

Een vormgevingstechniek met perspectief

Powder Injection Moulding

C. Kooij, N. Noort, H.L. Schram en A.S. Verdier.

In dit artikel worden de mogelijkheden geschetst van de vormgevingstechniek Powder Injection Moulding (PIM). De verschillende processtapen komen aan de orde en een vergelijking met andere vormgevingstechnieken wordt gemaakt. Verder wordt het spuitgieten van verschillende materialen behandeld. Tenslotte laat een praktijkvoorbeeld zien dat met succes de standtijd van een textielmachineonderdeel is verbeterd en de stukprijs is verlaagd door productie op basis van PIM.

Een veel gebruikte techniek voor de massaproductie van complex gevormde producten is spuitgieten.

Spuitgieten is een vormgevingstechniek waarbij een plastische massa of een vloeistof onder druk in een produktholte wordt gespoten en vervolgens stolt. Vooral dunwandige producten in kunststof, zink of aluminium worden door middel van spuitgieten geproduceerd.

Powder Injection Moulding (PIM) maakt het mogelijk dergelijke producten in staal, keramiek of hardmetaal te produceren.

Het PIM-proces komt in grote lijnen neer op het mengen van poeder met kunststof, het spuitgieten van dit mengsel tot een produkt, het verwijderen van de kunststof en tenslotte het sinteren van de poederdeeltjes. In het PIM-proces wordt gebruik gemaakt van gangbare produktiemiddelen zoals spuitgiemachines voor kunststof en sinterovens. PIM levert nauwe toleranties en is dus zeer geschikt voor de kosteneffectieve productie van technische producten.

PIM

In veel aspecten is PIM vergelijkbaar met het spuitgieten van kunststof. PIM is immers het spuitgieten van kunststof

Materiaal	Treksterkte (MPa = N/mm ²)	Rekgrens (%)	Hardheid (HRB / HRC)
Fe2Ni	360-1400	35-5	37 HRB - 44 HRC
AISI 316	510	45	42 HRB
17-4PH	1000	9	40 HRC

Tabel 1 Mechanische eigenschappen van drie soorten PIM-staal

met een hoge poederlading (ongeveer 50 volumeprocenten poederdeeltjes). In het produktontwerp spelen wanddikte, lossingshoek, deellijn en aansluitpunt een belangrijke rol. Deze parameters kunnen overigens aanzienlijk verschillen ten opzichte van de conventionele kunststofspuitgiettechnologie. Tevens zijn overgangen in vorm en dikte in het produkt kritisch. Verder is, rekening houdend met shotvolume en sluitkracht van de spuitgiemachine, het aantal produktholten van belang in verband met de stukprijs van het produkt en de matrijskosten.

Technische en economische overwegingen leiden tot de volgende globale omschrijving van een PIM-produkt:

- gewicht tot circa 50 gram,
- complexe vorm (3D),
- van staal, keramiek of hardmetaal,
- nauwe toleranties (max $\pm 0,025$ mm),
- goede oppervlakteruwheden (N5-N7),
- dunwandige secties ($\geq 0,7$ mm),
- materiaaldikte < 10 mm,
- seriegrootte vanaf 2000 stuks.

Het PIM-proces maakt gebruik van zeer fijne poeders, waarbij de deeltjes kleiner zijn dan $20 \mu\text{m}$. De gebruikte poeders zijn aanzienlijk fijner dan de poeders die bij de conventionele poedermetallurgie worden toegepast. Hierbij worden poeders met deeltjes tot $200 \mu\text{m}$ gebruikt.

PIM-poeders zijn relatief duur, de kosten zijn circa f 15,- tot f 75,- per kg. De hoge poederkosten betekenen veelal een beperking in het gewicht van een PIM-produkt (ongeveer 50 gram).

PIM-producten hebben een dichtheid van 96-99%, de porositeit is lijn en

uniform verdeeld, zodat de materiaaleigenschappen van PIM-materiaal nauwelijks onderdoen voor de eigenschappen van stamateriaal. De eigenschappen van enige PIM-materialen zijn weergegeven in tabel 1.

Alle voor stamateriaal gangbare nabewerkingsstappen, zoals draaien, boren, frezen, honen en slijpen, kunnen ook op PIM-materiaal worden uitgevoerd. Omdat PIM-staal weinig koolstof bevat kan de sterkte en de hardheid alleen worden verbeterd door cementeren of nitreren. Een oppervlaktebehandeling zoals verchromen of vernikkelen is zondermeer mogelijk.

PIM onderscheidt zich van andere vormgevingstechnologieën door de efficiëntie waarmee geometrisch complexe onderdelen gemaakt kunnen worden.

Bij complex gevormde producten moet men denken aan producten met hexagonale gaten, ondersnijdingen, blinde gaten, verstijvingsribben, golvende oppervlakken, uitstulpingen, opstaande randen, schroefdraad en produktcodering.

De vorm- en plaatstoleranties die met PIM bereikt kunnen worden zijn sterk afhankelijk van de geometrie van het produkt; voor de plaatstoleranties geldt als gemiddelde waarde $\pm 0,3\%$ per nominale dimensie. Op basis van deze toleranties en de goede oppervlakte-eigenschappen kunnen producten worden gemaakt die bijna aan de maat zijn. PIM is vooral concurrerend voor grote series (>250.000 stuks/jaar). Voor kleine series spelen de matrijskosten een belangrijke rol met betrekking tot de produktprijs. Toch kan PIM al interessant zijn voor series vanaf 2000 stuks

als gewerkt wordt met een gedeelde matrijs, waarvan slechts onderdelen worden verwisseld bij de aanmaak van nieuwe produkten. Het betreft dan over het algemeen produkten van dure exotische materialen, die moeilijk op een andere manier vorm te geven of moeilijk te bewerken zijn, zoals hardmetaal, keramiek en speciale staalsoorten.

Procesbeschrijving

Het PIM proces maakt gebruik van fijne poeders (deeltjes tot $20\text{ }\mu\text{m}$). De deeltjes zijn sferisch of onregelmatig

van vorm, afhankelijk van de productietechniek waarmee de poeders zijn gemaakt. Voor het spuitgieten gaat de voorkeur uit naar relatief grote sferische deeltjes, terwijl voor de sinterstap onregelmatige, kleine deeltjes tot een beduidend hogere dichtheid en een betere vormvastheid leiden. Een compromis van beide geeft over het algemeen de beste resultaten.

Het bindersysteem dat wordt gebruikt voor het maken van de feedstock heeft een aantal functies. De binder moet zorgen voor een vullende en glijdende werking tijdens het spuitgieten zonder dat ontmenging en degradatie optre-

den. Verder moet het bindersysteem zorgdragen voor voldoende sterkte na spuitgieten ("groene sterkte"), makkelijk te verwijderen en bij voorkeur niet duur zijn. Het volume aandeel van het bindersysteem in de feedstock is 40-50%.

Het PIM-proces bestaat uit de volgende stappen:

- mengen van het poeder met een bindersysteem,
- granuleren van de feedstock,
- spuitgieten tot een produkt,
- verwijderen van het bindersysteem (debinden),
- sinteren.

Mengen

Bij het mengen is het van belang dat voor het verkrijgen van een homogene feedstock, agglomeraten van het poeder worden gebroken. Men gebruikt hierbij meestal batchtype mixers met Z- of sigma-bladen, enkel- of dubbel-schroefextruders.

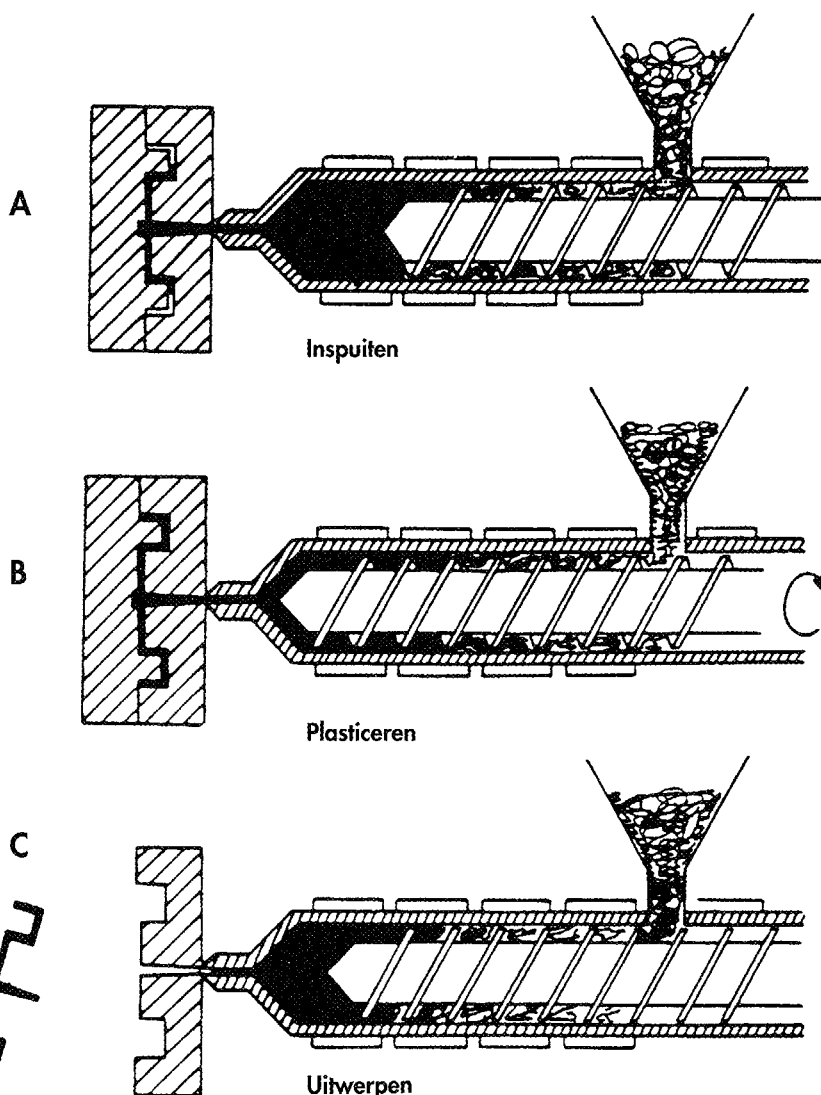
Granuleren

De feedstock wordt vervolgens bij kamertemperatuur gegranuleerd tot korrels van enkele millimeters, die geschikt zijn voor spuitgieten.

Spuitgieten

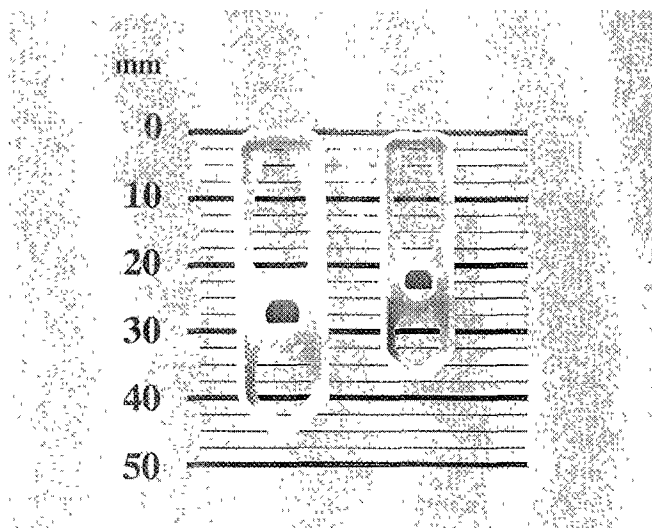
Het granulaat wordt via een hopper in de spuitgietmachine gebracht, zie figuur 1, waar het in een cilinder komt die door elektrische verwarmingselementen op een constante temperatuur wordt gehouden. Het bindersysteem in de feedstock smelt zodat een vloeibare massa ontstaat. Via een transport-extrusieschroef in de cilinder wordt de gesmolten feedstock verder gehomogeniseerd en getransporteerd. Aan het eind van de cilinder wordt het vloeibare materiaal in een gekoelde matrijs gespoten doordat deze schroef tevens als plunger dienst doet. Na het stollen wordt het produkt via (uitstoot)pennen uit de matrijs gestoten. Voor het spuitgieten kan een conventionele spuitgietmachine voor kunststof worden gebruikt. De feedstock kan onbeperkt worden hergebruikt: afgekeurde (groene) produkten en aanspuitkanalen kunnen na granuleren weer worden gebruikt.

Figuur 1 Een overzicht van het spuitgietproces



Powder Injection Moulding

Figuur 2 De krimp tijdens sinteren



Verwijderen van bindersysteem

Na de spuitgietstap wordt het bindersysteem verwijderd. Afhankelijk van het bindersysteem gebeurt dit thermisch, katalytisch of door middel van een oplosmiddel (solvent debinden). Bij thermisch debinden wordt het bindersysteem verwijderd door pyrolyse en verbranding van de polymeren bij verhoogde temperatuur (tussen 160 °C en 400 °C). Dit proces moet langzaam en beheerst plaatsvinden omdat anders oppervlaktefouten zoals scheuren en bla-

zen optreden. De degradatie van de binder kan worden versneld door een zuur als katalysator te gebruiken. Het katalytisch debinden gebeurt veelal bij een temperatuur tussen de 110 °C en 140 °C. Katalytisch afbreekbare binders zijn duurder en het proces behoeft een speciale uitstookoven met naverbrander.

Bindersystemen kunnen ook uit een product worden verwijderd met behulp van oplosmiddelen (solvent debinden). Vaak worden hiervoor toxische, licht ontvlambare vloeistoffen gebruikt zoals heptaan

en ethanol. Deze stoffen vragen additio-nale werkvoorschriften en extra controle op de arbeidsomstandigheden. Voor de regeneratie van de oplosmiddelen zijn extra voorzieningen noodzakelijk.

Het Keramisch Research Centrum van Hoogovens heeft een bindersysteem ontwikkeld dat gedeeltelijk in water oplosbaar is. Hierdoor is de debindstap sterk vereenvoudigd. De in water oplosbare componenten lossen in enkele uren voor meer dan 90% op, zodat een product met een zeer poreuze structuur ontstaat. Deze componenten zijn volledig biologisch afbreekbaar en leveren derhalve geen milieuproblemen op. De niet oplosbare componenten kunnen vervolgens door de (ontstane) poreuze structuur snel worden uitgestookt en zorgen voor een sterke binding van het groene product, waardoor een breed scala van producten kan worden geproduceerd. Het bindersysteem is goedkoop en er blijven geen asresten in het eindproduct achter.

Sinteren

De laatste stap in het proces is het sinteren van het product. Deze stap gebeurt bij metalen in een waterstof atmosfeer en bij oxydische keramiek onder lucht. Tijdens dit proces sinteren de poederdeeltjes aan elkaar en krimpt het product tot zijn eindmaten. De dichtheid van een product na sinteren ligt tussen 96 en 99%. Vanwege het aanvankelijk hoge volume aandeel binder in het product is de lineaire krimp van het product tijdens sinteren aanzienlijk, ongeveer 18-21% (afhankelijk van de poederlading) zoals in figuur 2 is te zien. Ondanks deze grote krimp is het mogelijk om producten reproduceerbaar te maken

Materiaal	Dichtheid (g/cm ³)	Treksterkte (MPa = N/mm ²)	Rekgrens (%)	Hardheid relatief
Polypropreen	0,9	30-70	150-700	-/±
Polycarbonaat	1,2	65	80-150	±
Aluminium	2,7	240	2	±
Zink	6,7	290	6	±
Staal	7,8	400-1000	4-35	+++
Aluminiumoxyde	3,8	300-400 *	-	+++++

* Deze waarde is een buigsterkte

Tabel 2 De eigenschappen van verschillende materialen

	Aluminium	Zink	Staal	Keramiek
Spuitgieten (shots/min)	0,5 - 3	0,5 - 3	1 - 2	1 - 2
Levensduur matrijs (shots)	100.000	>500.000	150.000	100.000
Grondstofprijs (f/kg)	2 - 3	2 - 3	16 - 65	15 - 70
Grondstofprijs (f/l)	5 - 8	13 - 20	125 - 500	60 - 450

Tabel 3 Grondstofprijzen en spuitgietbijzonderheden

Spuitgieten van materialen

Spuitgieten is een produktietechniek voor vooral complex gevormde dunwandige producten in kunststof, zink of aluminium. Recentelijk kunnen via PIM producten in staal, keramiek of hardmetaal worden gemaakt. Een overzicht van een aantal eigenschappen, de grondstofprijzen en de spuitgietbijzonderheden van de verschillende materialen is in de tabellen 2 en 3 weergegeven. De getallen in de tabellen zijn gemiddelde waarden.

	Aluminium	Zink	Staal	Keramiek
Toleranties (%)	±0,3	±0,2	±0,3	±0,3
Wanddikte (mm)	1 - 4	0,6 - 3	0,8 - 10	0,8 - 10
Gewicht, max. (kg)	20	10	0,05	0,05

Tabel 4 De toleranties en afmetingen van spuitgietsproducten

Fysische eigenschap	PIM Fe2Ni	Gieten 1.0416	Sinteren Fe2,5Ni	Sinteren* Fe2,5Ni
Dichtheid (%)	96	100	80	93
Treksterkte (MPa = N/mm ²)	360	380	180	330
Rekgrans (%)	35	25	8	24
Hardheid (HRB)	55	70	40	100

* Deze producten zijn nageperst en nogmaals gesinterd

Tabel 5 De vergelijking van de materiaaleigenschappen per vormgevingstechniek

Vanuit de optiek van het spuitgieten is kunststof (al dan niet gevuld) verreweg de goedkoopste optie – kunststofspuitgieten: 2-6 shots/min, kostprijs van de meeste kunststoffen tussen f 1,- en f 10,-/kg. Aluminium en zink zijn goede alternatieven indien hogere eisen aan sterkte en stijfheid worden gesteld. PIM wordt prijstechnisch pas interessant als kunststof, aluminium en zink qua stijfheid, sterkte, slijtvastheid of hittevastheid te kort schieten. PIM-staal – zeker de geharde kwaliteit – is bestand tegen zeer hoge trek- en buigbelastingen, keramiek is aanzienlijk brosser dan PIM-staal maar zeer geschikt voor slijtvaste, hitte- en corrosievaste toepassingen. Tabellen 3 en 4 laten zien dat de prijs van PIM-poeders het toepassingsgebied beperkt tot de kleinere producten.

Voor zink- en aluminiumproducten gaat dit niet op vanwege de veel lagere kostprijs van beide materialen. De toleranties van aluminium-, zink-, staal- en keramiekspuitgietswerk blijken weinig van elkaar te verschillen.

Concurrentiepositie PIM

Vormgevingstechnieken voor metaal

Metaal wordt op vele manieren vormgegeven. Verspanen, vervormen, gieten en sinteren zijn technologieën om producten te vormen. De keuze van de

vormgevingstechnologieën voor een bepaald product is afhankelijk van onder andere afmetingen, vorm, toleranties, materiaal, seriegrootte en prijs. Ook de microstructuur en de oppervlaktestructuur kunnen een rol in deze keuze spelen.

Voor de serieproductie van complex gevormde producten in staal, in een toler-

antiebereik van 0,3%-0,5%, zijn grofweg drie technologieën beschikbaar: (verloren)wasmodelgieten, sinteren en PIM.

De eigenschappen van de materialen die zijn vervaardigd met de verschillende vormgevingstechnologieën zijn weergegeven in tabel 5. De eigenschappen ontlopen elkaar niet veel als we bij sinteren de waarden in de laatste kolom beschouwen die worden verkregen als het product wordt nageperst en nogmaals wordt gesinterd.

In tabel 6 zijn voor de verschillende produktietechnieken de toleranties en produktafmetingen gegeven. PIM geeft van de drie technologieën de nauwste toleranties zodat producten kunnen worden gemaakt die aan de maat of meestal bijna aan de maat zijn.

Verder wordt met behulp van PIM de laagste oppervlakteruwheid bereikt en kunnen relatief dunwandige producten geproduceerd worden. Een ander voordeel van PIM (en sinteren) boven gieten is dat vanuit de vaste fase van het poederlegingen kunnen worden gemaakt die vanuit een smelt niet te maken zijn.

De conventionele sintertechniek maakt gebruik van een droogpersen of isostatische persen gevolgd door een sinterstap.

	PIM	Gieten	Sinteren
Toleranties (%)	±0,3	±0,5	±0,4
Oppervlakteruwheid R_a (μm)	0,4 - 1,6	1,6 - 6,3	>0,7
Wanddikte (mm)			
min.	0,8	2	1
max.	10	-	-
Gewicht (g)			
min.	0,1	1	0,1
max.	50	10.000	2.000
Lengte max. (mm)	100	450	250

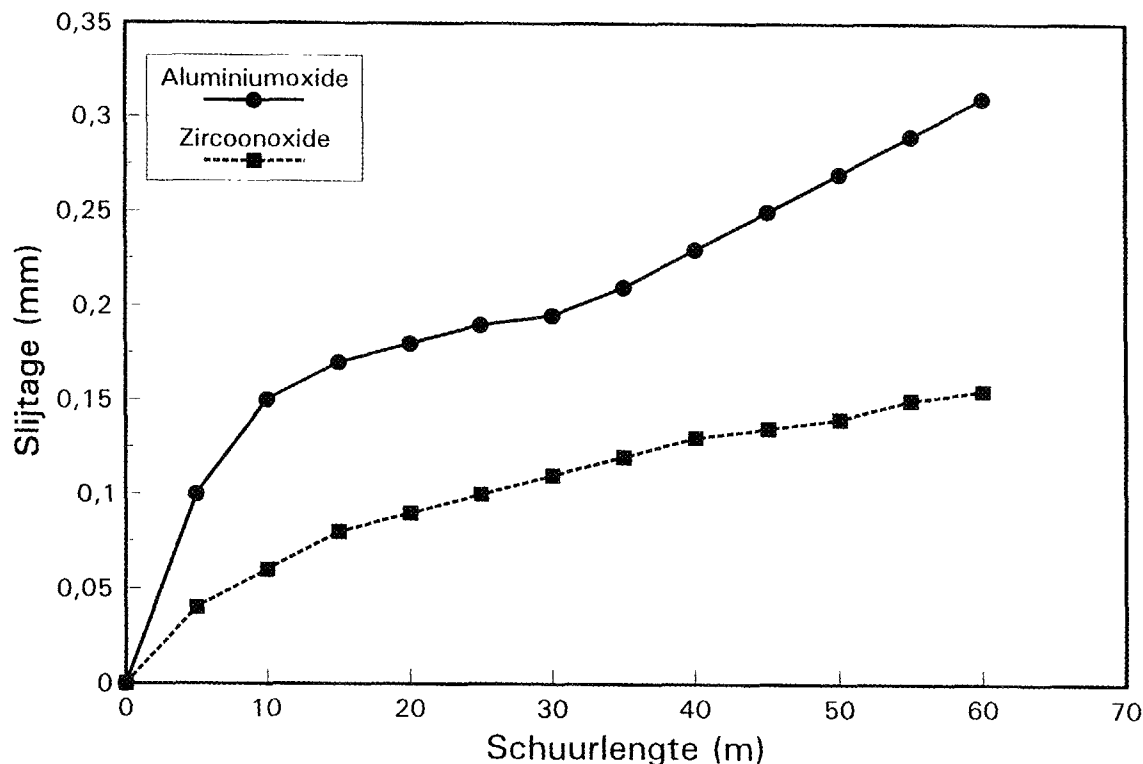
Tabel 6 Vergelijking van toleranties en afmetingen per vormgevingstechniek

	PIM	Gieten	Sinteren
Procestijd vormgevingsstap (s)	30 - 60 (*)	30 - 60 (*)	6 - 15 (#)
Levensduur matrijs (aantal shots)	150.000	>500.000	30.000 - 200.000
Poederkosten (f/kg)	16 - 60	0,4 - 4	2 - 7

* Het aantal producten per minuut is afhankelijk van het aantal produktholten in een matrijs # Exclusief napersen

Tabel 7 De vergelijking van de procestijd en de grondstofkosten van de verschillende vormgevingstechnieken

Powder Injection Moulding



Figuur 3 De resultaten van de slijtproef voor aluminiumoxyde en zirconoxyde

Bij droogpersen wordt uitgegaan van poeder eventueel vermengd met bind- en glijmiddelen. Het poeder wordt door middel van een stempel in een gehard-stalen matrijs tot een produkt geperst. De vormgeving is overwegend twee-dimensionaal; het reliëf in de persrichting is beperkt in verband met de homogeniteit van het produkt. Meer complex gevormde produkten of produkten met een groot volume kunnen worden geproduceerd door middel van isostatisch persen waarbij het poeder in een flexibele mal in een vloeistof onder druk wordt verdicht tot een produkt. De sintertechniek is van de drie de snelste techniek maar beperkt zich tot produkten met een wat eenvoudiger geometrie.

PIM-produkten zijn complexer van vorm, echter beperkt in afmetingen en gewicht voornamelijk vanwege de grondstofprijs zoals tabel 7 laat zien.

Vormgevingstechnieken voor keramiek

De concurrentiepositie van PIM voor keramische produkten ten op zichte van andere vormgevingstechnologieën verschilt van die van metaal. Voor het vormgeven van keramische produkten zijn technieken beschikbaar zoals mechanisch bewerken, slibgieten, plasti-

sche vormgeving en sinteren.

Mechanisch bewerken (of nabewerken) levert produkten met zeer nauwe toleranties op. Voor keramiek is deze techniek echter duur vanwege de hoge hardheid van deze materialen.

Slibgieten gaat uit van een keramisch poeder in een vloeistof (een slurry), die in een poreuze mal wordt gegoten of gepompt. Door filtratie zet het te vormen produkt zich af tegen de wand van de gietvorm. Op deze wijze kunnen ondermeer holle produkten worden gemaakt zonder dat een kern in de vorm aanwezig is. Slibgieten is uitermate geschikt voor relatief grote holle produkten zonder nauwe toleranties (zoals sanitaire toepassingen en serviesgoed).

Vormgeving van produkten is ook mogelijk door aan poeder organische stoffen toe te voegen zodat een plastische massa ontstaat die gemakkelijk in de gewenste vorm kan worden gebracht door bijvoorbeeld extrusiepersen en PIM. Bij extrusiepersen wordt deze plastische massa onder druk uit een mondstuk gespoten. Hierdoor kunnen op eenvoudige wijze grote hoeveelheden staaf of buis worden geproduceerd. Het groene extrusieprodukt kan verder machinaal worden bewerkt tot een pro-

dukt.

De sintertechniek maakt gebruik van een droogpers of een isostatische persstap gevolgd door een sinterstap. De produkten met een eenvoudige geometrie zullen via sinteren gemaakt worden en de complexere produkten via PIM. Indien mechanische eigenschappen, oppervlakte-ruwheid of toleranties van belang zijn, kan ook voor eenvoudige geometrieën voor PIM worden gekozen. PIM behaalt ook bij keramiek betere materiaaleigenschappen dan de conventionele sintertechniek.

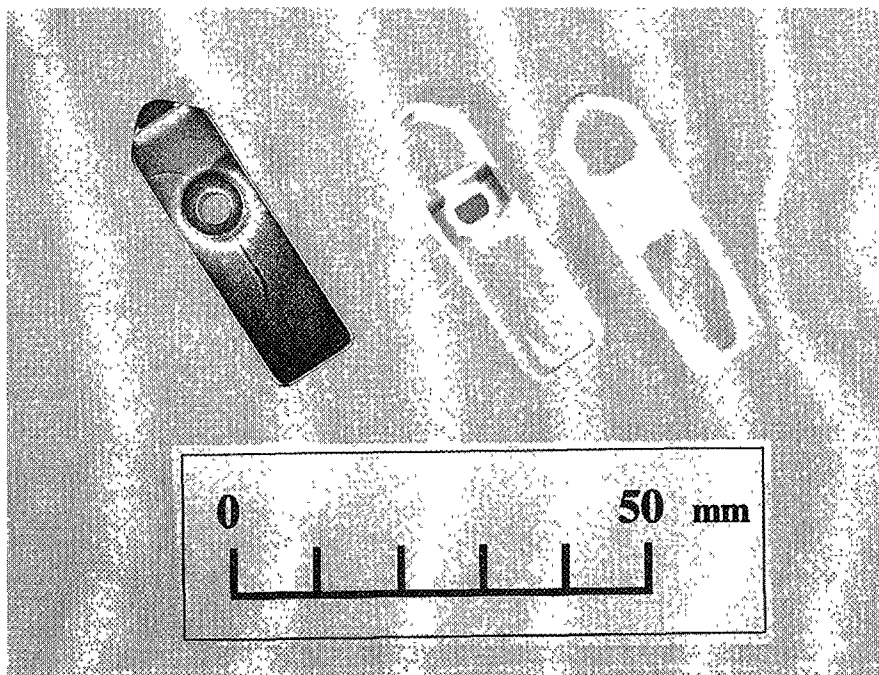
Praktijkvoorbeeld

Keramische PIM-produkten zijn vooral interessant voor die branches waarin slijtvaste en corrosievaste onderdelen met nauwe toleranties veelvuldig worden toegepast, zoals bijvoorbeeld in de apparatenbouw. Keramiek kan de standtijd van produkten verbeteren terwijl spuitgieten een kosteneffectieve manier is om grote aantallen produkten te produceren. Het navolgende voorbeeld beschrijft de ontwikkeling van een PIM-onderdeel voor een textielmachine.

Te Strake BV uit Deurne levert aan weefmachinefabrieken en weverijen over de gehele wereld geavanceerde produkten voor onder andere inslag-systemen. Het bedrijf heeft op dit gebied een leidinggevende rol opgebouwd.

Een onderdeel van luchtweef- of waterweefmachines is de garenavorbereider. In dit gedeelte van de machine komt de draad binnen en wordt, voorafgaande aan het eigenlijke gebruik, op ingenieuze wijze gewikkeld. Een onderdeel van de garenavorbereider is de zogenaamde opzetschoen. Dit onderdeel verzorgt het transport van het garen in de garenavorbereider. Omdat de opzetschoen blootstaat aan grote versnellingen is de massa van dit onderdeel van groot belang. Bovendien moet door de abrasieve werking van garen dit onderdeel zo slijtvast mogelijk zijn. Ook aan het oppervlak van de opzetschoen worden eisen gesteld. Een te ruw oppervlak zal het garen beschadigen terwijl bij een te glad oppervlak de transportfunctie van de opzetschoen niet naar behoren wordt uitgevoerd. Deze overwegingen hebben geleid tot een opzetschoen die is uitgevoerd als een precisie-gietonderdeel van aluminium. Dit onderdeel ondergaat een polijstbehandeling en vervolgens wordt het onderdeel hardverchromd en tenslotte volgen nog enige polijstbehandelingen om een geschikte oppervlaktegesteldheid te verkrijgen. Dit produkt is in de praktijk getest. Bij gebruik van bepaalde type garens is toch slijtage van de opzetschoen opgetreden. Uiteindelijk leidt deze slijtage tot beschadiging van de garens.

Te Strake zocht een alternatief in de toepassing van nieuwe materialen en op dat moment is de samenwerking met het Keramisch Research Centrum van Hoogovens Groep BV ontstaan. Het Centrum heeft zowel kennis op het gebied van materialen als op het gebied van vormgevingstechnologieën. Keramiek als materiaal voor de opzetschoen leek met het oog op de voornaamste produkteisen namelijk licht in gewicht en slijtvast een goede keuze. De vorm van de opzetschoen en de seriegrootte maakten productie door middel van PIM voor de hand liggend. Doordat reeds PIM-ervaring was opgebouwd met de materialen aluminiumoxyde en



Figuur 4 Het oorspronkelijke produkt (links) en het zirconia-(CIM) produkt

zircoonoxyde zijn slijtproeven op proefplaatjes van deze materialen uitgevoerd. In een proefopstelling is een lange band siliciumcarbide schuurpapier met een zekere kracht over de proefplaatjes heen getrokken. Het resultaat van de slijtproef is weergegeven in figuur 3. Deze figuur laat zien dat zircoonoxyde het beste bestand is tegen dit type belasting. Bovendien bleek de oppervlaktegesteldheid van zircoonoxyde aan de gestelde eisen te voldoen. De dichtheid echter van dit materiaal maakte het aanbrengen van massabesparende gaten in het conventionele ontwerp noodzakelijk. Bovendien moest het produkt voor spuitgieten geschikt worden gemaakt. Het uiteindelijke spuitgietprodukt tezamen met het oorspronkelijke produkt zijn weergegeven in figuur 4.

De zirconiaopzetschoen is in de praktijk getest en blijkt zeer goed te voldoen.

Inmiddels is het produkt in productie genomen. Het succes van deze toepassing is mede bepaald door een heel ander aspect: de prijs!

Het oorspronkelijke produkt in aluminium was relatief duur vanwege de na-

bewerkingen die het moest ondergaan zoals hardverchromen en polijsten. Het keramische produkt voldoet zonder nabewerkingen aan alle gestelde eisen en is zodoende met PIM aanzienlijk goedkoper te produceren, dus niet alleen de standtijd van de opzetschoen is belangrijk verbeterd maar ook de kosten van het produkt zijn drastisch verlaagd.

Literatuur

- [1] German R M, Powder Injection Molding, Metal Powder Industries Association, Princeton, 1990
- [2] Materiaalkeuze in de Werktuigbouwkunde, Stam Technische boeken BV, Culemborg, 1978
- [3] Metalelektro Profiel, Vereniging FMF, 14(1994)7, pp 26-27

Noot

De auteurs zijn werkzaam op het Keramisch Research Centrum van Hoogovens. Zij houden zich bezig met de technische en commerciële ontwikkeling van Powder Injection Moulding.