

VI p (deel 1): Numerieke simulatie van het precisie spuitgietproces

Citation for published version (APA):

Caspers, L. W., Zoetelief, W. F., & Meijer, H. E. H. (1994). VI p (deel 1): Numerieke simulatie van het precisie spuitgietproces. *Kunststof en Rubber*, (9), 27-30.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1994

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Numerieke simulatie van het precisie spuitgietproces

De eisen die aan de nauwkeurigheid van gespuitsgiete producten worden gesteld zijn de laatste jaren steeds hoger geworden. Het is belangrijk te weten hoe de nauwkeurigheid van het produkt wordt bepaald door procescondities en materiaaleigenschappen. Vandaar dat de aandacht bij simulaties van het spuitgietproces verschoven is van voorspelling van het verloop van het (vul-) proces naar voorspelling van produkteigenschappen die de maatnauwkeurigheid beïnvloeden. In dit artikel wordt een overzicht gegeven van die produkteigenschappen die met een geavanceerd simulatieprogramma kunnen worden voorspeld.

*Ir. L.W. Caspers, Ir. W.F. Zoetelief, Prof.Dr.Ir. H.E.H. Meijer,
Technische Universiteit Eindhoven*

Inleiding

Tot voor kort waren simulatieprogramma's voor het spuitgietproces uitsluitend geschikt voor het doen van voorspellingen over het procesverloop. Bovendien was de analyse beperkt tot de vulfase. Uitspraken konden worden gedaan over het ontstaan van vloeinaden, de plaats van luchtinsluitingen en onbalans in runnersystemen. Produktgeometrie, de positie van en het aantal aansluitingen en ontluchtingen konden worden geoptimaliseerd afhankelijk van het vulbeeld van de matrijs (zie het derde artikel in deze serie). Op deze manier kon de tijd van het proefdraaien van matrijzen sterk worden gereduceerd, en bleken aanpassingen veelal overbodig. Later werd ook

de navulfase bij de simulaties betrokken, en werd getracht de cyclustijd en het nadrukprofiel over de hele matrijs te voorspellen als functie van de procesparameters. Door de steeds hogere eisen die aan de precisie van gespuitsgiete produkten gesteld worden, wordt het belangrijk om naast het procesverloop ook produkteigenschappen te kunnen voorspellen. Hierbij moet men denken aan alle eigenschappen die van invloed zijn op maat- en vormnauwkeurigheid, en op de dimensiestabiliteit hiervan. In het geval van optische produkten speelt bovendien homogeniteit een belangrijke rol.

Restspanningen vertegenwoordigen de belangrijkste oorzaak die de maat- en vormnauwkeurigheid van produkten beïnvloedt. Ze worden naar hun ontstaansoorzaak onderverdeeld in twee categorieën: de thermisch geïnduceerde en de stromingsgeïnduceerde spanningen. Thermische span-

ningen zijn een gevolg van het inhomogeen afkoelen van het produkt, in combinatie met de druk die in het materiaal heerst. Aanwezige spanningen in gehard glas en gekoeld staalplaat hebben dezelfde oorzaak, zij het dat hier drukeffecten geen rol spelen. In principe vormen de spanningen een interne belasting van het materiaal, zodat, afhankelijk van gebruikstemperatuur en materiaal, kruipeffecten kunnen optreden. In gespuitsgiete produkten zijn thermische spanningen zo'n tien keer groter dan stromingsgeïnduceerde spanningen (die ook wel met de moleculaire oriëntatie kunnen worden geassocieerd). Deze laatste ontstaan doordat tijdens stroming van het materiaal (zowel tijdens de vulfase als tijdens de navulfase) de macromoleculaire ketens worden georiënteerd. Deze oriëntatie wordt gedeeltelijk ingevroren voordat deze kan relaxeren. Door het produkt weer voldoende te

verhitten kunnen deze spanningen relaxeren. Dat deze latente spanningen kunnen leiden tot ernstige vervormingen blijkt bijvoorbeeld bij verhitting van een plastic koffiebekertje. Uiteindelijk vervormt het bekertje niet terug naar een cirkelvormig, maar naar een ellipsvormig plaatje, omdat vóór het dieptrekken het plaatmateriaal was gewalst, en ook dit de macromoleculen heeft georiënteerd. De gebruikstemperatuur heeft dus via deze spanningen invloed op de maatstabiliteit van het produkt. Voor optische produkten is oriëntatie helemaal ongewenst, omdat dit de brekingsindex van het materiaal richtingsafhankelijk maakt. Ook andere eigenschappen als stijfheid en warmtegeleiding worden door oriëntatie richtingsafhankelijk. Deze effecten worden meestal verwaarloosd, omdat ze moeilijk meetbaar zijn.

Dichtheid is een tweede grootheid die de precisie van een produkt bepaalt. Hoewel de effecten in het algemeen gering zijn, blijken dichtheidsgradiënten en langzame verandering daarvan (fysische veroudering) voor hoge precisie wel van belang te zijn. De dichtheid is dus in het algemeen inhomogeen verdeeld, wat speciaal voor optische produkten nadelig is. De verdere verdichting van het materiaal in de tijd (streven naar evenwichtsdichtheid) beïnvloedt de maat- en vormstabiliteit. Semi-kristallijne materialen hebben een grotere dichtheid dan amorf materiaal en vertonen een extra invloed van de kristallisatiegraad, kristalgrootte en -structuur. Deze worden mede bepaald door de condities waaronder het materiaal is afgekoeld. Bovendien is de kristallisatiegraad niet stabiel in de tijd. Er is nog veel onderzoek nodig om de invloed van procescondities hierop te kwantificeren. Tenslotte is voor reagerende materialen de omzettinggraad en de reactiekrimp nog van invloed op de dichtheid.

Als een produkt wordt blootgesteld aan permanente externe belastingen, zal het materiaal in het algemeen kruip vertonen. Hierdoor vervormt het produkt en verliest mogelijk zijn vormfunctionaliteit. Hoewel het belang hiervan overduidelijk is, is men nog niet in staat gebleken een modellering van dit gedrag in een spuitgietsimulatieprogramma te implementeren. Dit geldt ook voor het verschijnsel van absorptie. Er zijn kunststoffen (zoals Nylon) die 10 procent van hun eigen volume aan water opnemen. Wat dit doet met vorm- en maatnauwkeurigheid is duidelijk. Deze materialen worden in

het algemeen dan ook niet toegepast als hoge precisie wordt vereist.

Modelvorming

De modelvorming van het spuitgietsproces is gebaseerd op de balansvergelijkingen en kennis over de begin- en randvoorwaarden. De vergelijkingen zijn echter alleen oplosbaar als er veronderstellingen worden gedaan over het gedrag van de te verwerken kunststof. Hierbij moet gedacht worden aan grootheden (van zowel de smelt als van de vaste fase) zoals viscositeit, dichtheid, warmtegeleiding, warmtecapaciteit en een spanningsrek relatie, zowel voor thermische spanningen als oriëntatie. Deze veronderstellingen worden beschreven in een aantal constitutieve vergelijkingen. Gegeven de sterk toegenomen kwaliteit van de proces-simulatie en computersoftware en -hardware, blijken onnauwkeurigheden in deze constitutieve relaties vaak beperkend voor de kwaliteit van de voorspellingen. Omdat uitsluitend dunwandige geometrieën worden beschouwd, kunnen een aantal termen in de totale set vergelijkingen worden vereenvoudigd of zelfs verwaarloosd. Dit leidt ertoe dat de druk alleen in het (twee-dimensionale) middenvlak van de geometrie wordt berekend, en dus constant over de dikte wordt verondersteld. Snelheden, spanningen en temperaturen variëren echter sterk over de dikte. Vandaar dat deze grootheden voor de volledige drie-dimensionale ruimte worden bepaald. Deze benadering wordt dan ook vaak de 2,5-D benadering genoemd. Uiteindelijk moeten er drie partiële differentiaalvergelijkingen worden opgelost, één voor de druk, één voor de temperatuur, en één voor de spanningen.

De coëfficiënten in deze vergelijkingen zijn helaas niet constant, maar worden bepaald door de boven aangehaalde constitutieve relaties. De warmtecapaciteit is bijvoorbeeld afhankelijk van de temperatuur. De dichtheid is afhankelijk van druk en temperatuur, de viscositeit van druk, temperatuur en afschuifsnelheid. De drie differentiaalvergelijkingen zijn dus gekoppeld. Als de vergelijking voor de spanningen wordt ontkoppeld levert dit slechts een geringe fout op in het resultaat, terwijl de rekentijd sterk wordt gereduceerd. Voor de berekening van temperatuur en druk wordt verondersteld dat de spanningstoestand in de vloeistof bepaald wordt door de afschuifsnelheid en de viscositeit. Deze laatste grootheid is zoals gesteld afhankelijk van druk, temperatuur en ook de af-

schuifsnelheid. (Dit heet gegeneraliseerd Newtons vloeigedrag.) Uit het berekende drukveld kan, gegeven de viscositeit, het snelheidsveld worden berekend. Druk, temperatuur en kinematica vormen de input voor de berekening van oriëntatie en thermische spanningen. Oriëntatie wordt berekend met een niet-lineair visco-elastisch model (compressibel Leonov model). Thermische spanningen kunnen worden berekend met een lineair visco-elastisch model (multi-mode Maxwell), of als alternatief met een zogenaamd visceus-elastisch model, waarbij wordt verondersteld dat de spanningstoestand in de vloeistof wordt bepaald door een gegeneraliseerd Newtons gedrag en in de vaste fase door lineair elastisch gedrag.

Omdat de stromingsgeïnduceerde spanningen een orde kleiner zijn dan de thermisch geïnduceerde spanningen worden de vervormingen voornamelijk op basis van de laatste soort spanningen bepaald.

Voor de formulering van rand- en beginvoorwaarden wordt verondersteld dat de smelt initieel homogeen is en uniform van temperatuur. De afkoeling aan de matrijswanden en lucht wordt beschreven met de meest algemene vorm: de Biot randvoorwaarden. Hierbij wordt een constante warmteoverdrachtcoëfficiënt verondersteld voor het warmtetransport van de kunststof naar de matrijs en een (andere) voor afkoeling aan de lucht. Tijdens de vulfase wordt aan de aansluiting een constante volumestroom voorgeschreven. Tijdens de navulfase wordt hier de druk bekend verondersteld en voorgeschreven als functie van de tijd. De druk aan het vloeifront is gelijk aan de omgevingsdruk. Tenslotte worden alle verplaatsingen en rotaties onderdrukt zolang het produkt zich in de matrijs bevindt, aangezien deze het gehele produkt omsluit. Na uitwerpen kan het produkt vervormen.

Implementatie-aspecten

Het hierboven beschreven model is geïmplementeerd in het programma Vlp, een programma voor de simulatie van vormgevingsprocessen van kunststoffen. Vlp is een afkorting van Polymer Product & Processing Properties Prediction Program. Het is ontwikkeld bij de Technische Universiteit Eindhoven en is gebaseerd op het eindige-elementenpakket SEPRAN [1]. De volgende processen kunnen worden gesimuleerd:

1. Spuitgieten van amorfe thermoplasten
2. Reactive Injection Moulding (RIM)

3. Two-shot moulding van amorfe thermoplasten
4. Resin Transfer Moulding (RTM)

Een groot aantal aspecten van het procesverloop kunnen worden voorspeld, alsmede een aantal belangrijke produkteigenschappen.

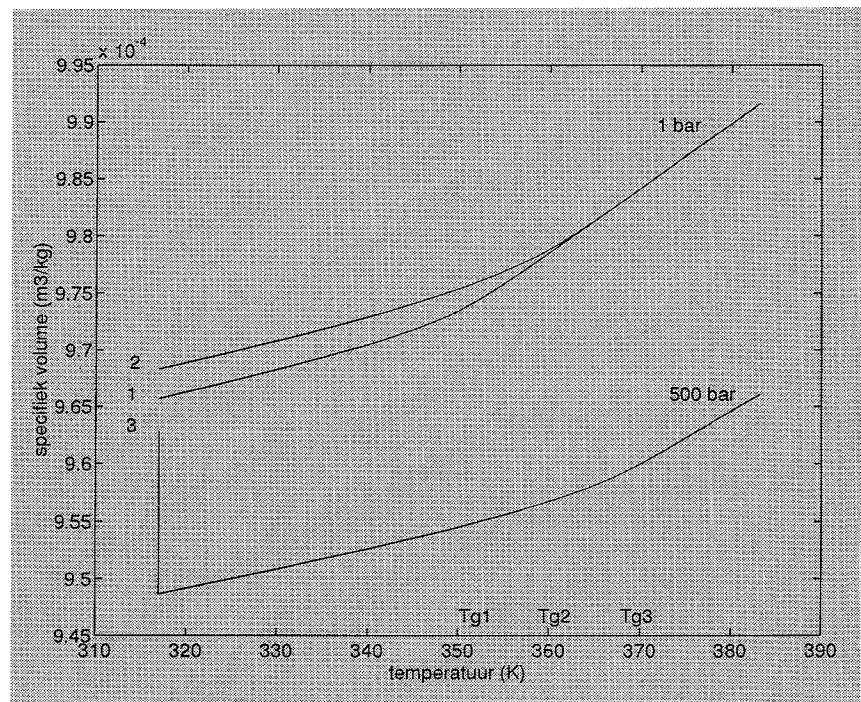
Omdat het probleem tijdsafhankelijk is, wordt het in een groot aantal discrete tijdstappen opgelost. Voor elke tijdstap worden de vergelijkingen voor druk en temperatuur opgelost. Met deze oplossing kunnen de materiaalparameters voor deze tijdstap worden berekend waarna opnieuw de coëfficiënten voor de druk- en temperatuurvergelijking kunnen worden bepaald. Vervolgens worden druk- temperatuurvergelijkingen een tweede keer opgelost. Dit proces wordt herhaald (geïtereerd), net zolang totdat de berekende druk en temperatuur niet meer veranderen en convergentie is bereikt. Vervolgens worden voor deze tijdstap de oriëntatie en thermische spanningen berekend op grond van de berekende druk, temperatuur en kinematica. Deze laatste volgt uit het berekende druk- en snelheidsveld.

In het middenvlak van de dunwandige geometrie is een mesh gedefinieerd van bikwadratische elementen. Tijdens de vulfase moet voor elke tijdstap de mesh worden aangepast door de voortgaande vulling van de matrijs. Dit gebeurt door lokale re-meshing aan het vloeifront. Voor berekening van de temperatuur, die ook over de dikte varieert, wordt in elk hoekpunt van een drukelement een één-dimensionale mesh gedefinieerd over de lokale dikte van het produkt. Ook spanningen en deformaties worden hiermee naar de plaats gediscrètiseerd. Voor de berekening van de vervormingen worden de in SEPRAN aanwezige schaalementen gebruikt, gemodificeerd voor gebruik van visco-elastische modellen.

Numerieke simulaties

Omdat het tweede artikel in deze serie speciaal is gewijd aan berekening van thermische spanningen in, en vervormingen van, gelaagde zogenaamde two-shot produkten, zal hier de nadruk worden gelegd op de resultaten van een voorbeeld hoe dichtheid de maatstabieliteit beïnvloedt. Hiervoor dient eerst nader ingegaan te worden op het zogenaamd pvT gedrag van, in dit geval, amorfe thermoplasten. In zo'n diagram staat het specifiek volume gegeven bij verschillende drukken en temperaturen.

Figuur 1 toont het pvT diagram voor

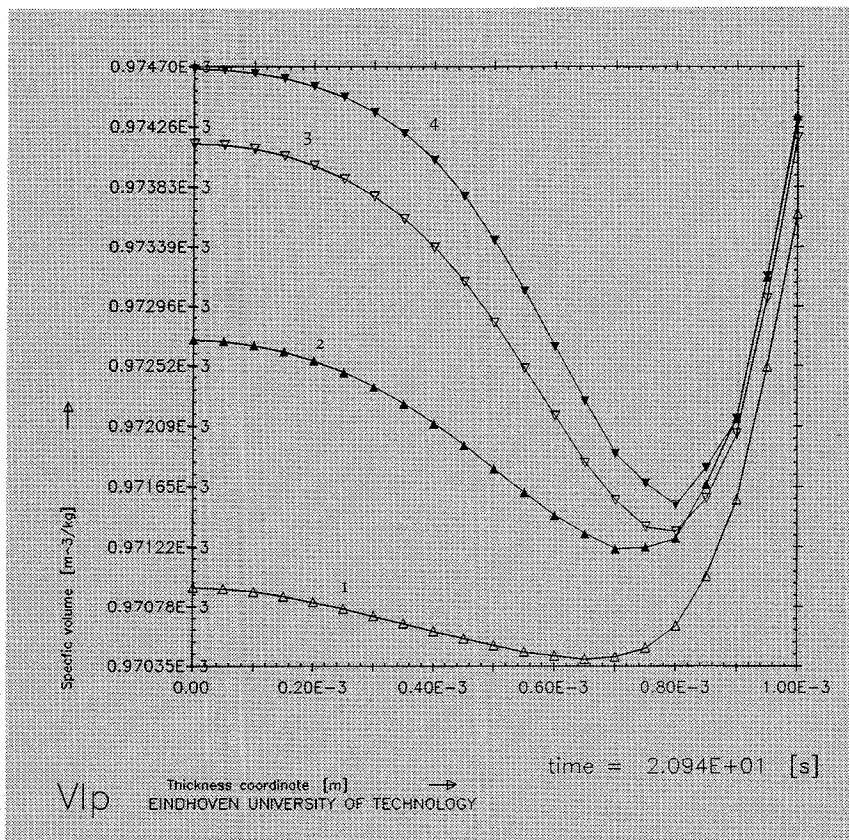


Figuur 1. pvT diagram voor polystyreen.

polystyreen. Het specifiek volume (omgekeerde van de dichtheid) staat uitgezet tegen de temperatuur. Curve 1 toont het gedrag als het vloeibare materiaal drukloos en langzaam wordt afgekoeld tot onder de glas-transitietemperatuur (circa 350 K), waarna het een vaste vorm aanneemt. De uitzettingscoëfficiënt blijkt voor de vaste fase anders dan voor de smelt. Curve 2 toont hetzelfde gedrag, maar nu bij een hoge afkoelsnelheid. Het specifiek volume blijkt bij kamertemperatuur en omgevingsdruk groter te zijn dan voor het geval waarbij de koelsnelheid laag was. Hieruit volgt dat niet de huidige temperatuur het specifiek volume bepaalt, maar de hele temperatuurhistorie bepalend is voor deze grootte. Ook zien we dat de glas-transitietemperatuur is toegenomen. Curve drie toont het gedrag van het specifiek volume als het materiaal onder hoge druk wordt afgekoeld, gevolgd door verwijderen van de druk. Het materiaal blijkt een kleiner specifiek volume te hebben zowel boven als onder de glastransitietemperatuur, ook nadat de druk is weggenomen. Het specifiek volume van een kunststof wordt dus bepaald door de gehele druk- en temperatuurhistorie. Als bovendien voor alle drie de curves het specifiek volume verder wordt gevolgd in de tijd (fysische veroudering), vinden we een verloop dat voor alle drie de curves verschilt. Hieruit blijkt dat de tijd (ofwel de 'leeftijd' van het materiaal) ook van invloed is op het specifiek volume.

Een model voor het specifiek volume

dat dit gedrag kan beschrijven is het zogenaamde KAHR model [2]. Dit model is geïmplementeerd in Vlp. Figuur 2 toont de verdeling van het specifiek volume voor een rechthoekige strip. Langs de horizontale as staat de dikte-coördinaat uitgezet, vanaf het midden tot het oppervlak van het produkt. (Er is dus symmetrie ten opzichte van het middenvlak.) Curve 1 geeft de verdeling voor een positie bij de (lijn)aanspuiting, curve 4 die voor een positie aan het einde van de vloeiweg. De overige curves komen overeen met tussenliggende posities. Met behulp van het hierboven beschreven pvT gedrag kunnen we het verloop van de curves verklaren. Aan de wand vallen de curves nagenoeg samen. Ze hebben dan ook ongeveer dezelfde afkoelsnelheid (zeer snel) en drukhistorie (compressie en decompressie in vaste fase) achter de rug. Naar binnen toe neem het specifiek volume af. Dit komt doordat het materiaal hier onder hogere (na-)druk is afgekoeld. Bovendien is het afkoelen langzamer gegaan. Verder naar binnen toe blijft curve 1 nagenoeg constant, terwijl de overige curves weer stijgen. Dit is het effect van de nadruk die afvalt over de vloeiweg. Het materiaal aan de aanspuiting heeft lang onder hoge (na-)druk gestaan, terwijl aan het einde de nadruk lager was en ook korter duurde. Voor curve 4 blijkt het specifiek volume in het midden hoger te zijn dan aan de wand. Dit komt waarschijnlijk doordat het materiaal aan de wand onder druk is gezet in de vaste fase, en in het midden toen het nog vloeibaar was. De druk heeft hier



Figuur 2. Berekende verdeling van het specifiek volume voor vier posities in de matrix.

dus geen invloed gehad op het uiteindelijke specifiek volume. Overigens is een dergelijk verloop voor specifiek volume ook gemeten [3] en de overeenkomst met de hier berekende profielen is goed. Als deze dichtheidsverdeling verder wordt gevolgd in de tijd, (fysische veroudering) dan blijken drukeffecten eerder te verdwijnen dan temperatureffecten. Uiteindelijk zal, volgens het model, een verdeling ontstaan die voor alle vier

de curves gelijk is en een verloop heeft dat lijkt op een dal-parabool: een verdeling die veroorzaakt is door het verschil in afkoelsnelheid aan de wand en in het midden. Een dergelijk parabolisch verloop is nog niet experimenteel vastgesteld.

Conclusies

Thermisch geïnduceerde en stromingsgeïnduceerde spanningen, dichtheid(sverschillen en -verande-

ringen), kruip en vochtabsorptie beïnvloeden de nauwkeurigheid van gespuitsgiete producten, maar dit zijn moeilijk te begrijpen fenomenen. Met behulp van numerieke simulatie van het spuitgietproces kunnen geen absolute uitspraken gedaan worden over de nauwkeurigheid van een product bij gegeven procescondities en materiaaleigenschappen. Zoals in dit artikel voor de dichtheid is aangetoond, kan met simulaties wel de invloed van proces- en materiaalparameters worden geschat en, belangrijker nog, beter worden begrepen.

Literatuur

- [1] 'SEPRAN introduction', Ingenieursbureau SEPRAN Leidschendam, The Netherlands, 1993.
- [2] 'The volumetric response of polymeric glasses to complex thermo-mechanical histories: a critical evaluation of the KAHR model', J. Greener, J.M. O'Reilly and K.C. Ng in 'Structure, relaxation, and physical aging of glassy polymers', ed.: R.J. Roe, J.M. O'Reilly, Pittsburgh Pennsylvania, USA, 1991.
- [3] 'Orientation, Stress and Density Distributions in Injection-Moulded Amorphous Polymers Determined by Optical Techniques', Reinhold Wimberger-Friedl, PhD-thesis Eindhoven University of Technology, The Netherlands, 1991.

CPC, Technische Universiteit Eindhoven, Faculteit Werktuigbouwkunde, WH. 0.143, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven. Telefoon: 040 472 811