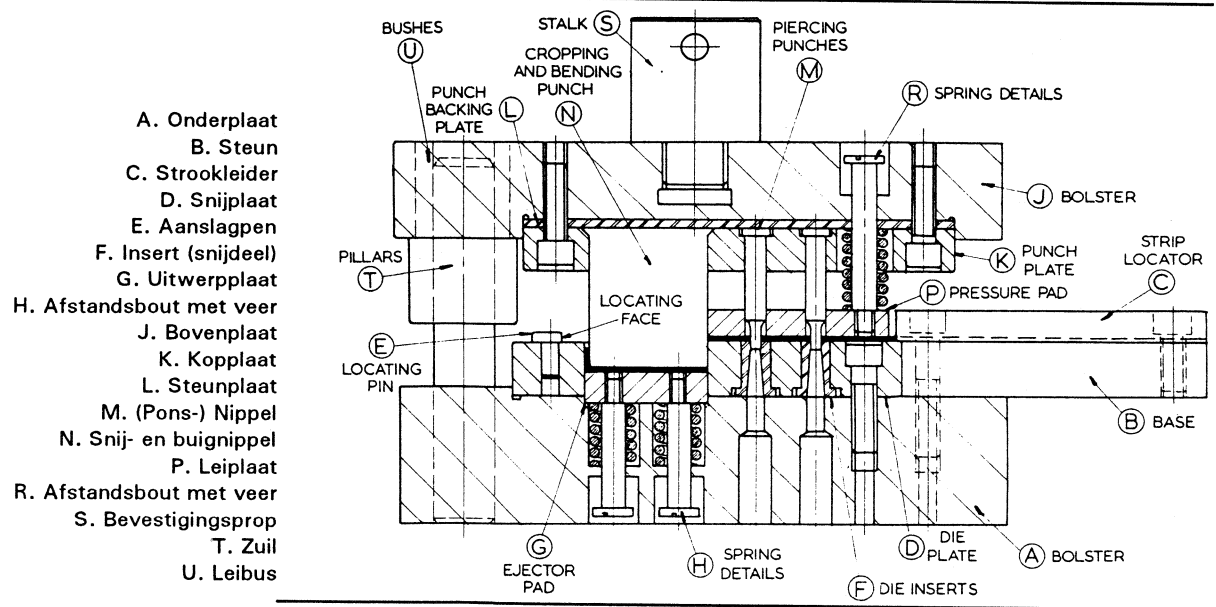
Bij volggereedschap zal men altijd pas in de laatste stap het produkt uit- of lossnijden: zolang het werkstuk in de strook blijft zitten zal het eenvoudig door te voeren zijn. Bij buig- en dieptrekbewerkingen kan het nodig zijn dat het werkstuk volledig los ligt. Als er na het lossnijden nog meer bewerkingen nodig zijn, zal het werkstuk met een transfermechanisme doorgevoerd moeten worden.



Figuur 24.4: Voorbeelden van onderdelen die in een volgstempel worden vervaardigd. Van boven naar beneden: een trek-ringetje van een blikje, een kapje van een aansteker, een sleepcontact van een motor, en een beugel



Figuur 24.5: Het principe van een volgstempel



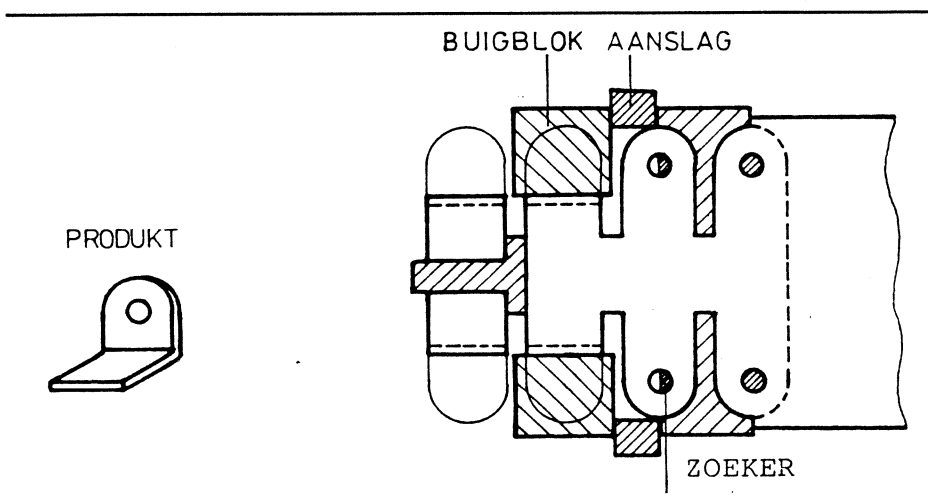
Figuur 24.6: Benaming van de onderdelen van het gereedschap

Stamp-buig-gereedschap

Om een buiging uit te voeren is het nodig dat het te buigen gedeelte vrij is van de rest van de strook. Men kan het gehele te buigen werkstuk afsnijden of doorkappen. Het te buigen materiaal komt dan los op het buigblok van de ondergereedschap te liggen. Dit zal men gebruiken voor eenvoudige produkten die in het geheel gebogen moeten worden. Een voorbeeld van een dergelijk stamp-buigstempel is gegeven in figuur 24.6.

Het stempel bestaat uit twee delen. Het ene deel is een snijstempel met een verende leiplatea waarmee een produkt wordt losgemaakt van de strook en waarmee het gat wordt geponst. Het tweede gedeelte is het buigstempel, waarvan het onderblok verend is. Dit buiggedeelte werkt als een matrijsbuig-gereedschap.

Men kan in plaats van het matrijsbuigen het afbuigen in het volggereedschap gebruiken. Hiervan is het principe weergegeven in figuur 24.7. In dit voorbeeld worden twee produkten tegelijk gebogen, pas in de volgende stap worden ze afgesneden.

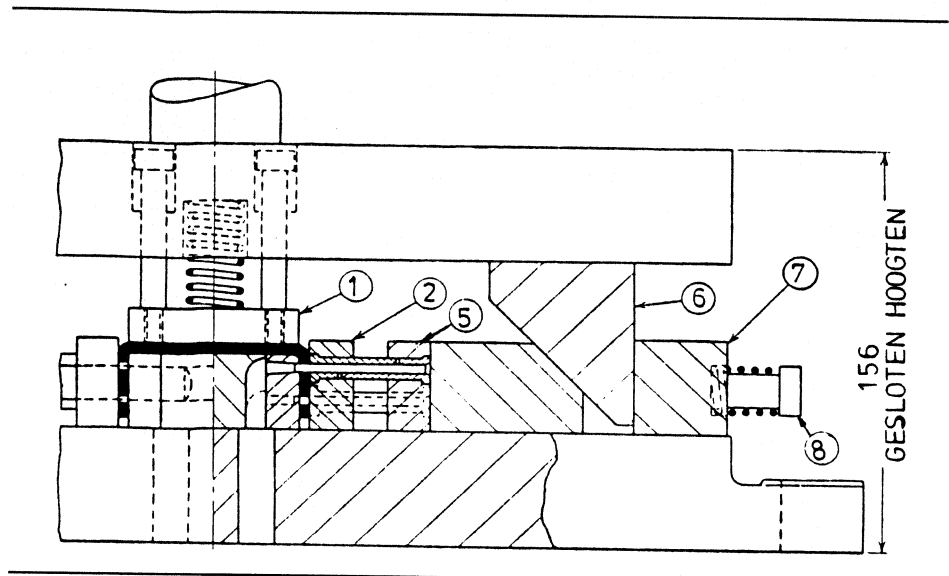


Figuur 24.7: Afbuigen in een volggereedschap

In dit geval kan de strook doorgeschoven worden zonder dat het gebogen deel ergens achter blijft haken. Dat zal niet altijd mogelijk zijn. Men zal dan de strook omhoog moeten brengen vóór het doorvoeren. Hiervoor worden de zogenaamde *strooklichters* gebruikt.

Gaten in de zijkant van een reeds gebogen produkt

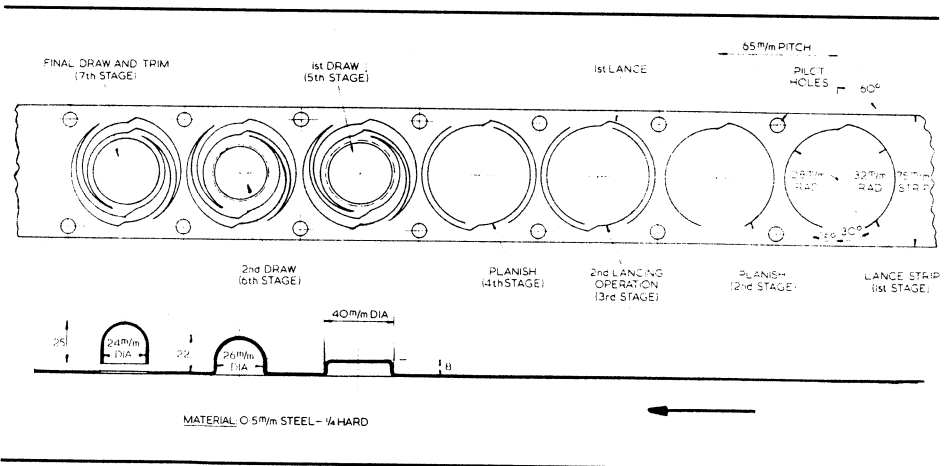
Vaak zal het gewenst zijn dat gaten in een gebogen produkt nauwkeurig zijn getolereerd ten opzichte van de buiglijn, of dat ze nauwkeurig in één lijn liggen. Helaas is dat niet zo goed mogelijk wanneer eerst de gaten worden geponst en pas daarna gebogen. Men zal er dan voor kiezen om de gaten ná het buigen in de zijkanten aan te brengen. Omdat het gereedschap loodrecht op de persrichting moet bewegen zijn er wiggen in het gereedschap aangebracht (figuur 24.8).



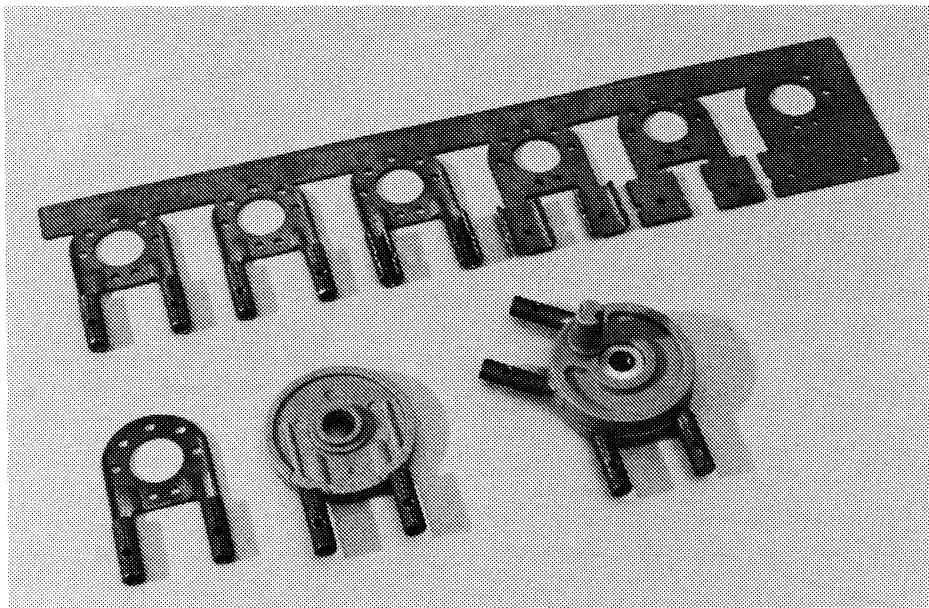
Figuur 24.8: Snijgereedschap met wiggen voor het aanbrengen van gaten in een gebogen plaat

Dieptrekgereedschap

Omdat het materiaal bij het dieptrekken naar binnen getrokken wordt, zal de blenk meestal los in het gereedschap moeten liggen. Wanneer er meerdere trekken nodig zijn zal het doorvoeren met een transferapparaat moeten gebeuren (figuur 20.2). De werkstukken worden tussen de stappen met twee tangen vastgepakt en één station doorgeschoven. Voor kleinere produkten zal het mogelijk zijn om de blenk met een paar punten aan de strook te laten zitten (figuur 24.9). De blenk wordt zodanig losgesneden dat er ruimte voor de vervorming is.



Figuur 24.9: Gedeeltelijk lossnijden van blenks



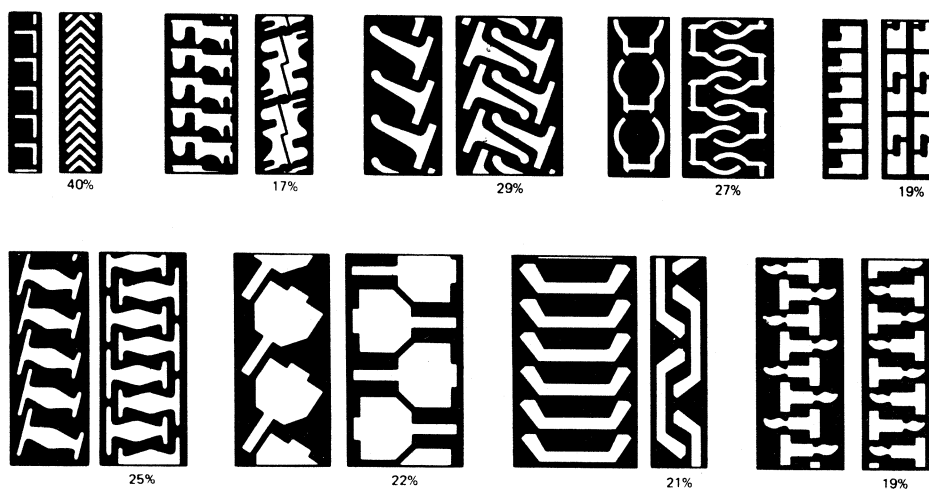
Figuur 24.10: Een scharnier dat gemaakt is op een volgstempel

24.5 STROOKINDELING

Om de scheidings- en omvormbewerkingen te kunnen automatiseren, zal men vaak als uitgangsmateriaal stroken of banden nemen. Stroken zijn geknipt uit een grote plaat, en hebben dus een eindige lengte. Band wordt op een rol aangeleverd.

Strookindeling

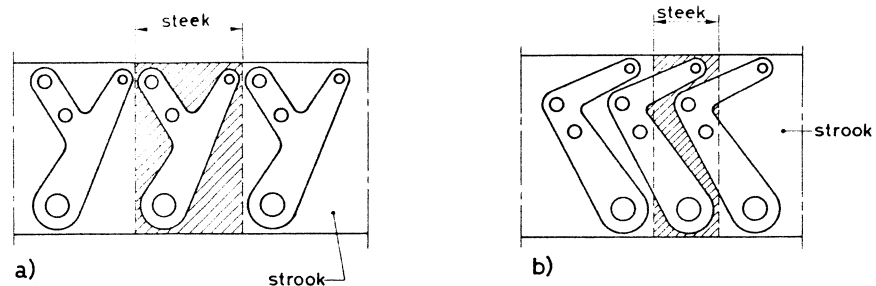
Door aandacht te besteden aan de indeling van de strook kan veel materiaal bespaard worden. In figuur 24.11 zijn enkele voorbeelden te zien van deze besparingen.



Figuur 24.11: Enkele voorbeelden van materiaalbesparing door een goede strookindeling

In de figuur is te zien dat sommige strookindelingen zo zijn gekozen dat er meerdere identieke werkstukken in één slag worden uitgesneden. Hierdoor wordt het gereedschap weliswaar een stuk duurder, maar bij grote series wordt dit snel terug verdiend.

Soms kan men door een kleine aanpassing van de vorm van het produkt materiaal besparen. In figuur 24.12 is hiervan een voorbeeld gegeven. De functie van de hefboom is gelijk gebleven, maar de vorm is zo gekozen dat de werkstukken beter in elkaar passen



Figuur 24.12: Aanpassing van een hefboom zodat er minder afval bij het uitstampen ontstaat

Toeslag strookbreedte en dambreedte

Zowel de strookbreedte als de positionering van de strook onder het snijstempel kennen en spreiding. Als men de strookbreedte even groot neemt als de breedte van de snijstempel bestaat er zeer een grote kans dat de rand van de snijstempel niet op de rand van het werkstuk snijdt, maar hier iets binnen of buiten valt.

Als de rand van de stempel iets *buiten* de rand van de strook valt heeft dit gevolgen voor het uiterlijk en de maten van het werkstuk. Voor het gereedschap heeft het echter niet zoveel gevolgen. Het wordt ernstiger wanneer de rand van de stempel net *binnen* de strookbreedte valt. Door het wegsnijden van een heel dunne rand kunnen metaalsplinters ontstaan die het gereedschap beschadigen. Bovendien zullen er scherpe bramen aan de zijkant van het werkstuk ontstaan.

In verband met de genoemde problemen wordt er voor het uitsnijden van een werkstuk een toeslag op de strookbreedte en de doorschuiflengte genomen. Deze toeslag wordt *dambreedte* genoemd. Het is belangrijk dat er een minimale waarde voor de breedte wordt aangehouden omdat:

- de dammen niet mogen breken als de leiplatea er op drukt;
- het overblijvende materiaal niet in het gat in de snijplaat mag gaan zitten;
- het overblijvende materiaal geen bramen mag veroorzaken;
- het materiaal de handen van de bediener niet mag verwonden.

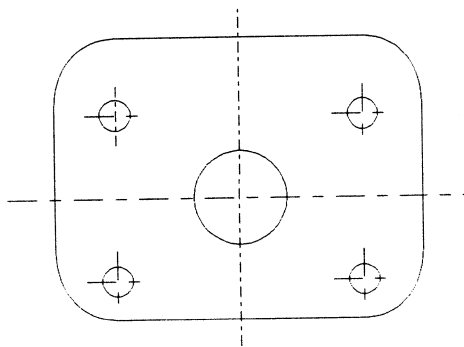
De dammen zouden wat dit betreft zo breed mogelijk moeten zijn, maar dit levert natuurlijk veel materiaalverlies op. De dambreedte mag dus niet willekeurig worden gekozen, maar moet een compromis zijn tussen de hierboven genoemde zaken. Een algemeen veilige waarde voor zachte materialen zoals aluminium en koper is een dambreedte van 3 maal de plaatdikte. Voor harde metalen is een toeslag aan beide zijden van $1\frac{1}{2}$

maal de plaatdikte al voldoende.

Wanneer op de breedtematen van een produkt een ruime tolerantie genomen kan worden, kan men kiezen voor het *doorsnijden* van de werkstukken. Hiermee wordt het afval van de dambreedte voorkomen.

24.6 POSITIONERING

De positionering is bij volgtempels van groot belang: de maten van het produkt zijn sterk afhankelijk van deze positionering. Wanneer bij het produkt in figuur 24.13 niet goed gepositioneerd wordt, zullen de maten tussen de gaten wel binnen de toleranties blijven (deze maten zijn immers gereedschapsgebonden), maar ze kunnen teveel naar één kant van het plaatje zitten.

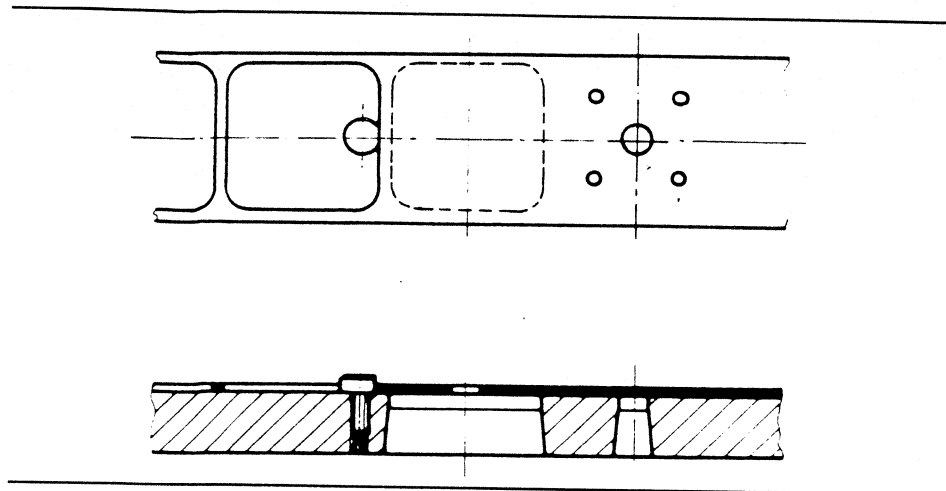


Figuur 24.14: Voorbeeld van een produkt waarvan de gaten verschoven zijn door slechte positionering van de strook

Er zijn verschillende manieren om goed te kunnen positioneren. Allereerst moet de strook in de doorschuifrichting gepositioneerd worden. Dit kan men doen door gebruik te maken van aanslagpenen, Amerikaanse vingers, zijsnijders, zoekers of een automatische aanvoerinrichting.

Aanslagpenen

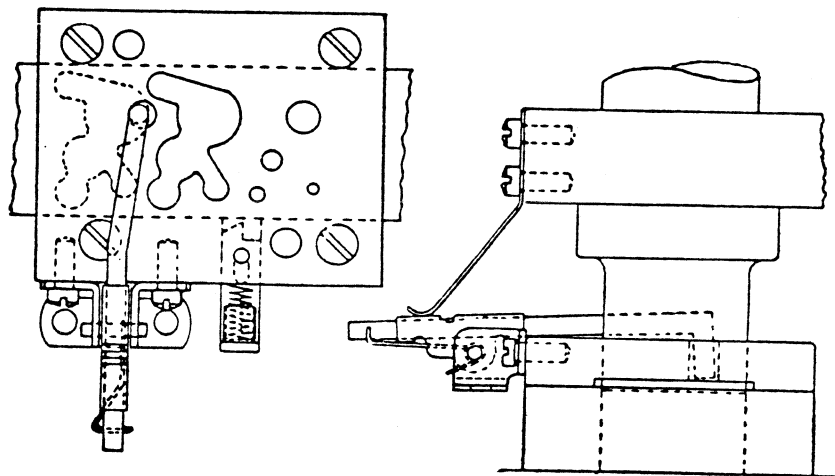
De eenvoudigste oplossing is het gebruik van een *aanslagpen* (figuur 24.14). Deze aanslagpen valt achter de dam, die ontstaan is bij het uitsnijden van een gereed produkt in de vorige slag. De strook moet iedere keer over de pen heen gebracht worden, waardoor het systeem niet zo snel werkt.



Figuur 24.14: Positioneren met een aanslagpen

Amerikaanse vinger

Een snellere methode is de zogenaamde *Amerikaanse vinger* (figuur 24.15). Dit is een constructie waarbij een scharnierend element op de leidingplaat door een nok aan het snijstempel omhoog wordt geduwd. Bij het naar beneden gaan van het stempel gaat deze omhoog en hij gaat weer naar beneden bij het omhoog gaan van het stempel. De strook wordt doorgeschoven als het stempel net uit het materiaal is getrokken. De aanslag valt in het gat van het in de vorige slag uitgesneden product.

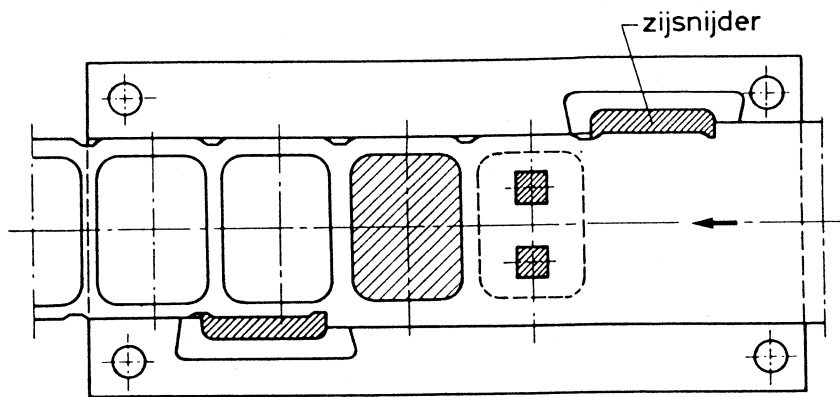


Figuur 24.15: Positioneren met een Amerikaanse vinger

Zijsnijder

Een nog snellere methode maakt gebruik van een *zijsnijder* (figuur 24.16). Dit is een pons die aan de rand van de strook een kleine hoeveelheid materiaal wegsnijdt, over precies één doorschuiflengte. De strook wordt doorgeschoven tot de net gemaakte rand tegen een aanslag komt.

Deze methode heeft als nadeel dat er iets meer materiaal nodig is. De breedte van het weggesneden deel is circa 2 mm voor smalle stroken en 4 mm voor brede stroken (in dat geval gebruikt men meestal twee zijsnijders, aan beide kanten).



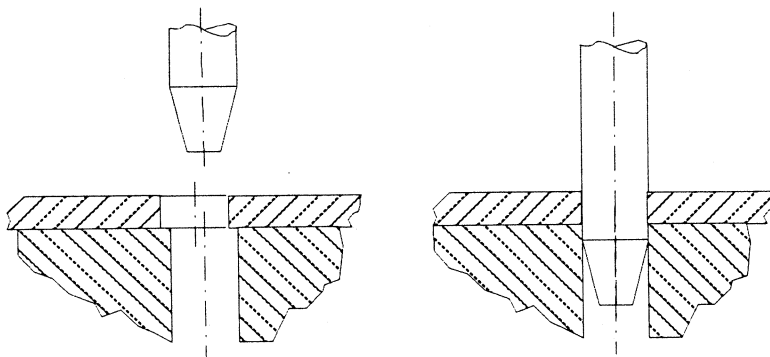
Figuur 24.16: Positioneren met een zijsnijder

Strookaanvoer

Men kan voor het positioneren ook gebruik maken van een *automatische aanvoerinrichting* waardoor de strook, tussen de persslagen door, over een nauwkeurig vastgelegde afstand wordt doorgeschoven.

Zoekers

De genoemde aanslagen zijn slechts geschikt voor het positioneren in de richting van de strookdoorvoer. In de breedte van de strook is er nog enige speling, waardoor de toleranties niet gehaald zouden kunnen worden. Voor dit positioneren gebruikt men *zoekers*. Dit zijn pennen met een conisch uiteinde, aangebracht in het gereedschap van de tweede stap. Deze vallen in een gat dat in de eerste stap is gemaakt (figuur 24.17). De zoekers positioneren de strook voordat het snijden begint in de lengte- en de breedterichting. Voor een goede positionering zijn twee zoekers nodig, omdat met slechts één zoeker de strook nog kan roteren.



Figuur 24.17: Nauwkeurig positioneren met behulp van zoekers

Als het produkt gaten bevat, kunnen deze gebruikt worden voor het positioneren met behulp van de zoekers. Wanneer dat niet het geval is, ponst men gaten in de strook op een plaats die buiten de contour van het produkt valt.

24.7 OPZETMECHANISMEN

Er zijn verschillende mogelijkheden om het werkstuk aan- en af te voeren van de pers. Deze mogelijkheden kunnen worden onderverdeeld in technieken voor het inleggen van losse blenks op een enkelvoudige pers en het aanvoeren van strook of band op een volgstempel.

Losse blenks

De eenvoudigste manier is het handmatig inleggen en uitnemen van de blenks. Hiermee zijn geen hoge produktiesnelheden te halen: bij het handmatig inleggen moet de pers ook met de hand gestart worden. Wanneer er in grotere series gewerkt wordt kan men voor het plaatsen van de losse blenks en het afnemen van de werkstukken gebruik maken van een industriële robot.

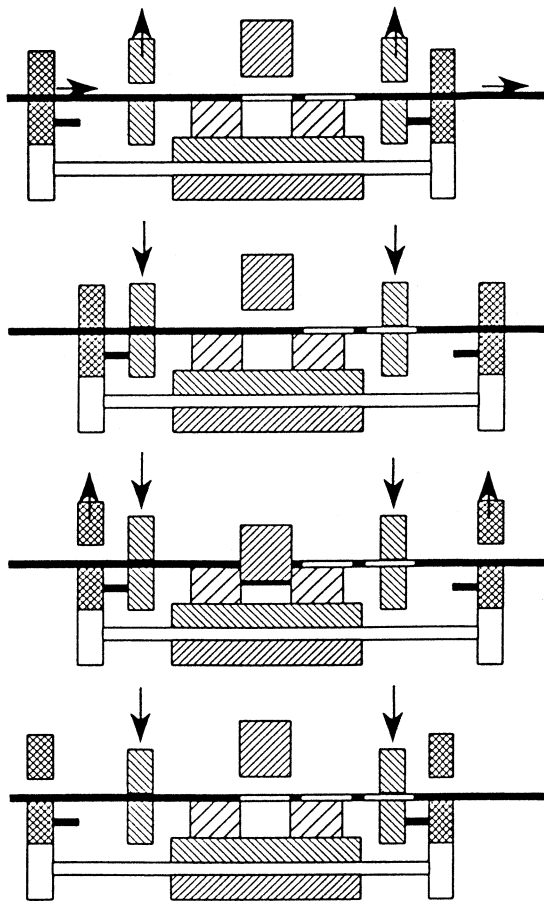
Een andere mogelijkheid is het gebruik maken van een laadmechanisme. Hierin worden de blenks geplaatst die moeten worden verwerkt. Ze worden automatisch één voor één onder de stempel geschoven. Aan de andere kant van de pers zorgt een uitwerpmechanisme voor de afvoer. In volgstempels kan niet met losse blenks worden gewerkt.

Stroken

Door het gebruik van stroken kan in veel gevallen de efficiency van het handmatig inleggen zonder hoge kosten worden verbeterd. Bij toepassing van volgstempels met handmatige inleg is het gebruik van stroken zelfs de enig mogelijke oplossing. In dit laatste geval moet bij het inbrengen van een nieuwe strook het materiaal niet verder komen dan de eerste bewerking. Men gebruikt hiervoor een zijaanslag. Deze wordt dus voor iedere strook slechts eenmaal gebruikt en vervolgens door veerdruk buiten werking gehouden.

Het aanvoeren van stroken wordt slechts bij hoge uitzondering gemechaniseerd, omdat hiervoor slechts dure en storingsgevoelige mechanismen kunnen worden gebruikt. Bij verdergaande mechanisatie van de materiaaltoevoer wordt dan ook bij voorkeur uitgegaan van bandtoevoer. Voor het doorvoeren van band door het gereedschap bestaan twee oplossingen: de tangenopzet en de rollenopzet.

Bij de *tangenopzet* wordt de band door het gereedschap gevoerd met behulp van een tangenmechanisme. Hierbij wordt het materiaal met twee tangen vastgenomen en over een nauwkeurig ingestelde afstand doorgeschoven. Nadat het materiaal is losgelaten, bewegen de tangen terug naar hun uitgangspositie. In de gebruikelijke opstelling wordt één tang voor en één tang na het gereedschap geplaatst.



Figuur 24.18: Het doorvoeren van de strook met behulp van een tangenopzet

Bij de *rollenopzet* wordt het materiaal intermitterend door twee stel rollen, waarvan één aan de aanvoer- en één aan de afvoorzijde, voortbewogen. Dit voortbewegen wordt door een zich in het pers bevindend mechanisme aangedreven. De slipkoppelingen houden hierbij de band gespannen tussen de aanvoer- en de afvoerrollen.

LITERATUUR

Doorschot, F.

De technologie van de serie- en massafabricage

Collegedictaat io27

Technische Universiteit Delft, 1991.

Hermans, H.

Vervaardigingstechnieken 3

Collegedictaat io27

Technische Universiteit Delft, 1986.

Sligte, J.G.

Spaanloos omvormen van metalen (deel 1)

Agon Elsevier, 1974.

Hoofdstuk 25: GEREEDSCHAPMAKEN

25.1 INLEIDING

Matrijsholten en stempels kunnen volgens verschillende methoden gefabriceerd worden. De belangrijkste technieken voor het vervaardigen van gereedschappen zijn:

- Verspanen (inclusief vonk-eroderen);
- Galvanotechniek;
- Metaalspuiten;
- Gieten.

Meer dan 90 % van de produktvormende delen van gereedschappen wordt door middel van verspanende bewerkingen gefabriceerd.

Verspanende bewerkingen zoals (draaien, frezen, kopiëren, boren kunnen uitsluitend worden toegepast op zachte of veredelde staalsoorten en op non-ferrometalen. Slijpen, leppen of vonkverspanen kunnen ook bij harde materialen worden uitgevoerd.

Het vonk-eroderen kan worden onderverdeeld in zinkvonken en draadvonken. Het zinkvonken is een belangrijke fabricagemethode voor matrijzen geworden. In plaats van direct de produktvormende delen in staal te maken, dus het negatief van het produkt, maakt men langs mechanische weg positieve elektroden waarmee de holte gevonkt wordt. Hier wordt later in dit hoofdstuk nog uitgebreider op terug gekomen.

Materiaalkeuze

Voor het vervaardigen van de matrijsholten en stempels zijn diverse materialen verkrijgbaar. Het grootste deel van de matrijzen wordt in staal uitgevoerd, de rest in non-ferrometalen.

In vlakstampgereedschap treden hoge mechanische spanningen op. Om deze te beheersen, maakt men gebruik van diverse soorten gereedschapstaal en hardmetaal.

Bij de materiaalkeuze kunnen de volgende materiaaleigenschappen van belang zijn:

- *Bewerkbaarheid.*
Door de hoge fabricagekosten bij verspanende bewerking is een goede bewerkbaarheid belangrijk. Voor matrijzen van kleine series is het nuttig om aan messing of aluminium te denken, die beide legeringen kunnen die zeer goed verspaand kunnen worden. Bij bewerkingen als zinkvonken en draadvonken kan direct in gehard staal worden gewerkt.
- *Hardbaarheid.*
Het harden van kleine matrijzen of onderdelen levert geen problemen op. Bij het harden van grote matrijzen kunnen ontoelaatbare vervormingen ontstaan. Als regel kiest men voor grotere gereedschappen een veredeld staal. Het bewerken gaat moeilijker dan in zacht staal, het voordeel is dat het harden minder problemen oplevert.

- *Stijfheid*
Voor gereedschap dat gebruikt wordt bij koudvervormingsprocessen is het belangrijk om te weten dat men de elastische vervorming van het gereedschap niet kan verkleinen door het materiaal te harden. De E-modulus van staal neemt namelijk nauwelijks toe bij het harden. Men kan wel betere resultaten bereiken door het toepassen van hardmetaal, met een E-modulus die een factor 2,5 maal hoger is dan die van staal.
- *Bestandheid tegen corrosie.*
Verwerkt men agressieve materialen, dan mag het matrijsmateriaal niet aangetast worden. Men moet in deze gevallen kiezen voor een staalsoort met een hoog chroom- en een laag koolstofgehalte. Een andere mogelijkheid is het aanbrengen van een beschermende laag op de matrijsdelen door verchromen of vernikkelen.
- *Lasbaarheid.*
Soms is het bij nieuwbouw met wijzigingen of bij reparaties noodzakelijk om het gereedschap te lassen. Geharde chroomnikkelstalen matrijzen met een betrekkelijk laag koolstofgehalte kunnen worden gelast als er speciale voorzieningen worden getroffen. Men moet wel bedenken dat dit een noodsprong is en dat de materiaaleigenschappen rond de las afwijken van de eigenschappen elders in het werkstuk.

Welke bewerkingen men uitvoert bij de fabricage van de produktvormende delen hangt af van een aantal factoren:

- De vorm van het produkt;
- De produkteisen;
- Het gereedschapsmateriaal.

In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste technieken worden behandeld.

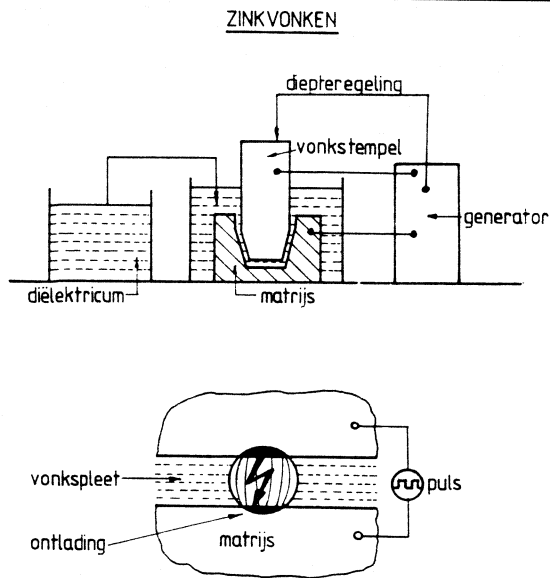
25.2 CNC-BEWERKEN

Matrijsvlakken die niet uit primitieven zijn opgebouwd, kunnen niet met conventionele gereedschapswerktuigen gemaakt worden. Deze gebogen vlakken freest men op een CNC-machine. De vorm van het te frezen vlak wordt numeriek ingevoerd of bepaald aan de hand van een CAD-file. Is de vorm toch nog vastgelegd in een model, dan kan men met behulp van een taster de coördinaten in de CNC-machine invoeren en daarna het matrijsdeel frezen.

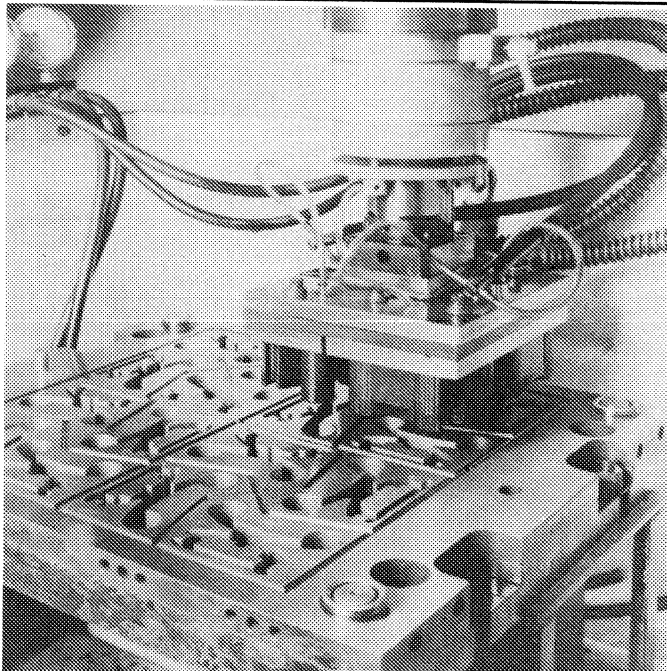
25.3 ZINKVONKEN

Bij het zinkvonken wordt gewoonlijk uitgegaan van een elektrode, waarin met behulp van conventionele of CNC bewerkingstechnieken de vorm van het produkt is aangebracht. De vorm van de elektrode wordt door middel van vonk-erosie overgebracht in het werkstuk. Het zinkvonken heeft zijn grootste voordelen bij vormen met niet-doorlopende gaten.

De elektrode en het werkstuk worden in een diëlektricum geplaatst. Dit diëlektricum is noodzakelijk voor het ontstaan van een vonkoverslag tussen de elektrode en het werkstuk. Het dient ook voor de afvoer van de verspaande deeltjes. Hiertoe wordt de vloeistof gecirculeerd met behulp van een pompinstallatie.



Figuur 25.1: Een opstelling voor het zinkvonken



Figuur 25.2: Het vonken van 16 holtes in een matrijsplaat

De elektrode en het werkstuk worden verbonden met een generator. Het proces is in grote mate zelfregelend, doordat steeds de meest uitstekende delen worden verspaand. In de kleine spleet tussen elektrode en werkstuk vindt een elektrische ontlading plaats op de plaats waar de spleet het kleinst is. Hierbij wordt op deze plaats een geringe hoeveelheid werkstukmateriaal verwijderd. Hierna ligt de kleinste afstand op een andere plaats in de spleet. De volgende ontlading gaat weer langs de kortste weg. De materiaalverwijdering leidt tot een kratervormige

oppervlaktestructuur. De elektrode, die meestal van koper of grafiet is gemaakt, wordt door de ontladingen nauwelijks aangetast.

Soms worden de vonkoverslagen op één plaats geconcentreerd zijn. Dit is ongewenst, omdat het tot gevolg kan hebben dat de elektrode en het werkstuk beschadigd raken. Wanneer dit verschijnsel zich voordoet spreekt men van 'bogen'.

Het zinkvonken kan in twee fasen worden verdeeld: het voorvonken en het navonken.

Bij het *voorvonken* is de spaanproductie of de snelheid van bewerking van belang. De verkregen oppervlakteruwheid is in deze fase van ondergeschikt belang. Bij het voorvonken is een grote pulsenergie nodig, die brede en diepe kraters veroorzaakt.

Bij het *navonken* is de vereiste oppervlakteruwheid het voornaamste punt, terwijl de spaanproductie van minder belang is. Voor deze fase zal een puls met een kleine energetische inhoud gebruikt moeten worden, met als resultaat kleine ondiepe kraters.

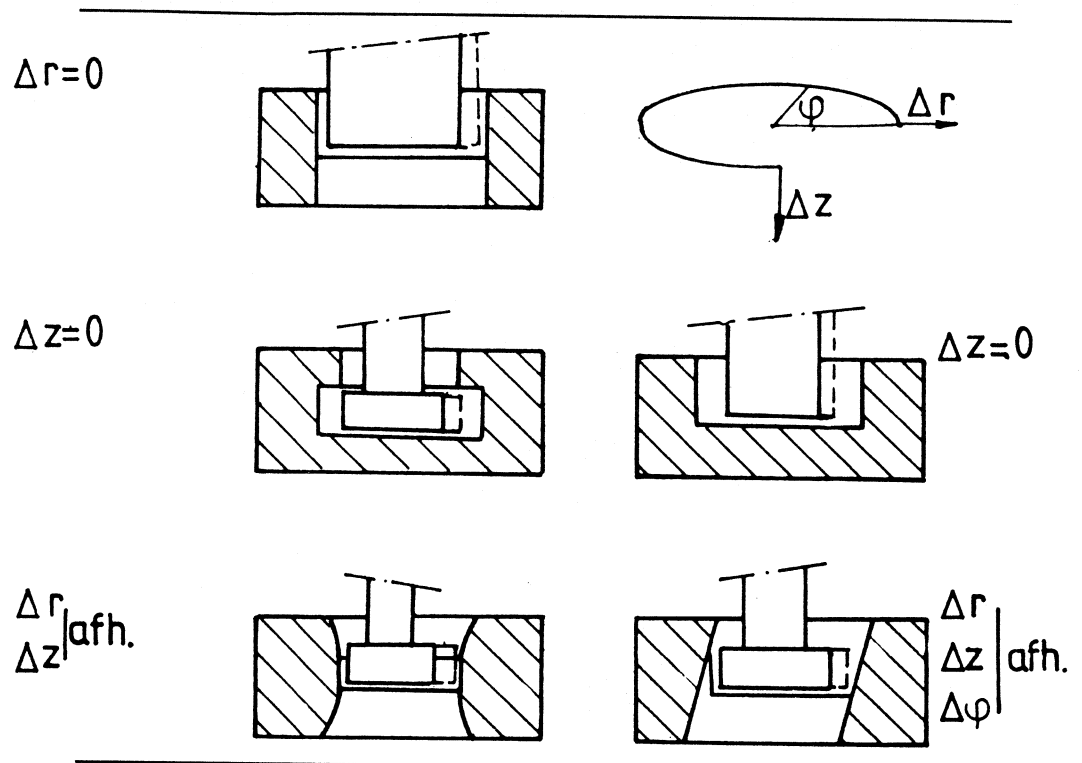
Afhankelijk van het elektrodemateriaal, het werkstukmateriaal en de bewerkingsnelheid kan men met één voorvonk- en één navonkelektrode meerdere gelijke onderdelen maken.

Een probleem dat bij het zinkvonken optreedt, is dat bij fijnwerken, waar wordt gestreefd naar een nauwkeurige afwerking, de grootste elektrodeslijtage voorkomt. Deze is geconcentreerd aan de onderzijde van de elektrode. Het is daarom in veel gevallen noodzakelijk om meer dan één fijnbewerkingselektrode te gebruiken.

Het genoemde probleem kan men oplossen door toepassing van het *planetaire zinkvonken*. Hierbij is het mogelijk om door een relatieve beweging tussen werkstuk en elektrode een vergroting van een reeds gemaakte holte te verwezenlijken. Planetaire erosiesystemen zijn voorzieningen die aan de elektrode een zijdelingse beweging geven, die meestal in een vlak loodrecht op de verticale voedingsrichting ligt. Door de relatieve beweging tussen elektrode en werkstuk worden kortsluiting en bogen sneller onderbroken. Doordat het vonkoppervlak is verlegd naar het manteloppervlak van de elektrode, dat bij eindbewerkingen meestal veel groter dan het frontale vonkoppervlak bij normale vonk-erosie, wordt een veel gelijkmatiger slijtageverdeling verkregen.

De meest gangbare materiaalsoorten voor de elektroden zijn grafiet, elektrolytisch koper en koper-wolfram. De keuze van het elektrodemateriaal wordt bepaald door :

- Slijtage van de elektrode ten gevolge van het vonk-erosieproces;
- De spaanproductie die bij de elektrode-werkstuk combinatie gerealiseerd kan worden;
- De mogelijkheden om de gevraagde elektrode te vervaardigen met behulp van beschikbare bewerkingstechnieken.



Figuur 25.3: Planetair zinkvonken

25.4 DRAADVONKEN

Bij het draadvonken wordt als elektrode een draad gebruikt die continu wordt vernieuwd. Deze draad is hierbij tussen een boven- en ondergeleiding gespannen. Bij deze techniek slaan de vonken over tussen de draad en het werkstuk, waarbij materiaal met een breedte van iets meer dan de draaddikte wordt weggeërodeerd. Door het eenmalig gebruik wordt de elektrodeslijtage teniet gedaan.

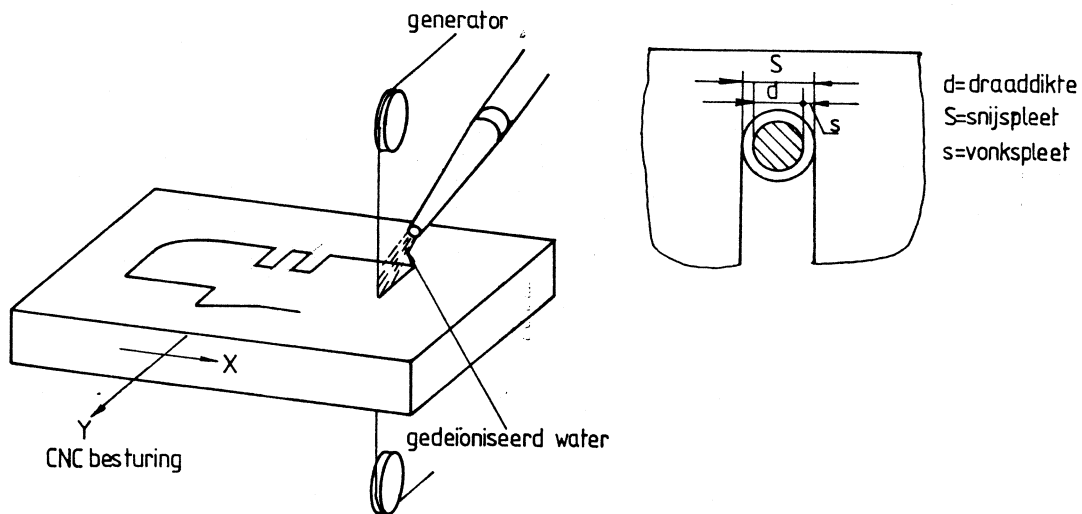
Het werkstuk wordt volgens een vooraf bepaalde baan ten opzichte van de draad bewogen met behulp van een numerieke besturing. Hierdoor is het snijden van vrijwel elke in- en uitwendige baan met grote nauwkeurigheid mogelijk.

Het is duidelijk dat het draadvonken alleen gebruikt kan worden voor doorlopende gaten. Men kan zowel geharde metalen als hardmetaal draadvonken. Met de draadvonkmethode kan men ook elektroden met ingewikkelde profielen maken voor het zinkvonken.

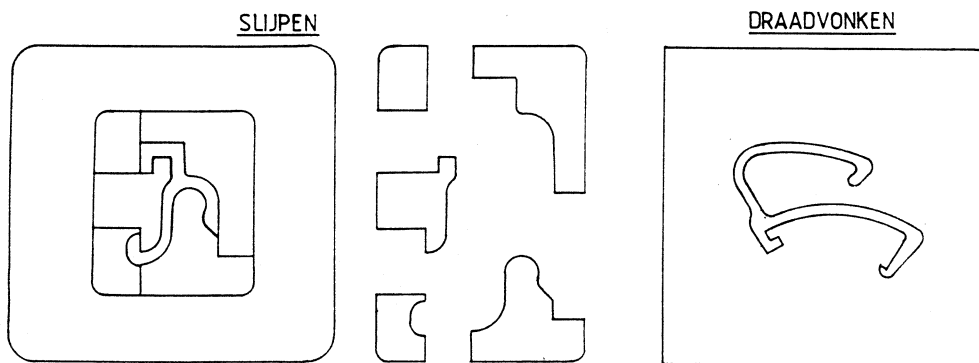
De voordelen van het draadvonken ten opzichte van conventionele bewerkingsmethoden zijn:

- Relatief eenvoudig maken van zeer moeilijke inwendige contouren en vormen;
- Grote nauwkeurigheid van de te vervaardigen werkstukken;
- Hoge reproduceerbaarheid door het ontbreken van gereedschapslijtage;
- Door de numerieke besturing kunnen wijzigingen zeer eenvoudig worden doorgevoerd;

- Matrijzen en stempels die vroeger uit meerdere delen moesten worden samengesteld, kunnen nu uit één stuk worden gemaakt (figuur 25.5);
- Verlaging van de kostprijs omdat de geprogrammeerde machine onbemand door kan draaien.



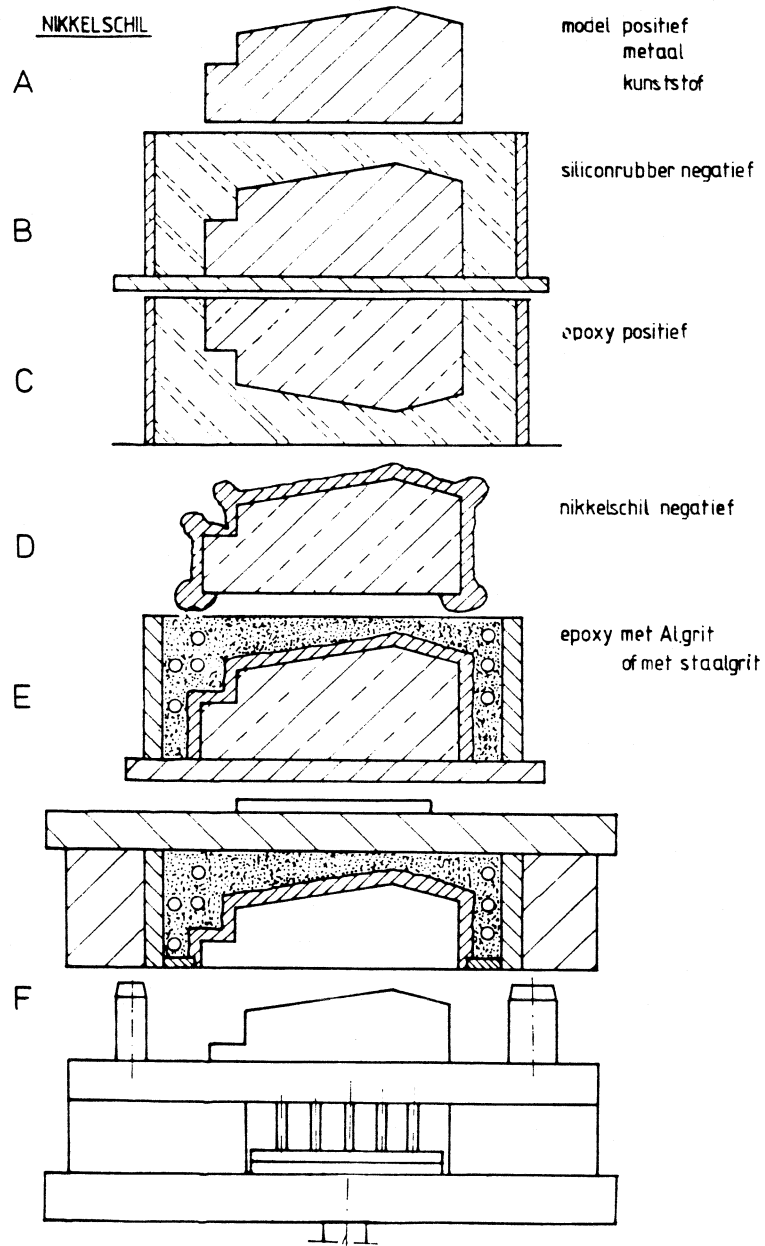
Figuur 25.4: Draadvonken



Figuur 25.5: Een werkstuk dat in meerdere delen geslepen moet worden, kan in één keer vervaardigd worden door te draadvonken

25.5 GALVANOTECHNIEK

De galvanotechniek wordt gebruikt bij het vervaardigen van matrijzen. De matrijsholte wordt hierbij gevormd door een galvanische nikkel- of nikkelcobaltneerslag op het model. Na het verwijderen van het model



Figuur 25.6: Vervaardiging van een matrijs met behulp van galvanotechniek

houden we een zelfdragende schaal over, die in een matrijsombouw gemonteerd kan worden. De verloop van het proces is weergegeven in figuur 25.6. Het model wordt van kunststof of metaal gemaakt (A). Als het model van kunststof is, moet het eerst geleidend worden gemaakt door er een laagje zilver op neer te slaan. Wanneer er meerdere gelijke holten nodig zijn in een matrijs, dan giet men het model af met siliconenrubber (B) en in dit negatief kan men met behulp van epoxy-gietmassa's een reeks positieven maken (C).

De voorbehandelde positieven hangt men in een bad van een waterige metaal-zoutoplossing. Op een afstand van de modellen (kathode) worden de nikkelplaten (anode) opgehangen. Sluit men het geheel aan op een gelijkstroombron, dan slaat op de modellen nikkel neer (D). De opgroei-

snelheid bedraagt 0,005 tot 0,02 mm/uur. De schillen krijgen een dikte van 1 tot 5 mm, afhankelijk van de vorm en de grootte van het produkt. De montage van de schil in de matrijs of ombouw kan op verschillende manieren gebeuren:

- De schil versneld galvanisch opgroeien met koper en verder mechanisch verwerken;
- Het ingieten met epoxyhars gevuld met aluminium- of staalgrit, waarbij de koelkanalen mee ingegoten kunnen worden (E);
- Het ingieten met laagsmeltende metaallegeringen.

De matrijs kan verder op de normale wijze afgebouwd worden (F).

Galvanisch gevormde holten past men toe:

- Als een bepaalde textuur op het oppervlak nodig is;
- Als perfect vlakke en hoogglans gepolijste oppervlakken nodig zijn, die men langs mechanische weg niet kan maken.

De nadelen van galvanische schillen zijn:

- De kans op beschadiging is groter door de lagere hardheid van het oppervlak (40 Rc ten opzichte van gehard staal van 50 tot 60 Rc);
- Reparatie is nauwelijks mogelijk;
- De warmtebestendigheid is ongeveer 300 °C;
- Bewegende delen door de schil vereisen extra zorg;
- De vorm van het produkt kan een beperking opleveren, omdat de laagdikte van te diepe delen zo gering kan zijn dat de mechanische sterkte onvoldoende is.

25.6 METAALSPUITEN

Het beoordelen van het gedrag van dynamisch belaste spuitgietprodukten wil men in een zo vroeg mogelijk stadium van de produktontwikkeling doen. Men spuit de produkten in goedkope matrijzen die toch 100 tot 1000 spuitingen kunnen verdragen. Deze matrijzen kunnen door middel van metaalspuiten worden vervaardigd. Soms maakt men met deze proefmatrijzen nog een kleine produktieserie.

Bij het metaalspuiten van matrijsholten maakt men gebruik van:

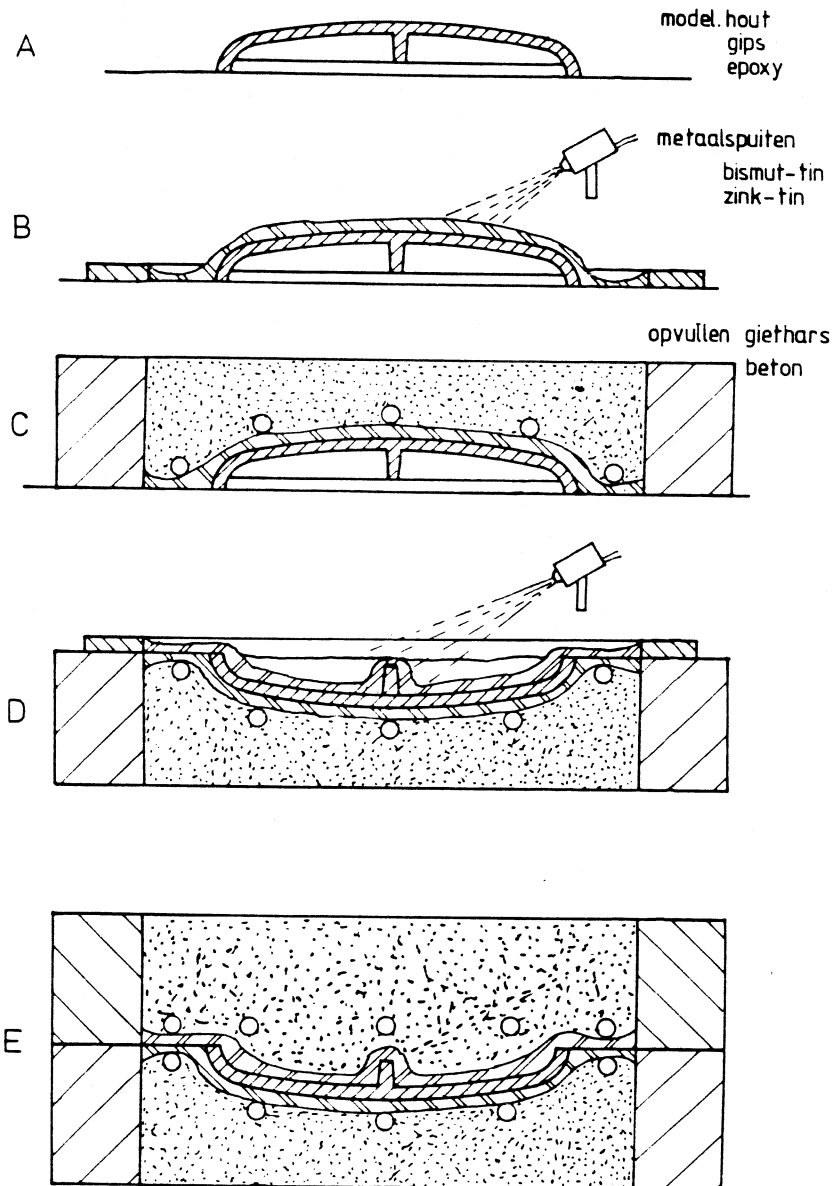
- Legeringen uit bismut en tin, die bij 70 tot 200 °C smelten afhankelijk van de samenstelling. De sterkte van het materiaal is gering.
- Een legering uit zink en tin met een smeltpunt van ongeveer 400 °C. Deze methode van bewerken noemt men vlamspuiten.

Het proces is weergegeven in figuur 25.7.

Het model (A) wordt gemaakt van kunststof, metaal of hout. Bij de laagsmeltende legering kan men voor het model ook leer en plasticine gebruiken. Voor de hoogsmeltende legering gebruikt men meestal hardhout.

Het model wordt voorzien van een laagje lossingsmiddel, waarna een metaallaag op het model wordt gespoten tot een laagdikte van 2 tot 6 mm (B). De dikte is afhankelijk van de vorm en de grootte van het produkt. Wanneer er een metaallaag is aangebracht kan men leidingen voor de koeling aanbrengen. De rest van de ruimte wordt opgevuld met beton of een giethars van epoxy en kwartszand (C).

Na het omdraaien van het model kan men de andere matrijshelft op dezelfde wijze vervaardigen (D en E). Men kan ook een stalen aanspuitbus mee ingieten en openingen voor de uitstoterpenen.



Figuur 25.7: Vervaardiging van een matrijs met behulp van metaalspuiten

25.7 GIETEN

Het fabriceren van matrijzen uit gesmeed of gewalst staal door verspanen is een dure methode. Soms kan het nuttig zijn aan gieten te denken. Dit hangt af van de vorm van het produkt en het te gieten materiaal. Wanneer de matrijshelften gegoten zijn, hebben ze al de vorm van het produkt. Meestal is er geen of slechts een geringe nabewerking nodig.

De materialen die voor het gieten van matrijzen in aanmerking komen zijn:

- Gietstaal, soms ook gietijzer;
- Non-ferrometalen (aluminium, zink en berylliumkoper);
- Gietharsen (eventueel gevuld met metaalkorrels);
- Siliconenrubber.

Gietstaal wordt gegoten met een zandvorm. De non-ferrometalen kunnen ook in zandvormen gegoten worden. De matrijzen uit aluminium en zink worden bij het spuitgieten van kunststoffen als proefmatrijzen voor het maken van prototypen toegepast. Ook kleine series kunnen met deze matrijzen worden gespoten. Hoe groot de serie kan zijn hangt van de produktvorm af. Matrijzen van gietstaal en berylliumkoper past men toe voor grotere series.

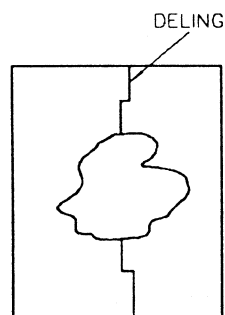
Berylliumkoper en zink kan men ook gieten in keramische vormen. Van het natuurlijke oppervlak van een model, bijvoorbeeld een houtnerfoppervlak, wordt een negatieve vorm gemaakt met siliconenrubber. In deze negatieve vorm giet men zeer fijn gemalen zirkoonoxyde dat gemengd is met een binder en een harder. Na het uitharden van de vorm wordt het geheel in een oven gebakken. In deze keramische vorm kan men de inzetstukken van de matrijs gieten: voor kleine series uit zink en voor grote series uit berylliumkoper.

Met deze methode maakt men inzetstukken van matrijzen waar hoge eisen worden gesteld aan de fijnheid van weergave van bepaalde oppervlakken, bijvoorbeeld voor het reproduceren van de structuren van hout, leer of textiel.

25.8 GEDEELD SLIJPEN

Het gedeeld slijpen is een veelgebruikte methode voor het vervaardigen van snijgereedschap. Voor elk snijgat maakt men twee aparte blokjes. Men legt de deling zo over het gat, dat de helften beide geslepen kunnen worden. De blokjes worden tussen twee lijsten achter elkaar gelegd. De buitenomtrek van de blokjes wordt nauwkeurig nabewerkt, zodat er tussen gaten precies de opzetmaat ontstaat. De gereedschappen die op deze manier worden vervaardigd zijn vaak erg lang.

Door de opkomst van het vonk-eroderen wordt het gedeeld slijpen steeds minder toegepast.



Figuur 25.8: Vervaardiging van snijgereedschap door middel van gedeeld slijpen

LITERATUUR

Zinkvonkerosie (begrippen, technologie en machinetechniek)
Vereniging voor de metaal- en elektrotechnische industrie
Publicatie VM76, 1984.

Anemaat, A.

Konstrueren in kunststoffen

Collegediktaat io82

Technische Universiteit Delft, 1992.

Doorschot, F.

De technologie van de serie- en massafabricage

Collegediktaat io27

Technische Universiteit Delft, 1992.

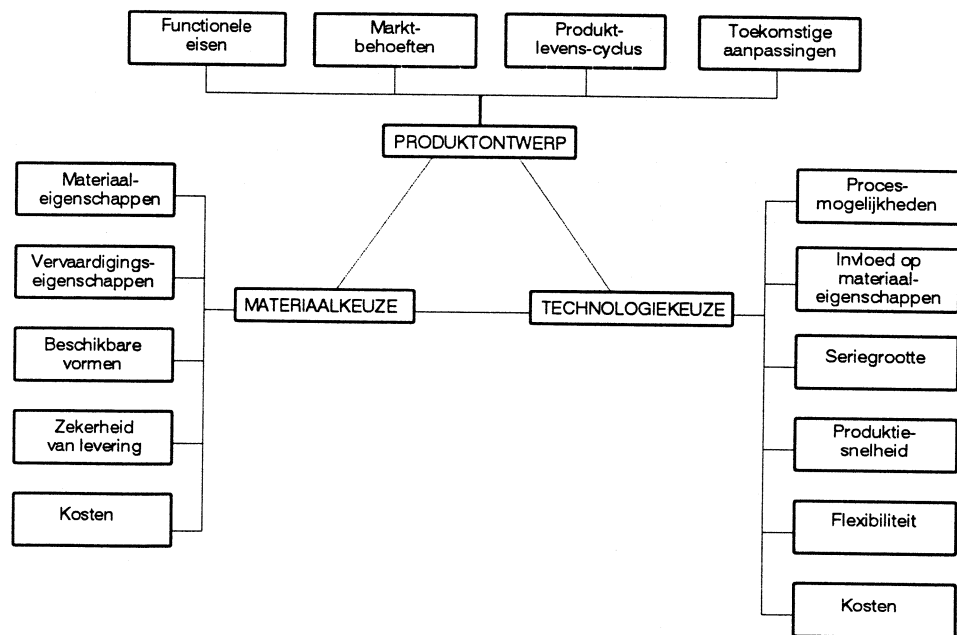
Hoofdstuk 26: TECHNOLOGIEKEUZE

26.1 INLEIDING

Omdat een ontwerp in de productie gerealiseerd moet kunnen worden, zijn ontwerp en vervaardigingstechniek nauw met elkaar verbonden. Ieder ontwerp moet niet alleen zo worden ontworpen dat het aan de functionele eisen voldoet, maar het moet ook economisch en zo eenvoudig mogelijk kunnen worden gerealiseerd. Op deze manier wordt de produktiviteit verhoogd en kan een producent concurrerend blijven werken.

In iedere produktontwikkeling worden de keuzes van materiaal en vervaardigingstechniek al in de ontwerpfase vastgelegd. Omdat de ontwerper tegenwoordig steeds meer technieken en materialen ter beschikking heeft, wordt het steeds moeilijker om voor een specifieke toepassing de beste technieken en materialen te kiezen en de kosten daarbij zo laag mogelijk te houden. Daarom heeft een ontwerper een goede kennis nodig van materialen en vervaardigingstechnieken, maar ook een innovatieve en creatieve benadering van het ontwerpproces en de fabricagetechnologie.

Om onderdelen van een goede kwaliteit voor de laagst mogelijke kosten te kunnen vervaardigen, is het belangrijk om te weten welke factoren van invloed zijn en welke relaties er tussen die factoren bestaan. De belangrijkste factoren die de kwaliteit en de kosten van een onderdeel beïnvloeden, zijn het ontwerp, de materiaalkeuze en de technologiekeuze.



Figuur 26.1: De factoren die de kwaliteit en de prijs van een produkt beïnvloeden

In figuur 26.1 is aangegeven welke factoren van invloed zijn op de kwaliteit en de prijs van een produkt. De factoren die van belang zijn bij het kiezen van een materiaal/technologie-combinatie zullen in dit hoofdstuk eerst worden behandeld. Daarna zal worden ingegaan op de wisselwerking tussen deze factoren en de wijze waarop deze wisselwerking de uiteindelijke keuze beïnvloedt. In het laatste deel van het hoofdstuk zullen technieken die concurrerend met elkaar zijn op verschillende punten met elkaar vergeleken worden. Hierbij zal worden aangegeven voor welke toepassingen de technieken het meest geschikt zijn.

26.2 MATERIAALKEUZE

Een groot aantal materialen staat de ontwerper ten dienste. De lijst van beschikbare materialen is op zich geen vast uitgangspunt. Soms verdwijnen materialen door vervanging of wettelijk verbod. Veel vaker echter verschijnen nieuwe materialen op de markt of wordt een nieuw materiaal ontwikkeld om een niet eerder te realiseren ontwerp mogelijk te maken. Omdat de vervaardigingstechniek niet los van het materiaal gekozen kan worden, zal in deze paragraaf nader worden ingegaan op een aantal factoren die van belang zijn bij de keuze van het materiaal. Deze factoren zijn aangegeven in figuur 26.1 en worden hierna, eerst los van elkaar, behandeld.

Materiaaleigenschappen

Veel materiaaleigenschappen zijn direct af te leiden van de gewenste functie vervulling van het te vervaardigen onderdeel. De kennis hierover komt in de Materiaalkunde uitgebreid aan de orde en blijft hier derhalve buiten beschouwing.

Vervaardigingseigenschappen

De vervaardigingseigenschappen zijn een groep van materiaaleigenschappen, die niet zozeer een relatie hebben met de functie vervulling van een onderdeel, maar met de gewenste of de te kiezen vervaardigingstechniek. Zo zal men bijvoorbeeld voor een te buigen of diep te trekken onderdeel moeten kiezen voor een materiaal met een hoge breukrek, terwijl deze eigenschap geen of weinig betekenis heeft voor het functioneren van het onderdeel.

Tot de groep van vervaardigingseigenschappen behoren bijvoorbeeld:

- Gietbaarheid;
- Plastische vervormbaarheid;
- Lasbaarheid;
- Lijmbaarheid;
- Polijstbaarheid;
- Verspaanbaarheid.

Deze lijst kan zonder veel moeite worden uitgebreid, gegeven het grote aantal verschillende vervaardigingstechnieken. Ook ten aanzien van deze vervaardigingseigenschappen moeten door de ontwerper keuzes gemaakt worden, omdat geen enkel materiaal goed scoort op alle eigenschappen. Wanneer de vervaardigingstechniek en de vervaardigingseigenschappen van het materiaal minder goed bij elkaar passen, ontstaan er altijd aanzienlijke meerkosten. Bij een slechte passing wordt het toepassen van een vervaardigingstechniek zelfs geheel onmogelijk. Tot deze laatste categorie behoren het polijsten van gietijzer en het buigen van graniet.

Een bijzonder punt van aandacht is dat voor veel materiaal/technologie-combinaties de materiaaleigenschappen voor en na het uitvoeren van de bewerking niet aan elkaar gelijk zijn. Dit geldt met name voor eigenschappen die samenhangen met corrosiebestendigheid en mechanische belastbaarheid. Soms zijn deze effecten gewenst zoals bijvoorbeeld bij het harden, maar soms zijn ze ook zeer ongewenst.

Beschikbare vormen

Wanneer er een materiaal gekozen moet worden, is het nuttig om te weten in welke vormen dit materiaal standaard geleverd kan worden, zodat er geen overbodige fabricagehandelingen hoeven te worden verricht. Van ieder standaardmateriaal zijn de eigenschappen, zoals oppervlakteruwheid en maattolerantie, afhankelijk van de wijze waarop het vervaardigd is. De meeste materialen kunnen standaard geleverd worden al plaat, staf en buis in verschillende afmetingen. Informatie over standaardmaterialen is te vinden in de catalogi van materiaalleveranciers. De vervaardigingstechniek die wordt toegepast om het halffabrikaat een bepaalde vorm te geven, kan van grote invloed zijn op de eigenschappen en prestaties van het eindproduct. Zo zullen twee platen die niet op gelijke wijze zijn gewalst, bij het buigen een verschil in terugvering vertonen.

Kosten

De kosten per eenheid materiaal hangen niet alleen af van het materiaal zelf, maar ook van de vorm en de grootte. Zo kost een dunne draad meer per kilo dan een dikke staaf van hetzelfde materiaal, omdat er meer bewerkingen op uitgevoerd moeten worden. Om dezelfde reden kosten poedervormige metalen meer dan blokken van hetzelfde materiaal. De kosten van het materiaal nemen in het algemeen af wanneer de aangeschafte hoeveelheid toeneemt.

De kosten van een materiaal zullen in de loop der tijd fluctueren vanwege fluctuaties in vraag en aanbod. Wanneer een materiaal niet langer kosten-concurrerend is, moeten alternatieve en goedkopere materialen worden gezocht.

Zekerheid van levering

De kosten van een materiaal worden beïnvloed door de zekerheid dat het materiaal geleverd kan worden. De zekerheid van levering wordt, behalve door internationale politieke invloeden, ook beïnvloed door bijvoorbeeld tekorten en stakingen of door planningsfouten van leveranciers.

26.3 TECHNOLOGIEKEUZE

We hebben in de voorafgaande hoofdstukken gezien dat alle vervaardigingstechnieken hun mogelijkheden en beperkingen hebben. Zo kunnen met behulp van gieten veel complexere vormen worden vervaardigd dan met koud-extruderen of sinteren, doordat met het gesmolten materiaal veel gemakkelijker de complexe vormholten gevuld kunnen worden. Aan de andere kant kunnen van koudvervormde werkstukken met behulp van verspanende technieken ingewikkelde vormen gemaakt worden, terwijl de sterkte groter is dan die van gegoten of gesinterde werkstukken.

Voor iedere nieuwe toepassing moeten alle alternatieven worden afgewogen. De keuze van een vervaardigingstechniek hangt niet alleen af van de vorm van het produkt, maar ook van andere factoren, zoals:

- Procesmogelijkheden zoals vorm- en groottebeperking, toleranties en oppervlaktekwaliteit;
- De invloed op de materiaaleigenschappen;
- De seriegrootte waarin het onderdeel vervaardigd moet worden;
- De produktiesnelheid die met de techniek gehaald kan worden;
- De flexibiliteit van de vervaardigingstechniek;
- De kosten van de verschillende aspecten van de fabricage.

Procesmogelijkheden

Het zal duidelijk zijn dat alle behandelde technieken hun beperkingen hebben met betrekking tot de complexiteit van de vorm, de afmetingen, de toleranties en de oppervlaktekwaliteit. Behalve van de vervaardigingstechnologie zijn deze beperkingen ook afhankelijk van het te bewerken materiaal.

Vorm- en groottebeperking

De maximale grootte die met een bepaalde technologie kan worden gemaakt, wordt meestal beperkt door de beschikbare machines en gereedschappen. Bij sommige processen worden er door het proces zelf beperkingen gesteld aan de maximale grootte. De dikte van kunststof spuitgietsproducten wordt beperkt door de lage warmtegeleiding van het materiaal. Bij het coquillegieten zullen werkstukken met zeer dikke wanden een veel te lange koeltijd tot gevolg hebben.

Het komt vaak voor dat de afmetingen van het werkstuk beperkt worden. De wanddikte van een werkstuk wordt bij het coquillegieten beperkt door de viscositeit van het materiaal en bij het pletten door de maximale pletverhouding d/h .

Het is belangrijk om in te zien dat door een kleine aanpassing van de vorm van het ontwerp (de wanddikte of afrondingen), een andere vervaardigingstechniek de meest geschikte kan worden.

Toleranties en oppervlaktekwaliteit

Belangrijke eigenschappen van een techniek zijn de toleranties en de oppervlaktekwaliteit die er mee geproduceerd kunnen worden. Ze zijn van invloed op de verschijningsvorm, latere montagehandelingen en de noodzaak van eventuele nabehandelingen. In het algemeen geldt dat de fabricagekosten hoger worden wanneer er nauwere toleranties en een fijnere oppervlaktekwaliteit gehaald moeten worden.

Wanneer er geen al te hoge eisen worden gesteld aan de nauwkeurigheid en de oppervlaktekwaliteit kunnen de onderdelen met een ruime tolerantie en een ruw oppervlak worden vervaardigd. In verband hiermee is het belangrijk dat er een goede communicatie is tussen de ontwerp- en de productie-afdeling.

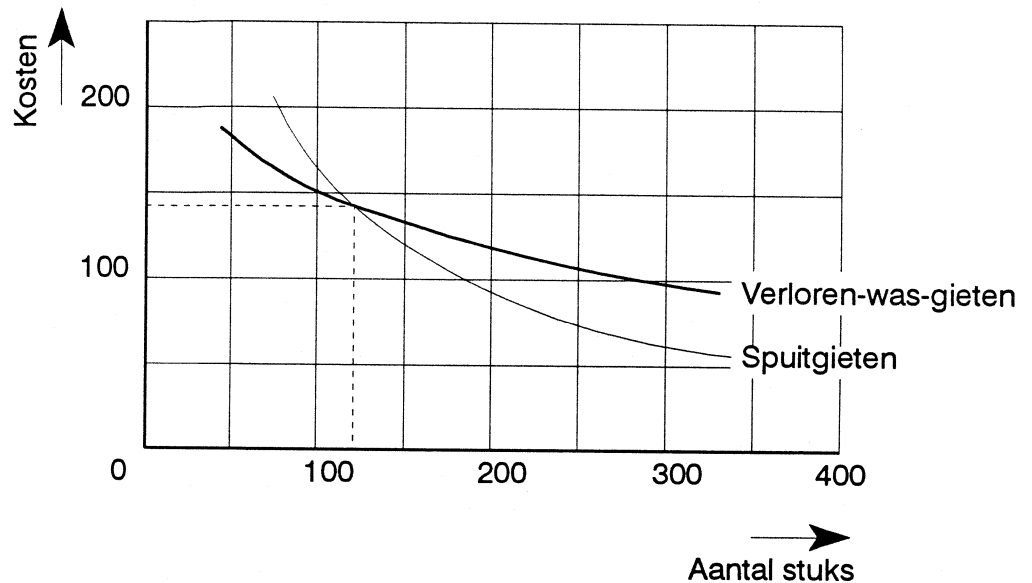
Seriegrootte

De seriegrootte waarmee een produkt vervaardigd wordt, kan sterk variëren. Paperclips, spijkers en balpennen worden in zeer grote series vervaardigd, in tegenstelling tot scheepsschroeven en vliegtuigmotoren.

De seriegrootte heeft een grote invloed op de technologiekeuze. Door grote verschillen in de vaste en variabele kosten kunnen technieken, die bij enkelstuksfabricage of bij kleine series economisch het meest aantrekkelijk zijn, bij grotere series te duur worden.

Bij kleine series is het belangrijk dat er met flexibel gereedschap wordt gewerkt, maar bij grotere series kan er voor technieken met produktspecifiek gereedschap gebruik worden gemaakt.

Een voorbeeld van de wijze waarop de kosten per onderdeel afhangen van de seriegrootte en de vervaardigingstechniek is te zien in figuur 26.2.



Figuur 26.2: De kosten van verloren-was-gieten en spuitgieten als functie van de seriegrootte bij een bepaalde toepassing

Produktiesnelheid

Een andere belangrijke factor bij de technologiekeuze is de produktiesnelheid. Deze is gedefinieerd als het aantal geproduceerde onderdelen per tijdseenheid. Met processen zoals spuitgieten, vlakstampen en dieptrekken kan een zeer hoge produktiesnelheid gehaald worden. Zandgieten, thermovormen en verspanende technieken hebben juist een zeer lage produktiesnelheid.

In sommige gevallen kan de produktiesnelheid worden opgevoerd door het proces te automatiseren of door op meerdere machines tegelijk te werken.

Het is trouwens niet altijd zo dat een lagere produktiesnelheid betekent dat het proces minder economisch is. Het gaat uiteindelijk om de totale kosten *per produkt* en deze kunnen bij een langzamer verlopend proces lager zijn. Bovendien kan een lagere produktiesnelheid soms een positieve invloed hebben op de eigenschappen van het werkstuk.

Flexibiliteit

De flexibiliteit van een vervaardigingstechniek is afhankelijk van de tijd die nodig is voordat met de fabricage kan worden begonnen (de *aanlooptijd*) en de tijd die nodig is om van de fabricage van het ene produkt om te schakelen naar een ander produkt (de *omsteltijd*).

Voor processen als extruderen, spuitgieten en vlakstampen zijn vaak complexe en dure gereedschappen nodig, terwijl lasersnijden en de conventionele verspanende bewerkingen met standaardgereedschap

kunnen worden uitgevoerd en daardoor een kortere aanlooptijd hebben. Een ander aspect dat van belang is, is de gereedschapwisseltijd. Het wisselen van gereedschap komt voor wanneer men van de fabricage van het ene produkt overgaat op de fabricage van een ander produkt, waar ander gereedschap voor gebruikt moet worden, of wanneer men voor de vervaardiging van een produkt meerdere gereedschappen op dezelfde machine moet gebruiken.

Wanneer men werkt met flexibele machines met computerbesturing kan men snel en effectief inspringen op produktwijzigingen. Dergelijke machines zijn echter wel duurder, zowel in onderhoud als in afschrijving.

Kosten

De kosten zijn uiteindelijk het resultaat van het totaal van alle keuzes. Veelal worden in eerste benadering een viertal soorten kosten van elkaar onderscheiden:

- Machinekosten, zoals rente, afschrijving, reparatie, onderhoud, reservedelen en energieverbruik;
- Gereedschapkosten; de kosten voor aanschaf van het gereedschap plus het onderhoud, afgeschreven over de te verwachten totaalserie;
- Loonkosten;
- Materiaalkosten.

Voor een typisch onderdeel uit de massafabricage verhouden deze kostensoorten zich als 15 : 15 : 15 : 55.

Voor onderdelen die van duur materiaal worden gemaakt, is het extra belangrijk dat de hoeveelheid *afval* zoveel mogelijk wordt beperkt. Omdat er bij verspanende bewerkingen bramen ontstaan, kunnen deze technieken minder economisch zijn dan bijvoorbeeld omvormende technieken waarmee hetzelfde onderdeel kan worden gemaakt. Bij het spuitgieten van kleine kunststofprodukten kan het materiaal van de aanspuiting een groot deel van de produktkosten voor zijn rekening nemen.

Bijzondere aandacht verdienen de kosten, die zijn verbonden aan mislukte produkten (de *uitval*). Wanneer materiaal/technologie-combinaties worden gekozen die op de grens van het mogelijke liggen, kunnen deze kosten buiten proporties stijgen. Waarden zo hoog als 30 tot 50% van het totaal zijn geen uitzondering, door de vele consequenties die een foutief onderdeel kan hebben in de volgende stappen in het bedrijfsproces en bij de klant.

26.4 VERGELIJKING VAN TECHNIEKEN

Het oervormen van metaal

De belangrijkste eigenschappen van de behandelde technieken voor het oervormen van metalen produkten zullen hier kort worden samengevat. In figuur 26.3 worden de technieken op diverse punten met elkaar vergeleken.

Een metalen voorwerp kan op een aantal manieren worden gemaakt. De kortste weg tussen uitgangsmateriaal en eindprodukt is het gietproces.

De maatnauwkeurigheid en de oppervlaktegesteldheid van het werkstuk zijn voor de diverse technieken verschillend. Of een gietstuk verspanend moet worden nabewerkt, hangt af van de gekozen methode en de vereiste nauwkeurigheid. De keuze van het gietproces hangt ook af van de afmetingen van het produkt, zoals de grootte en de minimale

	Zand-gieten	Verloren was gieten	Coquilliegieten	Lage-druk-gieten	Spuitgieten	Sinteren
Werkstuk:						
Materiaal	Alle	Alle	$T_s < 1000^\circ\text{C}$	$T_s < 1000^\circ\text{C}$	$T_s < 900^\circ\text{C}$	Alle
Gewicht (kg)	<300.000	<100	<100	<100	<50	<50
Min. dikte	3-6 mm	1 mm	2-4 mm	2 mm	0,5-1 mm	1 mm
Min. kerndiameter	4-6 mm	0,5-1 mm	4-6 mm	6 mm	3 mm	n.v.t.
Maatnauwkeurigheid ¹	3-7	10	8	8	10	7-10
Oppervlaktetail ¹	1-8	7-10	4-7	5-8	7-10	6-10
Complexiteit ¹	1-8	1-10	1-6	1-8	2-9	1-6
Porositeit ¹	5-10	10	3-6	4-8	1-6	1-8
Kosten ²:						
Machines	L-M	L-M	M	M	H	M-H
Matrijs	L	M	M	M-H	H	L-M
Arbeid	L-M	H	L-M	L-M	L-M	M
Nabewerking	M-H	M	M	M	L-M	L-H
Productie:						
Snelheid (stukks/uur)	<100	<1000	<60	<30	<200	<5.000
Min. seriegrootte	1-2000	5-50	1000-3000	5000	3000-5000	10.000
Aanlooptijd	dagen	uren- weken	weken	weken	weken- maanden	weken

¹ : Relatieve waarde van 1 (slecht) tot 10 (goed) ² : Relatieve waarde van L (Lage kosten) tot H (Hoge kosten)

Figuur 26.3: Vergelijking van technieken voor het oervormen van metaal

Voor hoogsmeltende legeringen zoals gietijzer en gietstaal is de technologiekeuze gemakkelijker dan voor bijvoorbeeld aluminium- en magnesiumlegeringen. Gietijzer en gietstaal worden vooral in zand- of grafietmatrijzen gegoten. Met *zandgieten* is het mogelijk om zeer grote gietstukken (tot 300.000 kg) te maken. Of de gietstukken handmatig of gemechaniseerd gemaakt worden, hangt af van het aantal te vervaardigen produkten.

Het *coquillegieten* lijkt in veel aspecten op het zandgieten, maar doordat een metalen matrijs wordt gebruikt, koelt het materiaal sneller af dan in een zandvorm. Hierdoor treedt er korrelverfijning op en ontstaat er minder poreusheid in het materiaal. Er kan met een grotere maatnauwkeurigheid en nauwere toleranties gewerkt worden en ook het oppervlak en de mechanische eigenschappen van het gietstuk zijn beter.

Wanneer werkstukken gemaakt worden, waarbij veel functies samengevoegd moeten worden, is het verstandig om aan *sputgieten* te denken omdat het hierbij mogelijk is complexe produkten te vervaardigen met een hoge mate van onderdelenintegratie. De werkstukken hebben een mooi afgewerkt oppervlak en ze kunnen met kleine toleranties gemaakt worden. Bovendien hebben ze relatief weinig nabewerking nodig. Door de dure matrijs is het spuitgieten vooral geschikt voor grotere series.

Het *lage-druk-gieten* ligt tussen het coquillegieten en het spuitgieten in. Door de aanwezige druk ontstaat er een gietstuk met goede materiaaleigenschappen. Het proces maakt het mogelijk om dunwandige gietstukken te vervaardigen met een goede oppervlaktekwaliteit.

Het *verloren-was-gieten* biedt een grote vormvrijheid, een grote maatnauwkeurigheid, een goede detaillering en een grote vrijheid in legeringskeuze. Met verloren-was-gieten is het mogelijk om hoogsmeltende legeringen te verwerken.

Het *sinteren* wordt toegepast voor relatief complexe produkten met een hoge sterkte en voor het verwerken van materialen die door gieten kunnen worden verwerkt. Het sinteren wordt ook gebruikt voor de vervaardiging van produkten die in bepaalde mate poreus moeten zijn.

In de meeste gevallen zijn de toepassingen van de oervormprocessen en de bewerking van *plaatmateriaal* duidelijk gescheiden, maar er zijn situaties waarin een produkt op beide manieren kan worden vervaardigd. Omdat bij het bewerken van plaat in het algemeen geldt dat de arbeidskosten laag zijn en de Gereedschapkosten hoog, zal deze techniek pas bij de vervaardiging van grotere series gekozen worden. Het kan dan economisch aantrekkelijk zijn om het produkt zo te herontwerpen dat het uit plaatmateriaal kan worden gemaakt.

Het oervormen van kunststof

De belangrijkste eigenschappen van de behandelde technieken voor de verwerking van kunststoffen zullen hier kort worden samengevat. In figuur 26.4 worden de technieken op diverse punten met elkaar vergeleken.

Het meest toegepaste proces voor de massafabricage van kunststof produkten is het *sputgieten*. Het grootste voordeel van spuitgieten is de grote vrijheid bij de vormgeving, waardoor verschillende functies in één produkt kunnen worden geïntegreerd. Het spuitgieten is een dure techniek voor kleine seriegrootten. Toch worden kleine series soms gesputgiet, wanneer dit de enige methode is om de vereiste kwaliteit te halen.

	Spuitgieten	Rotatiegieten	Thermovormen	Schuimen	Blazen	Extruderen
Werkstuk:						
Materiaal	Thermoplasten en thermoharders	Thermoplasten	Thermoplasten	Thermoplasten	Thermoplast	Thermoplasten en rubbers
Gewicht (kg)	0,01 g - 5 kg	0,01-300 kg	0,001-100 kg	-	-	-
Min.wanddikte (mm)	0,4 (thermopl.) en 1,0(thermoh.)	0,8	<1	4	1	0,4
Max. grootte	1200 mm	1-10.000 liter	10-7500 mm	-	0,1-10000 l	500 mm ²
Maatnauwkeurigheid ¹	6-10	2-7	4-6	4-9	6-10	6-10
Oppervlaktetail ¹	6-10	4-8	2-7	4-7	2-7	6-10
Complexiteit ¹	1-10	1-6	1-5	3-6	1-8	1-6
Kosten ²:						
Machines	H	M-H	M	M	M	H
Matrijs	H	L-M	L	L-H	M-H	M
Arbeid	M	L-M	L	M-H	H	L-M
Productie:						
Cyclustijd	10-60 sec.	15 min.	10-300 sec.	3-15 min.	10-300	10-60
Min. seriegrootte	3000	1-100	1-1000	500	1000	1000
Aanlooptijd	weken	dagen-weken	dagen-weken	dagen-weken	dagen-weken	dagen-weken

¹ : Relatieve waarde van 1 (slecht) tot 10 (goed) ² : Relatieve waarde van L (Lage kosten) tot H (Hoge kosten)

Figuur 26.4: Vergelijking van technieken voor het vormen van kunststof

Wanneer de gewenste wanddikte groter is dan met het spuitgieten bereikbaar is, zal men moeten overstappen op het *schuimen*. De maatnauwkeurigheid en de oppervlakedetaillering zijn bij het schuimen echter minder goed dan bij het spuitgieten. Het eindprodukt kost door de langere fabricagetijd twee- à driemaal zoveel als een niet-geschuimd spuitgietprodukt.

Met het *extrusieproces* is het mogelijk om complexe, dunwandige profielen te extruderen. Om de gewenste vorm en toleranties te halen is kalibreren vaak noodzakelijk. Er ontstaat een materiaal met hoge inwendige spanningen.

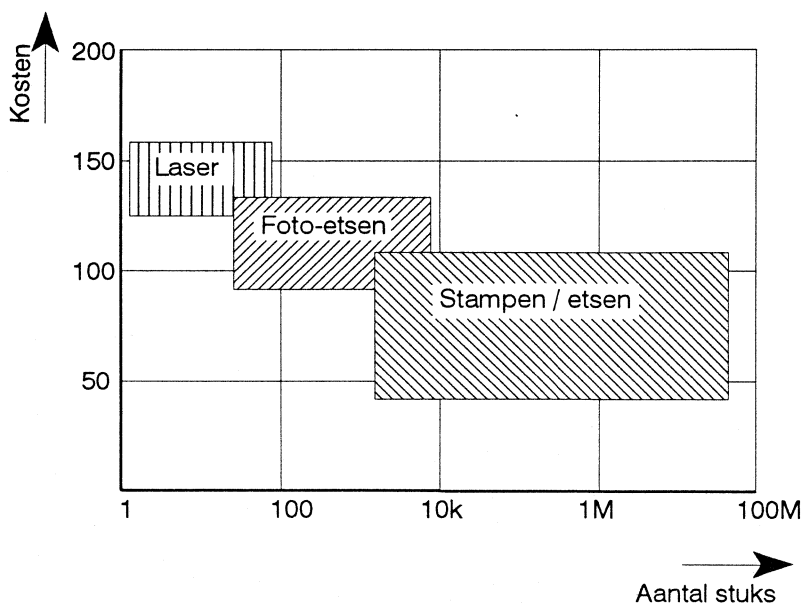
Voor de vervaardiging van holle produkten kan men van *blaasvormen* of *Rotatiegieten* gebruik maken. Voor kleine series kunnen deze technieken concurrerend zijn, maar voor grotere series van kleine produkten is het blaasvormen het meest geschikt. Wanneer men grote holle produkten wil maken, zal eerder Rotatiegieten worden toegepast.

Thermovormen kan concurrerend zijn met spuitgieten, blazen en Rotatiegieten, omdat grote oppervlakken met zéér dunne wanden kunnen worden gefabriceerd. Er moet wel rekening mee worden gehouden dat er geen goede detaillering mogelijk is. Het uitgangsmateriaal voor het thermovormen is wel duurder dan bij de meeste andere processen: kunststof plaat kost ongeveer drie keer zoveel als granulaat van hetzelfde materiaal.

Het snijden van plaat

In dit dictaat zijn drie technieken behandeld voor het snijden van plaat, namelijk vlakstampen, lasersnijden en fotochemisch etsen. Deze technieken kunnen voor bepaalde toepassingen concurrerend zijn, maar hebben toch ieder hun eigen werkgebied.

Bij een nieuw produkt moet de keuze gemaakt worden tussen deze technieken. Ieder van deze produktiemethoden heeft een eigen werkgebied (figuur 26.5).



Figuur 26.5: Werkgebieden van de verschillende methoden

Als er snel tot produktie gekomen moet worden, moet het eerst worden gedacht aan *lasersnijden*. Met de laserstraal kan men een groot aantal metalen en niet-metalen zoals kunststoffen, glas, hout en textiel snijden. Er kunnen gemakkelijk zeer complexe figuren worden uitgesneden met een snedebreedte van 0,1 tot 1,0 mm. Er is geen sprake van gereedschapslijtage, waardoor er een grote mate van reproduceerbaarheid is. Het proces kan eenvoudig geautomatiseerd worden, zodat er zeer eenvoudig wijzigingen in het ontwerp kunnen worden doorgevoerd. Als nadeel heeft het lasersnijden dat het produktietempo niet hoog ligt.

Met behulp van *fotochemische materiaalbewerkingen* kunnen zowel zeer kleine als grotere produkten uit plaat worden gemaakt. Het zijn technieken waarmee complexe produkten met een hoge nauwkeurigheid reproduceerbaar vervaardigd kunnen worden. Omdat het een zeer flexibele technologie is, kan met behulp van de fotochemische materiaalbewerkingen kan snel tot produktie worden gekomen. Na aanschaf van de benodigde apparatuur zijn de produktiekosten laag, zelfs al wordt het ontwerp enige malen gewijzigd. Dit in tegenstelling tot stampen, waarbij het vervaardigen van het stempel relatief duur is en het stempel bij een ontwerpwijziging meestal geen waarde meer heeft.

Bij grote series is het *stampen* economisch meer aantrekkelijk, hoewel de flexibiliteit hierbij kleiner is. Met stampen zijn vaak vergelijkbare produkten te vervaardigen. Er is echter een minder goede herhalingsnauwkeurigheid, door slijtage van de stempel. Aan het stampen zijn grote kosten verbonden voor de nabewerking en de vervaardiging van de stempel. Voor zeer grote series heeft het, waar mogelijk, de voorkeur. Bij sommige toepassingen worden de fotochemische bewerkingen uitgevoerd, omdat er voor de vervaardiging van de gewenste vorm geen alternatief is. In dat geval moet het langzaam verlopen van het proces op de koop toe worden genomen.

Voor het uitstansen van contouren zijn dure gereedschappen nodig, die slechts renderen bij grote aantallen. Het ligt daarom voor de hand om een stampinrichting te combineren met een lasergereedschap. Op zulke bewerkingscentra met een bewegend werkstuk worden de grote en eenvoudige gaten uitgeponst en de buitencontouren en ingewikkelde vormen met de laser uitgesneden. Deze economische oplossing voor de complete bewerking van werkstukken is ook belangrijk voor kleine series, prototypen en nulseries.

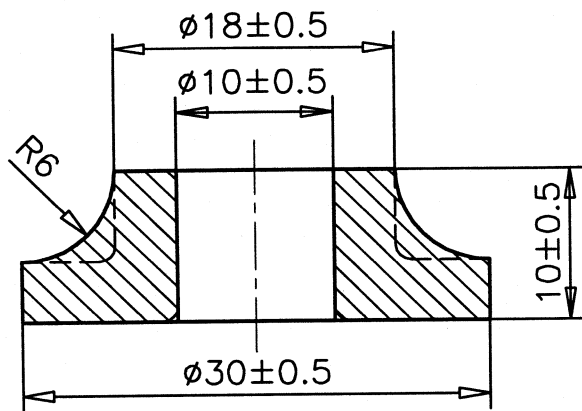
26.5 VOORBEELD TECHNOLOGIEKEUZE

In dit voorbeeld zal worden getoond welke stappen worden doorlopen bij de keuze van een vervaardigingstechniek. Het produkt wat we willen vervaardigen is de flens uit figuur 26.7. Meestal moet eerst worden vastgesteld welke functie een onderdeel heeft, welke belastingen er op aangebracht worden, in wat voor omgeving het gebruikt gaat worden en welke toleranties en oppervlakte-eisen er gesteld zijn. In dit voorbeeld zijn het materiaal en de afmetingen al vastgelegd.

Wanneer het materiaal, de afmetingen en de oppervlakteruwheid vaststaan, kan er voor de vervaardigingstechniek nog maar uit een beperkt aantal mogelijkheden worden gekozen.

Wanneer de technologiekeuze door één persoon moet worden uitgevoerd, kan het beste worden gewerkt volgens de elimatiemethode. Alle alternatieven worden één voor één bekeken en de ongeschikte worden weggestreept, waarna de aandacht geconcentreerd kan worden op de paar mogelijkheden die overblijven.

De mogelijkheden die in dit voorbeeld nog overblijven na eliminatie van de ongeschikte technieken zijn gieten, omvormen en verspanen.



Materiaal: Koolstofstaal
Min.hardheid: 220 BH

Alle maten in millimeters
(Stippellijnen geven alternatief ontwerp aan)

Figuur 26.7: Het ontwerp van de te vervaardigen flens

Gieten

Wanneer we de flens met behulp van een gietproces willen maken, hoeven we alleen te kijken naar gietprocessen die geschikt zijn voor de verwerking van staal. Het spuitgieten valt hierdoor af. Het verloren-was-gieten valt af, omdat de eenvoudige vorm de extra uitgaven die deze techniek met zich meebrengt niet rechtvaardigt.

We kunnen nu nog kiezen tussen zandgieten en coquillegieten. Welke we kiezen zal afhangen van de seriegrootte waarin het onderdeel vervaardigd gaat worden. Wanneer er bijvoorbeeld 2000 stuks gemaakt moeten worden, zal men eerder kiezen voor het coquillegieten.

Omvormen

Het onderdeel kan ook gemaakt worden met koud-extrusie. In dit geval zal het werkstuk verspanend moeten worden nabewerkt. Omdat het koud-extruderen slechts een halffabrikaat oplevert. Het is waarschijnlijk economisch aantrekkelijker om het onderdeel volledig met omvormprocessen te maken. Het is mogelijk om het onderdeel door middel van warm- of koud-smeden te maken en het met slagpersen na te bewerken om de gewenste toleranties te halen.

Verspanen

Het onderdeel kan worden vervaardigd door het verspanen van een massieve staaf, een buis, een gietstuk of een voorgevormd halffabrikaat. De kosten zijn hier de doorslaggevende factor. Het verspanen van staaf of buis is verreweg het goedkoopst, maar er ontstaat hierbij veel afval. Bij het gebruik van buis wordt dit nog beperkt.

Herontwerp

Het probleem zou anders worden, wanneer zou blijken dat het onderdeel van een materiaal gemaakt moet worden met een treksterkte van 550 MPa, dat de minimale wanddikte 10 mm is en dat de scherpe hoek niet noodzakelijk is (zie figuur).

Uit de eis van de minimale treksterkte volgt dat het onderdeel bijvoorbeeld ook uit nodulair gietijzer of koolstofstaal met een hoger koolstofgehalte gemaakt kan worden. Ook zijn er nu sinterprodukten mogelijk.

Doordat de scherpe hoek niet meer noodzakelijk is, kan het onderdeel ook uit plaatmateriaal worden vervaardigd. Dit is mogelijk door achtereenvolgens

ponsen en kraagtrekken of door dieptrekken gevolgd door uitponsen van de bodem. Welke van de twee mogelijkheden het best gekozen kan worden, hangt af van de taatheid van het materiaal.

Conclusie

Doordat het onderdeel uit dit voorbeeld een relatief eenvoudige vorm heeft, zal de beste vervaardigingstechniek pas gekozen kunnen worden na een grondige economische analyse van de alternatieven. Bij onderdelen met een meer ingewikkelde vorm is het aantal keuzemogelijkheden vaak beperkt en is het gemakkelijker om het beste alternatief te kiezen.

LITERATUUR

Kalpakjian, S.

Manufacturing engineering and technology (2nd edition)
Addison-Wesley Publishing company, 1992.

Luttervelt, C.A. van, T. Lujendijk

Inleiding vervaardigingskunde
Collegedictaat w53/w65
Technische Universiteit Delft, 1993.

Schey, J.A.

Introduction to manufacturing processes
McGraw-Hill, 1987.

Taal, A.J., P.F. Wentges, B.Ch. Ledeboer, R. Welschen en S.G.A. Derlox

Fotochemische metaalbewerking
Scriptie io69 - Technologie van de massafabricage
Technische Universiteit Delft, 1994.

Tan, S.

Vervaardigingstechnieken voor kunststoffen
io bo 17 - Serie io bijzondere onderwerpen deel 17
Technische Universiteit Delft, 1988.

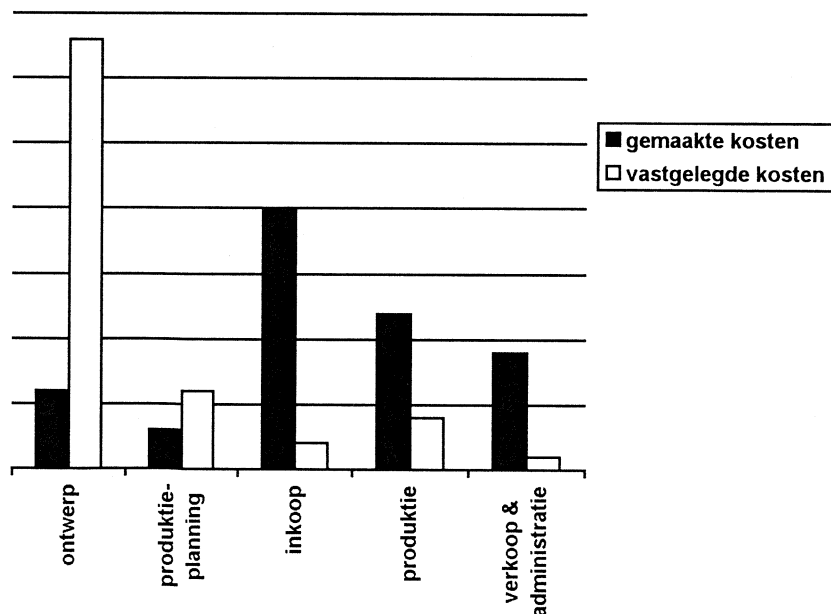
Hoofdstuk 27: KOSTEN

27.1 INLEIDING

Gedurende de levenscyclus van een artefakt worden vele uitgaven gedaan: de introductie van een produkt brengt kosten met zich mee. Deze kosten kunnen grofweg worden onderverdeeld in de kosten voor produktontwikkeling, de kosten voor produktie van het produkt, de kosten van het gebruik ervan en de kosten om er weer vanaf te komen (laatste: de end-of-life kosten). In het kader van het vak IDE 242 "vervaardigen 2" behandelen wij alleen de kosten voor produktie van het artefakt, omdat de uitgaven hiervan door het produktiebedrijf worden gedaan. Dit impliceert niet dat gebruiks- en end-of-life- kosten niet relevant zijn. Bij sommige produkten, zoals kopieerapparaten, spelen zij een vooraanstaande rol. Ze vallen echter buiten de scope van dit vak.

In de industriële produktontwikkeling speelt de reductie van kosten (cost-reduction) steeds een belangrijke rol. Een drijfveer achter de industriële revolutie was ongetwijfeld het streven om produkten, die vooralsnog alleen bereikbaar waren voor de hogere sociale klasse, door kostenreductie, binnen het bereik van de middenklasse te brengen. Een klassiek voorbeeld is het Wedgwood servies. Door toepassing van een ander materiaal en een andere produktiemethode is de prijs hiervan veel lager dan die van een traditioneel porseleinen servies, terwijl de kwaliteit vergelijkbaar is. Hierdoor kwam het bezitten van een mooi servies binnen bereik van de middenklasse en kon het in serie vervaardigd worden. De huidige prijsdaling in audio- en video-apparatuur geeft aan dat kostenreductie nog zeer aktueel is.

Uitgaven en kosten per afdeling



Figuur 27.1: uitgaven en kosten per afdeling (volgens Andreasen)

Een ogenschijnlijk klein, maar in dit kader relevant verschil, is dat tussen “het maken van kosten” en “het vastleggen van kosten.” Er is sprake van “kosten maken” als er iets gebruikt wordt, waarvoor een uitgave wordt gedaan. Deze uitgave kan nu of in de toekomst worden gedaan (denk aan het inkopen van materialen), of in het verleden zijn gedaan (denk aan het gebruik van machines). Onder het “vastleggen van kosten” verstaan we dat kosten worden bepaald, die in de toekomst moeten worden gedaan.

Figuur 27.1 laat zien waarom dit verschil juist voor ontwerpers zo belangrijk is: op de ontwerpafdeling worden weliswaar weinig kosten gemaakt, maar er worden veel kostenvastgelegd! Met andere woorden: in het produktontwerp zijn veel kosten geprogrammeerd! Industrieel ontwerpers moeten zich daarom in alle stadia van het ontwerpproces inzicht verschaffen in de kosten, die het produkt met zich mee brengt. Deel 27.4 van dit hoofdstuk bevat een aantal kwantitatieve en kwalitatieve technieken, die hierbij gebruikt kunnen worden.

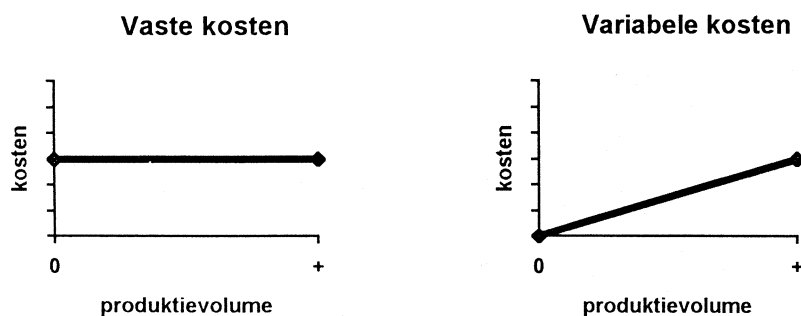
27.2 UITGAVEN, KOSTEN & PRIJS

Gedurende het industriële productieproces worden vele uitgaven gedaan die verschillend van aard zijn. De als gevolg daarvan optredende kosten, kunnen worden geklassificeerd naar de aard van de kosten (vaste vs. variabele kosten, direkte vs. indirecte kosten). Verder bestaan verschillende definities van kosten (fabrikagekosten, produktiekosten, totale kosten), afhankelijk van de uitgaven die tot deze kosten worden gerekend. De prijs is datgene wat uiteindelijk betaald wordt. Bedrijven hebben te maken met inkooprijzen en verkooprijzen. Inkooprijzen zijn datgene dat het bedrijf betaalt aan haar toeleveranciers. De verkoopprijs is datgene dat de klant van het bedrijf (groothandel, eindgebruiker) betaalt voor het produkt dat het bedrijf levert. Er geldt:

$$\text{Verkoopprijs} = \text{Totale Kosten} + \text{Winst voor belasting}$$

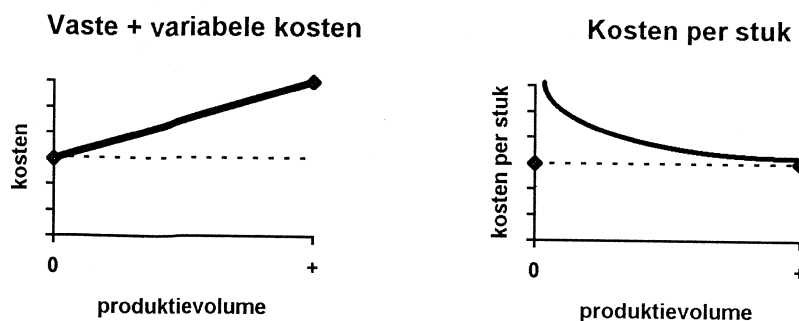
Vaste kosten / variabele kosten (fixed cost / variable cost)

Kosten kunnen worden onderscheiden in vaste kosten en variabele kosten. Vaste kosten zijn onafhankelijk van het produktievolume. Kosten voor matrijzen zijn een voorbeeld van vaste kosten: of er nu tienduizend of honderdduizend stuks produkt met een matrijs geproduceerd worden, de uitgaven voor de matrijs blijven praktisch gelijk (zie figuur 27.2, links)



Figuur 27.3: vaste en variabele kosten

Variabele kosten zijn daarentegen afhankelijk van het produktievolume (zie figuur 27.3, rechts). Deze afhankelijkheid wordt veelal als lineair verondersteld. Een voorbeeld van variabele kosten zijn de kosten van materialen die in het produkt verwerkt worden.



Figuur 27.3: veel voorkomende relatie tussen kosten en produktievolume

Figuur 27.3 toont een veel voorkomende relatie tussen kosten en produktievolume met daarin de vaste en de variabele kosten. De rechter figuur maakt duidelijk dat vaste kosten een minder belangrijke rol gaan spelen naar mate het produktievolume toeneemt. Hierbij moet worden opgemerkt dat de uitgaven voor vaste kosten worden gedaan, voordat de produktie kan worden gestart. Hiermee leggen vaste kosten beslag op de liquide middelen van het produktiebedrijf en vormen zij een risico: er is sprake van een investering.

Direkte kosten / indirecte kosten (direct cost / indirect cost)

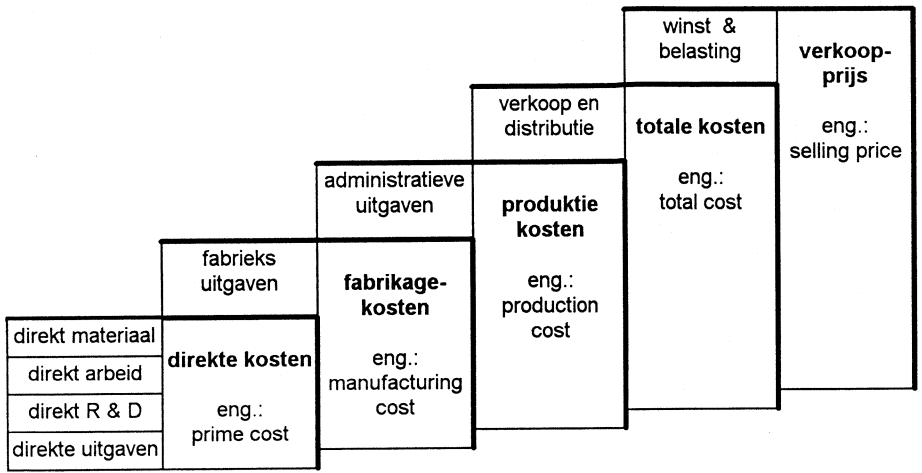
Een ander belangrijk onderscheid is dat tussen directe kosten en indirecte kosten. De uitgaven die directe kosten vormen, worden gedaan ten behoeve van één specifiek produkt. Voorbeelden van directe kosten zijn kosten van materialen waaruit het produkt is opgebouwd (direkte materiaalkosten) en de arbeidskosten van een persoon die één bepaald produkt assembleert (direkte arbeidskosten). Ook de afschrijving van produktiemiddelen (machines, computers, etc.) worden tot de directe kosten gerekend, mits deze door middel van uurtarieven aan aanwijsbare produkten worden toegerekend.

Indirekte kosten worden gevormd door uitgaven die niet speciaal ten behoeve van één produkt worden gedaan, zoals de kosten van gebouwen en administratieve ondersteuning.

Relatie tussen uitgaven en kosten

Figuur 27.4 geeft een overzicht van verschillende definities van kosten en hun relatie met de uitgaven zoals die gedurende het produktieproces gedaan worden.

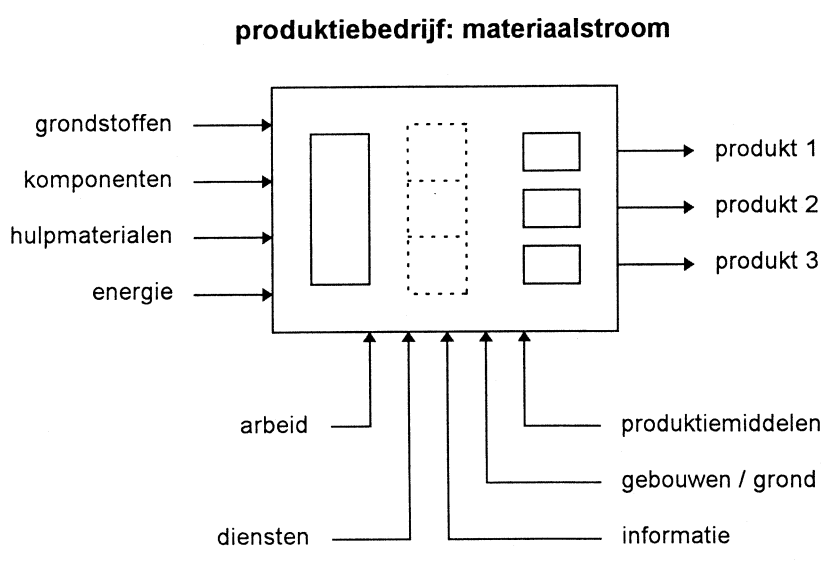
Industrieel ontwerpers hebben vooral invloed op de directe kosten (direct / prime costs) en de fabrieksuitgaven (factory expenses). Daarom spreken industrieel ontwerpers vaak over de fabrikagekosten (manufacturing cost) van een produkt. Dit kan praktisch zijn, hoewel niet mag worden vergeten dat de totale kosten (total cost) en de verkoopprijs (selling price), uiteindelijk de winst bepalen.



Figuur 27.4: kostenladder (naar model Niebel & Draper)

27.3 KOSTENBEREKENING (COSTING)

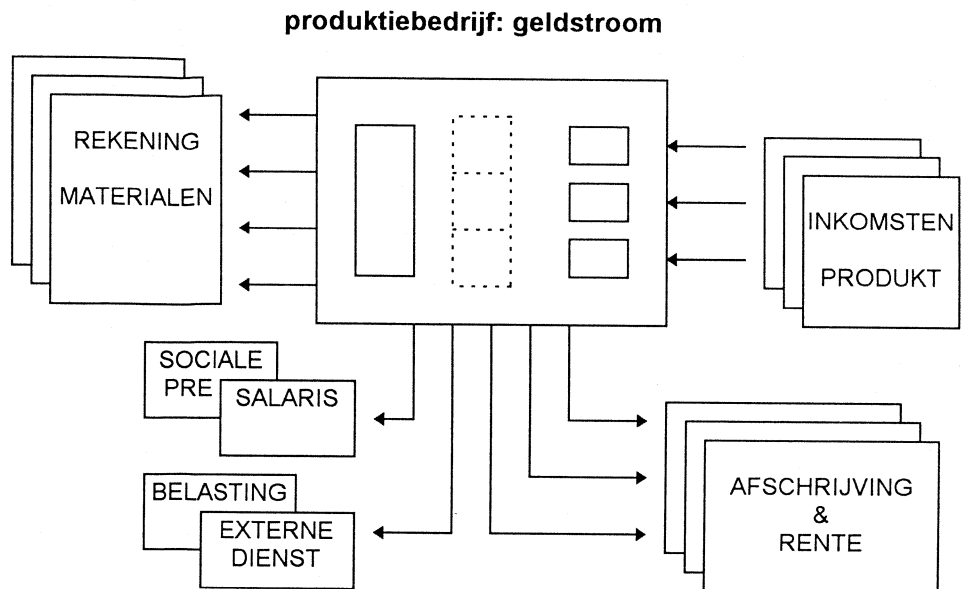
In een productiebedrijf worden grondstoffen, componenten, hulpmaterialen en energie, ook wel primaire invoer genoemd, getransformeerd tot één of meer produkten (zie figuur 27.5a). Dit wordt bewerkstelligd door de inzet van secundaire invoer: arbeid, produktiemiddelen, gebouwen / grond, financiën en het inkopen van diensten. De stroom, van primaire invoer naar gereed produkt, noemen we de materiaalstroom in het bedrijf.



Figuur 27.5a: Materiaalstroom door "black-box" productiebedrijf

Een soortgelijke stroom, maar in tegengestelde richting, is die van het geld (zie figuur 27.5b). Als gevolg van de verkoop van produkten ontstaan

inkomsten. Aan de andere kant worden uitgaven gedaan ter verkrijging van de noodzakelijke primaire en secundaire invoer. In het productiebedrijf kunnen zich verder voorraden (grondstoffen, componenten en gereed produkt) bevinden.



Figuur 27.5b: Geldstroom door "black-box" productiebedrijf

Aan de hand van een dergelijke "black-box" is het mogelijk de winst of verlies van het hele productiebedrijf over een bepaalde periode te berekenen:

$$\text{winst} = \text{inkomsten produkten} - \text{kosten.}$$

Dit "black-box"-model geeft echter geen inzicht welke uitgaven voor welke produkten worden gedaan. Derhalve kan niet worden berekend welk deel van de winst door een bepaald produkt gegenereerd wordt. Daarvoor moet men de geldstromen binnen in de "black-box" in kaart brengen: men moet bepalen welk produkt welke kosten met zich mee brengt. Dit proces noemt men kostenberekening (costing).

Behalve input voor het bepalen van het aandeel in de winst van individuele produkten, leveren kostenberekeningen kosteninformatie (zie verder 27.4). Deze kosteninformatie kan bij de ontwikkeling van een volgend produkt worden gebruikt om de kosten, die dit nieuwe produkt met zich mee brengt, te schatten. Kostenberekening vormt de basis voor kostenschatting (cost-estimation). De industrieel ontwerper zal derhalve enig inzicht in kostenberekening moeten hebben.

Kostenberekening

De basis van de kostenberekening is het verbijzonderen van uitgaven. Oftewel: het nagaan welke uitgaven aan welk produkt toegerekend kunnen worden. Voor het verbijzonderen van kosten bestaan vele manieren en verschillende bedrijven gaan er verschillend mee om. In dit kader wordt een principe beschreven dat een variant is op de "kostenplaatsenmethode."

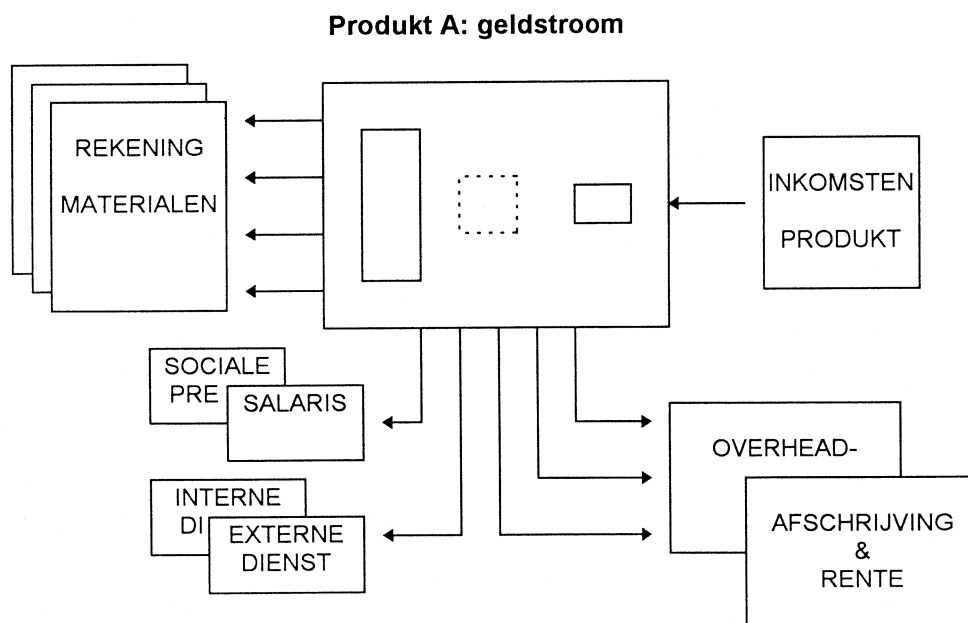
Er wordt onderscheid gemaakt tussen drie soorten uitgaven

- uitgaven ten behoeve van één produkt (zuiver direkte kosten)
- uitgaven voor meerdere, doch aanwijsbare, produkten
- uitgaven die niet aan een of meerdere produkten toe te schrijven zijn (zuivere overheadkosten).

Het verbijzonderen van zuiver direkte kosten is geen enkel probleem: deze zijn immers al "geoomerkt."

Uitgaven die gedaan worden voor meerdere, aanwijsbare, produkten zijn bijvoorbeeld de afschrijvingskosten van produktiemiddelen die voor meerdere produkten gebruikt worden en de arbeidskosten van een R & D afdeling die zich bezig houdt met de ontwikkeling van meerdere produkten. Op het eerste gezicht lijken dit indirecte kosten. Echter, door bij te houden waarvoor en hoe lang een middel of werknemer wordt ingezet (tijdschrijven), zijn deze kosten naar de verschillende produkten toe te rekenen. Dit gebeurt op basis van een machine-uurtarief voor produktiemiddelen, een mens-uurtarief voor werknemers of een afdelingsuurtarief voor een hele afdeling. Het berekenen van uurtarieven is een micro-economische verhandeling en wordt derhalve in het kader van dit vak niet behandeld. In de verdere kostenberekening worden uitgaven, die berekend zijn aan de hand van uurtarieven, op dezelfde manier behandeld als uitgaven als gevolg van de afname van externe diensten (zie figuur 27.6). Er wordt daarom vaak gesproken van een "interne dienst."

Uitgaven zoals die voor administratieve ondersteuning, grond, afschrijving van gebouwen, verwarming technische diensten etc., zijn moeilijk naar de verschillende produkten toe te rekenen. Meestal worden deze verbijzonderd in de vorm van overheadtoeslagen op de arbeidskosten en de kosten voor produktiemiddelen. De overheadtoeslag op arbeid is vaak rond de 100%, die op produktiemiddelen tussen 100 en 150 %.



Figuur 27.6: Geldstroom door "black-box" van produkt A

De scheiding tussen zuivere overheadkosten en indirecte kosten die d.m.v. uurtarieven door worden berekend is vaag. Deze wordt vaak ingegeven door het feit dat alles en iedereen laten tijdschrijven veel administratie en weinig toegevoegde waarde genereert.

Kostenberekeningen voor een enkele produkt kunnen nu worden gemaakt aan de hand van een "black-box" model, kongruent aan die voor het hele productiebedrijf (zie figuur 27.6).

Het aandeel van een produkt A, in de bruto winst (de winst voor het betalen van belasting) van de onderneming, kan als volgt worden berekend:

+	inkomsten produkt
-	uitgaven direkte materiaalkosten
-	uitgaven direkte arbeidskosten
-	afschrijving en rente (produktiemiddelen alleen voor A)
-	uitgaven interne diensten (uurtarieven)
-	uitgaven externe diensten (alleen voor A ingekocht)
-	overhead toeslagen
<hr/>	
	bruto winst

Kostenberekening: overkapaciteit

De kosten die in een bedrijf gemaakt worden, worden beïnvloed door twee "drivers:" de produkten die door en bedrijf geproduceerd worden en het management. De omvang van de overheadkosten worden voornamelijk bepaald door het management, dat er naar moet streven om de beschikbare capaciteit optimaal te benutten. Is er sprake van overkapaciteit, dan kan men op twee manieren omgaan met de berekening van uurtarieven en overheadtoeslagen.

- Men kan uitgaan van de gebruikte capaciteit. Uurtarieven en overheadtoeslagen zijn dan afhankelijk van de bezettingsgraad van gebouw, mens en machine.
- Men kan uitgaan van de maximale capaciteit. Uurtarieven en overheadtoeslagen zijn dan onafhankelijk van de bezettingsgraad van gebouw, mens en machine.

In het eerste geval worden de kosten als gevolg van overkapaciteit, in de uurtarieven en overheadtoeslagen, doorberekend in de kosten van de produkten. Dit geeft de industrieel ontwerper een vertroebeld beeld: de kosten van slecht management zijn in principe niet produktafhankelijk en kunnen dus niet door de industrieel ontwerper beïnvloed worden. Daarom verdient de tweede optie de voorkeur: de kosten als gevolg van overkapaciteit moeten dan als verliespost van de winst van het productiebedrijf worden afgetrokken. Dit kan een vreemd beeld opleveren: het kan voorkomen dat op alle produkten van het productiebedrijf winst wordt gemaakt, terwijl het bedrijf verlies lijdt. Het maakt echter duidelijk, welke kosten als gevolg van de verschillende produkten ontstaan, en welke als gevolg van overkapaciteit.

27.4 HET VOORSPELLEN VAN KOSTEN

Een kostenberekening kan alleen achteraf worden gemaakt: nadat een produkt een bepaalde tijd in produktie is (denk bijvoorbeeld aan het begrip "kwartaalcijfers") of nadat een serie geproduceerd en verkocht is. Om tijdens het produktontwikkelingsproces inzicht te krijgen in de kosten die een produkt genereert, kan men deze kosten voorspellen. Wij spreken dan kostenschatting (cost-estimation).

Het begrip "voorspellen" impliceert dat er sprake is van een combineren van informatie, ervaring en dat er bepaalde aannames worden gedaan. Bij kostenschatting is dit niet anders. Er zijn verschillende technieken om kosten te schatten: allemaal maken zij gebruik van kosteninformatie, geen van allen is zonder meer toe te passen en allemaal behoeven zij aannames, bijvoorbeeld ten aanzien van aantallen produkten die verkocht zullen worden.

Kostenschatting: technieken

Technieken voor het schatten van kosten worden onderverdeeld in drie hoofdgroepen:

- kwalitatieve kostenschatting (qualitative cost-estimation)
- globale kostenschatting (global cost-estimation)
- gedetailleerde kostenschatting (detailed cost-estimation)

Kwalitatieve kostenschatting geeft inzicht in de kosten van een produkt, zonder dat hieraan een absoluut bedrag wordt verbonden. Het vergelijken van twee ontwerpen aan de hand van ontwerpregels is een voorbeeld van kwalitatieve kostenschatting.

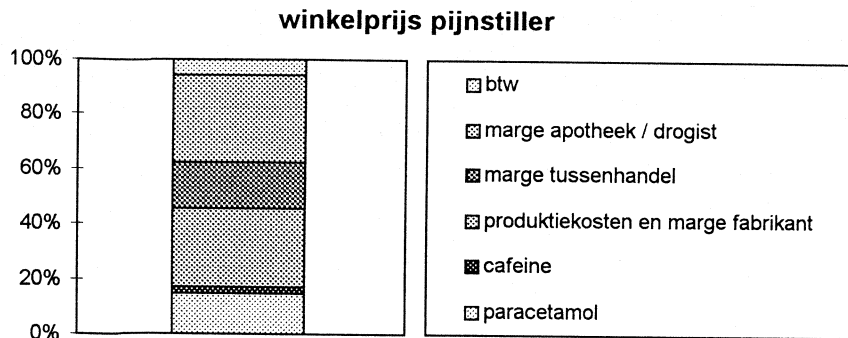
Bij globale kostenschatting worden kostengegevens van bestaande produkten gebruikt, bij schatten van de kosten van een nieuw ontwerp. Er bestaan technieken op basis van vectoren (deze worden verder niet behandeld) en op basis van empirisch afgeleide kostenfuncties (cost-functions). Veel gebruikt is de faktor-methode (factor method), die gebruik maakt van eenvoudige kostenfuncties met slechts één variabele. Globale kostenschatting wordt ook wel parametrische kostenschatting genoemd.

Bij gedetailleerde kostenschatting voorspelt men alle uitgaven die tijdens de produktie en marketing van een produkt zullen optreden: men probeert de kostenberekening van te voren in te vullen. Kostenschatting met behulp van gedetailleerde kosteninformatie is tijdrovend en vereist veel kennis en informatie op het gebied van produktietechnologie en bedrijfseconomie. De gedetailleerde kostenschatting vormt vaak de eerste stap van de produktievoorbereiding.

Kwalitatieve kostenschatting met behulp van kostenstructuren

In een kostenstructuur (figuur 27.7) worden een aantal elementen aangegeven die samen de verkoopprijs, de totale kosten of de fabriekskostprijs van een produkt bepalen. Voor elk element is aangegeven welk percentage van de kosten door dit element wordt veroorzaakt.

Door het interpreteren van kostenstructuren kunnen kwalitatieve uitspraken worden gedaan over conceptuele verschillen in produkten, vaak over de hele lifecycle. Kostenstructuren geven inzicht in de verhoudingen tussen kosten en zijn daarom vooral geschikt voor het stellen van prioriteiten bij herontwerp met het oog op kostenvermindering.



Figuur 27.7: kostenstructuur van een pijnstiller (bron: Intermediair 1996)

Aan de hand van de kostenstructuur van figuur 27.7 kan worden voorspeld, dat vermindering van de hoeveelheid paracetamol in pijnstillers een grotere besparing op zal leveren dan vermindering van de hoeveelheid cafeïne.

Kwalitatieve kostenschatting aan de hand van ontwerpregels

Ontwerpregels zijn wellicht de meest gebruikte bron van kosteninformatie. Met behulp van een ontwerpregel kan worden bepaald dat ontwerp A goedkoper is dan ontwerp B. Er zijn honderden ontwerp-regels bekend waarvan de grafisch uitgevoerde goed-fout regels het bekendst zijn (zie o.a. figuren 2.4, 3.17, 9.14, 10.20 in het diktaat IDE 242 "Vervaardigen 2"). Deze zijn niet onafhankelijk en voldoen aan de ene ontwerpregel impliceert soms dat aan een andere ontwerpregel niet, of minder, voldaan kan worden. Door het kwalitatieve karakter van ontwerp-regels is niet zonder meer af te leiden welke ontwerpregels in een bepaalde situatie de prioriteit verdienen. Ontwerpregels zijn handig om te voorspellen of een herontwerp duurder of goedkoper zal zijn dan het huidige produkt.

Kostenfuncties

In veel globale kostenschattingen wordt een kosten voorspeld aan de hand van kostenfuncties. Kostenfuncties worden empirisch afgeleid en hebben de volgende structuur:

$$\text{Kosten} = C_1 \times P_1^{a1} + C_2 \times P_2^{a2} + \dots + C_n \times P_n^{an}$$

Hierin is P een eigenschap van het te ontwerpen produkt, zoals massa, wanddikte of "aantal elektronische features." P wordt ook wel een "cost-driver" genoemd. C is een kental dat afhangt van vele factoren zoals materiaalprijzen, loonpeil, seriegrootte, etc. Eigenlijk bevatten deze kentallen alle non-universele factoren van kosteninformatie. Hierdoor is een kostenfunctie specifiek voor een bepaalde bedrijfsomgeving en een bepaalde groep (cluster) produkten of produkt onderdelen.

Kostenfuncties worden empirisch afgeleid aan de hand van kosteninformatie van bestaande produkten of produktonderdelen.

Hiervoor worden de volgende stappen doorlopen:

1. verzamel kosteninformatie van bestaande produkten binnen de bedrijfsomgeving
2. cluster deze produkten aan de hand van produktie-relevante kenmerken
3. bepaal per cluster de "cost-drivers"

4. bereken de kentallen m.b.v. regressie-analyse
5. test de afgeleide kostenfuncties.

Een bedrijf kan op deze manier **aan de hand** van haar eigen produkten een kosteninformatie systeem **ontwikkelen** dat door industrieel ontwerpers gebruikt kan worden. Een **kostenschatting** voor een bepaald ontwerp wordt vervolgens als volgt **gemaakt**:

1. bepaal tot welk **cluster** een ontwerp behoort
2. zoek de bij dit **cluster** behorende kostenfunctie
3. bepaal **aan de hand** van het ontwerp de waarde van de "cost-drivers"
4. bereken de geschatte kosten.

Kostenschattingen met behulp van kostenfuncties kunnen heel nauwkeurig zijn: een gemiddelde afwijking van minder dan 5% van de werkelijke waarde is mogelijk. De nauwkeurigheid van kostenfuncties hangt echter sterk af van de kwaliteit van de clustering van de produkten of produktonderdelen: hoe beter en nauwer de clustering, hoe nauwkeuriger de kostenfunctie.

Faktor-methode

De veel gebruikte faktor-methode (factor-method) maakt gebruik van kostenfuncties met slecht één "cost-driver:"

$$\text{kosten} = C \times P.$$

Dit kosteninformatie systeem is daardoor zeer eenvoudig toepasbaar en kostenschattingen kunnen redelijk nauwkeurig zijn mits de data (de kentallen C) up-to-date zijn. Hoewel er verschillende "cost-drivers" P (massa, oppervlakte, kosten, etc.) mogelijk zijn, vormen, in de industriële massaproductie, de direkte materiaalkosten meestal de te gebruiken "cost-driver."

Het kental C is ook hier bedrijfspecifiek en produktspecifiek en kan eenvoudig worden afgeleid uit het aandeel materiaalkosten M (material cost share) van de kostprijs of de totale kosten:

$$C = 1/M.$$

Er bestaan overzichten met materiaalkostenfrakties met betrekking tot verschillende produkten (tabel 27.1) en branches (tabel 27.2). Verder kunnen materiaalkostenfrakties binnen elk bedrijf worden bepaald, aan de hand van de kostenstructuur van huidige produkten (zie figuur 27.7).

Bij het gebruik van zowel tabellen als kostenstructuren, moet men zich zeer goed op de hoogte stellen om welke kosten en elementen het precies gaat, waar deze informatie vandaan komt en of deze nog voldoende aktueel is!

De meest algemene vorm van de faktor-methode is de 1-3-9 regel van H.F. Rondeau. Deze stelt dat de fabrikagekosten van een produkt gelijk is aan drie maal de materiaalkosten en de verkoopprijs aan negen maal de materiaalkosten. De materiaalkosten worden door Rondeau gedefinieerd als de kosten van grondstoffen plus 20% voor afval en gereedschapskosten. Hoewel de 1-3-9 regel door zijn algemene karakter de minst nauwkeurige techniek is, is zij voor het verkrijgen van "een eerste indruk" goed bruikbaar.

Item description	material cost share [%]	share classification	Industry group description	direct material share	direct labor share	indirect payroll
Automobile	70	large	Beverages	0.65	0.08	0.05
Railway Freight Car	68	large	Tobacco	0.55	0.07	0.02
Chemical Plant	64	large	Textile Mill Prod.	0.56	0.20	0.05
Rail Passenger Car	58	large	Apparel	0.48	0.23	0.07
Construction Equip.	54	large	Wood Products	0.52	0.21	0.05
Diesel Engines	50	large	Furniture, Fixtures	0.45	0.24	0.09
Machine Tools	48	large	Paper Products	0.51	0.17	0.07
Amplifiers	45	large	Printing, Publish.	0.33	0.20	0.16
Clocks, Watches	25	medium	Chemicals	0.43	0.09	0.07
Electrical Instrum.	25	medium	Petroleum Prod.	0.75	0.04	0.02
Measuring Tools	20	medium	Rubber and Plastics	0.45	0.20	0.08
Glass Products	14	small	Leather	0.46	0.25	0.07
China Products	7	small	Stonen Clay, Glass	0.41	0.21	0.08
			Primary metals	0.56	0.17	0.06
			Fabricated Metal	0.46	0.21	0.09
			Nonelectrical Eq.	0.42	0.21	0.12
			Electrical Equip.	0.42	0.19	0.14
			Transportation Eq.	0.57	0.15	0.08
			Instruments	0.34	0.17	0.14
			Miscellaneous Mfg.	0.44	0.21	0.10
			Avarage for all industries	0.51	0.16	0.10

Tabel 27.1 (links): materiaalkostenfractie van verkoopprijs van verschillende produkten

Tabel 27.2 (rechts): direkte materiaalkosten fractie van totale jaar branche-verkoop

Gedetailleerde kostenschatting

De productieplanning (process-plan) vormt de basis voor gedetailleerde kostenschatting. Aan de hand hiervan wordt voorspeld welk beslag de productie en marketing van een produkt legt op mensen, machines, gereedschappen en materialen. Er wordt een belangrijke aanname gedaan ten aanzien van de aantallen produkt die verkocht zullen worden. Het maken van een gedetailleerde kostenschatting verloopt verder congruent aan het maken van een kostenberekening (zie deel 27.3 van dit hoofdstuk).

Een gedetailleerde kostenschatting bevat de volgende componenten:

- ontwerpkosten
- engineeringkosten
- directe materiaalkosten
- directe arbeidskosten
- machinekosten
- gereedschapskosten
- inspectiekosten
- administratiekosten
- verkoop & distributiekosten
- overheadkosten

Een gedetailleerd kostenschatting kan worden vereenvoudigd door één of meer componenten (bijvoorbeeld administratiekosten en verkoop & distributiekosten), als overheadkosten te beschouwen.

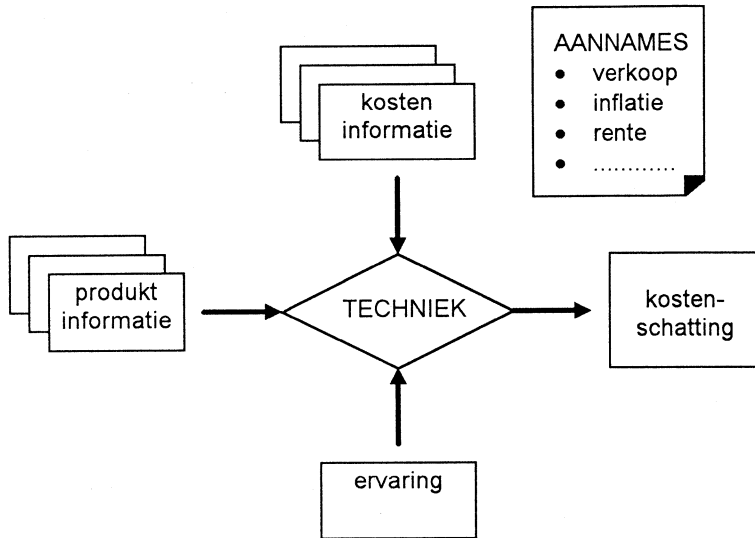
De drie basisformules die in gedetailleerde kostenschattingen gebruikt worden zijn:

- kosten = aantal x prijs per stuk
- kosten = massa x prijs per massa-eenheid
- kosten = aantal uren x uurtarief

Cruciaal bij het gebruik van een gedetailleerde kostenschatting is het schatten van de tijd die elke actie uit de productieplanning vereist. Voor menselijke handelingen bestaan databases die zijn voortgekomen uit arbeidstudies. Een voorbeeld hiervan zijn de tabellen van Boothroyd & Dewhurst voor het schatten van assemblagetijden en het Maillard-systeem voor de tijd die nodig is om een spuitgietmatrijs te vervaardigen. Voor het schatten van procestijden en gereedschapstandtijden bestaan vele formules, zoals de formules voor afkoeltijden van spuitgietprodukten in hoofdstuk 5 van dit diktaat.

Kostenschatting in het ontwerpproces

Een kostenschatting wordt gemaakt op basis van produktinformatie, kosteninformatie en een aantal aannames (zie figuur 27.8).



Figuur 27.8: Kostenschatting

fase van het ontwerpproces	beschikbare produkt informatie	kwalitatieve technieken	kwantitatieve technieken
analyse	eigenschappen	interpreteren kostenstructuur	faktor-methode
koncept	funkties principes	interpreteren kostenstructuur	faktor-methode
materialisatie	geometrie materiaal	ontwerp-regels	kosten-funkties
uitwerking	productieproces	ontwerp-regels	gedetailleerde kostenschatting

Tabel 27.3: bruikbare technieken per fase van het ontwerpproces

Voorbeelden van produktinformatie zijn funkties, features, wanddikte, materiaal en fabrikagetechnologie. Het nivo van de benodigde produktinformatie verschilt per kosteninformatie systeem. De beschikbare produktinformatie, het gaat immers om een produkt in spé, verschilt bovendien per fase van het ontwerpproces. Daarom kunnen de verschillende kosteninformatie systemen niet willekeurig in elke fase van het ontwerpproces gebruikt worden. Tabel 27.3 geeft voor elke fase van het ontwerpproces de bruikbare kosteninformatie systemen.

Kosteninformatie beschrijft de relatie tussen produkteigenschappen en kosten. Alle technieken voor het schatten van kosten maken gebruik van een vorm van kosteninformatie zoals ontwerpregels, kostenstructuren, tabellen, funkties, uurtarieven materiaalprijzen etc. Een belangrijk aspekt van kosteninformatie is het non-universele karakter ervan: de relatie tussen produkteigenschap en prijs verschilt per land, per bedrijf en in de tijd. Dit komt door verschillen in energieprijzen, loonpeil, technologie en de manier waarop overheadkosten verbijzonderd worden: denk hierbij aan kosten als gevolg van overkapaciteit! Als twee verschillende bedrijven een kostenschatting maken voor hetzelfde produkt, kunnen deze verschillende uitkomsten hebben! Kostenschattingen zijn, net als kostenberekeningen, niet zonder meer vergelijkbaar.

Kostenschatting: een stappenplan

Bij het schatten van kosten moeten worden de volgende stappen doorlopen:

1. bepaal het doel van de kostenschatting
2. bepaal de fase en de beschikbare produktinformatie
3. kies een techniek voor de kostenschatting
4. verzamel de benodigde kosteninformatie en identificeer aannames
5. voorspel de kosten
6. evalueer de resultaten.

Bij het bepalen van het doel moet worden vastgesteld welke kosten men precies wil schatten, of een absolute schatting nodig is, of dat volstaan kan worden met een vergelijking van ontwerpen, en hoe nauwkeurig de schatting moet zijn. Een kostenstructuur van een vergelijkbaar produkt geeft vaak het benodigde inzicht. Nadat het doel en de beschikbare produktinformatie bepaald zijn, kan met behulp van tabel 27.3 een techniek worden gekozen.

Het verzamelen van de benodigde kosteninformatie is vaak lastig. Als basis voor kwantitatieve technieken is een kostenberekening van een vergelijkbaar produkt een goede bron. Verder vindt men kosteninformatie literatuur, kranten, on-line diensten, brochures, leveranciers, etc. Zie o.a. deel 27.7 van dit hoofdstuk. Aannames worden bewust gedaan, denk hierbij aan de gewenste nauwkeurigheid, en geregistreerd. Goed gekozen aannames kunnen veel werk besparen!

Nadat de voorspelling is gedaan wordt deze geëvalueerd om te verifiëren of het de gewenste informatie heeft opgeleverd, hoe relevant die informatie (achteraf) is en welke invloed de gedane aannames op de voorspelling hebben gehad.

27.5 VOORBEELDEN

Inleiding

Een citruspers bestaat uit gespuitsgiete kunststof delen (behuizing + persbenodigdheden), staal (motor + bevestigingsartikelen), koper (motor) en karton (verpakking). Bedrijf P ontwikkelt en assembleert citruspersen en verkoopt ze vervolgens aan verschillende, landelijke, verkooporganisaties. Alle onderdelen worden bij toeleveranciers betrokken. Momenteel wordt in bedrijf P een nieuwe citruspers ontwikkeld. Tabel 27.4 geeft een overzicht van de directe materiaalkosten zoals die berekend zijn voor het nieuwe citruspersontwerp.

materiaal	massa [g]	direkte materiaalkosten
div. kunststoffen	450	fl. 1,25
div. staal/ijzer	95	fl. 0.40
koper	50	fl. 1.45
karton	120	fl. 0.30
inkt	5	fl. 0.05

Tabel 27.4: directe materiaalkosten ontwerp-citruspers

Voorbeeld 1: kostenschattingen in de conceptfase

Door kostenschattingen in de conceptfase kan worden voorspeld of de productie van het ontwerp commercieel aantrekkelijk is. Commercieel aantrekkelijk wil zeggen dat het produkt voor een voor de konsument aantrekkelijke prijs, met een voor de producent voldoende winstmarge op de markt gebracht kan worden.

Met behulp van de 1-3-9 regel kan een eerste, grove, schatting van de fabrikage-kostprijs (KF) en de winkelprijs (PW) van het nieuwe ontwerp worden gemaakt:

$$KF = 3 \times (1,2 \times \text{fl.}3,45) = \text{fl.}12,42$$

$$PW = 9 \times (1,2 \times \text{fl.}3,45) = \text{fl.}37,26$$

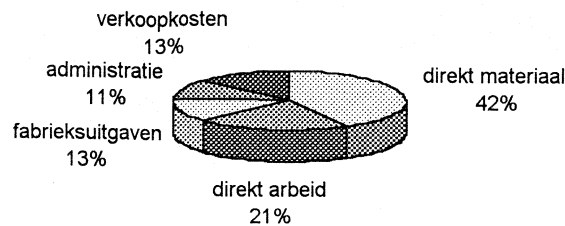
De geschatte winkelprijs komt ongeveer overeen met de werkelijke prijs van een citruspers in de winkel, waaruit we kunnen afleiden dat het ontwerp waarschijnlijk voor de juiste prijs op de markt gebracht kan worden.

Met de faktor-methode en tabel 27.2 kunnen de verkoopprijzen die de toeleveranciers rekenen voor de onderdelen worden geschat. Voor bedrijf P vormen deze de directe materiaalkosten van de citruspers.

kunststof (rubber & plastics) :	DM = 1/0,45 x fl.1,25 = fl.2,78
staal (fabricated metal):	DM = 1/0,46 x fl.0,40 = fl.0,78
koper (primary metal):	DM = 1/0,56 x fl.1,45 = fl.2,59
verpakking (printing):	DM = 1/0,33 x fl.0,35 = fl.1,06

De totale directe materiaalkosten voor bedrijf P bedragen fl.7,21. Figuur 27.9 toont de kostenstructuur zoals die geldt voor de huidige citruspersen van bedrijf P.

totale kosten citruspersen bedrijf P



figuur 27.9: kosten-structuur huidige citruspersen

Met behulp van de factor-methode worden de totale kosten die bedrijf P maakt bij de productie van een citruspers volgens het nieuwe ontwerp als volgt geschat:

$$TK = 1/0,42 \times \text{fl.}7,21 = \text{fl.}17,17$$

Vervolgens berekenen we de geschatte verkoopprijs VP waarvoor bedrijf P de nieuwe citruspers aan de verkooporganisaties moet verkopen, als gestreefd wordt naar een winstmarge van 10%, na het betalen van belasting (50%):

$$VP = 1,2 \times \text{fl.}17,17 = \text{fl.}20,60$$

Voorbeeld 2: kostenschatting in de materialisatiefase

De kosten van de kunststof onderdelen bepalen een groot deel van de totale kosten van een citruspers, zoals die door bedrijf P geproduceerd worden. Door kostenfuncties af te leiden van bestaande citruspersen, kunnen de kosten van kunststof onderdelen in de materialisatiefase worden geschat.

Van zestig kunststof onderdelen van bestaande citruspersen van bedrijf P worden de inkoopprijzen verzameld. Ze worden geclusterd naar de massa van het onderdeel en vervolgens worden, met behulp van regressieanalyse, de volgende kostenfuncties afgeleid:

$$KI = 0,97 \times (m \times MP) + 0,017 \times d \quad (10 \text{ g} \leq \text{massa} < 25 \text{ g})$$

$$KI = 1,00 \times (m \times MP) + 0,043 \times d \quad (25 \text{ g} \leq \text{massa} < 60 \text{ g})$$

$$KI = 1,10 \times (m \times MP) + 0,065 \times d \quad (\text{massa} > 60 \text{ g})$$

waarin:

KI geschatte inkoopprijs kunststof onderdeel [fl.]

m massa onderdeel [g]

MP materiaalprijs [fl./g]

d wanddikte onderdeel.

Er bestaan twee ontwerpvoorstellen voor het huisdeksel van de citruspers:

- A. een huisdeksel van ABS (3 DM/kg) van 75 gram en een wanddikte van 1,8 mm
- B. een huisdeksel van PP (1,3 DM/kg) 100 gram met een wanddikte van 2,2 mm

Met behulp van bovenstaande kostenfuncties worden de inkoopprijzen van de twee ontwerpvoorstellen geschat:

$$KI = 1,10 \times (75 \times 0,0037) + 1,8 \times 0,065 = \text{fl.}0,42$$

$$KI = 1,10 \times (100 \times 0,0015) + 2,2 \times 0,065 = \text{fl.}0,31$$

In dit geval zou een huisdeksel van PP de goedkoopste oplossing zijn.

Voorbeeld 3: kostenschatting in de uitwerkingsfase

Toeleverancier N wordt door bedrijf P gevraagd om een offerte uit te brengen voor de levering van 1000.000 citruspers huisdeksels (ontwerp B) in drie jaar tijd. Met een vereenvoudigd gedetailleerd kosten informatie systeem wordt de minimale verkoopprijs van de huisdeksels berekend.

T.a.v. uurtarieven geldt het volgende

- Het produkt wordt gespoten op een 350/130 spuitgietmachine. Hiervoor is een machineuurtarief van fl. 30,- berekend
- Er is één ongeschoolde werknemer die vijf spuitgietmachines bewaakt. Hiervoor is een uurtarief van fl.25,- berekend.
- De matrijs wordt gemaakt door geschoolde werknemers. Hiervoor is een uurtarief van fl.50,- berekend.

Voor het hele bedrijf geldt verder:

- Alle overheadkosten van het bedrijf worden verbijzonderd door een toeslag van 100% op uurtarieven voor machines en arbeid.
- Er wordt gestreefd naar een winstmarge van 5%, na betaling van belasting (50%).

De tijden worden als volgt geschat:

- Met het Maillard-systeem (zie literatuur) wordt aan de hand van de complexiteit en het oppervlak van het produkt geschat dat het maken en testen van de matrijs 356 uur zal kosten.
- Met behulp van formule 13 van hoofdstuk 4 wordt een afkoeltijd van het produkt 5,0 sec. zal bedragen. De cyclustijd wordt geschat op 1,3 x de afkoeltijd = 6,5 sec.

Vervolgens wordt de minimale verkoopprijs als volgt berekend:

Materiaalkosten		
100.000 kg PP	fl.1,50 per kg	150.000
Gereedschapskosten		
356 uren maken en testen	fl.50,00 per uur	17.800
overheadtoeslag	100%	17.800
Proceskosten		
1806 machine-uren	fl. 30,00 per uur	54.180
1806 / 5 mensuren	fl.25,00 per uur	9.030
overheadtoeslag	100%	+ 63.210
totale kosten		312.020
winst + belasting	10%	+ 31.200
verkoopprijs		fl. 343.220

Aan de hand van de bovenstaande schatting kan toeleverancier N de 1.000.000 huisdeksels voor fl.343.220,- aan bedrijf P aanbieden.

27.6 COMPUTERONDERSTEUNING

Kwantitatieve kosteninformatie systemen brengen vaak het nodige rekenwerk met zich mee, zowel bij het verzamelen van kosteninformatie, het schatten van kosten, als bij het afleiden van kostenfuncties. Spreadsheet programma's vormen daarom een praktisch gereedschap om kosteninformatie op te slaan en het rekenwerk te verlichten. Moderne spreadsheets bevatten bovendien de nodige statistische functies die nodig zijn voor het afleiden van kostenfuncties.

27.7 INFORMATIEBRONNEN

Kosteninformatie is vaak moeilijk in te winnen. Bedrijven praten hier niet graag over de prijzen die zij betalen en ontvangen. Kostenberekeningen bevinden zich meestal in mappen met "Classified Information" of "Bedrijfsgeheim" erop gestempeld. Hieronder enkele informatiebronnen die gebruikt kunnen worden bij het schatten van kosten.

Branchegegevens

- CBS-Jaarboek
- Kamers van Koophandel
- Jaarverslagen van bedrijven.

Grondstoffen

- Jaarboek Kunststof & Rubber
- IO-diktaat BO 5 "Kunststoffen"
- Ashbe M.F. "Material Selection in Mechanical Design," Pergamon Press
- Kranten met een zeer goede economisch/financieel bijlage.

Halffabrikaten & Componenten

Over halffabrikaten en componenten zijn veel brochures beschikbaar (o.a. in het Technisch Documentatiecentrum van de faculteit Industrieel Ontwerpen). Deze zijn echter, op een uitzondering na, zonder prijslijst. Hiervoor moet de leverancier benaderd worden. Houdt er rekening mee dat fabrikanten die grote hoeveelheden bestellen, kortingen bedingen van maximaal 30%.

Een indicatie van kosten van halffabrikaten kan worden verkregen aan de hand van de voorraadkatalogus van de IO-werkplaats.

- IO-diktaat IO 27 H (nr. 632), "Kostprijsgegevens:" veel prijzen van halffabrikaten.

Machine-uurtarieven

Over machines zijn veel brochures te vinden, helaas meestal zonder prijslijst.

- IO-diktaat IO 27 H (nr. 632), "Kostprijsgegevens:" uurtarieven voor veel machines. Let op: deze zijn inclusief overheadtoeslag van +/- 100%!

Spuitsieten

- IO-diktaat IO82A "Konstrueren in kunststoffen." (materiaalkosten, matrijkskosten, machine-uurtarieven).

Assemblagetijden

- Methode van Boothroyd & Dewhurst (o.a. in IO-diktaat IDE 342 "Vervaardigen 3").

27.8 LITERATUUR

Andreasen

"Design for assembly (second edition)"
Springer, Berlijn, 1983

Anemaat, prof.ir.A.

"Konstrueren in kunststoffen"
TUDelft, fac. Industrieel Ontwerpen io 82a (671), 1981.

Botter, prof.ir. Constant H.

"Produktiemanagement, vierde, geheel herziene druk"
Kluwer Bedrijfswetenschappen, Deventer, 1993

Creese, R.C., Adithan, M., Pabla, B.S.

"Estimating and Costing for the Metal Manufacturing Industries"
Marcel Dekker Inc., New York 1992.

Ralph Sims Jr., E.

"Precision manufacturing costing"
Marcel Dekker Inc., New York, 1995

Rodney D. Stewart

"Cost-estimating"
John Wiley & Sons Inc., New York, 1991

Slot, prof. dr. R.

"Elementaire Bedrijfseconomie"
Stenfert Kroese B.V., Leiden, 1987

Stevenson, William J.

"Production / Operation Management, fourth edition"
Irwin Inc., Burr Ridge (Illinois), 1993

Veefkind, ir. M.J.

"Quantitative cost estimation in early industrial design stages"
Proceedings III international congress for project engineering,
Barcelona 1996.

Veefkind, ir. M.J., Koudijzer, ir. J

"Vervaardigen 3" (Boothroyd-methode, hoofdstuk 3)
TUDelft, fac Industrieel Ontwerpen IDE342 (627), 1995.

Wierda, L.S.

"Cost Information Tools for Designers"
Delft University Press, Delft 1990.