



Delft University of Technology

Verspanen

(not) safe for designers - XV

Tempelman, Erik

Publication date

2022

Document Version

Final published version

Published in

De Constructeur

Citation (APA)

Tempelman, E. (2022). Verspanen: (not) safe for designers - XV. *De Constructeur*, 62(1), 20-25.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Verspanen

(NOT) SAFE FOR DESIGNERS – XV

De Apple MacBook uit 2008 zat vol slimme innovaties. Een 'multi-touch track pad', LED 'backlighting', meer geheugen en rekenkracht, en een opvallend lange batterijlevensduur. Maar dat alles viel in het niet bij die ene innovatie: de 'unibody'. Integraal gefreesd uit een blok massief aluminium was dit een 'game changer' in de behuizing van laptops.

ERIK TEMPELMAN, ADVIESBUREAU ERIKTEMPELMAN.COM,
UNIVERSITAIR HOOFDDOCENT TU DELFT – INDUSTRIEEL
ONTWERPEN

Apple documenteerde de voordelen zelf in een prachtige video: robuuster, betere toleranties voor het plaatsen van de talloze onderdelen, een high-tech 'look & feel' met strakke 'fit & finish', en een lichter en platter eindproduct¹. Sindsdien voorziet Apple bijna alle producten – laptops, iPhone's, desktopcomputers, et cetera – van een dergelijke behuizing.

Onmisbaar

Of het nu gaat om het mechanisch nabewerken van gietstukken of smeedwerk, of het zogenaamd 'integraal verspanen' van bijvoorbeeld de net bewierookte MacBook-behuizing – het verspanen is volstrekt onmisbaar in de productietechniek. Ook producten die er ogenschijnlijk zonder lijken te kunnen, hebben er toch mee te maken: voor kunststof spuitgietproducten bijvoorbeeld hebben we matrijzen nodig, en die maken we weer door te verspanen².

In de basis is het verspanen "subtractief", want we beginnen met een blok uitgangsmateriaal – of met een ruw product bij verspanen als nabewerking – en halen stap voor stap materiaal weg tot de gewenste vorm overblijft. Het productieafval dat hierbij vrijkomt, de spanen, kunnen we in de regel goed recyclen³.

Verspanen biedt opmerkelijk veel vormvrijheid en dat is vooral goed nieuws voor de lichtgewicht ont-

werper (afbeelding 1). Het is verder de manier bij uitstek om tot extreem hoge toleranties te komen.

Standaardpakket

Verspanen omvat diverse methoden, waarvan het trio draaien-boren-frezen tot het standaardpakket van elke serieuze werkplaats behoort. Verder zijn er methoden voor het fijnere werk, zoals slijpen, leppen en honen – en dan zijn er ook nog de niet-mechanische technieken, in het bijzonder chemisch en elektro-thermisch verspanen. Dit alles wordt ingezet voor prototyping dan wel enkelstuksfabricage, voor (zeer) grote series, en voor alles er tussenin. Ook qua materialen is het verspanen uiterst flexibel. Voor hout is het zelfs dé vormgevingstechniek bij uitstek, zeker als we bedenken dat het zagen ook een verspanende methode is. Dit maakt de IKEA tot een verspanend bedrijf van wereldformaat. En wat dacht u van steen? Ook de David werd door Michelangelo 'integraal verspaand' uit marmer. Toch heeft het verspanen wel degelijk zijn voorkeuren voor materialen en vormen. Elke constructeur en ontwerper zal dit weten te appreciëren! Laten we daarom eens nader bezien hoe dit alles uitpakt en welke lessen we kunnen leren.

Krachten

In afbeelding 2 ziet u schematisch een beitel, die zich met een snelheid V van rechts naar links beweegt. Voor het gemak is de beitel weergegeven als een scherpe driehoek. Dit schema geeft allereerst drie belangrijke hoeken aan: *de vrijloophoek α* , *de beitelhoek β* , en *de spaanhoek γ* . Samen zijn ze per definitie gelijk aan 90° . De beitel neemt een laagje materiaal weg met een zekere dikte, die bij verspanende professionals bekend staat onder de term 'aanzet'.

Het werkstuk verzet zich tegen de beitel, maar mits de voorwaartse krachtcomponent F_h voldoende groot is, zal het materiaal de strijd verliezen en wel door te falen onder afschuiving. Dit gebeurt in de met rood aangegeven *afschuifzone*. We zagen al eerder dat bij metalen de vloeigrens op afschuiving

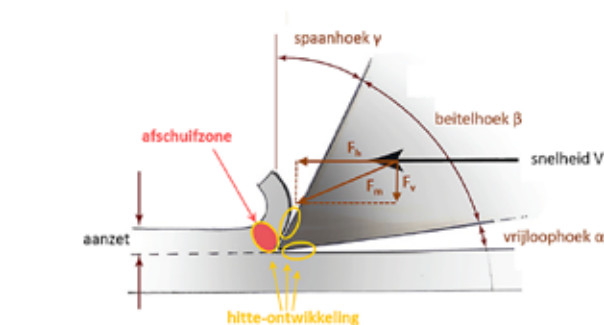
1 Zie bijvoorbeeld <https://tinyurl.com/CST-NFSD>

2 Al kan printen ook, onder andere via het PRIM-proces van Promolding. Deels geprinte delen in een verder verspaande matrijs kan ook, bijvoorbeeld om contourvullende koelkanalen te realiseren.

3 Maar nooit met 100 procent terugwinning! Alle bewerkingen van overenthousiaste marketingafdelingen ten spijt, komen we in de praktijk bij goed opgezette operaties tot typisch 90-95 procent. En qua kosten leveren we fors meer in dan dat, want het uitgangsmateriaal is doorgaans veel duurder per kilogram dan de waarde van de spanen.



Afbeelding 1 De ultralichte en ultrastijve 'BramBrake' racefietsrem – winnaar van de European Aluminium Award in 2006. (M5 Ligfietsen)



Afbeelding 2 Het verspanen in zij aanzicht (links) met krachten en hitte-ontwikkeling (rechts).

zo'n 60 procent is van die op trek, en de afschuifsterkte zo'n 80 procent van de treksterkte⁴. Vanwege de geometrie heeft de beitel de neiging om naar boven de kruipen; dit gaan we tegen door niet alleen voorwaarts maar ook neerwaarts te duwen, met krachtcomponent F_v . Typisch geldt dat $F_h \approx 3F_v$ en de resultante hiervan is dan de totaal benodigde verspaankracht die de machine moet leveren, in afbeelding 2 aangegeven als F_m .

Intussen moet de beitel zelf natuurlijk niet falen. Het meest voor de hand liggend is om een beitel met grote beitelhoek β te gebruiken, maar dat vraagt ook weer hogere krachten. Beter gebruiken we harde, sterke beitelmaterialen, zoals snelstaal (Engels: 'high speed steel', afgekort HSS) of technisch keramiek. Voor het beste resultaat kiezen we per te bewerken materiaalgroep een daarvoor geoptimaliseerde beitelgeometrie. Dit kent u van uw doe-het-zelf borensetje thuis, waarin de houtboren, metaalboren en steenboren er duidelijk anders uitzien. Ontwerpers opgelet: het verspanen van combinaties van materialen biedt dus een speciale uitdaging. We zien dat vraagstuk onder andere terug bij de 'bedplate' van de BMW-motor in afbeelding 3 die stalen inzetstukken heeft.

Vermogen

Gewapend met deze kennis zouden we een schatting kunnen maken van de verspaankracht, bij gegeven materiaalsterkte, snelheid en aanzet. Echter, deze kracht is slechts zelden een beperkende factor. Meer van belang is het benodigd vermogen, en dit hangt niet alleen af van de reeds genoemde drie parameters maar ook van de breukrek van het materiaal. Bij verder gelijke omstandigheden zal dit vermogen lineair schalen met deze breukrek⁵. Het vermogen P dat we in het materiaal inbrengen, dat wil zeggen verspaankracht maal snelheid, dus $P = F_h \cdot V$, wordt vrijwel volledig omgezet in deformatiewarmte en wrijvingswarmte. De eerst concentreert zich in de afschuifzone juist voor de beitelpunt, de

4 Trek, knik en zo meer: belastingsvormen vergeleken; (not) safe for designers? – IV; Constructeur nr. 3, , pp. 30-32.

tweede zien we tussen beitel en werkstuk, en tussen beitel en spaan. U ziet de hieruit voortkomende *hitte-ontwikkeling* in afbeelding 2 terug. Wie snel wil verspanen, moet deze warmte goed af weten te voeren. En, kiest u vooral een hittebestendig beitelmetaal, zoals technisch keramiek.

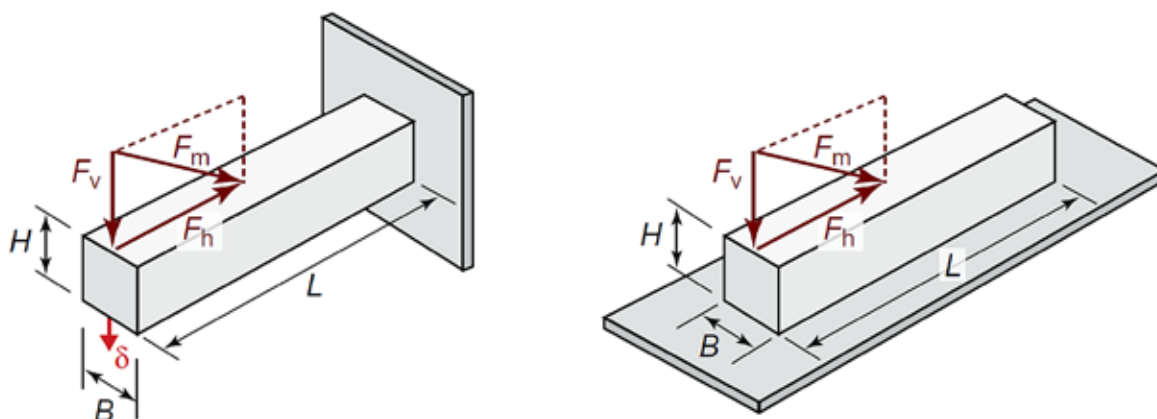
Materialen

De deformatiewarmte kunnen we minimaliseren door een materiaal te kiezen dat, bij de gewenste sterkte, een geringe breukrek heeft. Zo verspanen we in plaats van het taaie laagkoolstofstaal liever 'automatenstaal', dat door toevoeging van mangaan en zwavel relatief bros is. Kneedaluminium, van zichzelf ook taai en dus ongeschikt voor snel verspanen, werd traditioneel met lood gelegeerd teneinde hetzelfde doel te bereiken. De 'Restriction on Hazardous Substances' (RoHS) heeft dit inmiddels verboden, en nu wordt onder andere bismut ingezet.



Afbeelding 3 Bedplate van een BMW-motor met stalen inzetstukken. (BMW Groep)

5 We maken de aanname dat de breukrek op afschuiving schaalt met de breukrek op trek. Voor homogene materialen (dus GEEN hout of composieten) is dit doorgaans een redelijke aanname.



Afbeelding 4 Verspanen met en zonder volledige ondersteuning van het werkstuk.

In dit verband is het vermeldenswaardig dat Apple voor de MacBook een eigen legering liet formuleren, precies toegesneden op hun eisenpakket. Maar, het materiaal moet ook niet weer niet té bros worden, want dan zal het met een klap scheuren onder de verspaankracht als gevolg van een tekort aan kerftaaiheid. Dit zien we bij glas en steen, twee materialen waar de verspaankracht vaak wel een beperkende factor is. Los daarvan hebben brosse materialen doorgaans een slechte vermoeiingssterkte, dus de afweging is nog complexer – al helemaal als we er na het verspanen nog aan willen lassen...

Hoe dan ook, dankzij dit legeren, en dankzij de uitstekende beitelmaterialen van vandaag de dag, kan het integraal verspanen de productiviteit halen die voor massaproductie nodig is. Wat geweldig goed helpt is rijkelijk gebruik van verspaanvloei-stoffen. Deze fungeren als smeermiddel (= minder wrijvingswarmte), nemen makkelijk warmte op, en voeren met de warmte tegelijk de spanen af. Hebt u toch taaie materialen te verspanen, zoals RVS of titanium, dan zit er weinig anders op dan de aanzet en/of snelheid laag te houden. U trekt hierbij lange spanen, die er sierlijk uitzien maar bepaald niet makkelijk te hanteren zijn. Een zogeheten spaanbreker biedt dan hulp.

Nog niet genoemd zijn de technische kunststoffen. Ook hier geldt dat we liever een wat brossere plastic zullen verspanen, zoals POM, dan een taaie, zoals HDPE. Wat hierbij extra speelt, zijn de vervormingen van het werkstuk onder de verspaankracht. In de volgende sectie kijken we nader naar dit thema.

Belastingvormen

Onder de verspaankracht zal ieder werkstuk elas-

tisch vervormen voordat het begint af te schuiven. Dat is wat de Wet van Hooke voorspelt. Waar het nu om gaat is ten eerste om buiging te vermijden ten faveure van pure druk – de lichtgewicht ontwerper herkent dit thema direct! Afbeelding 4 brengt het verschil het in beeld: we vergelijken hier een eenzijdig ingeklemd werkstuk links met een vlak opgelegd maar verder identiek werkstuk rechts. In beide gevallen zijn de afmetingen $L \times B \times H$ gelijk.

Links zien we hoe de neerwaartse component van de verspaankracht F_v direct tot doorbuiging van het werkstuk leidt (de horizontale component F_h genereert pure druk). Die doorbuiging veroorzaakt al bij geringe verspaankrachten een meetbare afwijking van de gewenste maat. Daarom moeten we de aanzet zeer laag houden, wat de productiviteit beperkt. Rechts is dit probleem niet aan de orde.

De pure druk is overigens de reden waarom de vrijloophoek α nodig is (afbeelding 2). Het materiaal veert elastisch in alvorens af te schuiven, en veert achter de beitel weer terug. Een stijf materiaal als staal heeft doorgaans aan 4° genoeg, maar het flexiblere aluminium vraagt zo'n 6° , en plastics zelfs 10° . Wie aluminium verspaant met een gereedschap voor staal ziet de wrijvingswarmte tussen beitel en werkstuk flink oplopen – dit is uiteraard niet optimaal.

Over opspannen gesproken

Bij complexere vormen die we willen verspanen is dit lastiger te bereiken, maar met de juiste opspanningen (in het Engels 'fixtures' genaamd) is het toch te doen. Apple-ontwerper Jonathan Ive meldde indertijd met onverholen verbazing hoe veel tijd

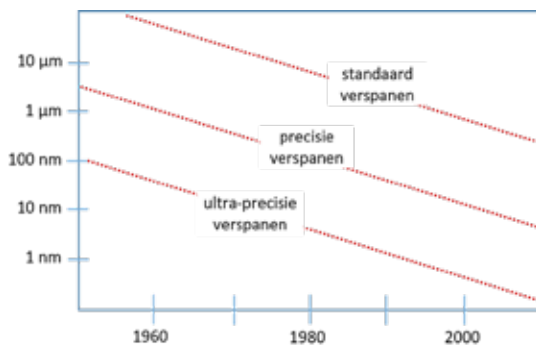
zijn team spendeerde aan het ontwerpen en optimaliseren van de fixtures voor die aluminium uni-body. Dit werk omvat dan ook de voor het integraal verspanen benodigde investeringen, als u seriematig wilt werken. De ontwerpregel is simpel: de verspaankracht moet altijd recht door het werkstuk naar de opspanning kunnen gaan.

Over opspannen gesproken: dat wilt u het liefste maar één keer hoeven te doen. Immers, elke keer dat u moet 'omspannen' (bijvoorbeeld om in wat eerst de onderkant was te kunnen boren), bent u teruggeworpen op de precisie van dat omspannen, en die is in de regel een orde lager dan die van uw machine. Nauwkeurig 'klokken', dat wil zeggen na-meten en bijstellen, biedt uitkomst maar kost tijd en dus geld. Zo vinden we weer een ontwerpregel en wel: zorg dat u alle benodigde bewerkingen in één opspanning kunt doen – en ja, dat hangt af van wat uw machine allemaal kan, waarover straks meer.

Dromen

Het minimaliseren van vervormingen is één ding – het voorspellen is een tweede. En daar is de verspanende industrie intussen verbluffend goed geworden, tot en met het voorspellen van gereedschapsslijtage en thermische vervorming aan toe. Gecombineerd met betere machines en gereedschappen leidt dat tot een trend die al in 1974 (!) door de Japanner Nori Taniguchi werd voorspeld (afbeelding 5). Let vooral op de logaritmische schaal op de verticale as. Inderdaad – verspanen is een proces met een haast onvoorstelbare verfijning geworden en prestaties als het gaat om toleranties waar andere processen alleen maar van kunnen dromen.

>



Afbeelding 5 Taniguchi-trend voor het verspanen.



Afbeelding 6 Door middel van 'kartelen' kan je draaipatronen maken zoals op de bedieningsknop van deze kraan. (Quooker)

SAMPLE

Hogesnelheidverspanen

En over verfijning gesproken – tegenwoordig kiest men vaak voor het hogesnelheidverspanen, een procesvariant die ook te danken is aan de ontwikkelingen in beitelmaterialen als hardmetaal en keramiek. Hierbij zien we bij methoden als frezen en boren toerentallen tot wel 60.000 min^{-1} . De aanzet wordt hierbij bewust laag gehouden. Maar nu dreigt wel het gevaar van resonanties, die tal van problemen kunnen verzorgen. De oplossing daarvan? Het zorgvuldig afstemmen van machine, gereedschap, werkstuk, en materiaal. Dit maakt dat het verspanen, ondanks jarenlange automatisering, nog steeds gebaat is bij goede communicatie in de hele waardeketen.

Draaien

We noemden al het trio draaien-boren-frezen uit de werkplaats. Het eerste, het draaien, wordt ingezet voor rotatiesymmetrische producten⁶. Hierbij wordt het werkstuk om zijn lengteas gedraaid en wordt de beitel er axiaal en/of longitudinaal langs bewogen om materiaal weg te nemen. Hoe groter de draaibank, hoe lager het toerental van het werkstuk, dat spreekt voor zich. Maar dat er ook decoratief-functionele patronen mogelijk zijn is minder bekend. Hebt u thuis een Quooker Fusion, dan kent u een voorbeeld uit uw dagelijkse praktijk (afbeelding 6). De draaibank was overigens een uiterst belangrijke schakel in de industrialisatie van de wereld – maar dat is een verhaal voor een andere plaats⁷.

Boren

Boren is een nabewerking, maar niet minder onderwerp van optimalisatie dan alle andere processen. Zo zijn er standaardboren, kanonboren voor (... de naam zegt het al) gaten die acht of meer maal diep zijn dan breed ($L/D > 8$), en 'jobber drills' voor ondiepe gaten ($L/D < 2$). Een aardig

⁶ Een verwant proces is het kottieren, dat we vooral bij grotere producten tegenkomen.

^[7] Onmisbaar goede video: <https://www.youtube.com/watch?v=djB9oK6pk-bA&t=762s>. Aanrader!

weetje is dat de spaanhoek γ varieert over de straal van de boor, en wel zodanig dat de tip van de boor verreweg de meeste weerstand ondervindt. Is de tip door het werkstuk heen, dan schiet de hele boor vaak in één klap door. Ervaren doe-het-zelvers onderkennen dit probleem, en boren met een blokje onder het werkstuk om bramen, splinters of ander ongemak te voorkomen.

Frezen

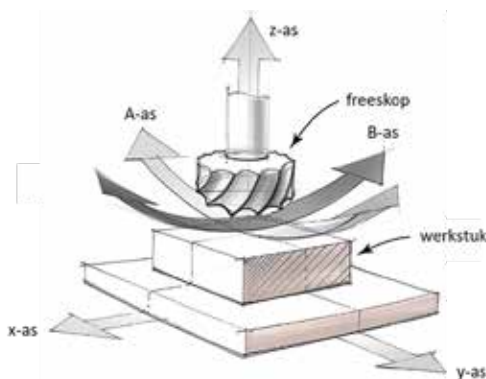
Bij het frezen wordt het werkstuk op het werkblad opgespannen en beweegt een speciaal gereedschap, de freeskop, zich er overheen. Die gebeurt in de regel met minimaal drie onafhankelijke assen van vrijheid (= translatie langs X-, Y- en Z-as), en onder computer numerieke controle (= CNC). Bij vier- en vijfassige freesbanken kan de kop ook nog zwenken rond één respectievelijk twee assen (afbeelding 7), en we krijgen een zesde graad van vrijheid als de freeskop ook nog parallel aan zijn draaiingsas kan transleren. Met een drieassige frees plus CNC kunnen we ook dubbelgekromde vormen maken, maar dat vraagt wel het gebruik van een bolkopfrees. Deze neemt relatief weinig materiaal weg en werkt daardoor relatief langzaam. Bij een enkelgekromde vorm kunt u werken met de snellere vingerfrees of de nog snellere mantelkopfrees. U ziet het: verspanen is flexibel, maar heeft wel degelijk zijn voorkeuren voor materialen en vormen!

Bewerkingscentra

In zogeheten bewerkingscentra worden deze drie methoden in feite gecombineerd. Dergelijke machines werken volautomatisch en kunnen vaak ook zelfstandig van gereedschap wisselen. Ze pakken bijvoorbeeld eerst een mantelkopfrees voor het grove werk en daarna een bolkopfrees voor de afwerking. Hun computerbesturing maakt dat de bewerkingscentra feitelijk de eerste stappen waren op weg naar de *smart industry* – en dat al in de jaren '80, ruim voor de acceptatie van 3D-printers.

Verder onderzoek

Wie meer wil weten over verspanen, staat een keur aan bronnen ten dienste. Vakbeurzen zijn er genoeg, zowel nationaal als internationaal (onder andere www.maakindustrie.nl/esef), net als vakbladen (zoals *Constructeur* en *Link*). Qua literatuur is ASM 'Volume 16: Machining' de aanrader – duur, maar het geld meer dan waard. Wilt u de processen zien, dan kunt u beginnen bij YouTube, maar stap beslist ook eens de werkplaats binnen. Beter nog, zet uw veiligheidsbril op en draai, boor of frees zelf een stukje! En ga tenslotte eens bij een professioneel verspaanbedrijf op bezoek, want alleen daar kunt u écht zien hoe het moet. ●



Afbeelding 7 Vrijheidsgraden bij het vijfassig frezen