

Microstraal bewerken als precisie vormgevingstechnologie

Bestaande technieken voor de vervaardiging van microsysteemtechnische componenten blijken in onvoldoende mate toepasbaar om het toenemende spectrum aan gewenste geometrieën en materialen te kunnen vormgeven. De behoefte aan geschiktere technieken neemt daardoor toe. Een grote potentie lijkt aanwezig voor een incrementeel vormgevingsproces in combinatie met een niet-productgebonden gereedschapsconcept. Aan de Technische Universiteit Delft is een verkennend onderzoek afgerond naar één van de mogelijkheden hiervoor: het microstraalomvormen.

• *ir. E. Schippers, dr.ir. A.M. Hoogstrate, dr.ir. R. Delhez (Technische Universiteit Delft)* •

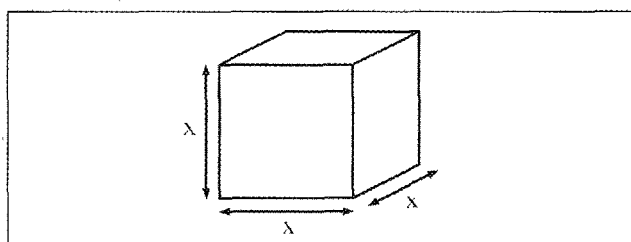
Mechatronische en microsysteemtechnische producten spelen een steeds grotere rol in het dagelijks leven, waarbij de consumentenelektronica en medische technologie belangrijke toepassingsgebieden vormen. Hieruit volgt onvermijdelijk een marktverraag naar efficiëntere en betrouwbare productieprocessen voor deze producten.

Gelet op de toenemende functiedichtheid en de afnemende karakteristieke afmetingen van deze producten stuiten de bestaande, op silicium-technologie gebaseerde vervaardigingstechnieken, zoals ets- en depositietechnologieën, op technologische grenzen. Daarbij speelt enerzijds de productiviteit van de vervaardigingstechniek een rol, maar anderzijds ook de bereikbare geometrie en het spectrum van toepasbare materialen [1].

De vraag rijst dan ook of er toch niet ook voor de conventionele productieprocessen en materialen toepassingen in het microdomein weggelegd zijn, temeer daar deze veelal met het oog op voor economisch rendabele toepassing in grote series ontwikkeld zijn. Hierbij moet vooral gedacht worden aan oer- en omvormtechnieken. Ook verspannings- en verbindingstechnieken komen zeker in aanmerking. Dit resulteert in de vertaling van reeds bestaande technologieën voor de vervaardiging van hoogwaardige producten in het macrodomein naar het toepassingsgebied van microsysteemtechniek, het microdomein. Dit is één van de opgaves die de sectie ProductieTechniek en -Organisatie (PTO) van de faculteit Ontwerp, Constructie en Productie (OCP) van de Technische Universiteit Delft (TU Delft) zichzelf stelt.

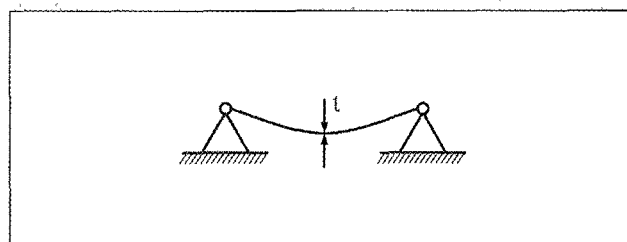
Voorbeeld 1: Volume en oppervlakte

Een kubus met ribbe x heeft een volume van x^3 en een oppervlak van $6x^2$. Naarmate de kubus kleiner wordt, vermindert het volume met een waarde x meer dan het oppervlak en dit houdt dus in dat het kubusoppervlak in verhouding groter wordt dan het volume. Deze afhankelijkheid speelt bijvoorbeeld een rol bij zoogdieren die leven in een koud klimaat, waarbij kleine dieren een relatief groot verlies aan lichaamswarmte moeten compenseren.



Voorbeeld 2: Buig- en membraanstijfheid

Loodrecht op een scharnierende plaat met dikte t wordt een belasting aangebracht. Naarmate de plaat dunner wordt, neemt de buigstijfheid D van de plaat af met t^3 . De membraanstijfheid M neemt dan echter af met t , waardoor de membraanstijfheid in verhouding minder afneemt dan de buigstijfheid. Door deze afhankelijkheid buigt een dunne plaat relatief minder ver door dan een dikke.



Binnen het onderzoeksgebied 'free particle processes', waartoe eveneens Micro Abrasive Waterjet Machining en Micro Abrasive Air Jet Machining behoren, is recent gestart met een verkennend onderzoek naar de mogelijkheden om met behulp van een van deeltjes voorziene luchtstraal onderdelen om te vormen. Dit artikel geeft een overzicht van de aanpak en de eerste resultaten van een verkennend onderzoek naar de mogelijkheden van deze nieuwe vormgevingstechniek.

Microbewerkingstechnieken

Bij de ontwikkeling van een gereedschapsgebonden micro-vormgevingsproces blijkt steeds, dat de vervaardiging van het gereedschap zelf het meest kritisch is. Zelfs als het technisch mogelijk is gereedschap van voldoende kwaliteit te produceren, dan is de ontwikkelingsinspanning hiervoor vaak economisch onverantwoord. Bovendien kan de flexibiliteit die wordt bereikt bij macro-vormgevingsprocessen middels een modulaire opbouw van het gereedschapssysteem over het algemeen niet vertaald worden naar micro-gereedschappen.

Wanneer men echter bestaande macro- en micro-vormgevingstechnologieën nader onderzoekt, dan zijn er, in het bijzonder in het microdomein, twee benaderingen veelbelovend. De eerste is het vervullen van een productgebonden gereedschap voor een universeel gereedschap. De tweede is het toepassen van een incrementeel proces in plaats van een continu proces.

Voorbeelden van de eerste benadering zijn het omvormen met een water- of laserstraal [2,3]. Met name laserstraalomvormen heeft echter als nadeel, dat op het product een warmtebeïnvloede zone achterblijft. Combinatie van beide benaderingen wordt gevonden in bijvoorbeeld het incrementeel vormgeven van een ultra-dunne plaat met behulp van een micro-hamer [4]. Ook bij het vormgeven op basis van de cumulatieve werking van versnelde deeltjes, zoals het kogelstraalomvormen (shot peen forming) vindt men een combinatie van de twee benaderingen [5].

Hierbij moet echter wel opgemerkt worden dat met name voor een micro-bewerking geldt dat de combinatie van een eenvoudig niet-productgebonden gereedschapsconcept en de grote flexibiliteit alleen dan tot een industrieel toepasbaar productieproces leidt, wanneer de nodige kennis voor integrale procesbeheersing beschikbaar is.

Schaaleffecten

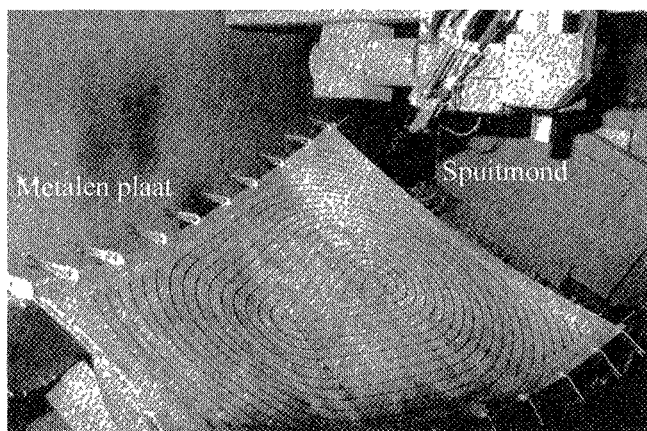
Miniaturisering is het reduceren van afmetingen van het product tot minder dan 1 mm. Bij deze afmetingen treden eerste en tweede orde schaaffecten op, die het procesresultaat beïnvloeden. De eerste orde schaaffecten worden beschreven door middel van wiskundige vergelijkingen die de invloed van veranderde verhoudingen tussen procesparameters weergeven. In het bovenstaande kader zijn enkele voorbeelden te zien van eerste orde schaaffecten. Bij het omvormen met een laserstraal spelen eerste orde effecten als een grotere warmte-beïnvloeding en de geringere flexibiliteit van de eindvorm een rol.

De tweede orde schaaleffecten kunnen niet beschreven worden door algemene modellen en zijn daardoor minder voorspelbaar. Deze effecten spelen bij afmetingen in het submillimeter gebied een steeds grotere rol. Experimenteel bepalen van de invloed van deze effecten is noodzakelijk om een optimale procesbeheersing te kunnen realiseren. Door tweede orde effecten kunnen procescondities van bijvoorbeeld dieptrekken verslechteren, doordat het materiaal sneller verdunt en er eerder scheurvorming kan ontstaan. Deze condities ontstaan door variabele waarden van vloeispanning, anisotropie en ductiliteit.

De tweede orde effecten wordt veroorzaakt door de microstructuur van het materiaal. Onder de microstructuur wordt, in geval van polykristallijne metalen, met name de grootte en oriëntatie van de kristallen verstaan. De individuele kristallen krijgen, door hun afnemend aantal bij afnemende afmetingen van het product, een steeds grotere betekenis en beïnvloeden de lokale materiaalresponsie. Bij grotere afmetingen worden de lokale effecten, door het grotere aantal betrokken kristallen, uitgemiddeld tot een uniforme responsie.

Deze effecten treden over het algemeen op bij afmetingen van circa 1 mm, maar kunnen soms al optreden bij grotere of kleinere dimensies. Dit is afhankelijk van de verhouding tussen product- en kristalafmetingen.

Onderzoek naar de tweede orde effecten is nog in volop in ontwikkeling, waardoor bepaalde materiaalgedragingen nog niet onderzocht of verklaard zijn. Het microstraalomvormen kan daarom effecten blootleggen die nog niet eerder zijn waargenomen.



Afbeelding 1. Segment van een tankbodem van de Ariane 5 raket, dat door middel van kogelstraalvormen wordt gevormd (Bron: Dornier)

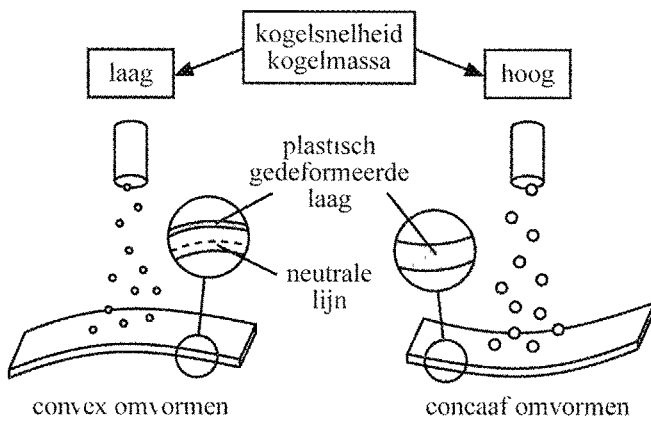
Microstraalomvormen

De techniek van het vormgeven met behulp van een microstraal wordt op macro schaal toegepast voor het omvormen (zie afbeelding 1) van plaatvormige onderdelen voor de lucht- en ruimtevaartindustrie. Met behulp van kogelstraalomvormen worden platen van enkele millimeters dik, bijvoorbeeld huidpanelen van vliegtuigen, door middel van een kogelstraal omgevormd. De kogels, waarvan de diameter in een zelfde orde van grootte ligt als de plaatdikte, worden met snelheden van enkele tientallen meters per seconde op de platen afgeschoten. Bij het schalen naar het microstraalomvormen moeten de straaldeeltjes verhoudingsgewijs een zelfde kinetische energie bezitten, daar de minimaal benodigde omvormenergie per volume eenheid materiaal niet verandert. Kleine straaldeeltjes dienen dus een veel hogere snelheid te bezitten.

De procescondities van het kogelstraalomvormen worden over het algemeen experimenteel bepaald, omdat het omvormproces dermate complex is dat modelleren ervan nauwelijks mogelijk is. Bovendien worden deze gegevens uit concurrentie overwegingen zelden of niet gepubliceerd. De meeste gepubliceerde gegevens beperken zich, gezien de grote industriële toepassing, tot het convex vormen van platen (zie afbeelding 2). Naast convex vormen bestaat echter nog een complementaire variant, concaaf vormen, die wetenschappelijk gezien zelfs interessanter is, maar die industrieel slechts zeer beperkt toegepast wordt.

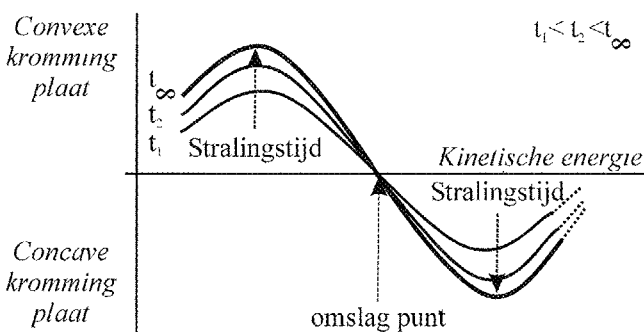
Bij gelijkblijvende plaaieigenschappen is het convex of concaaf vormen afhankelijk van de kinetische energie van de kogels, die een dunne, respectievelijk dikke plastische gedeformeerde laag in de plaat veroorzaken. Deze plastische deformatie veroorzaakt een spanningspatroon over de dikte van de plaat, die de uiteindelijke vorm van het product bepaald. Iedere verandering in hardheid, materiaal of dikte van de plaat zorgt voor een andere reactie van de plaat, en dus voor een andere eindvorm. Om een volledig beeld van de geschikte procescondities te verkrijgen, is het experimenteel vaststellen van de invloed van de diverse parameters vaak de enige optie.

Wel zijn er bepaalde trends bekend waarin de omvormcurve van afbeelding 3 zich beweegt, zoals het vlakker worden van de curve en het korter worden van de curve bij afnemende dikte van de plaat. Deze trends zijn duidelijke gevolgen van de eerste orde schaaleffecten. Onderzocht is in hoeverre deze trend zich doorzet wanneer de afmetingen afnemen tot in het microdomein.



Afbeelding 2. Bij lage kinetische energie van de kogelstraal ontstaat een dunne gedeformeerde laag aan de bestraalde zijde van de plaat en daardoor zal de plaat convex vormen. Bij hoge kinetische energie wordt deze laag dikker en krijgt de plaat een concave kromming.

De mate van omvormen is afhankelijk van de tijd, waarbij langer of korter bestralen slechts invloed heeft op de mate van omvormen, niet op het type omvormen. Bij langer stralen neemt de zogenaamde bedekkingsgraad van de plaat toe, dat wil zeggen: de verhouding tussen het door kogelinslagen geïndenteerde oppervlak en het onvervormde oppervlak. Ervaringen bij het kogelstraalomvormen hebben geleerd dat zeer lang stralen, waardoor de bedekkingsgraad oploopt tot boven de 100%, een negatieve invloed heeft; de plaat verliest een deel van de vervorming en keert enigszins terug naar de oude vorm. Een optimale verhouding tussen enerzijds de



Afbeelding 3. Lage kinetische energie veroorzaakt een convexe kromming van de plaat, die bij hogere waarden van de kinetische energie via het omslagpunt verandert in een concave kromming. Bij toenemende stralingstijd neemt de kromming van de plaat toe.

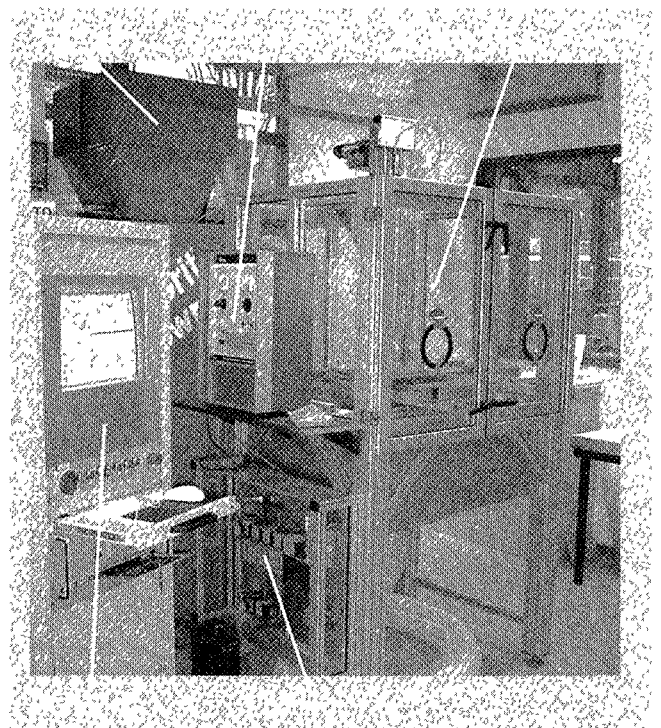
bestralingsduur en anderzijds de mate van omvormen wordt verkregen bij een bedekkingsgraad van ongeveer 5%.

De uitgangshardheid van het product beïnvloedt niet alleen het verloop van het omvormproces, de hardheid zelf verandert ook tijdens het proces. Bij het convex omvormen vindt er over het algemeen 'workhardening' plaats aan de bestraalde zijde van de plaat. Bij geharde, koud vervormde of voorgespannen producten treedt er echter onder invloed van de bewerking 'worksoftening' op. Over hardheidsveranderingen tijdens het concaaf omvormen zijn geen gegevens gevonden.

Om de invloed van miniaturisatie van het kogelstraal- tot microstraalomvormen te onderzoeken is het van belang de hardheidswaarden te bepalen van zowel convex als concaaf gevormde werkstukken.

Procestechnische ontwikkeling

Met behulp van de in het laboratorium van PTO aanwezige onderzoekopstelling voor het Micro Abrasive Air Jet Machining (afbeelding 4), is het microstraalomvormen experimenteel onderzocht. Om een vormende in plaats van afnemende bewerking te realiseren, is het abrasief vervangen door ronde glaskogeltjes met een gemiddelde diameter

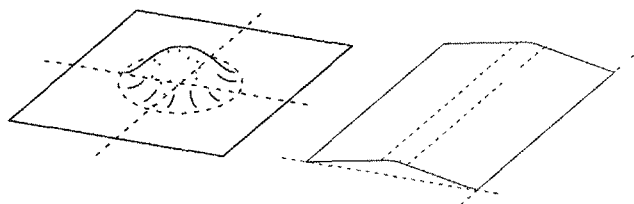


Afbeelding 4. Microstraalomvormmachine

van 75 μm , de diameter varieerde tussen de 50 en de 105 μm . Als proefstukken zijn strippen (120x35 mm) van nage-nog zuiver aluminium (A199,5), met een dikte van 100 of 150 μm gebruikt. Deze strips bevatten in beide gevallen ongeveer twintig kristallagen over de dikte, die langgerekt en dun van vorm zijn door het op dikte walsen van de strip-pen.

Deze afmetingen zijn gekozen met het oog op de schaafeffecten die een rol kunnen gaan spelen. Hierdoor zijn de verschillen en overeenkomsten tussen kogelstraalomvormen en microstraalomvormen duidelijk te onderscheiden.

Er zijn twee straalprincipes toegepast, ten eerste door de spuitmond gedurende enige tijd op één vaste plaats te houden en ten tweede door de spuitmond herhaaldelijk in lijnen boven de plaat te bewegen (afbeelding 5). Voor elk van deze bewerkingstechnieken is een geschikt inklemsysteem ont-

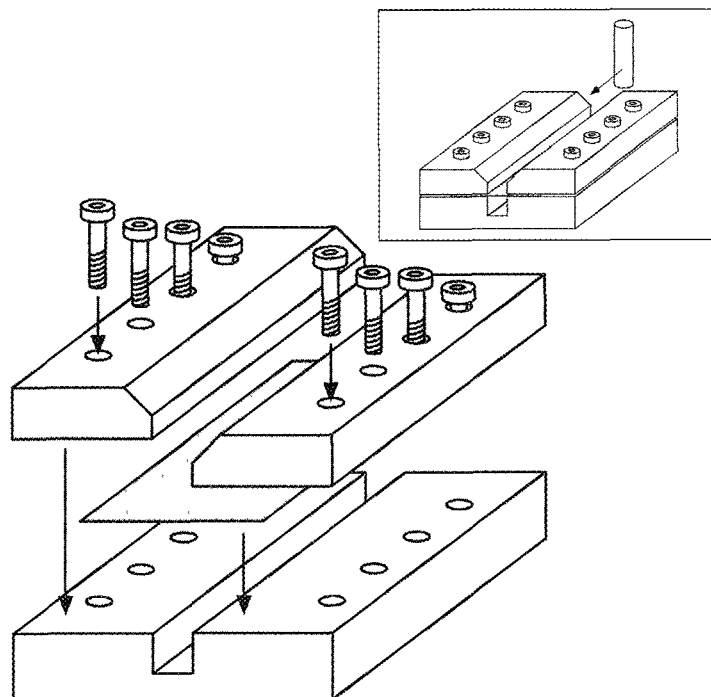


Afbeelding 5 Resultaat van twee stralingsprincipes: stralen op één plaats (links) en stralen in relatieve rechtlijnige beweging tussen werkstuk en spuitmond (rechts)

wikkeld; afbeelding 6 geeft hiervan een schematische weergave voor bestralen in lijnen.

De bepalende grootheden van het omvormproces zijn de straaltijd, de deeltjessnelheid en de afstand van de spuitmond tot de plaat. De straaltijd varieert van 10 tot 30 s bij stralen op één plaats en van 0,026 tot 2,591 s bij stralen in lijnen (voedingssnelheid 10 mm/s). De bedekkingsgraad van de strips loopt daarbij op van 5 tot wel 1000%. De gebruikte deeltjessnelheid was ca. 150 m/s. De kinetische energie van de deeltjes was daardoor verhoudingsgewijs gelijk aan gehanteerde waarden voor kogelstraalomvormen. Uit de eerste orde schaafeffecten mag dus een gelijksoortig vormingsgedrag tussen het macro en micro domein verwacht worden. Grote verschillen worden daarbij zeer waarschijnlijk veroorzaakt door tweede orde schaafeffecten. De afstand tussen de spuitmond en de strip is gevarieerd tussen 2 en 20 mm. De tabel hieronder geeft een volledig overzicht van geselecteerde vaste en variabele waarden van de procesparameters.

Het kogelstraal- en microstraalomvormen zijn vergeleken op basis van geometrie en materiaaleigenschappen. Deze



Afbeelding 6. Schematische weergave inklemsysteem voor stralen van teststrips in rechte lijnen.

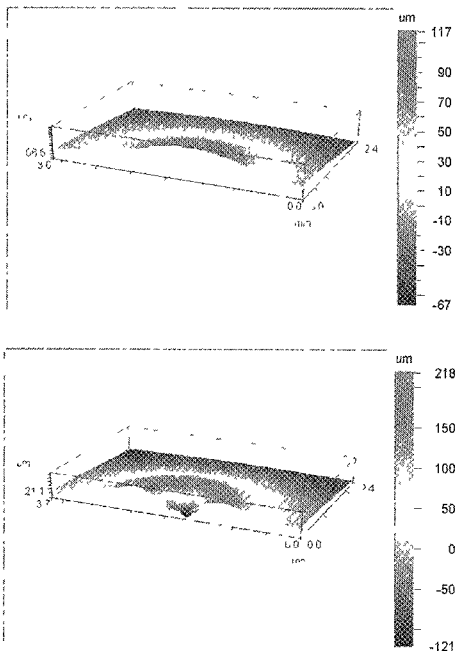
zijn voor het kogelstraal omvormen bekend en in het microdomein nog betrekkelijk eenvoudig te meten, bijvoorbeeld door het bepalen van de textuur en de hardheid van de proefstrippen.

Producteigenschappen: geometrie

De procesresultaten van de omgevormde proefstrippen kwamen in grote mate overeen met de resultaten van kogelstraalomvormen. Met name de resultaten van de 150 μm

	Parameter	Waarde
Vaste waarden	Kogel materiaal	Glas
	Kogel diameter	50-105 μm
	Voeding kogels	10 g/min
	Spuitmond diameter	0,65 mm
Variabele waarden	Luchtdruk	0-0,6 MPa
	Afstand spuitmond-strip	2-20 mm
	Voortgangssnelheid spuitmond	10 mm/s
	Straaltijd	0,026-30 s

Geselecteerde vaste en variabele waarden van procesparameters



Afbeelding 7. Convex vormen van de strip bij stralen op één plek met hoge kogelsnelheid. Bij korte stralingstijd ontstaat een convex gevormde strip, maar deze contour wordt bij langere stralingstijd doorboord door de hoge bedekkingsgraad.

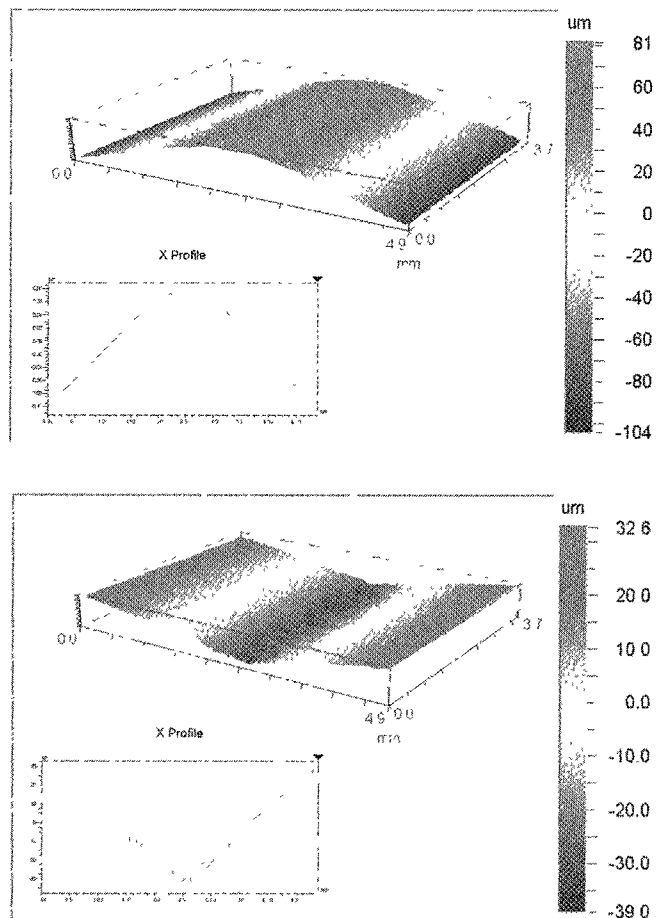
dikke proefstrippen bleken niet of nauwelijks te verschillen, wat aangeeft dat tweede orde schaafeffecten bij deze afmetingen en plaaieigenschaften nog geen rol spelen.

De kinetische energie van de deeltjes was ontoereikend voor concaaf vormen van de 150 µm dikke proefstrippen. Deze waren bij een maximale deeltjessnelheid echter wel in sterke mate onderhevig aan slijtage, veroorzaakt door verspanend ploegen van de kogels. Bij verlengen van de bestralingstijd werden de strippen daardoor dunner en uiteindelijk zelfs doorboort (afbeelding 7). Het bezwijken van het materiaal wordt veroorzaakt door de combinatie van het slijtageproces door de hoge kogelsnelheid en de zeer hoge bedekkingsgraad, die zeer snel oploopt bij verlenging van de bestralingstijd.

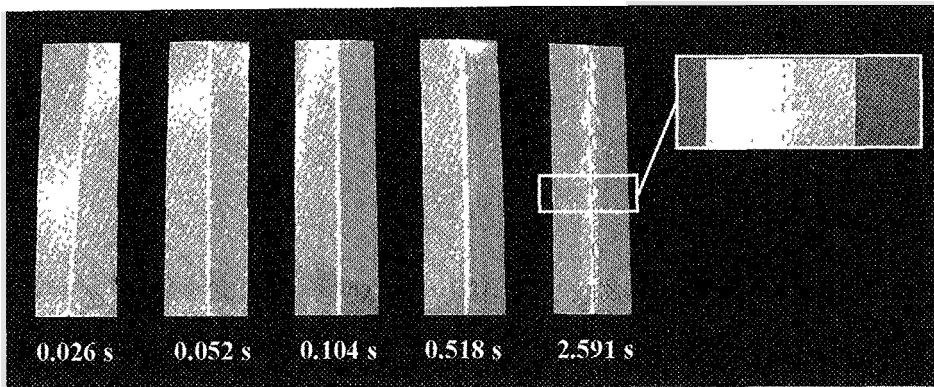
De invloed van de afstand tussen plaat en spuitmond, blijkt bij beide diktes een belangrijke invloed te hebben op de resulterende vervorming van een stip. Bij stralen op één plaats dicht op de strips werd lokaal een scherp kegelvormig profiel gevormd, terwijl bij grotere afstand een vlak gausisch profiel werd verkregen. In het macrodomein is geen informatie hierover gevonden, zodat aangenomen mag worden dat dit effect zich daar niet zo duidelijk manifesteert. De invloed van de afstand van de spuitmond tot de plaat, kan worden verklaard doordat bij de gekozen instellingen en korte afstanden er zeer snel (0,1 s) een zeer hoge bedekkingsgraad (>100%) gerealiseerd wordt. De convexe contour wordt dan snel gevormd en kromt tevens zeer lokaal, waardoor een hoge, scherpe piek ontstaat.

De dunne proefstrippen van 100 µm, vormden zowel convex als concaaf (afbeelding 8). Globaal waren de resultaten hetzelfde als de 150 µm dikke strippen. Bij bepaalde instellingen ontstonden er echter interessante verschijnselen. Het omslagpunt tussen convex en concaaf omvormen lag niet bij één bepaalde deeltjessnelheid, maar bij een variatie van 10%, die bij overigens identieke procescondities is waargenomen. Dit kan alleen verklaard worden door een plaatsafhankelijke responsie van het materiaal. Dit is een tweede orde schaafeffect waarbij de microstructuur in een strip de lokale vloeispanning of ductiliteit bepaalt, die dominant is voor het vormgedrag.

Bij het langdurig lijnvormig stralen van de proefstrippen trad een opvallend verschijnsel op (zie afbeelding 9). Weergegeven zijn proefstrippen die met toenemende straaltijd (van 0,026 tot 2,59 s) zijn omgevormd. Bij een straaltijd



Afbeelding 8. Convex en concaaf vormen van de strips bij een luchtdruk van 0,2 MPa respectievelijk 0,4 Mpa



Afbeelding 9. Ontwikkeling van sterk golvend oppervlak van 100 μm strips bij toename van de stralingstijd

van zo'n 0,52 s klappt het vormen op enkele plaatsten om; dat wil zeggen: de globaal convex gevormde strip vertoont lokaal concave vormen en de globaal concaaf gevormde strip vertoont lokaal convexe vorm. Dit verschijnsel wordt sterker met toenemende straaltijd zodat een sterk golvend oppervlak ontstaat. Uiteindelijk resulteert de lange straaltijd in een extreem hoge bedekkingsgraad, wat leidt tot verdunnen van de plaat, en tenslotte tot penetratie van de plaat. Het omklappen van de vorm laat zich slechts gedeeltelijk door tweede orde schaaffecten verklaren, zodat het precieze mechanisme van het ontstaan van de golvingen nog onderwerp van verder onderzoek is.

Producteigenschappen: materiaalkenmerken

De textuur van de gedeformeerde strips is geanalyseerd onder een microscoop met gepolariseerd licht, waardoor de kristallagen van het gewalst aluminium zichtbaar worden. In afbeelding 10 en 11 zijn doorsnedes van de onvervormde en vervormde 100 en 150 μm dikke strippen te zien.

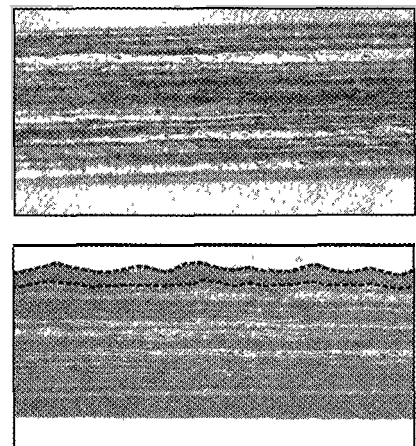
Bij de onvervormde strippen zijn de kristallagen regelmatig gestapeld en langgerekt, wat veroorzaakt is door de walsbewerking vóór het microstralen. Bij de concaaf vervormde strip van 100 μm dik zijn alle kristallagen vervormd, dat wil zeggen: de strip is over de gehele dikte gedeformeerd. Dit klopt met de theorie dat plastische deformatie over de gehele dikte van een plaat vereist is om deze concaaf om te kunnen vormen. Bij de convex gevormde 150 μm dikke strip zijn slechts enkele kristallagen gedeformeerd die zich aan het oppervlak van de bestraalde zijde bevinden. De dikke lijn geeft de randen van de gedeformeerde kristallagen aan. Ook de bevindingen van de convexe vorm kloppen met de theorie.

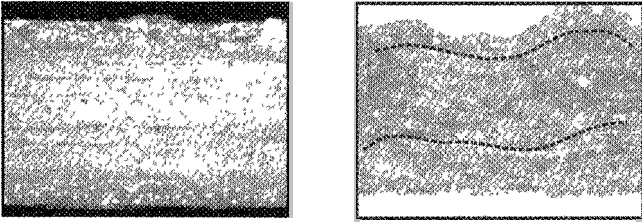
De veranderingen in de textuur die ontstaan door het microstraalomvormen zijn dus identiek aan die bij het kogelstraalomvormen. Het voor het kogelstraalomvormen opgestelde model is dus eveneens bruikbaar om voorspellingen in het microdomein te doen.

De hardheid van de strips is vastgesteld met een Vickers microhardheidsmeting. Deze meting geeft ten opzichte van andere meetmethoden het beste resultaat. Toch lieten de resultaten nog grote onderlinge variaties zien, wat veroorzaakt wordt door de relatief grote diamant die bij de normale microhardheidsmeting gebruikt wordt, in relatie met de stripdikte.

Het onvervormde materiaal van de 100 μm en de 150 μm dikke strippen had een hardheidswaarde van 60 HV respectievelijk 70 HV. Tussen het vervormde en onvervormde materiaal is een hardheidsvermindering van ongeveer 5 HV waarneembaar, waarbij geen duidelijk onderscheid waarneembaar was tussen de convexe en concave vorm. Een zelfde hardheidsvermindering is waargenomen bij het convexe vormgeven door kogelstraalomvormen. Ook hier lijkt het materiaalgedrag in het macro- en microdomein identiek te zijn. Dat vereenvoudigt de voorspellingen over het vormgedrag op microschaal, omdat van de kennis op macroschaal gebruik kan worden gemaakt.

Afbeelding 10. Onvervormde en convex gevormde strips van 150 μm ; gedeformeerde laag is klein ten opzichte van de stripdikte.





Afbeelding 11. Onvervormde en concaaf gevormde strip van 100 μm , gedeformeerde laag beslaat volledige stripdikte.

Conclusie en vooruitblik

De variëteit aan mogelijke vormen door gebruik te maken van een niet-productgebonden gereedschap biedt het microstraalomvormen een enorme flexibiliteit.

De resultaten geven aan dat er grote overeenkomsten zijn tussen kogelstraal- en microstraalomvormen. De eerste orde effecten blijken dominant te zijn, zodat het microstraalvormen ontwikkeld kan worden tot een betrouwbaar en repeeteerbaar proces. Tevens ontstaat de mogelijkheid de beschikbare ervaringen en gegevens van het kogelstraalomvormen modelmatig te vertalen vanuit het macrodomein naar het microdomein.

Bij afnemende afmetingen beginnen tweede orde schaaffecten eveneens een rol te spelen, waardoor het proces een onvoorspelbaar en onbeheersbaar karakter krijgt. Deze effecten treden op bij afnemende verhoudingen tussen de afmeting van het werkstuk en de afmetingen van de individuele kristallen. Door fijnkorreliger uitgangsmateriaal te gebruiken kunnen de tweede orde schaaffecten bij verdergaande miniaturisatie waarschijnlijk onderdrukt worden.

Met dit verkennend onderzoek is een eerste stap gezet in de richting van integrale procesbeheersing voor het microstraalomvormen. Om tot een beter begrip van de wetmatigheden en schaaffecten in het microdomein te komen zal in de volgende stap door middel van eindige elementen modellering en lokale spanningsmetingen de interne spanningstoestand van het werkstuk onderzocht worden. Deze kennis zal bijdragen tot een integrale ontwerp en productieketen waarin de potenties van het proces ten volle benut kunnen worden.

Literatuur:

- [1] Völklein, F. und Zetterer, T.: Einführung in die Mikrosystemtechnik, Grundlagen und Praxisbeispiele, Vieweg Verlag 2000
- [2] Iseki, H., 'Flexible and incremental bulging of sheet metal using high-speed water jet', JSME international journal. Series C. Mechanical systems, machine elements and manufacturing, vol. 44 no 2. (2001), p. 486-493
- [3] Geiger, M. and Hennige, T.: Laser forming –an innovation for manufacturing engineering. In: Shirvani, B. et al. (eds.), Proceedings of the 8th International Conference on Sheet Metal, 'Sheet Metal 2000', Birmingham: University of Central England 2000, p. 43-54
- [4] Saotome, Y. et al., 'An in-situ incremental microforming system for three-dimensional shell structures of foil materials', Journal of Materials Processing Technology, 113 (2001), p. 636-640
- [5] Kopp, R. and Schulz, J., 'Flexible sheet forming technology by double-sided simultaneous shot peen forming', in: Annals of the CIRP, vol.51 no 1 (2002), p. 195-198

Voor meer informatie:

Dr ir. A.M. Hoogstrate

Technische Universiteit Delft

Ontwerp, Constructie en Productie

Laboratorium voor ProductieTechniek en -Organisatie (PTO)

Mekelweg 2

2628 CD Delft

Tel: 015- 278 68 04

Email: a.m.hoogstrate@wbmt.tudelft.nl