

› **VERSPANEN VAN MOEILIJK BEWERKBARE MATERIALEN**



TNO innovation
for life

INHOUDSOPGAVE

| | | |
|----------|---|-----------|
| | VOORWOORD | 5 |
| 1 | INLEIDING | 7 |
| | 1.1 Het project | 7 |
| | 1.2 De ketenoplossing | 7 |
| | 1.3 De onderwerpen | 7 |
| | 1.4 De deelnemers | 9 |
| 2 | MOEILIJK TE VERSPANEN MATERIALEN | 11 |
| | 2.1 Introductie verspaning | 11 |
| | 2.2 Moeilijk te verspanen materialen | 12 |
| | 2.3 Verspaanbaarheid van moeilijke materialen | 13 |
| 3 | BEWERKEN VAN ROESTVASTSTAAL EN DUPLEX | 15 |
| | 3.1 Samenstelling | 15 |
| | 3.2 Austenitische RVS soorten | 16 |
| | 3.3 Ferritische RVS soorten | 18 |
| | 3.4 Martensitische RVS soorten | 19 |
| | 3.5 Duplex RVS soorten | 20 |
| 4 | TITANIUM LEGERINGEN | 23 |
| | 4.1 Samenstelling | 23 |
| | 4.2 Verspaanbaarheid | 26 |
| 5 | SUPERLEGERINGEN | 29 |
| | 5.1 Samenstelling en indeling | 29 |
| | 5.2 IJzer gebaseerde superlegeringen | 32 |
| | 5.3 Nikkel gebaseerde superlegeringen | 33 |
| | 5.4 Kobalt gebaseerde superlegeringen | 37 |
| 6 | KRACHTEN EN VERMOGENS | 39 |
| | 6.1 Het begrip specifieke snijkracht | 39 |
| | 6.2 Snijvermogen | 40 |
| | 6.3 Keuze snijgereedschap op basis van krachten | 41 |
| | 6.4 Stabiliteit van machines | 48 |

COLOFON

© 2011

Verspanen van moeilijk bewerkbare materialen is een uitgave van TNO.

De inhoud is samengesteld door Dr. Ir. Andre Hoogstrate en Ir. Han Oosterling, beide werkzaam bij TNO op het gebied van productietechnologie.

In nauwe samenwerking met Verspanende bedrijven, Toeleverende bedrijven en Brancheverenigingen.

Vormgeving en prepress: Studio Twintig tien, Waalre

Gedrukt in Nederland. Oplage 2.000 stuks.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt, in welke vorm dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this book may be reproduced in any form, without written permission from the publisher.

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7 | GEREEDSCHAPSKEUZE EN SNIJPARAMETERS | 53 |
| 7.1 | Informatie | 53 |
| 7.2 | Keuze proces | 53 |
| 7.3 | Gereedschaps-coatings | 61 |
| 8 | METAALBEWERKINGSVLOEISTOFFEN VOOR MOEILIJK TE BEWERKEN MATERIALEN | 63 |
| 8.1 | De functies van metaalbewerkingsvloeistoffen | 63 |
| 8.2 | Invloed van de temperatuur op gereedschap | 64 |
| 8.3 | Indeling van metaalbewerkingsvloeistoffen | 65 |
| 8.4 | Optimale keuze metaalbewerkingsvloeistof voor moeilijk te bewerken materialen | 66 |
| 8.5 | Onderhoud watermengbare MBV's | 67 |
| 8.6 | Gebruik van hoge druk koeling bij draaien | 67 |
| 9 | BEWERKINGS STRATEGIE | 69 |
| 9.1 | Keuzeproces bewerkingsstrategie | 69 |
| 9.2 | Besturingstechnologie | 71 |
| 10 | APPLICATIEVOORBEELDEN | 73 |
| 10.1 | Bewerken van Monel 400 | 73 |
| 10.2 | Bewerken van austenitisch roestvaststaal | 78 |
| 10.3 | Bewerken van Inconel 718 | 80 |
| 11 | BRONNEN | 83 |



VOORWOORD

Voor u ligt het boek over het verspanen van moeilijk bewerkbare materialen. Het is het resultaat van het TNO kennisoverdrachtproject “Verspanen van moeilijk bewerkbare materialen”. Het bevat zowel achtergrondkennis als praktisch toepasbare richtlijnen en gegevens. Het is een introductie in dit onderwerp en kan ook gebruikt worden als naslagwerk.

Dit boek is samengesteld door Dr. Ir. Andre Hoogstrate en Ir. Han Oosterling, beide werkzaam bij TNO op het gebied van productietechnologie.

Aan de inhoud van dit boek hebben de volgende bedrijven bijgedragen: Cimcool Industrial Products BV, CNC Consult & Automation BV, Dijk Consult, Hamel metaal, Heidenhain Nederland BV, Hembrug BV, Oerlikon Balzers Coating Benelux, Seco Tools Benelux, Techno Trade. Daarnaast is bij de totstandkoming ook gebruik gemaakt van andere bronnen.

Het project is uitgevoerd door TNO in samenwerking met de Koninklijke Metaalunie, het FME-CWM, Syntens, negen verspanende bedrijven en elf toeleverende bedrijven.

Dit project is gesponsord door het Syntens Applicatie Centrum Productietechnologie (ACP) en de regeling TNO MKB Kennisoverdracht van het Ministerie van Economische Zaken (EZ).

Han Oosterling

Projectleider

1. INLEIDING

De huidige trend van duurzaam produceren, minder energiegebruik en minder milieubelasting leidt tot een grote toename van het gebruik van moeilijk te bewerken materialen in onder andere de vliegtuigindustrie, de medische sector, de automobiel sector, offshore industrie en de high end equipment sector. Onder deze materialen vallen o.a. Ti-legeringen, Inconel, Hastaloy, duplex-stalen. Voor het produceren van onderdelen uit deze materialen is verspanen het belangrijkste proces. Om dit efficiënt en betrouwbaar uit te voeren is specifieke achtergrondkennis nodig over de typische verspaningseigenschappen van deze materialen en is kennis nodig van methoden om het verspaningsproces te optimaliseren.

1.1 HET PROJECT

De aanleiding voor dit project is de behoefte die de brancheverenigingen FME en Metaalunie hebben geconstateerd bij hun leden om meer kennis te krijgen over het verspanen van moeilijk bewerkbare materialen. Ook Syntens merkt aan vragen uit deze sector deze behoefte.

1.2 DE KETENOPLOSSING

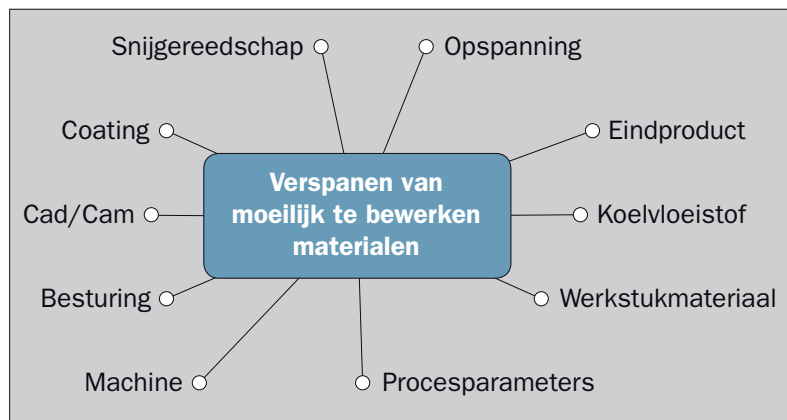
Het betrouwbaar en efficiënt verspanen van moeilijk bewerkbare materialen vraagt een ketenoplossing, waarbij leveranciers van werkstukmateriaal, gereedschapsmachines, gereedschappen, koelsmeermiddelen, machinebesturingen en programmeersystemen betrokken zijn om het verspanende bedrijf te voorzien van de juiste middelen en informatie. In dit project zijn alle belanghebbenden in de keten samengebracht voor een integrale benadering van het verspanen van moeilijk bewerkbare materialen.

1.3 DE ONDERWERPEN

De onderwerpen die aan bod komen zijn gekozen op basis van de hierboven genoemde ketenoplossing en weergegeven in fig 1.1. In hoofdstuk 2 wordt besproken waarom de moeilijk bewerkbare materialen moeilijk te verspanen zijn (centraal in fig 1.1). De werkstukmaterialen worden in hoofdstuk 3, 4 en 5 behandeld. Dit zijn de RVS legeringen, de Titaan legeringen en de super legeringen. Procesparameters, krachten en vermogens inclusief machinestabiliteit, keuze van snijgereedschappen inclusief coating worden besproken in de hoofdstukken 6 en 7. Hoofdstuk 8 handelt over metaalbewerkingsvloeistoffen.



Hoofdstuk 9 is gewijd aan de invloed van Cad/Cam en machinebesturing op het verspanen van moeilijk bewerkbare materialen. En tenslotte worden in hoofdstuk 10 het eindproduct en de opspanning behandeld door middel van applicatievoorbeelden. In hoofdstuk 11, het laatste hoofdstuk, worden de bronnen gegeven, waarvan bij de totstandkoming van dit boekje gebruik is gemaakt.



Figuur 1.1: Invloedsfactoren bij het verspanen van moeilijk bewerkbare materialen.

1.4 DE DEELNEMERS

De volgende bedrijven en organisaties hebben aan dit project deelgenomen

1.4.1 Verspanende bedrijven

Beverwijkse machinefabriek BV
 Machinefabriek Gebroeders Frencken BV
 Machinefabriek Van Keulen BV
 Makomar CNC Verspaning
 Mechanische Industrie Menzing bv
 Metal Machinebouwers BV
 Pelders Metaal BV
 VDL Enabling Technologies Group Eindhoven BV
 Weir Minerals Netherlands BV

1.4.2 Toeleverende bedrijven:

| | |
|----------------------------------|----------------------|
| Seco Tools Benelux | - Gereedschappen |
| Van Hoorn Carbide | - Gereedschappen |
| Oerlikon Balzers Coating Benelux | - Coatings |
| Techno Trade | - Gereedschappen |
| Cimcool Industrial Products BV | - Koelvloeistoffen |
| Mavom | - Koelvloeistoffen |
| Hembrug BV | - Machines |
| Topmill BV | - Machines |
| CNC Consult & Automation BV | - CAM-Software |
| Heidenhain Nederland BV | - Machinebesturing |
| Hamel metaal | - werkstukmaterialen |
| Dijk Consult | - Machine Inspectie |

1.4.3 Brancheverenigingen

FME – CWM
 Koninklijke Metaalunie
 Syntens Applicatie Centrum Productietechnologie
 Syntens Eindhoven

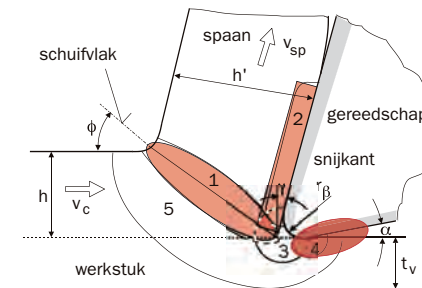
2. MOEILIJK TE VERSPANEN MATERIALEN

2.1 INTRODUCTIE VERSPANING

Verspaning is een proces waarbij materiaal gescheiden wordt door middel van een snijwig. Het eenvoudigste snijproces is een schaafproces wat in twee dimensies weergegeven wordt in figuur 2.1.



Actieve zones bij het verspanen



- 1: primaire afschuifzone
- 2: secondaire afschuifzone op het snijvlak
- 3: secondaire afschuifzone op de snijkant
- 4: secondaire afschuifzone op het vrijloopvlak
- 5: voor-deformatiezone

γ : snijhoek
 α : vrijloophoek
 ϕ : afschuifhoek
 t_v : deformatie diepte

Figuur 2.1: Snijwig in twee dimensies.

Complexere snijprocessen zoals boren en frezen verlopen in essentie op dezelfde wijze. Complicerende factoren zijn een verlopende spaandikte en een voortdurend in- en uittreden van de individuele snijtanden. Tal van parameters, zoals gereedschapsmateriaal, geometrie, coating etc bepalen de uiteindelijke prestatie van het snijgereedschap in termen van verspaningskrachten en slijtagebestendigheid. Elk werkstukmateriaal heeft zijn specifieke verspaningseigenschappen, zoals hardheid, taaiheid en ductiliteit. Het optimale snijgereedschap en de optimale snijparameters zullen voor elke toepassing, machineafhankelijk, bepaald moeten worden.

2.2 MOEILIJK TE VERSPANEN MATERIALEN

Om het kiezen van snijgereedschappen te vereenvoudigen is er een hoofdingeling in werkstuk materialen gemaakt, die door nagenoeg alle gereedschapsfabrikanten gevolgd wordt. Deze codering wordt gekenmerkt door een kleur en lettercodering.

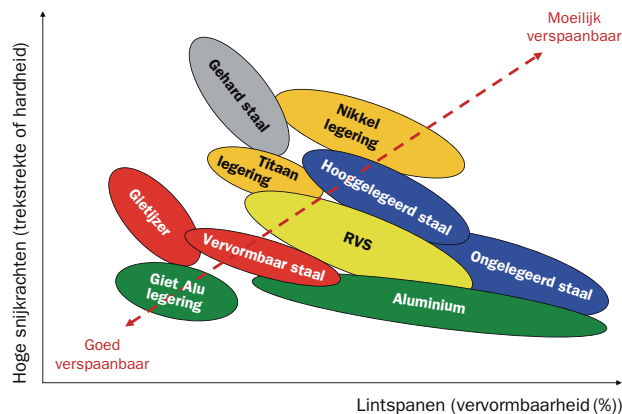
| ISO Kleurcodering | ISO codering | Benaming (Engels) | Benaming |
|---|-----------------|-------------------|-----------------------------|
|  | P | Plain steel | Gewone staalsoorten |
|  | M | Stainless steels | Roestvaste stalen |
|  | K | Cast Irons | Gietstalen |
|  | N | Non Ferrous | Niet-ijzer metalen |
|  | S | Super alloys | Warmtebestendige materialen |
|  | H | Hardened steels | Gehard staal |

Tabel 2.1: ISO codering voor werkstukmaterialen.

De meeste fabrikanten hebben deze hoofdingeling nog verder verfijnd naar eigen inzicht, waardoor de subcategorieën van de diverse fabrikanten niet meer één-op-één te vergelijken zijn.

Gewone staalsoorten en niet-ijzer metalen, zoals koper- en aluminiumlegeringen worden bestempeld als makkelijk verspaanbare materialen. Alhoewel gietstalen moeilijker bewerkbaar zijn is de term 'moeilijk bewerkbare materialen' voorbehouden voor de volgende materiaalgroepen: roestvaste staalsoorten (stainless steels), warmtebestendige materialen (Heat Resistant Super Alloys, HRSA), Titanium legeringen (Super Alloys).

In figuur 2.2 is de tendens van de diverse materiaalgroepen voor moeilijk of makkelijk verspaanbaar weergegeven.



Figuur 2.2: Verspaanbaarheid van de diverse materiaalgroepen.

2.3 VERSPAANBAARHEID VAN MOEILIJKE MATERIALEN

De vraag is nu waarom bepaalde materialen moeilijker verspaanbaar zijn dan andere materialen, en daaraan gekoppeld: is het vanuit de materiaaleigenschappen te voorspellen of materialen moeilijk verspaanbaar zijn.

2.3.1 Roosterstructuur

Verspanen begint met het vervormen van het werkstukmateriaal. Deze vervorming vindt plaats door het afschuiven van de atoomvlakken in de specifieke roosterstructuur van het materiaal.

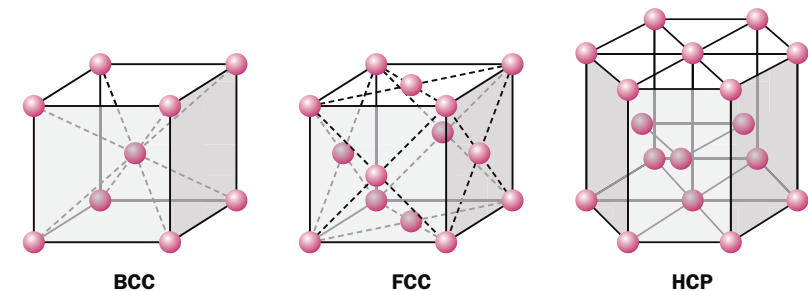
Er zijn drie belangrijke metallische roosterconfiguraties:

> Kubisch Ruimtelijk Gecentreerd rooster (KRG); in het Engels: Body Centered Cubic (BCC).

> Kubisch vlakken gecentreerd rooster (KVG); Engels: Face Centered Cubic (FCC).

> Hexagonale dichtste stapeling (HDS); Engels: Hexagonal-Close-Packed (HCP).

De structuren staan in figuur 2.3 grafisch weergegeven.



Figuur 2.3: Kristal structuren van metalen.

Metalen kunnen door temperatuurstijging of drukverhoging overgaan in een andere kristalstructuur. Met legeringselementen en warmtebehandelingen is het mogelijk de roosterstructuur van een materiaal te beïnvloeden. De roosterstructuur is één van de bepalende elementen hoe makkelijk of moeilijk het materiaal vervormbaar en verspaanbaar is.

Daarnaast zijn er nog twee hoofdoorzaken aan te wijzen waardoor materialen moeilijk verspaanbaar zijn:

> Verstevinging van de materialen.

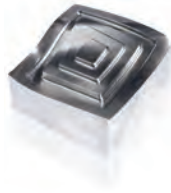
> Slechte warmtegeleiding van deze materialen.

2.3.2 Verstevinging van materialen

Het toevoegen van legeringselementen kan ook tot gevolg hebben dat deze elementen zich in de lege ruimtes tussen de materiaal-atomen nestelen, wat vooral bij klein-atomige legeringselementen zal gebeuren. Groot-atomige legeringselementen zullen de roosterposities van het basismateriaal overnemen. Beide effecten zorgen ervoor dat de vlakken moeilijker over elkaar heen schuiven en dus kost het op werkstukschaal meer kracht om deze materialen te vervormen en te bewerken. Daarnaast zijn er nog een groot aantal andere complexe mechanismen waaraan materialen hun sterkte ontleunen, zoals precipitatieharding door een warmtebehandeling en dislocatiedichtheidverandering door koud-vervormen. Een warmtebehandeling zoals zachtgloeien, kan er anderzijds op gericht zijn de verspaanbaarheid van het materiaal te verbeteren. In het kader van deze brochure voert het echter te ver al deze materiaalkundige aspecten te behandelen.

2.3.3 Slechte warmtegeleiding

Grotere krachten bij het verspanen van verstevigde materialen leiden tot hogere warmte-ontwikkeling. Bij geharde staalsoorten leidt dit lokaal tot verweken van het materiaal, waardoor het beter verspaanbaar wordt. De moeilijk te verspanen materialen hebben de eigenschap dat ze zeer slecht warmte geleiden. Daardoor kan de ontstane warmte niet snel genoeg afgevoerd worden en wordt het snijgereedschap blootgesteld aan hoge temperaturen. De hittebestendige materialen zijn erop ontwikkeld dat ze bij hoge temperaturen hun sterkte behouden. De temperatuur op de snijkant van het gereedschap kan echter zo hoog oplopen dat de sterkte van de snijkant sterk terug loopt. Dit heeft onmiddellijk ernstige gereedschapsslijtage tot gevolg.



3. BEWERKEN VAN ROESTVASTSTAAL EN DUPLEX

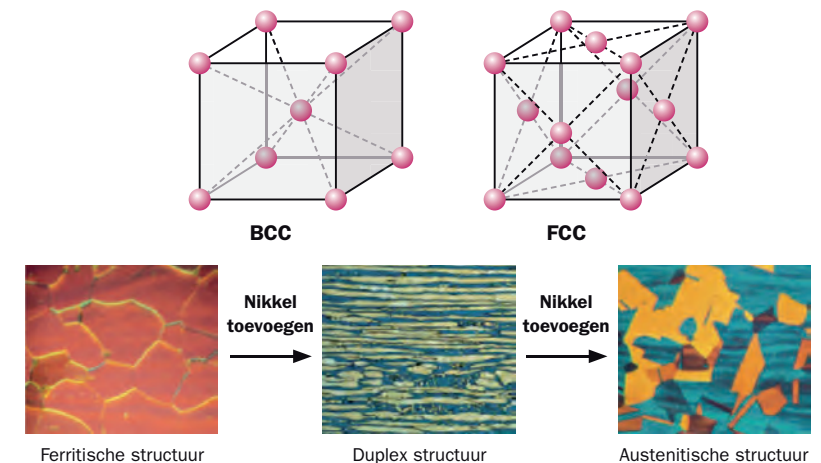
3.1 SAMENSTELLING

Roestvaste staalsoorten zijn Chroomhoudende staallegeringen. Het chroom gehalte moet minimaal 10.5% bedragen. Het chroom oxideert aan het materiaal-oppervlak tot een zeer dunne, transparante chroom-oxide huid (Cr_2O_3).

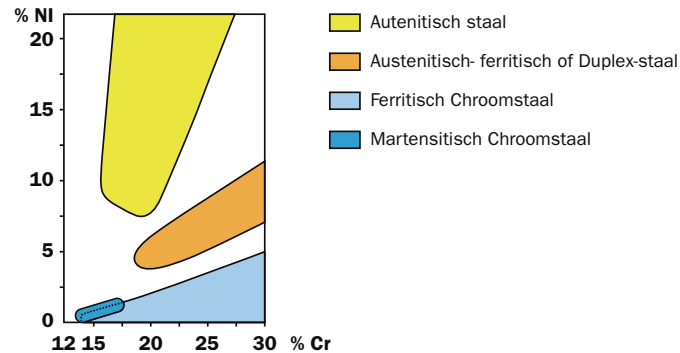
Bij beschadiging is deze huid zelfherstellend. Deze huid voorkomt het verder oxideren (roesten) van het materiaal en geeft Chroomhoudende legeringen hun 'roestvaste' eigenschappen.

Een tweede belangrijke legeringselement is Nikkel. Door toevoegen van minimaal 6% Nikkel verandert de structuur van volledig ferritisch (Body Centred Cubic of BCC) naar volledig austenitisch (Face Centred Cubic of FCC), zie ook Figuur 3.1. In het overgangsgebied, bij Nikkelgehalten tussen 0 en 6% zijn combinaties mogelijk, die bij kamertemperatuur zowel austenische als ferritische kristallen bevatten.

Uit figuur 3.2 blijkt dat er ook wederzijdse beïnvloeding van de legeringselementen is. Bij een toenemend Chroomgehalte moet bijvoorbeeld het Nikkelgehalte ook hoger zijn om een Duplex structuur te realiseren.



Figuur 3.1: Effect op de kristalstructuur door het toevoegen van Nikkel.

Identificatie van materiaal groep

Figuur 3.2: Hoofdtypes roestvaststaal.

Op basis van de hoofdlegeringselementen voor roestvaststaal Chroom en Nikkel worden de volgende vier hoofd-types roestvast staal op basis van hun structuur onderscheiden:

- > Austenitisch roestvaststaal
- > Ferritisch roestvaststaal
- > Austenitisch-Ferritisch of Duplex-staal
- > Martensitisch roestvaststaal

De bewerkbaarheid van deze roestvaststaal-soorten hangt sterk af van de materiaalstructuur. Deze hoofdgroepen worden in de volgende paragrafen in detail beschreven.

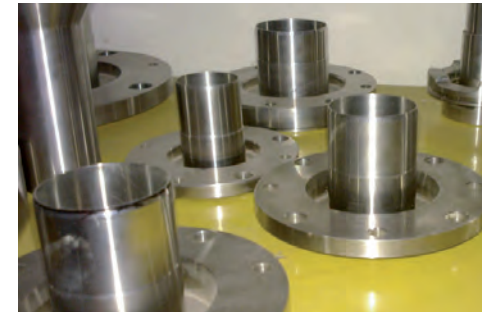
3.2 AUSTENITISCHE RVS SOORTEN

| Handelsbenaming | AISI 304 | AISI 316 |
|------------------------------------|----------|----------|
| UNS | S30400 | S31600 |
| Werkstofnummer | 1.4301 | 1.4401 |
| Treksterkte [N/mm ²] | 505 | 580 |
| 0.2% rekgrens [N/mm ²] | 215 | 290 |
| Breuk rek [%] | 70 | 50 |
| Hardheid [HRB] | 70 | 79 |

Tabel 3.1: Voorbeelden van austenitische RVS soorten.

Austenitische roestvaststaalsoorten vertegenwoordigen het grootste deel van de RVS-soorten. De austenische structuur wordt verkregen door toevoeging van de legeringselementen Nikkel (Ni) en Chroom (Cr). AISI 304 is het bekende 18/8 RVS, met 18% Chroom en 8% Nikkel. De austenitische structuur is verantwoordelijk voor het taaie (ductiele) gedrag van deze RVS-soorten, evenals voor het niet-magnetische gedrag.

Toepassingen van austenitisch roestvaststaal vinden we terug in huishoudelijke apparatuur in leidingwerk en vaten in de chemische- en voedingsmiddelen-industrie, maar ook als beeldbepalende gevelelementen in de architectuur.



Figuur 3.3: Toepassing van AISI316 voor gebruik in maritieme omgeving.

3.2.1 Verspaning

Austenitische roestvaststaal soorten laten zich goed verspanen. Een hoger koolstofgehalte maakt deze austenitische RVS soorten hardbaar, waardoor flank- en kraterslijtage van het gereedschap op kan treden. Dit heeft een afname van de standtijd van het gereedschap tot gevolg. Voor het bewerken van austenitische RVS-soorten kunnen twee methodes gebruikt worden:

- > De lage-snelheidsmethode, toepasbaar op wat oudere, minder stabiele machines.
 - > De hoge-snelheidsmethode, toepasbaar op moderne, stabiele machines.
- De verspaningsparameters voor beide methoden liggen ver uit elkaar. Parameter combinaties 'ergens ertussen in' leiden vaak tot hoge gereedschapsslijtage en een matig tot slecht freesresultaat.

Lage-snelheidsmethode

De basis voor de lage-snelheidsmethode is: houd de temperatuur voldoende laag zodat er geen snijkantsopbouw op de snijkant kan plaatsvinden.

Om dit te bewerkstellingen moet een lage snijsnelheid gekozen worden én moet gebruik worden gemaakt van zoveel mogelijk koeling (inwendige én uitwendige koeling en bij voorkeur hogedrukkoeling).

Hoge-snelheidsmethode

Het basisprincipe achter de hoge-snelheidsmethode is: voorkom snijkantsopbouw op de snijkant door een voldoende hoge temperatuur op het spaanvlak te creëren. Als gevolg hiervan moet gewerkt worden met een hoge snijsnelheid en mag geen koeling gebruikt worden.

Als de temperatuur niet voldoende hoog wordt, ontstaat extreme snijkantsopbouw. Dit leidt tot hoge gereedschapskosten en zeer matige freeskwaliteit.

Een praktisch voorbeeld voor het verspanen van austenitisch roestvaststaal met de hoge- en lage-snelheidsmethode wordt behandeld in "Hoofdstuk 10: Applicatie voorbeelden".

3.3 FERRITISCHE RVS SOORTEN

| Handelsbenaming | ASTM 18Cr - 2Mo |
|------------------------------------|-----------------|
| UNS | S44400 |
| Werkstofnummer | - |
| Treksterkte [N/mm ²] | 415 |
| 0.2% rekgrens [N/mm ²] | 275 |
| Brek rek [%] | 20 |
| Hardheid [HRB] | 95 |

Tabel 3.2: Voorbeeld van ferritische RVS-soort.

Ferritische RVS-soorten lijken in hun eigenschappen veel op 'gewone' staalsoorten. Door toevoeging van Chroom (12% tot 17%) hebben deze materialen echter een betere corrosiebestendigheid dan hun gewone staal equivalenten. De corrosiebestendigheid is echter lager dan van de austenische RVS-soorten. Ferritische RVS-soorten hebben hun toepassing eveneens in huishoudelijke apparaten en binnenhuis-architectuur. Ferritische RVS-soorten zijn in tegenstelling tot hun austenische soortgenoten wel magnetisch. Een test met een magneet kan dus snel uitsluitel geven of we met een austenische (of martensitische), danwel ferritische RVS te maken hebben. Voor de lepels en vorken in een bestek-cassette wordt veelal gebruik gemaakt van austenitisch (niet-magnetisch) RVS. Deze RVS-soort is door zijn taai gedrag minder geschikt om ingezet te worden als scherpgeslepen meskant. Messen worden daarom uit ferritisch (magnetisch) RVS gemaakt. Keerzijde van deze keuze is dat messen in de vaatwasser na verloop van tijd als eerste en enige roest beginnen te vertonen.

3.3.1 Spaanvorming

Door het koudverstevigingsgedrag van ferritisch roestvaststaal ontstaat bij het verspanen een harde laag aan het gesneden oppervlak en ook de spanen zijn door versteving erg hard, met als gevolg 'notch wear' (kerfslijtage) van de snijkant. Het verstevigingsgedrag leidt eveneens tot adhesieve slijtage van de beitel. Hierbij hecht de spaan of het werkstuk zich momentaan aan de beitel, doordat het proces verder loopt scheurt de hechtlaag zich los, waarbij coating of beitel materiaal meegenomen kan worden. Bij een sterkere hechting blijft de spaan vastplakken aan de beitel en ontstaat een opbouwspankant (Engels: build-up edge of BUE) op het gereedschap, met als gevolg een slecht werkstuk oppervlak en een verkorte standtijd van het gereedschap. Werkstukmaterialen waaraan zwavel (S) toegevoegd is, geven een beter verspaangedrag door de 'smerende' werking ervan, maar dit gaat ten koste van de corrosiebestendigheid van het materiaal.



Figuur 3.4: Toepassing van ferritisch RVS in een emulsifier in de voedingsindustrie.

3.3.2 Gereedschapskeuze

Gereedschappen met scherpe snijkanten en een positieve snijgeometrie hebben de voorkeur om de snijkrachten, en daarmee de temperatuur van het werkstuk, zo laag mogelijk te houden.

3.3.3 Snijcondities

Bij verspanen in meerdere gangen moet bij voorkeur onder de oppervlakte-geharde laag van de voorgaande snede gesneden worden. Dit betekent dat bij de snij-parameters gekozen moet worden voor voldoende snedediepte bij zowel draaien als frezen en voldoende voeding per tand bij frezen.

3.4 MARTENSITISCHE RVS SOORTEN

| Handelsbenaming | Alloy 410 | 17 - 4 PH A | 17 - 4 PH 900H |
|------------------------------------|-----------|-------------|----------------|
| UNS | S41000 | - | - |
| Werkstofnummer | 1.4006 | - | - |
| Treksterkte [N/mm ²] | 1525 | 1103 | 1448 |
| 0.2% rekgrens [N/mm ²] | 1225 | 1000 | 1379 |
| Brek rek [%] | 14 | 5 | 7 |
| Hardheid [HRC] | 45 | 35 | 45 |

Tabel 3.3: Voorbeeld van martensitische RVS-soorten.

Martensitische RVS-soorten bevatten 11 tot 13% Chroom en geen of nagenoeg geen Nikkel. Ook deze RVS-soort is magnetisch. Een deel van de martensitische RVS-soorten is precipitatie-hardbaar. Deze worden aangeduid met PH. De PH-varianten hebben corrosie-eigenschappen die overeenkomen met austenitische varianten. PH-varianten hebben echter een veel hogere sterktegrens en maakt hen dus geschikt voor gebruik in geavanceerde luchtvaarttoepassingen zoals de Joint-Strike-Fighter.

3.4.1 Bewerkbaarheid

Martensitische RVS-soorten zijn warmtehardbaar. De bewerkbaarheidseigenschappen variëren sterk met de warmtebehandeling die het uitgangsmateriaal ondergaan heeft. Veelal wordt aanbevolen het materiaal in de zachtgegloeide toestand te bewerken.

3.4.2 Gereedschapskeuze

Scherpe positieve gereedschappen in combinatie met lage voedingssnelheden worden aanbevolen. Snijnsnelheden van 18 tot 25 m/min zijn niet ongebruikelijk.

3.5 DUPLEX RVS SOORTEN

| | F51 | F53 | F55 |
|------------------------------------|---------------|----------|----------|
| UNS | S31803/S32205 | S32750 | S32760 |
| Werkstofnummer | 1.4462 | 1.4410 | 1.4501 |
| Treksterkte [N/mm ²] | 660 - 950 | min.795 | min.750 |
| 0.2% rekgrens [N/mm ²] | > 480 | > 550 | > 550 |
| Brek rek [%] | > 25 | > 15 | > 25 |
| Hardheid [HB] | max. 293 | max. 310 | max. 290 |

Tabel 3.4: Voorbeelden van Duplex RVS-soorten.

Duplex-stalen hebben een gelaagsgewijze opgebouwde Austenitische-Ferritische structuur in een 50%-50% verhouding, die een hoge sterkte geeft. Duplex-stalen bevatten minder Nikkel dan de austenitische RVS-soorten.

3.5.1 Toepassingen

Duplex wordt ingezet voor tanks en leidingwerk en koppelingen in de proces-industrie, de olie- en gasindustrie, papierindustrie en ontziltingsinstallaties.



Figuur 3.5: Toepassing van Duplex-staal in afsluiters voor de olie-industrie.

3.5.2 Bewerkbaarheid

Duplex-stalen kwaliteiten zijn over het algemeen minder goed te verspanen in vergelijking met conventionele austenitische RVS-soorten. Dit wordt veroorzaakt door de hoge treksterkte en breukrek. Hierdoor treden hoge snijkrachten op en wordt er veel warmte geproduceerd tijdens het verspanen.

Stabiele opspanning van werkstuk en gereedschap zijn danook noodzakelijk. Kleine intredehoeken zijn noodzakelijk om gereedschapsslijtage en braamvorming te minimaliseren.

Door verschuiving van de verhouding austenische-ferritische fase in de richting van meer ferritische fase (meer dan 60%) verbetert de bewerkbaarheid.

4. TITANIUM LEGERINGEN

4.1 SAMENSTELLING

De kristalstructuur van puur Titanium is bij normale omgevingscondities een hexagonaal dichtste stapeling; dit wordt de alpha-fase genoemd. Dit is een slecht vervormbare structuur die boven de 880°C transformeert naar een kubisch ruimtelijk gecentreerd rooster; deze wordt beta-fase genoemd. De beta-fase is makkelijker vervormbaar. Door toevoegen van legeringselementen aan het pure titanium kan de transitietemperatuur gevarieerd worden en met het uitvoeren van warmtebehandelingen kunnen kristalstructuren 'opgedrongen' worden aan het materiaal. Op basis van de kristalstructuur worden Titaniumlegeringen onderverdeeld in drie groepen:

- > Alpha-legeringen (α -Ti)
- > Alpha-Beta-legeringen (α - β -Ti)
- > Beta-legeringen (β -Ti)

Doordat Titanium slecht oplosbaar is in andere materialen en er snel zeer brosse intermetallische bindingen ontstaan was het lange tijd onmogelijk Titanium in grote verhouding te mengen met andere metalen. Recent zijn er echter minder brosse Gamma-Titanium-Aluminides (γ -TiAl) ontwikkeld, die bestaan uit ca. 60% titanium, ca. 40% aluminium en geringe hoeveelheden overige legeringselementen.

4.1.1 α -Titanium



| | CP - Grade 2 | Ti - 5Al - 2.5Sn |
|------------------------------------|--------------|------------------|
| UNS | R50400 | R54520/R54521 |
| Werkstofnummer | 3.7035 | 1.7852 |
| Treksterkte [N/mm ²] | 510 - 605 | 861 |
| 0.2% rekgrens [N/mm ²] | 335-545 | 827 |
| Breuk rek [%] | 21 - 29 | 15 |
| Hardheid [HRC] | - | 36 |

Tabel 4.1: Voorbeelden van α -Ti soorten.

Titaniumlegeringen met zeer weinig legeringselementen worden ook wel aangeduid als "Commercial Pure CP". De legeringselementen verstoren het hexagonaal dichtste rooster niet, maar worden opgenomen in de vrij ruimte in het rooster. Vaak beïnvloeden deze elementen de chemische reactiviteit van het materiaal, waardoor het bijvoorbeeld corrosiebestendiger wordt. Al de CP-Titanium types behoren tot de Alpha-Titanium categorie.

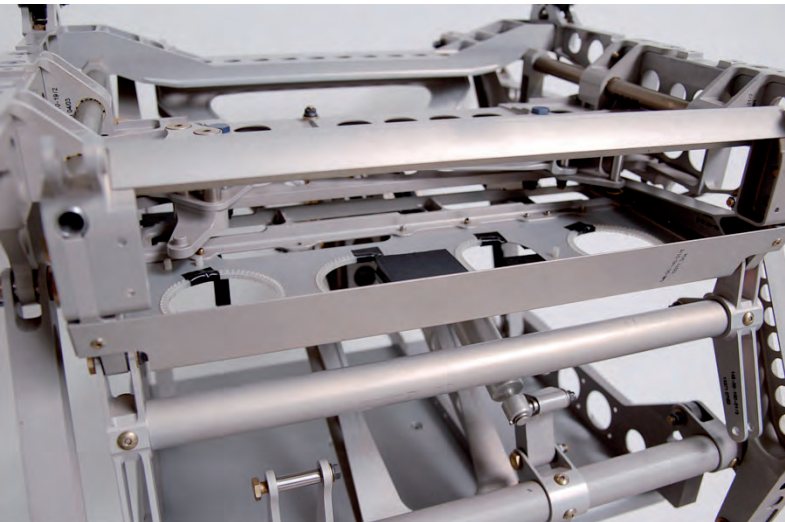
Een in de vliegtuigbouw veel gebruikte Alpha-legering is Ti-5Al-2.5Sn. Deze wordt toegepast in frames en motoren vanwege de goede lasbaarheid, goede sterkte bij hogere temperaturen.

Het materiaal lijkt in de bewerking erg op roestvaststaal. Daarom wordt aanbevolen scherpe snijkanten te gebruiken, lage snijsnelheden en hoge voedingen toe te passen in combinatie met veel koelvloeistof. Deze materialen hebben erg de neiging tot versmeren. Daarom mag de voeding nooit stopgezet worden, zolang het gereedschap in contact is met het werkstuk.

4.1.2 Alpha-Beta-Titanium

| | Ti - 6Al - 4V (zacht gegloeid) | Ti - 6Al - 4V (gehard) |
|-----------------------|--------------------------------|------------------------|
| UNS | R56400 | R56400 |
| Werkstofnummer | 3.7164 | 3.7164 |
| Treksterkte [N/mm²] | 950 | 1170 |
| 0.2% rekgrens [N/mm²] | 880 | 1100 |
| Brek rek [%] | 14 | 10 |
| Hardheid [HRC] | 36 | 41 |

Tabel 4.2: Voorbeelden van α-β-Ti soorten.



Figuur 4.1: Toepassing van Titanium in een complex onderdeel voor de vliegtuig-industrie.

De meest bekende Titaniumlegering is Ti-6Al-4V dit is een α+β-Titanium waarvan de eigenschappen door warmtebehandeling gevarieerd kunnen worden.

De warmtebehandeling bepaald het aandeel β-Titanium. Een te groot aandeel β benadeelt de lasbaarheid van het materiaal.

4.1.3 Beta-Titanium

| | Ti - 10V - 2Fe - 3Al |
|-----------------------|----------------------|
| UNS | R54610 |
| Werkstofnummer | - |
| Treksterkte [N/mm²] | 1170 |
| 0.2% rekgrens [N/mm²] | 1110 |
| Brek rek [%] | - |
| Hardheid [HRC] | 41 |

Tabel 4.3: Voorbeelden van β-Ti soorten.

De meeste β legeringen zijn goed omvormbaar en zijn ontwikkeld voor smeeddelen voor vliegtuig-frames. Deze legeringen zijn warmtehardbaar tot hoge treksterkte. Dit maakt de eindbewerking door middel van frezen of draaien zeer lastig.

| e.g. | Ti-64 | Ti-6246 | Ti-834 | Ni-based Superalloys | Titanium Aluminides |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|---------------------|
| Operating temperature (°C) | up to 230 | up to 430 | up to 730 | 1,230 - 730 | up to 730 |
| | | | | | |

Figuur 4.2: Toepassing van diverse Titaniumlegeringen in een vliegtuigturbine.

4.1.4 Gamma-Titanium-Aluminide legeringen

| | TiAl Alloy 48Al - 2Nb - 2Cr |
|------------------------------------|------------------------------------|
| UNS | - |
| Werkstofnummer | - |
| Treksterkte [N/mm ²] | 360-500 |
| 0.2% rekgrens [N/mm ²] | 275-380 |
| Brek rek [%] | 1-3 |
| Hardheid [HRC] | - |

Tabel 4.4: Voorbeelden van γ -Ti soorten.

Gamma Titanium-Aluminides γ -TiAl hebben excellente mechanische eigenschappen en oxidatie- en corrosie-weerstand bij temperaturen boven de 600° Celsius. γ -TiAl zijn daardoor in principe geschikt om Nikkel gebaseerde superlegeringen te vervangen in vliegtuigturbines. De eerste toepassingen voor deze titanium legering komen nu op de markt. Daardoor zijn er nog weinig gegevens over het materiaal openbaar. De lage vervormbaarheid van het materiaal maakt dat het extreem lastig verspaanbaar is.

4.2 VERSPAANBAARHEID

De verspaanbaarheid van Titanium is, in vergelijking met staal en roestvaststaal, slecht te noemen. Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door:

- > Slechte warmtegeleiding van Titanium
- > Chemische reacties van Titanium met het gereedschapsmateriaal bij hogere temperaturen.
- > Hoge sterkte, diverse legeringselementen worden opgenomen tussen de reguliere atoomstructuur en verhinderen daardoor het afschuiven van het materiaal.

Titanium behoudt bij hogere temperaturen zijn sterkte. Dit veroorzaakt hoge snijkrachten en dus veel warmteontwikkeling aan de snijkant. In combinatie met de slechte warmtegeleiding van het materiaal ontstaan er hoge temperaturen tot wel 1100°C op de contactvlakken. Bij deze hoge temperaturen kan door chemische reacties het gereedschap wegslijten. Botte snijkanten op hun beurt genereren weer meer warmte, waardoor de levensduur van de gereedschappen verder verkort wordt. Vanaf ca 600°C zal Titanium gaan reageren met de zuurstof uit de lucht. Er ontstaat dan een zuurstofverrijkte oxidelaag met een bros karakter; de zogenaamde alpha-case. Deze laag is een beetje te vergelijken met de witte laag, die bij het vonkverspanen van staal aangetroffen kan worden. Bij luchtvaarttoepassing is deze alpha-case absoluut verboden omdat deze laag een zeer hoge scheurinitiërende werking heeft.

Bij iets lagere temperaturen heeft Titanium de neiging vast te lassen aan de beitel. Niet voor niets bestonden de eerste coatings voor gereedschappen uit Titanium-legeringen met een goede hechting aan het beitelmetaal. Bij het afscheuren van de snijkantsopbouw wordt de bestaande coating ook gedeeltelijk afgescheurd, wat een versnelde slijtage tot gevolg heeft.

4.2.1 Aanbevelingen voor verspaning van Titanium

De verspaning van Titanium moeten voldoen aan de volgende voorwaarden:

- > Beperk de temperaturen op het snijvlak door beperking van de snijsnelheid.
- > Gebruik ongecoate snijgereedschappen van fijnkorrelig hardmetaal.
- > Kies voor positieve snijkantsgeometrie en een voldoende taaie snijkant.

5. SUPER-LEGERINGEN

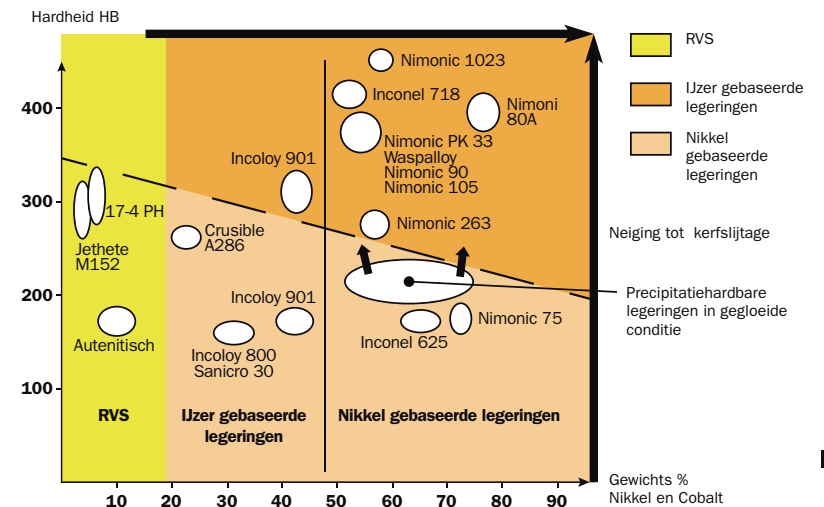
5.1 SAMENSTELLING EN INDELING

Superlegeringen kunnen op basis van hun basismateriaal onderscheiden worden in drie categorieën:

- > Op Nikkel (Ni) gebaseerde legeringen
- > Op IJzer (Fe) gebaseerde legeringen
- > Op Cobalt (Co) gebaseerde legeringen

De op IJzer gebaseerde superlegeringen zijn een doorontwikkeling van de RVS-soorten. In onderstaande figuur (figuur 5.1) is dit duidelijk geïllustreerd. Tot ca. 20% Nikkel wordt gesproken over Roestvast stalen, tot 50% Nikkel zijn de materialen IJzer gebaseerd, daarboven wordt Nikkel het belangrijkste legeringselement.

Tijdens verspanen gegenereerde warmte (maat voor plastische vervorming)



Figuur 5.1: Indeling van de superlegeringen naar gewichtspercentage Nikkel en Kobalt en de hardheid.

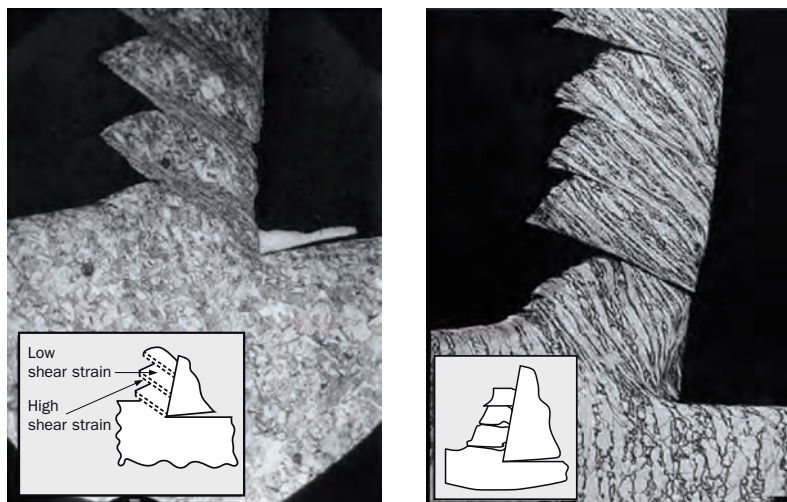
De belangrijkste legeringselementen voor superlegeringen zijn:

- > Nikkel (Ni), wat de materiaalstructuur stabiliseert, waardoor de materiaaleigenschappen ook bij hoge temperaturen intact blijven.
- > Kobalt (Co), Molybdeen (Mo) en Wolfraam (W) zorgen voor verbeterde sterkte bij hoge temperaturen.
- > Chroom (Cr), Aluminium (Al) en Silicium (Si) verbeteren de oxidatieweerstand.
- > Koolstof (C) ten slotte verbetert de kruipsterkte van het materiaal.

5.1.1 Bewerkbaarheid van superlegeringen

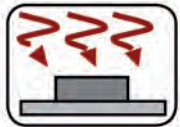
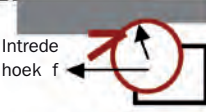


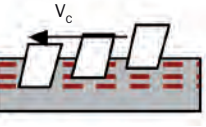
De bewerkbaarheid neemt binnen de groep superlegeringen af in de volgorde: IJzer gebaseerd, Nikkel gebaseerd, Kobalt gebaseerd.

Doordat de materialen ontwikkeld zijn voor hoge sterkte bij hoge temperaturen, verweken deze niet door de hoge temperatuur rond de snijkant. Hierdoor worden in de meeste gevallen gesegmenteerde spanen (figuur 5.2) gevormd. Naast de hoge statische belasting op de snijkant als gevolg van de hoge sterkte van deze materialen ontstaat nog een extra dynamische belasting op de snijkant door de gesegmenteerde spaanvorming. Deze dynamische belasting kan op zijn beurt trillingen van het gereedschap of van het werkstuk tot gevolg hebben, met een slecht oppervlak als resultaat.



Figuur 5.2: Gesegmenteerde spaanvorming bij het verspanen.

In tabel 5.1 worden algemene aanbeveling voor gereedschapskeuze en verspaningscondities voor het verspanen van superlegeringen gegeven.

| | |
|--|---|
|  <p>Zacht gloeien</p> | <p>Bewerk superlegeringen in de meest zachte staat, veel superlegeringen worden precipitatie-gehard. De precipitaten veroorzaken een overmatige abrasieve slijtage van het gereedschap.</p> |
|  <p>Beitel geometrie</p> | <p>Maak, waar mogelijk gebruik van een grote intrede hoek (ronde snijplaten). Gebruik een sterke basisgeometrie met een grote neusradius. Deze verdeelt de snijkracht over een langere snijkants-lengte en voorkomt geconcentreerde schade.</p> |
|  <p>Snij geometrie</p> | <p>Maak gebruik van een positive snijgeometrie om de snijkrachten zo veel mogelijk te beperken, versteviging van het werkstukmateriaal en snijkantsopbouw te voorkomen. Gebruik voldoende taaie snijkanten om de dynamische snijkantsbelasting te kunnen weerstaan.</p> |
|  <p>Stijve machine</p> | <p>Bij voldoende machine- en werkstuk-stabiliteit kan overwogen worden om keramische snijplaten te gebruiken. Gebruik een stijve opspanning, voorkom doorbuigen en trillingen van het werkstuk.</p> |
|  <p>$ap_1 \neq ap_2 \neq ap_3$</p> | <p>Gebruik variable snededieptes als meerdere snedes noodzakelijk zijn. Dit voorkomt kerslijtage.</p> |

Tabel 5.1: Algemene aanbevelingen rond gereedschapskeuze voor het verspanen van superlegeringen.

In de volgende paragrafen zullen de diverse superlegeringen in meer detail besproken worden.

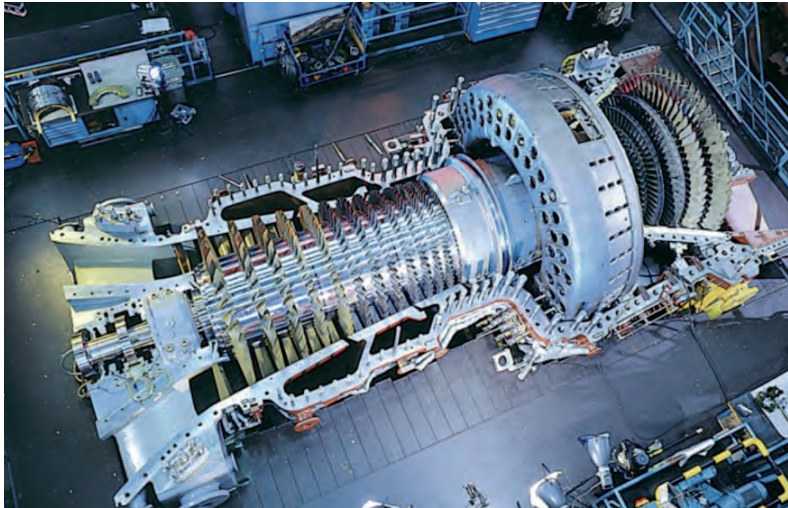
5.2 IJZER GEBASEERDE SUPERLEGERINGEN

IJzer gebaseerde superlegeringen zijn eigenlijk een doorontwikkeling van austenitische roestvast stalen. Binnen het geheel van de superlegeringen hebben de IJzer gebaseerde superlegeringen de laagste sterkte-eigenschappen bij verhoogde temperatuur. Tot de bekendste IJzer gebaseerde superlegeringen behoren: Incoloy 909, Greek Ascolloy and A286.

| Handelsbenaming | Incoloy Alloy 909 | Greek Ascoloy | A286 |
|-----------------------|-------------------|---------------|--------|
| UNS | N19909 | S41800 | S66286 |
| Werkstofnummer | - | - | 1.4980 |
| Treksterkte [N/mm²] | 130 | 965 | 620 |
| 0.2% rekgrens [N/mm²] | 114 | 760 | 275 |
| Breuk rek [%] | 15 | 15 | 40 |
| Hardheid [HB] | - | - | - |

Tabel 5.1: Voorbeelden van IJzer gebaseerde superlegeringen.

Uit de tabel is al op te maken dat Greek Ascolloy en A286 vanuit de UNS systematiek beschouwd worden als een roestvaststaal en dus een S-nummer hebben. Vanuit de hoge-temperatuur-eigenschappen wordt het door veel leveranciers onder de superlegeringen gerekend. A286 is extreem ductiel, daarom wordt aangeraden het materiaal niet in de zachtgegloeide toestand, maar in de precipitatie geharde toestand te bewerken. De bewerkingseigenschappen zijn voor deze legeringen te vergelijken met roestvast staal, dus gebruik lage voedingssnelheden en scherpe positieve snijkanten.



Figuur 5.3: Toepassing van superlegeringen in de turbineschoepen van een stationaire stoomturbine.

5.3 NIKKEL GEBASEERDE SUPERLEGERINGEN

Nikkel-gebaseerde superlegeringen worden het meest toegepast. Een vliegtuigmotor bijvoorbeeld bestaat voor meer dan 50 gewichtsprocenten uit Nikkel gebaseerde superlegeringen. De Nikkel gebaseerde superlegeringen worden op hun beurt weer onderverdeeld in:
> Pure Nikkel legeringen
> Nikkel-Koper legeringen
> Nikkel-Chroom legeringen
In de volgende paragrafen worden typische voorbeelden van deze drie legeringen beschreven.

5.3.1 Commercieel puur Nikkel legeringen

Alloy 200 en Alloy 201 bestaan beiden voor 99.6% uit puur Nikkel (Commercially Pure: CP Nikkel). Deze legeringen hebben goede mechanische eigenschappen, een goede corrosie weerstand en bijzonder goede kerfslagwaarden.

| Handelsbenaming | Alloy 200 Nickel 200 | Alloy 201 Nickel 201 |
|-----------------------|----------------------|----------------------|
| UNS | N02200 | N02201 |
| Werkstofnummer | 2.4060 / 2.4066 | 2.4061 / 2.4068 |
| Treksterkte [N/mm²] | 503 | 403 |
| 0.2% rekgrens [N/mm²] | 186 | 103 |
| Breuk rek [%] | 30 | 50 |
| Hardheid [HB] | 109 | 90-120 |

Tabel 5.2: Voorbeelden van Nikkel gebaseerde superlegeringen.

De samenstelling van Alloy 201 is na genoeg gelijk aan die van Alloy 200. Maar Alloy 201 heeft een lager koolstof gehalte om brosheid te voorkomen bij temperaturen boven de 315°C. Alloy 200 kan daarom worden toegepast tot ca 315°C, terwijl Alloy 201 tot 677°C kan worden toegepast. In de praktijk wordt er dubbel gecertificeerd materiaal op de markt aangeboden Alloy 200/201, wat voldoet aan beide normen.



Figuur 5.4: Uitlaatgasturbine voor automotive toepassingen van Nikkel gebaseerde superlegering Inconel 713C.

Toepassingen van Alloy 200 en 201 worden gevonden in procesinstallaties, vooral in de voedselindustrie, synthetische fibers en alkali, chemische opslagtanks, elektronische onderdelen en luchtvaartonderdelen. Alloy 201 is bijzonder goed geschikt voor koud vormen van onderdelen. Door het lagere koolstof gehalte heeft het ook een lagere hardheid dan Alloy 200. Alloy 201 heeft de voorkeur bij hogere temperatuur toepassingen (boven de 315°C). De bewerkbaarheid van Alloy 200 en 201 is onderling vergelijkbaar: Om opbouwen van de snijkant te voorkomen, dient het snijgereedschap een positieve snijkantshoek te hebben van 40-45°. De bewerkbaarheid van koudgetrokken of getrokken en spanningsarm-gegloeid materiaal is beter dan die van gegloeid materiaal.

5.3.2 Nikkel-koper legeringen

Als typische materialen binnen de Nikkel-koper legeringen worden de Monel legeringen hier genoemd.

| Handelsbenaming | Alloy 400 Monel 400® | Alloy K- 500 Monel K- 500® |
|-----------------------|----------------------|----------------------------|
| UNS | N04400 | N05500 |
| Werkstofnummer | 2.4360/2.4361 | 2.4375 |
| Treksterkte [N/mm²] | 517 - 620 | 621 - 758 |
| 0.2% rekgrens [N/mm²] | 172 - 345 | 276 - 414 |
| Breuk rek [%] | 35 - 60 | 25 - 45 |
| Hardheid [HB] | 110 - 149 | 140 - 185 |

Tabel 5.3: Voorbeelden van Nikkel-koper gebaseerde superlegeringen.

Alloy 400 heeft een hoge sterkte over een breed temperatuurbereik, daarnaast heeft het een goede corrosiebestendigheid in veel corrosieve omgevingen. Alloy 400 heeft zeer hoge kerfslagwaarden. Alloy K-500 heeft een gelijkwaardige corrosiebestendigheid t.o.v. alloy 400 echter met beduidend betere mechanische eigenschappen door de toevoeging van Aluminium en Titaan.

Toepassingen van Alloy 400 zijn: afsluiters, pomp assen, schroefassen, studbolts, procesinstallaties voor o.a diesel, petroleum, boilers en warmtewisselaars. Toepassingen van Alloy K-500 zijn te vinden in de hoger mechanisch belaste onderdelen zoals: kettingen en kabels, pomponderdelen, afsluiters, olieboorgereedschap en mengers voor de papier- en de papierpulp-industrie.

Alloy 400 kan met de algemeen bestaande snijgereedschappen goed worden bewerkt. Zeker in een spanningsarmgegloeide toestand laat het materiaal zich goed bewerken. Het bewerken van Alloy K500 gaat het beste in gegloeide conditie. In age-hardened conditie kan men het materiaal bewerken tot net voor de eindmaat en na harden bewerken op eindmaat. In verband met de hoge optredende krachten en grote warmteontwikkeling bij het bewerken in geharde toestand, dient het te verspanen volume geminimaliseerd te worden door de voorbewerking en semifinish-bewerking in ongeharde toestand uit te voeren.

5.3.3 Nikkel-Chroom legeringen

De bekende Inconel 6xx legeringen behoren tot de Nikkel-Chroom superlegeringen.

| Handelsbenaming | Alloy 600 Inconel 600® | Alloy 601 Inconel 601® | Alloy 625 Inconel 625® |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| UNS | N06600 | N06601 | N06625 |
| Werkstofnummer | 2.4816 | 2.4851 | 2.4856 |
| Treksterkte [N/mm²] | 550 - 690 | 550 - 790 | 827 - 1034 |
| 0.2% rekgrens [N/mm²] | 205 - 345 | 205 - 415 | 414 - 655 |
| Breuk rek [%] | 35 - 55 | 40 - 70 | 60 - 40 |
| Hardheid [HB] | 65 - 95 | 60 - 80 | 145 - 220 |

Tabel 5.4 Voorbeelden van Nikkel gebaseerde superlegeringen.

Alloy 600 is een Nikkel-Chroom legering met goede bestendigheid tegen corrosie, hoge temperaturen en hoge sterkte. Alloy 600 kan ook worden toegepast voor cryogene installaties maar ook voor temperaturen tot 1095°C. Voor nucleaire toepassingen is er een speciale Alloy 600 kwaliteit ontwikkeld nl. Alloy 600T. Alloy 601 is een Nikkel-Chroom-IJzer legering met goede mechanische eigenschappen, goede bestendigheid tegen corrosie en hoge temperaturen. Alloy 625 is een Nikkel-Chroom legering met betere mechanische eigenschappen dan 600/6001. Het heeft zeer goede corrosiebestendigheid, ook in zeewater, en is goed lasbaar.

Alloy 600 wordt onder andere toegepast in ovenonderdelen voor chemische en voedselprocessing-apparatuur, nucleaire toepassingen, electrodes van bougie's, turbine-afdichtingen en condensors. Alloy 601 wordt toegepast in thermische procesapparatuur, luchtvoorverwarmers, uitlaatsystemen voor diesel motoren en verbrandingskamers. Alloy 625 kan gevonden worden in maritieme omgevingen: Staalkabels, subsea connectors, afdichtingen, schroefbladen en subsea belows. Het temperatuurtoepassingsgebied loopt van cryogeen tot 982°C.



Figuur 5.5: Toepassing van Inconel uitlaatkleppen voor high performance verbrandingsmotoren in de racerij.

De bewerkbaarheid van Alloy 600 is vergelijkbaar met die van gewone RVS-soorten en ligt tussen RVS AISI303 en RVS AISI316. Ook Alloy 601 is goed bewerkbaar, in het bijzonder in de oplossingsgegloeide toestand.

Alloy 625 is volledig austenitisch en de bewerkbaarheid is vergelijkbaar met austenitische RVS-soorten. Start met lage snijnsnelheden en scherpe snijplaten met een positieve snijhoek.

5.3.4 Algemene bewerkbaarheid van Nikkel gebaseerde legeringen

Superlegeringen zijn uitgezocht c.q. ontwikkeld op hun hoge sterkte bij hoge temperaturen. Deze materialen vertonen dus geen hardheidsverlaging onder invloed van de snijtemperatuur, zoals bijvoorbeeld wel het geval is bij gewone staalsoorten.

Bij het verspanen van superlegeringen spelen drie elkaar versterkende mechanismen (mechanische, thermische en kerf belasting) een rol.

Deze zorgen voor excessieve slijtage van het gereedschap:

- > Mechanische belasting: Door het uitblijven van het verwekingseffect is de druk op de snijkant significant hoger bij het verspanen van superlegeringen, wat kan leiden tot snijkantsbreuk, chipping of vervorming van de snijkant.
- > Thermische belasting: Door de slechte thermische geleidingseigenschappen van superlegeringen zal de temperatuur van de snijkant extra hoog oplopen.
- > Kerf werking: Voor het spaanvlak uit loopt een deformatiefront waar het materiaal niet gesneden, maar wel bijvend vervormd wordt. Deze vervorming veroorzaakt tevens een versteviging van het werkstukmateriaal aan het oppervlak. Een volgende snedepassage zal daardoor op snedediepteniveau kerfslijtage (notch-wear) veroorzaken aan het snijgereedschap. In het ongunstigste geval is de gehele snedediepte verstevigd waardoor extreme gereedschapsslijtage optreedt. Hardheidsverhogingen van 34 HRC voor de bewerking naar 45 HRC na bewerking zijn niet ongewoon.

De aanbevelingen voor het verspanen van Nikkel gebaseerde superlegeringen zijn zonder uitzondering uit op het voorkomen of minimaliseren van de drie bovengenoemde slijtage mechanismen.

- > Gebruik PVD gecoate snijkanten met scherpe, positieve geometrie: Dit verlaagt de druk op de snijkant en verlaagt de kans op snijkantsvervorming en breuk.
- > Gebruik hoge snededieptes (single-pass operations): dit voorkomt kerfslijtage en minimaliseert het deformatie-hardingeffect.
- > Gebruik middelmatige snijnsnelheden: Warmte krijgt meer tijd om weg te vloeien en voorkomt zo excessief hoge temperaturen op het snijvlak. Gebruik relatief hoge voedingen per tand: grote spaandoorsnedes verlagen de benodigde energie per cm³ verspaand volume.
- > Gebruik hogedrukkoeling: Dit houdt de temperatuur in de snijzone zo laag mogelijk.

5.4 KOBALT GEBASEERDE SUPERLEGERINGEN

Kobalt gebaseerde superlegeringen hebben bij hoge temperaturen een nog betere corossieweerstand dan de op Nikkel gebaseerde legeringen.

Kobalt is echter een duur materiaal, waardoor de toepassing van Kobalt gebaseerde legeringen beperkt is.

Toepassingen zijn te vinden in de heetste delen van vliegtuigturbines en, vanwege hun excelente corrosiebestendigheid, in componenten voor de nucleaire en medische industrie.

Bekende materiaaltypes zijn:

| | Haynes 25 | Stellite 21 | Stellite 31 |
|------------------------------------|-----------|-------------|-------------|
| UNS | R30605 | - | R3031 |
| Werkstofnummer | - | - | - |
| Treksterkte [N/mm ²] | 1005 | 710 | 740 |
| 0.2% rekgrens [N/mm ²] | 475 | 565 | 430 |
| Brek rek [%] | 51 | 9 | 10 |
| Hardheid [HRC] | 24 | 27 - 40 | 20 - 35 |

Tabel 5.5: Voorbeelden van Kobalt gebaseerde superlegeringen.

De bewerkbaarheid van Kobalt gebaseerde legeringen is laag. Voor een aantal legeringen wordt aangeraden deze in de precipitatiegeharde toestand te bewerken. In de zachte toestand treedt te veel 'work-hardening' op om tot een goed resultaat te komen.

6. KRACHTEN EN VERMOGENS

Allereerst worden in dit hoofdstuk de proceskrachten als gevolg van het snijproces onder de loupe genomen. Het krachtverloop zal worden gevisualiseerd met door TNO ontwikkelde software.

6.1 HET BEGRIIP SPECIFIEKE SNIJKRACHT

Om snijprocessen onderling te kunnen vergelijken is in de verspaningstheorie het begrip specifiek snijvermogen ingevoerd.

$$\text{specifiek snijvermogen} = \frac{\text{opgenomen vermogen}}{\text{versaande volume materiaal per tijd}}$$

Een materiaal met een hoog specifiek snijvermogen vraagt dus meer vermogen om een bepaald volume materiaal te kunnen verspanen, dan een materiaal met een laag specifiek snijvermogen.

Aangezien

$$\begin{aligned} \text{opgenomen vermogen} &= \text{snijkracht} \cdot \text{snijnsnelheid} \\ \text{versaand volume per tijd} &= \text{spaandoorsnede} \cdot \text{snijnsnelheid} \end{aligned}$$

volgt dat het specifiek snijvermogen gelijk is aan de specifieke snijkracht:

$$\text{specifiek snijvermogen} = \frac{\text{Snijkracht}}{\text{spaandoorsnede}} = \text{specifieke snijkracht}$$

Uitgebreid experimenteel onderzoek heeft echter aangetoond dat deze eerste eenvoudige benadering niet voldoende recht doet aan de werkelijkheid.

Zo blijkt de kracht bij toenemende spaandikte minder snel toe te nemen: een tweemaal zo grote voeding per tand (=spaandikte) geeft dus minder dan tweemaal zoveel kracht. Bij voldoende machinestabiliteit hebben grotere voedingen per tand de voorkeur.

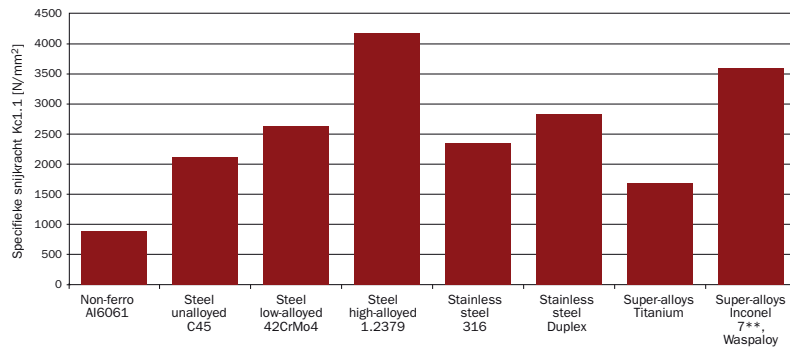
Bij afnemende spaandiktes neemt de kracht nagenoeg niet verder af doordat de wrijving van het vrijloopvlak een belangrijke rol gaat spelen.

Zoals hierboven beschreven valt de snijnsnelheid weg uit de formules voor de specifieke snijkracht. De snijkracht wordt dus bepaald door de voeding per tand en niet door de snijnsnelheid of het toerental van de machine.



Voor gewone materialen, zoals Aluminium- en IJzer-legeringen is dit voor een groot snijnelheidsgebied inderdaad het geval. Bij moeilijk verspaanbare materialen geldt dit niet, omdat het verloop van het snijproces aan de beitelpunt zeer sterk afhangt van de lokale condities zoals temperatuur- en spanningsverdeling in en rond het snijfront. Andere lokale condities leiden tot geheel andere benodigde vermogens. Door leveranciers verstrekte gegevens gelden dus uitsluitend als richtlijn in de aanbevolen parameter-range.

Een voorbeeld voor de typische specifieke snijkrachtswaarden voor diverse materialen bij een snedendoorsnede van $1 \times 1 \text{ mm}^2$ is in Figuur 6.1 weergegeven.



Figuur 6.1: Specifieke snijkracht $K_{c1.1}$ voor diverse werkstukmaterialen.

In figuur 6.1 is te zien dat de specifieke snijkrachten voor moeilijk bewerkbare materialen wel hoog zijn, maar niet de verschillen tussen makkelijk en moeilijk bewerkbare materialen kunnen verklaren. Veel moeilijk bewerkbare materialen hebben echter een beperkte warmtegeleiding. Hierdoor blijft veel warmte in de snijzone, wat een hoge thermische belasting op de snijkanten geeft. Deze thermische belasting resulteert in versnelde slijtage van het gereedschap.

6.2 SNIJVERMOGEN

Het snijvermogen is gelijk aan:

$$\text{snijvermogen} = \text{snijkracht} \cdot \text{snijnsnelheid}$$

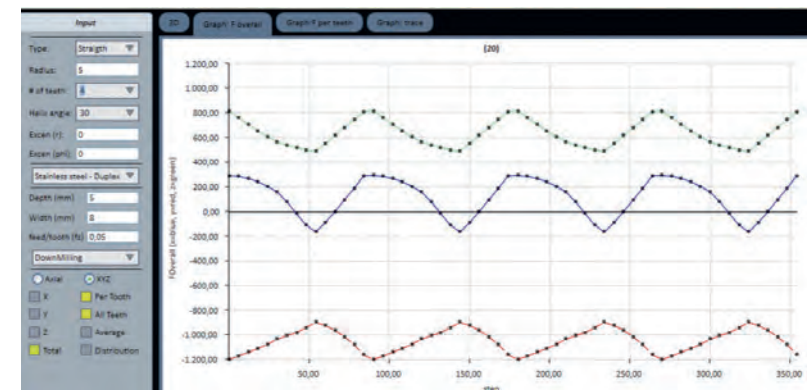
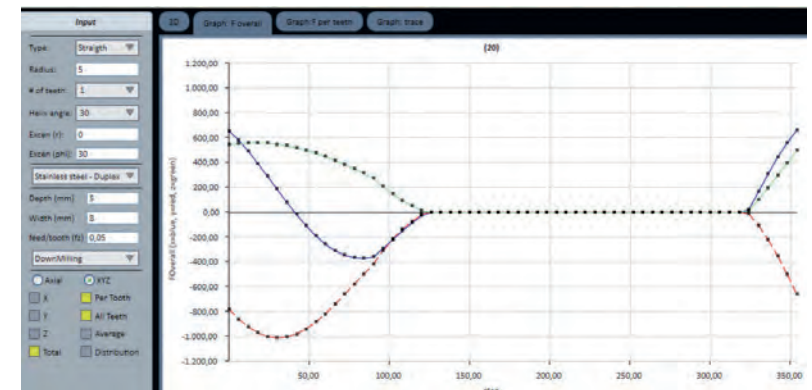
In de vorige paragraaf werd aangetoond dat de snijkracht onafhankelijk was van de snijnsnelheid. Het snijvermogen neemt echter wel lineair toe met de snijnsnelheid. Hogere toerentallen leiden dus niet zozeer tot grotere krachten, maar wel tot hogere vermogenopname. Deze hogere vermogens beïnvloeden in het bijzonder de 'warmte-huishouding' in het gereedschap en het werkstuk. Veel hittebestendige werkstukmaterialen kunnen vanuit hun toepassingsgebied deze hogere warmtebelasting prima aan. Men moet er echter op bedacht zijn dat gereedschappen en hun coatings hier minder bestand tegen zullen zijn.

6.3 KEUZE SNIJGEREEDSCHAP OP BASIS VAN KRACHTEN

Door TNO is software ontwikkeld om het krachterspel tijdens het frezen te kunnen visualiseren. Hiermee kan globaal het effect van een aantal factoren, zoals aantal snijkanten, excentriciteit en helixhoek gevisualiseerd worden.

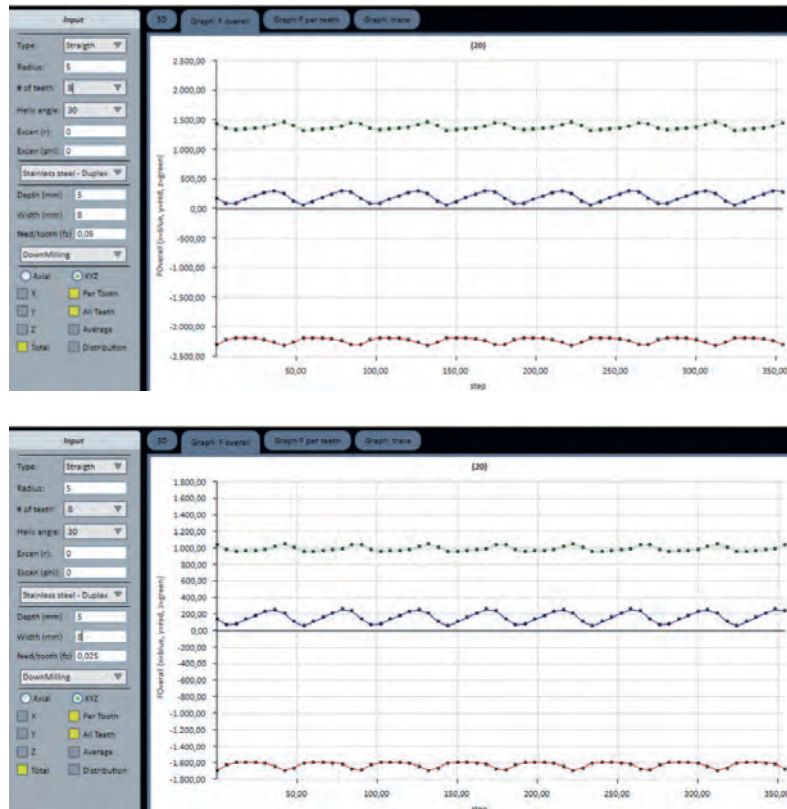
6.3.1 Aantal snijkanten

Bij het frezen met volledige freesbreedte (slotting) varieert de snededikte van 0 bij de intrede naar het maximum en weer terug naar 0. Een enkele snijkant in aangrijping geeft daarom een variërende snijkracht (figuur 6.2a). Deze variatie kan bij hoge snijkrachten leiden tot een variërende uitbuiging van de frees en daardoor aanleiding zijn tot trillingen.



Figuur 6.2: Snijkrachtsvariatie bij gebruik van 1 (a) en 4 (b) snijkanten.

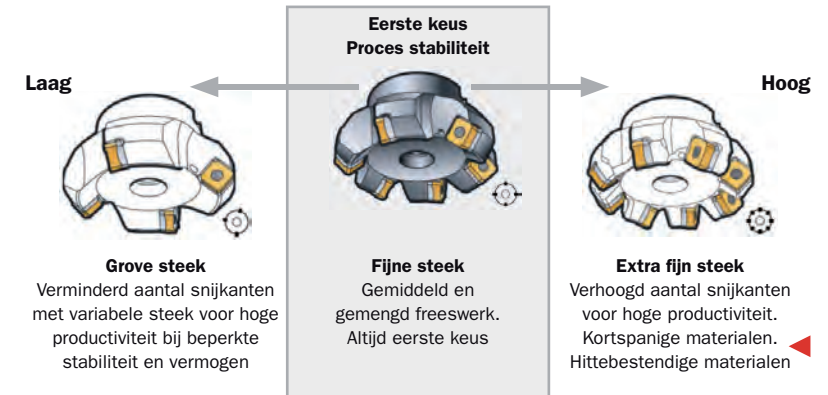
Een toenemend aantal snijtanden zal leiden tot vermindering van de variatie van de snijkraft, te zien in figuur 6.3 a en b, waarin identieke snijcondities voor 4 en 8 tanden gevisualiseerd zijn.



Figuur 6.3: a) Freeskraftvariatie met 8 tanden; b) 8 tanden halve voeding per tand.

Doordat meer tanden tegelijkertijd in aangrijping zijn, komt het gemiddelde krachtniveau wel hoger te liggen. Om het gemiddelde krachtniveau en het gevraagde vermogen te reduceren kan bij meer tanden de voeding per tand gereduceerd worden, waarbij toch het totaal verspaande volume identiek blijft (figuur 6.3: a en b).

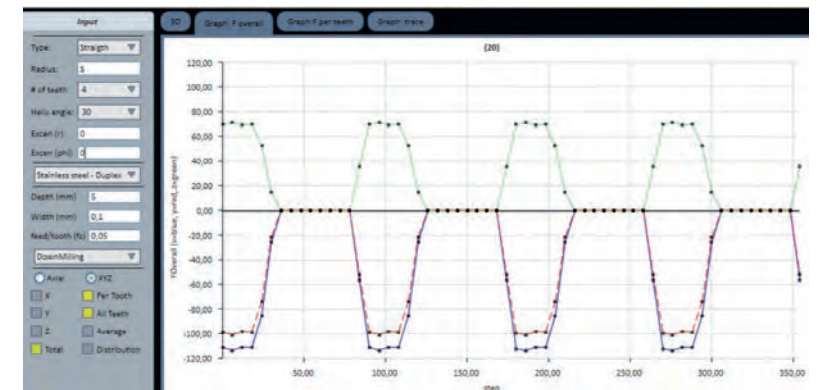
Veel tanden over de omtrek beperken de spaan-afvoermogelijkheden. Doordat bij moeilijk verspaanbare materialen de verspaningsvolumes lager liggen dan bij bijvoorbeeld Aluminium kunnen voor moeilijk verspaanbare materialen vaak zogenaamde 'extra-close-pitch' gereedschappen succesvol ingezet worden (figuur 6.4).



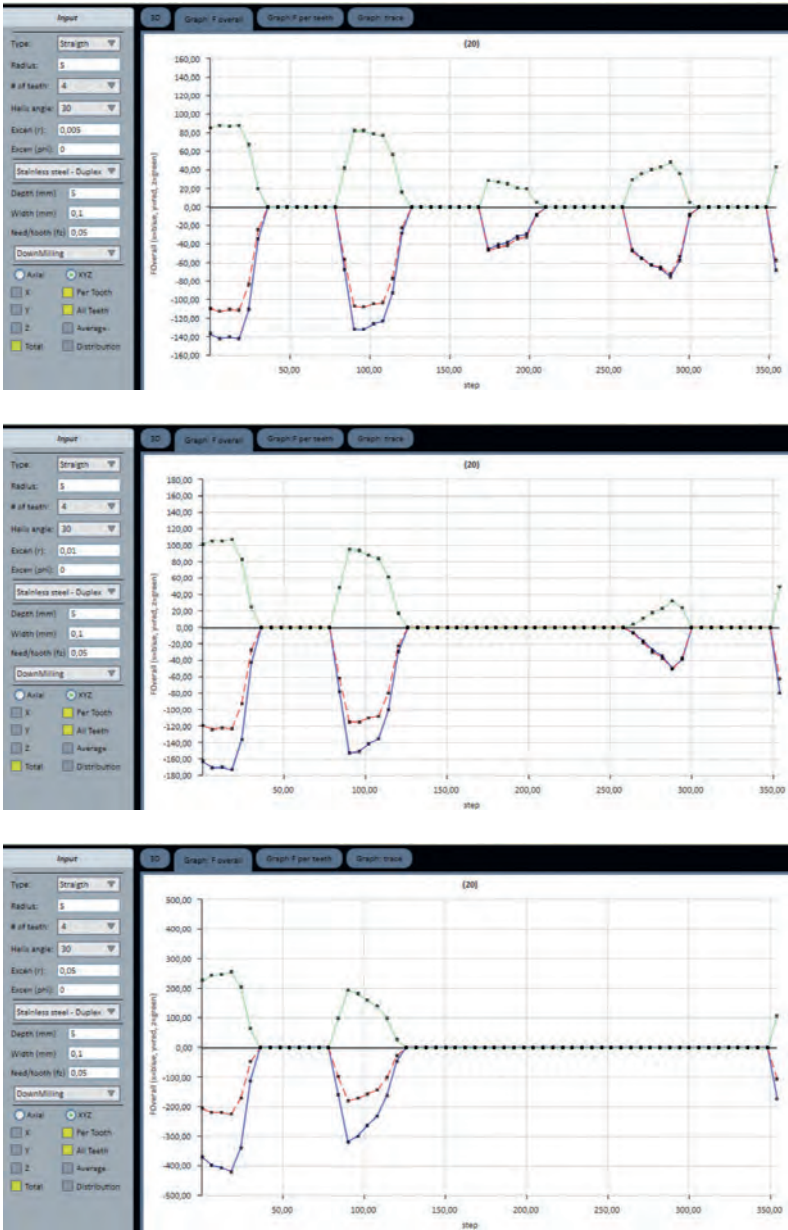
Figuur 6.4: Voorbeeld aanbeveling van Sandvik voor het gebruik van extra-close Pitch (steek) gereedschappen.

6.3.2 Rondloopnauwkeurigheid van gereedschapshouders

Het gebruik van fine-pitch gereedschap is in veel gevallen gekoppeld aan een lage voeding per tand. Zeker tijdens het finishen komen de voedingen in de buurt van de rondloopnauwkeurigheid van de frees. Excentriciteit van de frees kan er toe leiden dat slechts enkele tanden daadwerkelijk snijden. Dit geeft een onrustig freesbeeld, aanleiding tot trillingen en versnelde slijtage van de tanden die meer dan gemiddeld in aangrijping zijn. Een voorbeeld de invloed van het krachtsverloop onder invloed van rondloopnauwkeurigheid is weergegeven in figuur 6.5.



Figuur 6.5: Invloed van de rondloopnauwkeurigheid van een frees op de snijkraftsvariatie.



Figuur 6.5: Invloed van de rondlooptuigzaamheid van een frees op de snijkrachtingsvariatie.

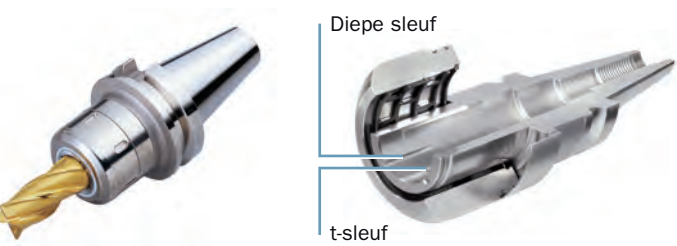
De rondlooptuigzaamheid van het gereedschap wordt voor een groot deel bepaald door het type gereedschapsopname. Het verdient echter aanbeveling ook de gereedschapsopname van de machine zelf van tijd tot tijd te controleren; lagervoorspanning, slijtage en botsingen kunnen ertoe leiden dat de rondloop van de machine in de loop van de tijd verslechtert.

In tabel 6.1 worden diverse veelgebruikte gereedschapsspanstelsystemen vergeleken op een aantal kenmerken.

| | naaldlager type milling chuck | krimp- houder | hydrodehn | weldon | DIN- spantang |
|----------------------|--|------------------|-----------|--------|------------------|
| rondloop [mm] | 0.005 | 0.003 | 0.003 | >0.02 | 0.01 - 0.03 |
| max. koppel [Nm] | 1000 | 500 | 250 | - | 180 |
| max. toerental [rpm] | 20000 | 40000 | 20000 | 8000 | max. 15000 |
| stijfheid | + | + | - | - | - |
| demping | + | 0 | + | - | - |
| slankheid | - | + | - | - | - |
| gebruiksgemak | + | - | - | + | + |

Tabel 6.1: Vergelijk tussen diverse veelgebruikte gereedschapsspanstelsystemen.

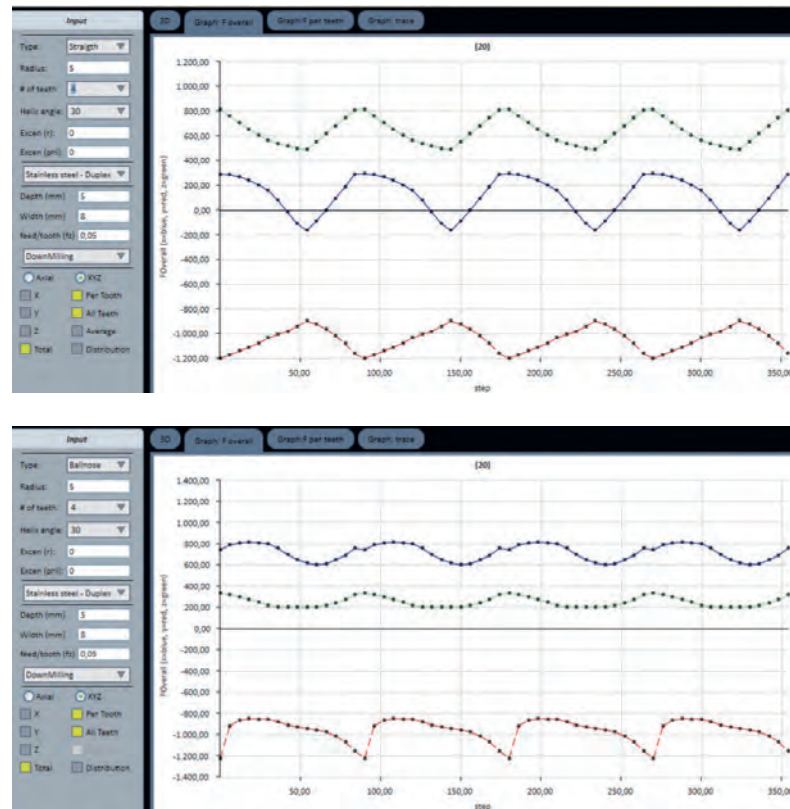
Specifiek voor moeilijk bewerkbare materialen valt de naaldlager milling chuck positief op door de redelijk goede rondloop in combinatie met een hoog overdraagbaar koppel en goede stijfheid en goede dempende eigenschappen.



Figuur 6.6: Naaldlager Milling chuck van NT Tool.

6.3.3 Vorm van de frees

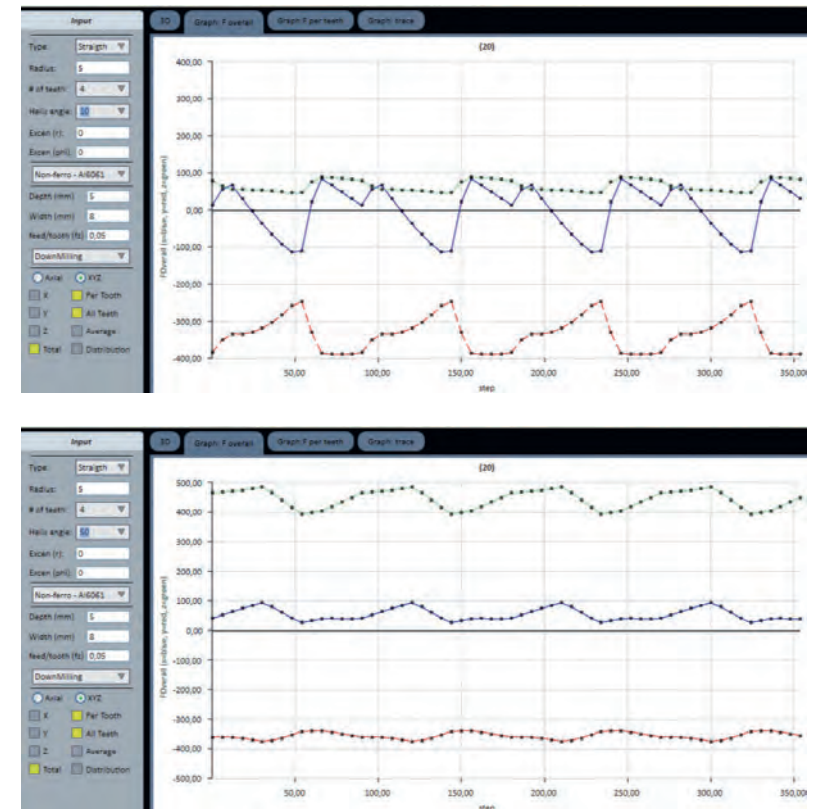
Door hun vorm laten rechte en bolkopfrezen bij verder gelijkblijvende parameters een ander krachtverloop zien. In figuur 6.7 worden deze twee frezen met elkaar vergeleken.



Figuur 6.7: Invloed van freesgeometrie op de freeskrachten.

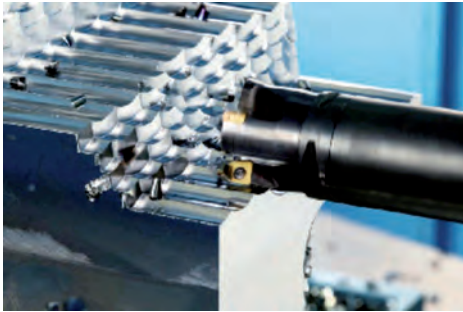
Wat opvalt is, dat de kracht in axiale (=Z) richting bij de rechte frees aanmerkelijk groter is dan bij de bolkopfrees. Dit wordt veroorzaakt door de spiraalhoek van de frees. Daarentegen is de kracht in voedingsrichting (=X) bij de bolkopfrees aanmerkelijk groter.

De machine en frees zullen in axiale richting veruit de grootste stijfheid hebben. Het is dus wenselijk de grootste krachten in de Z-richting te 'dirigeren' dit kan o.a. door gebruik te maken van rechte frezen in plaats van bolkopfrezen (zie figuur 6.7), door het kiezen van een frees met een grotere helix-hoek (zie figuur 6.8).



Figuur 6.8: Invloed van de helix-hoek op de snijkraftvariaties.

Of door het toepassen van specifieke bewerkingsstrategieën, zoals plunge-milling. Hierbij is de voeding van de frees axiaal gericht, zodat de grootste freeskracht in de Z-richting optreedt.



Figuur 6.9: Voorbeeld van plunge-milling proces.

6.4 STABILITEIT VAN MACHINES

6.4.1 Statische en dynamische stabiliteit

Stabiliteit van machines kan onderscheiden worden in statische en dynamische stabiliteit. Bij statische stabiliteit wordt een statische kracht aangebracht en gekeken hoever de machine uitbuigt onder invloed van deze kracht. De dynamische stabiliteit van een machine beschrijft het gedrag van de machine onder wisselende krachtbelasting. Dit is een complex samenspel tussen optredende krachten, de diverse machine-elementen en de de besturing. Kleine krachtwisselingen, die samenvallen met de natuurlijke trillingsvorm van een machine kunnen elkaar in de loop van de tijd zodanig versterken dat maatafwijkingen, extreme gereedschapsslijtage of gereedschapsbreuk kan optreden. Een bekend voorbeeld is het "chatter verschijnsel" waarbij een trilling, die geïntroduceerd wordt door de inslag van de aparte tanden van de frees, binnen enkele seconden uitgroeit tot een niveau waarvan de frees breekt. De dynamische machinestabiliteit is erg afhankelijk van de specifieke verspanings-situatie en is bijzonder lastig vooraf te bepalen. De statische machinestabiliteit daarentegen is relatief eenvoudig vast te stellen zoals uit de volgende paragrafen zal blijken.

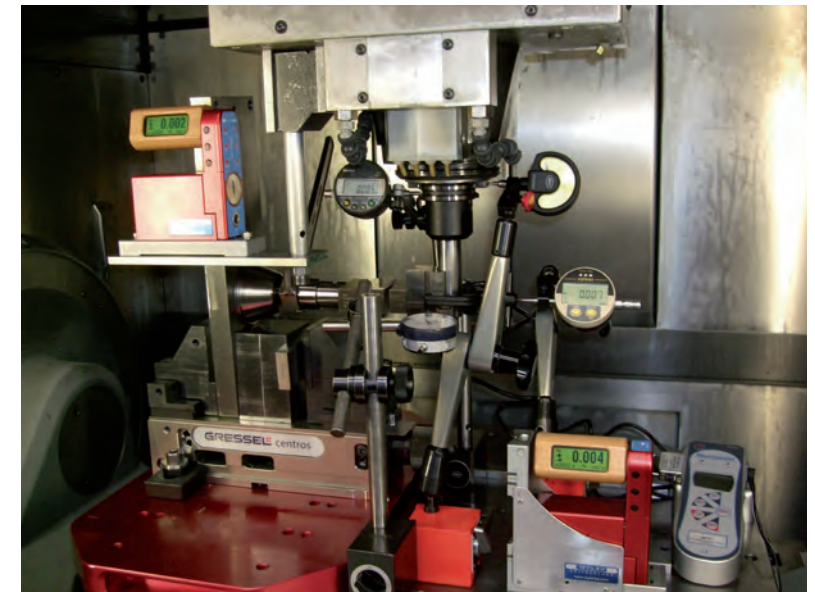
6.4.2 Bepalen van de statische machinestabiliteit

De statische machinestabiliteit is met eenvoudige hulpmiddelen te bepalen. Om een belastingssituatie te creëren overeenkomend met de belasting door het bewerkingsproces, wordt er een kracht aangebracht tussen de gereedschapsspil en de werkstukopspantafel. In de metingen in het kader van dit project is dit gedaan met behulp van een vijzel.

Door een 'drukdoos', een kracht-opnemer gebaseerd op rekstrooktechnologie, in serie met de vijzel op te nemen kan de kracht, die door de vijzel uitgeoefend wordt op de spil gemeten worden.

Door in dezelfde opstelling diverse meetklokken te bevestigen, bijv. tussen de tafel en de spilneus of tussen de spilkast en de spilneus kan de verplaatsing tussen deze twee elementen bepaald worden onder diverse belastingcondities.

Om na te kunnen gaan of er sprake is van een zuivere verplaatsing, of van verbuigen/kantelen van bepaalde machine-elementen zijn op diverse plaatsen waterpassen ingezet.



Figuur 6.10: Voorbeeld van een meetopstelling met vijzel, meetklokken en elektronische waterpassen.

Aan de volgende vier machines zijn statische stabiliteitsmetingen uitgevoerd:

- > Leadwell
- > Deckel Maho
- > Hermle C800V
- > Hermle C40U

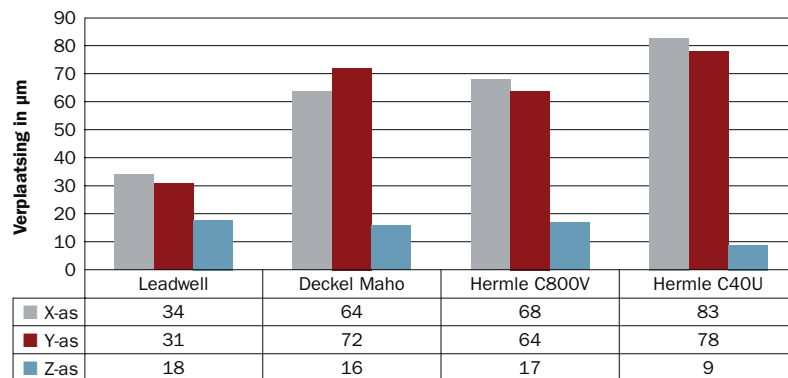
6.4.3 Overzicht van gemeten stabiliteitswaarde

Wat opvalt bij alle machines is, dat de relatie tussen kracht en verplaatsing netjes evenredig verloopt. Een verdubbeling van kracht geeft ook een verdubbeling van verplaatsing. Dit betekent dat in het gemeten krachtbereik de vervormingen elastisch zijn, en dat de machines vrijwel spelingsvrij zijn.

Verder blijkt dat in het X-Y vlak, het 'spantafel vlak', de verplaatsing richtings-onafhankelijk is. Een bepaalde kracht in X-richting respectievelijk in Y-richting leidt dus tot een even grote verplaatsing in X, danwel Y.

De Deckel Maho, Hermle C800V en de Hermle C40U zijn machines die gevoelsmatig in dezelfde stabiliteitsklasse vallen. De gemeten doorbuigingen wijken niet veel van elkaar af. In Figuur 6.11 zijn de uitbuiggegevens van diverse machines samengevat. De Leadwell machine heeft een veel kleinere doorbuiging in X en Y richting. Dit was ook te verwachten, omdat deze machine een stuk zwaarder uitgevoerd is dan de andere drie machines.

Verplaatsing bij $F = 1000 \text{ N}$



Figuur 6.11: Samenvatting uitbuiggegevens diverse machines.

Er is geprobeerd na te gaan welk machine-element verantwoordelijk is voor de meeste uitbuiging.

Voor de hand liggende kandidaten zijn:

Het gereedschap:

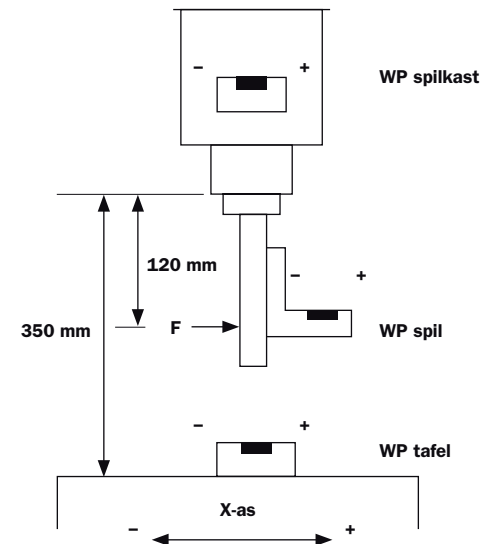
- > De opname van het gereedschap in de houder.
- > De opname van de houder in de conus.

De spil:

- > De verplaatsing van de spil-as in de lagering.
- > De buiging van de spil-as tussen de lagers
- > De verplaatsing van de lagers in de behuizing.

De machine:

- > De verplaatsing van de spilbehuizing.
- > De verplaatsing/kanteling van de opspantafel.

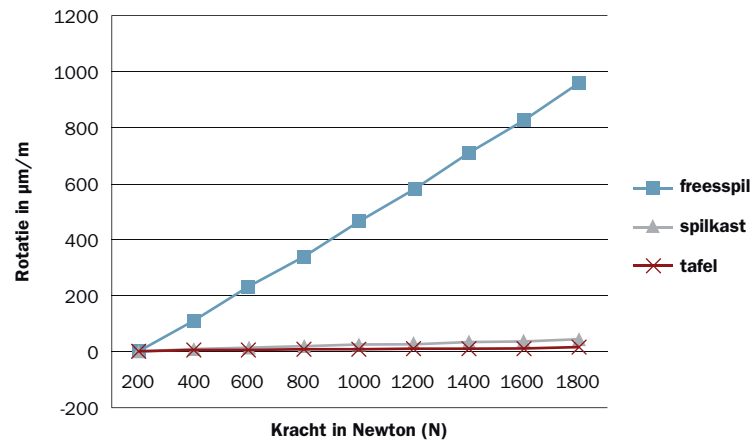


Figuur 6.12: Schematische weergave van de meting om het 'slapste' element uit de keten te bepalen.

Om hier een uitspraak over te doen is op drie plaatsen de hoekverdraaiing met een waterpas (WP) gemeten (zie figuur 6.12):

- > Op de spilkast
- > Op de meetdoorn
- > Op de tafel

Hermle C40U: Rotatiemetingen in X



Figuur 6.13: Voorbeeld van meetresultaat voor de rotatiemeting van een Hermle C40U

Uit de meetresultaten blijkt bij alle machines een opmerkelijke rotatie van de spil, bij verwaarloosbare rotaties van de spilkast en tafel. Het zijn dus niet zozeer de verplaatsingen en vervormingen in de sledes, die de stijfheid aan de gereedschap-tip bepalen, maar de rotatie van het hoofdspil in zijn lagering. Hierbij kan de conclusie getrokken worden dat de buiging van de spil in de lagering een allesbepalende invloed op de statische stijfheid van de machine heeft. Het is aan te bevelen om bij de overwegingen rond de aanschaf van een machine, op het punt van machinestijfheid, de stijfheid van de hoofdspil een grote rol te laten spelen.



7. GEREEDSCHAPS-KEUZE EN SNIJPARAMETERS

7.1 INFORMATIE

Op het gebied van verspaning en gereedschappen zijn grote hoeveelheden informatie via het internet toegankelijk, alhoewel wel geconstateerd moet worden dat deze informatie grotendeels in het Engels aanwezig is. Deze hoeveelheid informatie wil echter niet zeggen dat het keuzeproces hierdoor eenvoudiger geworden is.

Online tools om gereedschappen te selecteren beperken zich vaak tot het maken van een correcte selectie van individuele onderdelen van een samengesteld gereedschap. Vooral een ervaren gebruiker, die op zoek is naar een variant van een bekende combinatie, bijvoorbeeld met een grotere diameter of een grotere uitsteeklengte, kan hierdoor snel en efficiënt zoeken.

Om vanuit een verspaningsvraagstuk een optimaal gereedschap te kiezen is een lastigere opgave. Veel gereedschapsfabrikanten hebben naast de internet gebaseerde tools ook nog naslagwerken voorzien van vele toepassingsvoorbeelden. Uit deze informatie kan op hoofdlijnen gekozen worden welk gereedschapssysteem het beste aansluit bij het bedrijf. Keuze van een gereedschapssysteem legt vaak voor jaren een relatie met een leverancier vast. Het is nuttig om gereedschappen niet order-gedreven aan te schaffen, maar een systeemkeuze te maken en dit systeem orderafhankelijk uit te breiden.

In de volgende paragrafen wordt de gereedschap- en snijparameterkeuze door middel van een stappenplan toegelicht.

7.2 KEUZE PROCES

Het keuzeproces bestaat uit een drie-stappen plan, waarbij de uitgangssituatie een onderdeelontwerp is, wat bestaat uit geometrie, toleranties en materiaal-specificatie.

- > Opstellen van een globaal bewerkinsplan.
- > Detailleren van de gereedschapskeuze per bewerkinsstap uit het bewerkinsplan.
- > Kiezen van de snijcondities bij de gereedschappen.

In de volgende paragrafen worden deze drie stappen nader uitgewerkt.

7.2.1 Stap 1: Opstellen van het bewerkingsplan

Het bewerkingsplan bestaat uit een stappenplan met op hoofdlijnen het type bewerking (bijv. vlakfrezen, contourfrezen, sleuf-frezen), het soort bewerking (bijv. voorfrezen, semifinish-frezen, nafrezen) en welke productgeometrie het betreft. Een eerste indicatie van de benodigde machine (type, afmetingen en stabiliteit) en de globale opspanstrategie moeten aangegeven worden.

- > Voor producten die in serie geproduceerd gaan worden kunnen zachtgloe- en hardings-stappen in het bewerkingsplan ingevoegd worden. Voorbewerken in de zachtgeloide toestand heeft vanuit productiviteits-perspectief de voorkeur.
- > Voor enkelstuks productie weegt de toenemende logistieke complexiteit en langere doorlooptijd vaak niet op tegen het bewerken van het materiaal in de geharde eindconditie.

7.2.2 Stap 2: Per bewerkingsstap detailleren van de gereedschapskeuze


Voor draaibewerkingen moet een insert-geometrie, een insert-materiaal, een insert-coating en een insert-houder gekozen worden.

De geometrie volgt voor een groot gedeelte uit de te realiseren geometrie en het soort bewerking (voor-, semifinish-, of na-draaien). De optimale combinatie van insert-materiaal en insert-coating, samen ook wel de grade van de insert genoemd, kan per leverancier bepaald worden op basis van het werkstukmateriaal en de verspaningscondities (onderbroken snede/grote overhang). Instabiliteit vereist een taaiere 'grade' gereedschapsmateriaal.

De houder volgt uit de geometrie van het werkstuk.

Freesbewerkingen kunnen met wisselplaatgereedschap of met volhardmetaalfrezen uitgevoerd worden. Vaak zullen voor kleinere benodigde diameters (tot ca 15 mm) volhardmetaalfrezen ingezet worden. Voor grotere diameters kunnen wisselplaatgereedschappen toegepast worden. De beschikbaarheid van wisselplaatgereedschap voor kleinere diameters wordt echter steeds beter.

Vanuit de aanbevelingen van fabrikanten voor volhardmetaalfrezen en wisselplaatgereedschappen is op te maken dat de volhardmetaalfrezen algemener toepasbaar zijn dan wisselplaatfrezen. Zie als voorbeeld figuur 7.1.

| | | | | | | | |
|--|--------------------------|---------------------------|-----------|------------------|--------------|----------------|--------|
|  Prestatie | HPM | JHP992 JHP950 | JHP760 | JHP992 JHP950 | JHP490 | JHP750 | JHP170 |
| | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | | | | | | | |
| | JABRO-SOLID ² | JS553 & 554 (L) | | | | | |
| | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | | | | | | | |
| | | JS512, 513 & 514 (L & XL) | | | | | |
| ■ | | ■ | ■ | □ | □ | □ | |
| | Steel | Stainless steel | Cast Iron | Non-ferrous | Super-alloys | Hardened steel | |

Figuur 7.1: Inzet gebied van de volhardmetaalfrezen van Seco.

De gereedschapsfamilies JS553 en JS554 van Seco worden gepositioneerd als alleskunnners, die in elk materiaal toepasbaar zijn. Voor het High Performance bewerken van moeilijk verspaanbare materialen zijn de Seco freesfamilies JHP760 voor roestvaste stalen en JHP750 voor de superlegeringen geschikt. De keuze hangt dan grotendeels af van de productgeometrie die de benodigde lengte en diameter voorschrijft.

Ook andere gereedschapsleveranciers hebben overeenkomstige toepassingsgebieden voor hun volhardmetaalfrezen.

Voor het incidenteel verspanen van moeilijk verspaanbare materialen is het gebruik van de 'alleskunnners' een aantrekkelijk alternatief. De prestaties in termen van productiviteit en levensduur van deze frezen zullen echter wel achterblijven bij frezen die specifiek ontwikkeld zijn voor één materiaalcategorie.

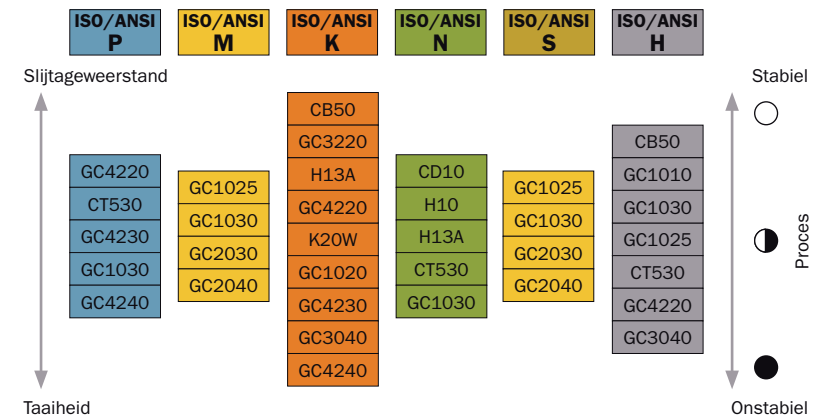
Keuze van freesgereedschap met wisselplaten is het meest gecompliceerd.

In principe moet een 'body', een insert-geometrie en een insert-grade geselecteerd worden.

Deze keuzes kunnen echter niet los van elkaar gemaakt worden. Inserts passen niet in elke body en elke insert-geometrie is niet in alle grades beschikbaar.

De documentatie van de leverancier leidt de gebruiker door het selectieproces heen. Doordat verschillende leveranciers verschillende routes bedacht hebben is het nuttig om eerst vertrouwd te raken met de selectiemethode van de leverancier. De ene leverancier start bij de grade, deze limiteert de insert-geometrie keuze en daarmee de te kiezen bodies.




Grades for frezen




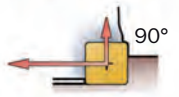

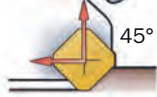


Figuur 7.2: Insert-grades gekoppeld aan werkstukmateriaal.

De andere leverancier begint juist bij de bodies, deze hebben een applicatiegebied (materiaal/ verspaningscondities), daarmee wordt vervolgens de keuze van de inserts en beschikbare grades ingeperkt.

Bij de keuze van een wisselplaatgereedschap spelen het aantal inserts over de omtrek (Engels: pitch) van de wisselplaatfrees en de geometrie van de snijkant een dominante rol. In tabel 7.1 en 7.2 zijn een aantal algemene richtlijnen weergegeven.

| Coarse pitch. Verminderd aantal snijkanten | Close pitch. Gemiddeld aantal snijkanten | Extra close pitch. Maximaal aantal snijkanten |
|---|---|--|
|  |  |  |
| Toepasbaar bij beperkte stabiliteit en beperkt vermogen | Algemeen toepasbaar. Eerste keus | Zeer productief onder stabiele snijcondities. Zeer geschikt voor hittebestendige superlegeringen |

Tabel 7.1: Keuze van het aantal snijkanten

| 90 graden | 45 graden | ronde inserts |
|--|--|--|
|   |   |   |
| Geschikt voor dunwandige producten, zwakke opspanning | Algemeen toepasbaar. Eerste keus. Hogere productiviteit doordat meer snijkantslengte in aangrijping is | Sterke snijkant. Algemeen toepasbaar. Maximale snijkantslengte in aangrijping. Zeer geschikt voor hittebestendige superlegeringen |

Tabel 7.2: Keuze snijkantsgeometrie.

Ook bij de gereedschapskeuze speelt het type opdracht een belangrijke rol. Voor repeterend werk kunnen specifieke wisselplaatgereedschappen voor de order gekocht worden. Bij enkelstuks of incidenteel werk zal met bestaande middelen gewerkt moeten worden. In beide gevallen heeft het voorkeur om samen met de gereedschapsleverancier ofwel een optimaal gereedschapspakket samen te stellen of een universeel toepasbare set gereedschappen, afgestemd op het beschikbare machinepark te definiëren. Een gereedschapsleverancier kan hier met zijn kennis meerwaarde leveren aan de verspaner.

7.2.3 Stap 3: Keuze van de verspaningsparameters

De snijparameters die gekozen moeten worden zijn:

Bij frezen:

- > Snijnsnelheid, die zich vertaalt in een toerental voor een bepaalde frees.
- > De voeding per tand, die met het aantal snijkanten over de omtrek van de frees de voeding per minuut bepaald.
- > De snedebreedte en -diepte die door het CAM pakket gebruikt worden om de snedeopdeling te berekenen.

Bij draaien:

- > De snijnsnelheid, die het toerental van het werkstuk bij een bepaalde diameter bepaald.
- > De voeding per omwenteling, die met het toerental de voeding per minuut bepaald.
- > De snedediepte die door het CAM pakket gebruikt wordt om de snedeopdeling te berekenen

Helaas kunnen de parameters niet onafhankelijk gekozen worden.

Gestart moet worden met de snijnsnelheidskeuze. De speelruimte bij moeilijk bewerkbare materialen is klein in vergelijking met de meer conventionele constructiematerialen. Een belangrijk punt is dat bij het verspanen van moeilijk bewerkbare materialen de snijnsnelheid aanmerkelijk lager moet liggen dan bij de gebruikelijke constructiematerialen in de orde van 50m/min voor Titanium en slechts 30 m/min voor Kobalt gebaseerde superlegeringen.

Vervolgens kunnen de snedebreedte en -diepte en voeding per tand in onderlinge afhankelijkheid gekozen worden.

De keuze voor deze parameters bepaalt enerzijds de productiviteit, anderzijds ook de optredende krachten. Afhankelijk van de stabiliteit van de machine, het gereedschap en de opspanning in combinatie met het beschikbare vermogen zullen er in een specifieke situatie praktische limieten optreden, die niet in algemene tabellen of rekenprogramma's te vinden zijn. Snijparameterwaarden van een leverancier zijn dus altijd slechts een richtlijn en dienen als startpunt voor eigen optimalisatie.

Probeer bij het verspanen van moeilijk bewerkbare materialen zo veel mogelijk snijkantslengte in aangrijping te krijgen. Voor frezen dus een grote snedediepte en geringe snedebreedte; hierdoor wordt de freesslijtage over een zo groot mogelijke snijkantslengte uitgesmeerd, wat de levensduur ten goede komt.

Het keuzeproces voor de parameters verloopt bij elke gereedschapsleverancier anders. Voor Sandvik Coromant worden bijvoorbeeld in de catalogus per combinatie van materiaaltype en toepasbare inserts voor drie maximale spaandiktes de bijbehorende snijnsnelheid opgegeven in een tabel. Zie tabel 7.3 voor een uittreksel uit deze tabellen. Twee snijnsnelheidswaarden worden gegeven. De eerste voor frezen met beperkte aangrijping (bovenste getallen in een cel in tabel 7.3) en frezen met grote aangrijping (onderste getallen in een cel tabel 7.3). Deze tabellen zijn onafhankelijk van het exacte gereedschap en het aantal snijkanten.

Door de oogharen kijkend kan hier snel het globale speelveld in snij snelheden voor een specifiek materiaal uit gelezen worden.

| CMC nr. | Materiaal | Insert-materiaal | | |
|---------|--|------------------------------|----------------------|----------------------|
| | | GC1025 | GC1030 | H13A |
| | | Maximale spaandikte hex [mm] | | |
| | | 0,5-0,15-0,2 | 0,05-0,15-0,2 | 0,1-0,15-0,2 |
| | | Snijnsnelheid vc [m/min] | | |
| 20.22 | Superlegering op Nikkelbasis, veredeld | 40-40-40 37-34-32 | 40-40-40 37-34-32 | 40-39-38 35-33-30 |
| 20.31 | superlegering op Kobaltbasis, gegloeid | 30-29-28 25-33-20 | 30-29-28 25-22-20 | 28-27-26 23-21-18 |
| 23.21 | Titanium α+β gegloeid | 65-65-65 60-55-50 | 65-65-65 60-55-50 | 55-55-55 50-45-45 |



Omstandigheden:

Vingerfreesen. Freesdiameter van 25 mm.
Freesbreedte 10 mm.



Omstandigheden:

Freess, diameter van 125 mm.
Gecentreerd over het werkstuk.
Freesbreedte 100 mm.

Tabel 7.3: Uittreksel uit freesparameters Sandvik – Coromant Catalogus 2011: de bovenste snij snelheden zijn een richtlijn voor frezen met beperkte aangrijping, de onderste snelheden gelden voor frezen met grote aangrijping.

Is de exacte freesgeometrie, gewenste snedebreedte, -diepte en voeding per tand bekend, dan kan via een internetapplicatie op de website van Sandvik eenvoudig een berekening voor deze specifieke frees gemaakt worden (zie figuur 7.3 voor een voorbeeld).

De aanbevelingen kunnen vergeleken worden met de gegevens van de machine. Zo kan gecontroleerd worden of de machine bij het geselecteerde toerental het benodigde vermogen en het benodigde moment kan leveren. Is dit niet het geval, dan kan door aanpassen van de voeding de spaandoorsnede verkleind worden, waardoor ook de optredende snijkracht lager wordt, en daarmee het gevraagde vermogen.

Verlagen van de snedediepte is eveneens een optie, maar hierdoor wordt minder snijkant ingezet. De consequentie is dat er meer snedes gemaakt moeten worden om eenzelfde volume materiaal te verwijderen. De slijtage wordt in dit geval geconcentreerd op een kleiner gedeelte van de snijkant, waardoor gereedschapskosten hoger zullen uitvallen.

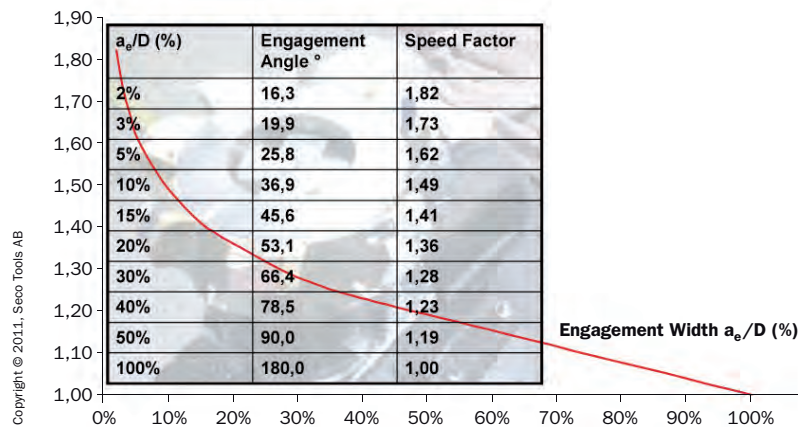
The screenshot shows the Sandvik Calculation Formulas application. The 'Workpiece material' section includes 'National standard' (CMC), 'Denomination' (20.22), and 'Coromant grades' (H10F). The 'Hardness' is set to 350 HB. The 'Parameters (choose either fz, hex or hm)' section includes 'Feed per cutting edge (fz)' (0.25 mm), 'Maximum chip thickness (hex)' (0.15 mm), 'Average chip thickness (hm)' (0.07 mm), 'Cutting diameter (Dc)' (125 mm), 'Inscribed circle (ic)' (10 mm), 'Number of effective edges (zc)' (4 pcs), 'Cutting depth (ap)' (1 mm), 'Working engagement (ae)' (100 mm), and 'Working engagement start (aei)' (12 mm). The 'Cutting data recommendation' section displays: 'Cutting speed (vc)' (30 m/min), 'Spindle speed (n)' (73 rpm), 'Feed speed (vf)' (73 mm/min), 'Cutting power for removal of chips (Pc)' (0.7 kW), 'Metal removal rate (Q)' (7 cm³/min), and 'Cutting torque (Mc)' (90 Nm). The interface includes a '<< Back' button, a 'Metric' radio button (selected), an 'Inch' radio button, and a 'Calculate' button.

Figuur 7.3: Voorbeeld van een ingevulde parameter-calculatie van Sandvik: Links staan de invoergegevens, rechts de uitvoer.

Seco hanteert voor de selectie van de verspaningsparameters een andere strategie. Een gegeven startwaarde dient met situatieafhankelijke correctiefactoren te worden aangepast.

Zo wordt bijvoorbeeld altijd de snijsnelheid vermeld voor een ‘full-slotting’ situatie. Voor gevallen waarbij de frees niet volledig in snede is, moet een speedfactor bepaald worden zie figuur 7.4. Uit de figuur is af te leiden dat voor finish-bewerkingen, waarbij de frees een geringe ingrijping heeft de snijsnelheid tot 1,8x gekozen kan worden.

$$\text{Speed Factor} = [\text{Actual Engagement Angle } (^{\circ}) / 180 ^{\circ}]^{0.25}$$



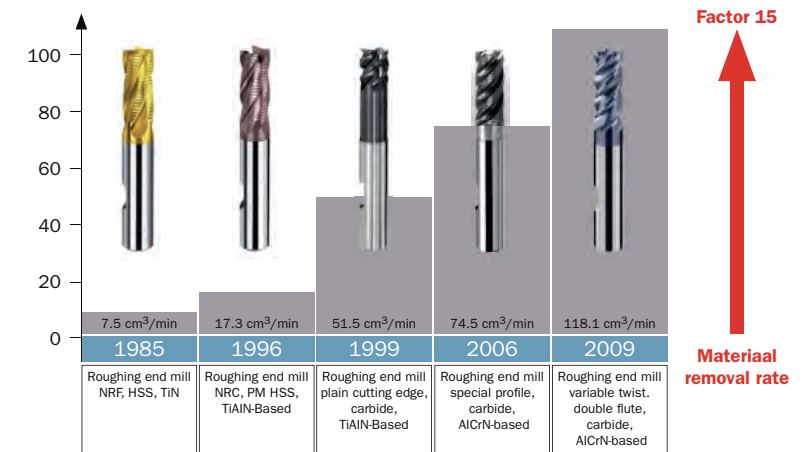
Figuur 7.4: Bepaling van de speed factor.

Ook Seco heeft, net als de andere grote gereedschapsleveranciers software en internetapplicaties beschikbaar om het keuzeproces te ondersteunen.

7.3 GEREEDSCHAPS-COATINGS

Veel gereedschappen worden voorzien van coatings. Ondanks hun geringe dikte van enkele tientallen nanometers tot maximaal enkele micrometers hebben ze een niet te onderschatten invloed op de snijeigenschappen en standtijden van het gereedschap (figuur 7.5).

Materiaal removal rate [cm³/min]



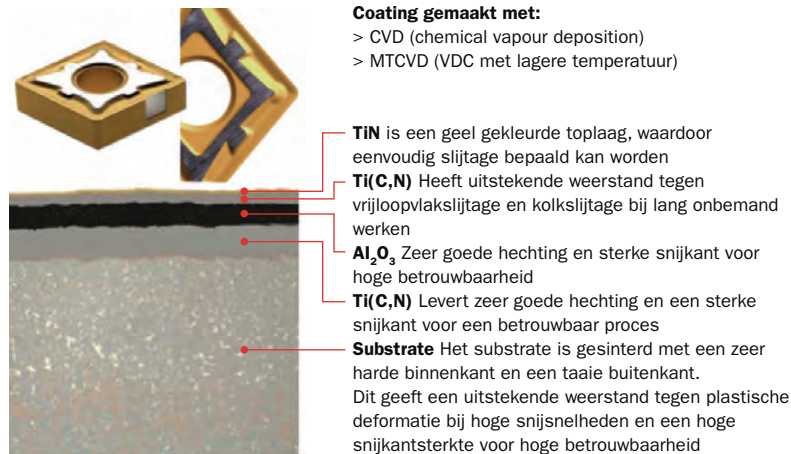
Tool diameter 10 mm, Workpiece steel 800 - 1000 N/mm² (Source Fraisa SA)

Figuur 7.5: Toename van de materiaalfname per tijd (material removal rate) in de afgelopen jaren.

Coatings worden toegepast om:

- > slijtagebestendigheid van de beitel te verhogen,
- > chemische inertie van de beitel te verbeteren,
- > als hittebarrière om temperatuurwisselingen in de beitel door een onderbroken snede te verminderen,
- > de wrijvingsweerstand tussen beitel en spaan te verlagen,
- > de aanhechting van werkstukmateriaal aan de beitel voorkomen.

Om gelijktijdig aan al deze eisen te voldoen is één enkele coatinglaag in veel gevallen niet voldoende. Vaak zijn er meerdere functionele lagen noodzakelijk om alle eisen te realiseren, zoals in het voorbeeld van figuur 7.6 aangegeven is.



Figuur 7.6: Voorbeeld van een multi-layer coating

Naast de functionele lagen zullen tussenlagen toegevoegd moeten worden om een optimale hechting tussen de lagen te garanderen en de chemische stabiliteit bij hogere temperaturen te waarborgen. Het ontwerpen en aanbrengen van de coatings is specialistisch werk, wat grotendeels buiten de eindgebruiker om zal gaan. Door de gereedschapsleverancier wordt de combinatie van basismateriaal en coating dan ook als één enkele keuze aangeboden. Vaak aangeduid met de 'grade' van het materiaal.

Het is echter goed om ook als eindgebruikers en met name als werkvoorbereiders de kennis over coatings en de nieuwste ontwikkelingen op pijl te houden om zo een optimale gereedschapselectie mogelijk te maken. De gereedschapsleverancier met kennis van zaken heeft hier duidelijk meerwaarde.

8. METAAL-BEWERKINGS-VLOEISTOFFEN

Keuze van metaalbewerkingsvloeistoffen voor moeilijk te bewerken materialen spelen vaak een ondergeschikte rol ten opzichte van de gereedschapskeuze. Ook hier geldt dat met de keuze een langdurige relatie met de leverancier wordt aangegaan.

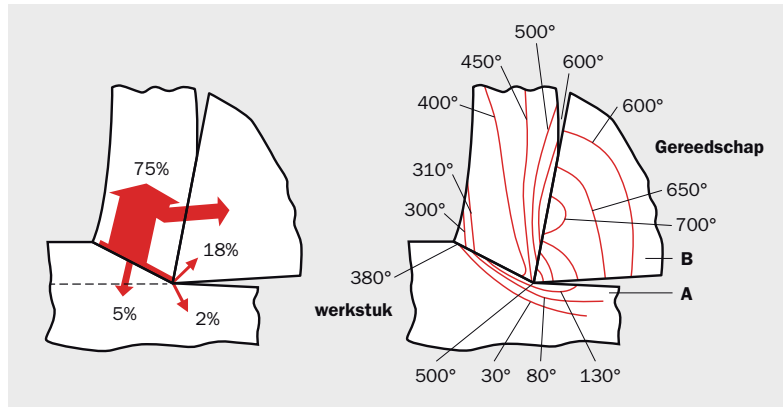
8.1 DE FUNCTIES VAN METAALBEWERKINGSVLOEISTOFFEN

De functies van een metaalbewerkingsvloeistof zijn:

- > Koelen
- > Smeren
- > Reduceren wrijving
- > Voorkomen van 'koudlassen'
- > Afvoer spanen
- > Voorkomen van metaalstof in de lucht

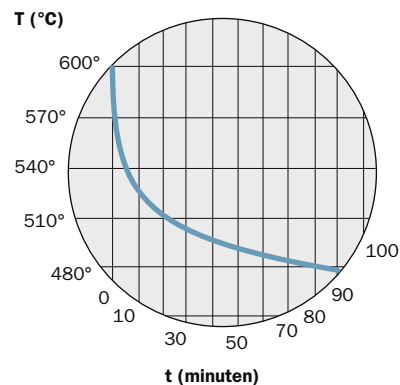
8.2 INVLOED VAN DE TEMPERAATUUR OP GEREEDSCHAP

Bij het verspanen van reguliere constructiematerialen zal de verspaningswarmte voor het grootste gedeelte afgevoerd worden via de spaan. (figuur 8.1). Ondanks dat kan de temperatuur op het spaanvlak oplopen tot ca 700°C.



Figuur 8.1: Temperatuursverdeling in werkstuk, gereedschap en spaan.

Er is een directe relatie tussen de temperatuur en de standtijd van een gereedschap (Figuur 8.2). Met name bij materialen met slechte warmtegeleiding, zoals bijvoorbeeld Titanium, wordt minder warmte via de spaan afgevoerd.



Figuur 8.2: Relatie tussen standtijd en temperatuur

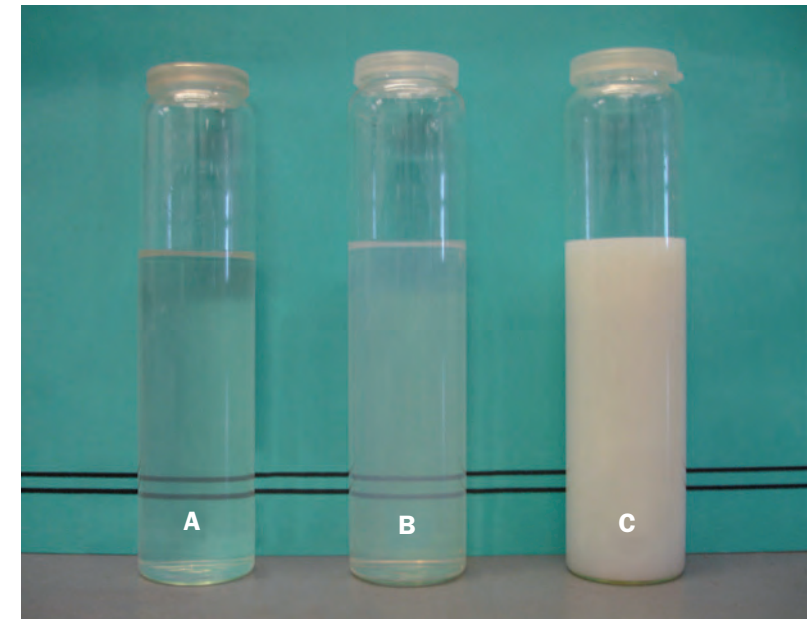
Het is daarom essentieel om de opbouw van warmte in het gereedschap te voorkomen door goede smering en efficiënte koeling.

8.3 INDELING VAN METAALBEWERKINGSVLOEISTOFFEN

De metaalbewerkingsvloeistoffen (MBV's) kunnen onderverdeeld worden in:

- > Niet-watremengbare MBV's
- > Watremengbare MBV's

De niet- watremengbare MBV's zijn volledig gebaseerd op olie: minerale, plantaardige danwel synthetische olie. Deze vloeistoffen zijn minder geschikt voor het verspanen van moeilijk bewerkbare materialen.



Figuur 8.3: klassen watremengbare metaalbewerkingsvloeistoffen.

De watremengbare MBV's worden verdeeld in drie klassen op basis van het gehalte minerale olie (figuur 8.3):

- > Emulsies: bevatten tussen de 40 – 90% minerale olie en zien er melkachtig uit (C).
- > Halfsyntheten of micro- emulsies: bevatten tussen 5 – 40% minerale olie. Deze zien er half transparant (B) uit.
- > Synthetische vloeistoffen: Deze bevatten geen minerale olie maar bestaan uit:
 - Of plantaardige olie /esters. Deze zijn halftransparant (B) of melkachtig (C);
 - Of volledig wateroplosbare smeermiddelen, met een volledig transparant uiterlijk (A).

8.4 OPTIMALE KEUZE METAALBEWERKINGSVLOEISTOF VOOR MOEILIJK TE BEWERKEN MATERIELEN

De ideale MBV voor moeilijk te bewerken materialen zoals Titanium, Duplex en HRSA's, is een product dat goede smering (reductie van wrijving (=warmte)) combineert met goede koelende eigenschappen. De productgroepen die in aanmerking komen zijn:

- > Emulsies met een hoog gehalte minerale olie.
- > Synthetische vloeistoffen met een hoog gehalte plantaardige olie/esters.
- > (Vol) Synthetisch vloeistoffen met een hoog gehalte aan wateroplosbare smeermiddelen.

Een verdere vernauwing van de productkeuze vindt plaats op basis van een aantal 'secundaire' eigenschappen. Door het zorgvuldig afwegen van deze keuze kunnen grote problemen en hoge kosten op de lange termijn worden voorkomen.

8.4.1 Gezondheids- en veiligheidsaspecten

De keuze voor een MBV is vaak voor langere tijd. Eindproducten, zoals bijvoorbeeld vliegtuigonderdelen of medische instrumenten, ondergaan vaak een langdurig en kostbaar certificeringstraject, waarin ook de te gebruiken MBV vastgelegd wordt. Het is daarom belangrijk een 'gedwongen' wissel van MBV's te voorkomen. Het kan voorkomen dat een MBV niet meer aan (wettelijk) gestelde gezondheids- of veiligheids-eisen voldoet. Als gevolg van Europese richtlijnen in het kader van REACH & CLP (http://guidance.echa.europa.eu/about_reach_nl.htm) staat een aantal stoffen die in MBV's worden gebruikt ter discussie (m.n. boorzuur en biocides op basis van stoffen die formaldehyde vrijgeven). Hoewel het initieel duurder lijkt, kan het op langere termijn lonend zijn om bij voorbaat voor alternatieve producten te kiezen.

8.4.2 Mengwater

De gekozen MBV moet geschikt zijn voor het mengwater dat wordt gebruikt. Gedemineraliseerd water is zeer geschikt voor volsynthetische producten op basis van wateroplosbare smeermiddelen, maar zal over het algemeen schuimvorming geven bij de andere producttypen. Mengwater met een te hoge waterhardheid (veel opgelost calcium en magnesium) kan bij emulsies en syntheten op basis van plantaardige olie/esters leiden tot productinstabiliteit (zeep- en residuevorming) en bij volsyntheten tot harde kalkafzettingen.

8.4.3 Schuimvorming

De eisen aan MBV's voor wat betreft schuimvorming worden steeds hoger. Denk bijvoorbeeld aan steeds compactere bewerkingsmachines, kleinere vloeistof-tanks en bewerkingen onder steeds hogere druk. Schuimvorming kan, naast het overstromen van de machine of de filtratie-unit, leiden tot verminderde koeling, smering en filtratie.

Volsynthetische MBV's op basis van wateroplosbare smeermiddelen zijn praktisch ongevoelig voor schuimvorming omdat deze groep van producten geen emulgator-systeem bevat. Halfsyntheten en emulsies kunnen afhankelijk van de hardheid van het gebruikte water wel schuimvorming geven. Fabrikanten kunnen anti-schuim-middelen gebaseerd op siliconeverbindingen gebruiken om schuimvorming zoveel mogelijk te onderdrukken. Mochten deze middelen niet gewenst zijn (b.v. vanwege reinigingsmoeilijkheden), vraag dan de fabrikant om een verklaring en zorg er voor dat er geen 'losse' antischuimmiddelen aanwezig zijn die 'per ongeluk' aan de machine kunnen worden toegevoegd.

8.5 ONDERHOUD WATERMENGEBARE MBV'S

Net als de verspaningsmachine heeft een MBV ook onderhoud. Goed onderhouden MBV's kunnen gedurende langere tijd stabiel en zonder problemen functioneren. Goed vloeistofonderhoud is daarbij belangrijk en helpt problemen voorkomen. Een goede leverancier verzorgt daar ondersteuning voor. Een aantal (eenvoudige) checks zijn noodzakelijk:

Dagelijks:

- > Geur en visueel (kleur, vervuiling met spanen en opdrijvende olie, vulniveau machine)
- > (Minimaal) wekelijks:
- > Concentratie d.m.v. van refractometer of (mini)titratie.
- > pH meting d.m.v. pH meter of pH papier.

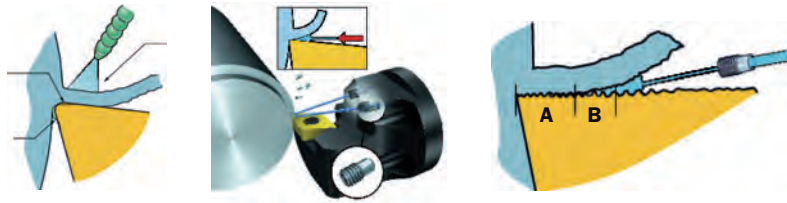
Wekelijks:

- > Temperatuur vloeistof (max. 40°C, liefst kamertemperatuur)
- > Bacterie- en/of schimmelgroei controle d.m.v. een dipslide

Zie verder ook 'Handboek Veilig en gezond werken met metaalbewerkingsvloeistoffen (MBV)', http://docs.minszw.nl/pdf/158/2007/158_2007_5_3799.pdf

8.6 GEBRUIK VAN HOGE DRUK KOELING BIJ DRAAIEN

Eén van de meest limiterende factoren bij het verspanen van hoge sterkte materialen is de enorme warmteontwikkeling bij het snijden. Als deze warmte effectief afgevoerd kan worden, kan met hogere voedingen gewerkt worden. Hoge druk koeling kan hierbij op drie manieren ondersteunend zijn.



Figuur 8.4: Conventionele koeling (links) Toepassing van hoge druk koeling bij draai bewerkingen (midden en rechts).

In de eerst plaats voert het effectief koelvloeistof toe aan de snijzone (gebied A in figuur 8.4).

In de tweede plaats tilt de straal door het wigeffect de spaan van het spaanvlak (gebied B in figuur 8.4). Hierdoor ontstaat minder wrijving en minder contactslijtage op het spaanvlak van de beitel.

In de derde plaats zorgt de koelstraal voor een sterke kromming van de spaan. Dit levert een snelle éénzijdige afkoeling van de spaan die ervoor zorgt dat een kortspanig proces ontstaat. Hierdoor kunnen de spanen makkelijker afgevoerd worden.

Hoge druk systemen bestaan tot 1000 bar druk, maar voor titanium is 200 bar voldoende. Bij roestvaststaal zijn ook bij drukken van 80 bar al duidelijke productiviteitsverbeteringen waarneembaar.



9. BEWERKINGS STRATEGIE

9.1 KEUZEPROCES BEWERKINGSSTRATEGIE

Verspaningsmodellen, gereeschapslevensduur en slijtage worden bepaald met eenvoudige, eenduidige snijcondities, zoals 'full-slotting' of 'side-milling' langs een rechte zijde.

In de productie worden vaak complexe geometrie gevraagd. Het is de taak van CAM om deze complexe geometrie met zo constant mogelijke freesbelasting te realiseren.

Voor het verspanen van moeilijk bewerkbare materialen zijn er geen speciale strategieën beschikbaar. Wat dat betreft wijkt de werkvoorbereiding niet af van de gewone constructiematerialen.

Daar waar gewone constructiematerialen nog 'vergevingsgezind' zijn met hun procescondities, zijn moeilijk verspaanbare materialen dat, door hun beperkte proceswindow, totaal niet. Bij het frezen van pocket in aluminium bijvoorbeeld kan de frees in de hoeken fors hoger belast worden doordat de materiaalomsag fors verhoogd wordt bij het gebruik van een eenvoudige strategie.

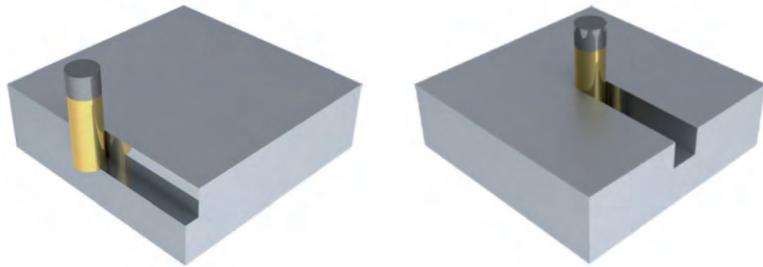
Bij moeilijk verspaanbare materialen moet deze belastingsverhoging vermeden worden, door bijvoorbeeld toepassen van trochoïdaal frezen. Deze en andere complexere strategieën zijn ruim beschikbaar in de huidige generatie CAM-pakketten. CAM-programmeurs moeten zich echter wel bewust worden van het beperkte proceswindow en leren de beschikbare strategieën maximaal in te zetten.

Ruwweg kan men drie hoofdkeuzes onderscheiden

- > Bewerkingsstrategie
- > Inloopstrategie
- > Optimalisatie van voedingen

9.1.1 Bewerkingsstrategie

Full-slotting is voor moeilijk bewerkbare materialen een slechte keuze (figuur 9.1). Spaanafvoerproblemen en temperatuuropbouw geven een korte levensduur van de frees. Side-milling is een betere keuze.

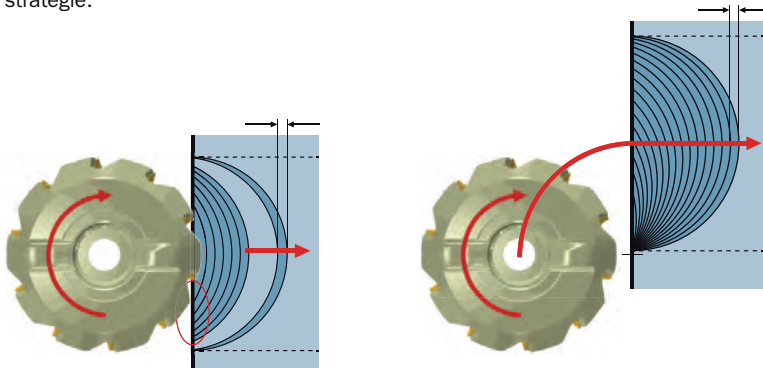


Figuur 9.1: Verschillende bewerkingsstrategieën: Side-milling (links); full-slotting (rechts).

Om een zo constant mogelijke belasting, zowel mechanisch als thermisch, te realiseren moet de frees voortdurend in snede blijven. Bij in- en uitloop ontstaan grote krachtvariëaties die de levensduur van de frees nadelig beïnvloeden.

9.1.2 Inloop strategie

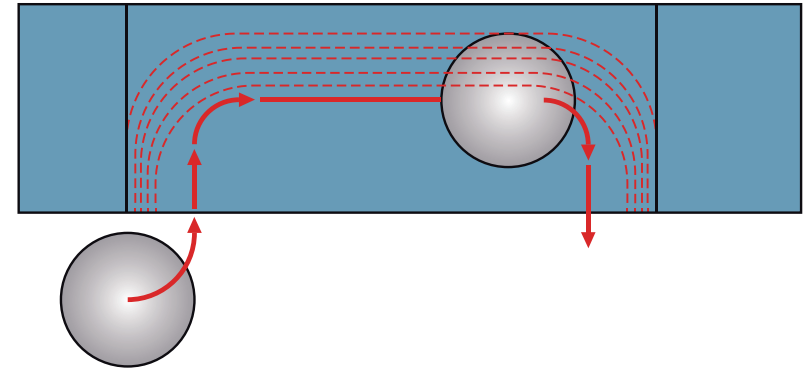
Als vuistregel kan gesteld worden dat de frees zo min mogelijk met in- en uittrede hoeken tussen respectievelijk -30 en +30 graden belast mag worden. Gebruik dus in plaats van de conventionele rechte inloop (figuur 9.2) de roll-into-cut inloop strategie.



Figuur 9.2: Inloop strategieën: conventioneel (links), roll-into-cut (rechts).

Deze strategie vereist iets meer denk- en programmeerwerk, maar verdient zich dubbel terug in de standtijd van de frees.

Een consequentie van de frees constant in snede houden is te zien in figuur 9.3. In plaats van de sleuf met een zig-zag-strategie pendelend leeg te frezen is gekozen om het freesfront zo lang mogelijk te maken, zodat een minimaal aantal in- en uittredes noodzakelijk zijn.



Figuur 9.3: Alternatieve strategie voor het voorfrezen van een brede sleuf.

9.2 BESTURINGSTECHNOLOGIE

Het programmeren van het verspaantechnische optimale bewerkingspad met bijbehorende voedingen, garandeert niet dat de machine deze ook exact zo uitvoert. Machines hebben door hun constructie een aanzienlijke traagheid, waardoor de machine hoogdynamische baanbewegingen niet kan volgen.

Anderzijds kan de eindige nauwkeurigheid van CAD-modellen ook aanleiding zijn tot overgangsfouten in aansluitende vlakken. Te exact volgen van deze sprongen in de oppervlakkenovergang geeft hoge versnellingen en 'rukken' in de machine, die de oppervlaktekwaliteit nadelig beïnvloeden. Moderne besturingen zijn uitgerust met look-ahead functies in combinatie met de asregeling, die zorgen dat het machinegedrag gunstiger wordt ten koste van de baannauwkeurigheid. Helaas hebben besturingsfabrikanten ieder hun eigen implementatie voor het beïnvloeden van het machinegedrag gekozen.

Het is dus van groot belang dat de gekozen strategie en bijbehorende parameters in lijn liggen met de mogelijkheden en beperkingen van de machine.

Evenals bij het CAM-programmeren zijn deze functies niet specifiek ontwikkeld voor het bewerken van moeilijk bewerkbare materialen, maar ook hier geldt dat door het beperkte proceswindow voor moeilijk verspaanbare materialen de bewerking niet erg vergevingsgezind is.

10. APPLICATIE- VOORBEELDEN

In dit hoofdstuk zullen ter illustratie van de hiervoor behandelde theorie drie bewerkingsvoorbeelden toegelicht worden.

Bewerken van Monel 400: In dit voorbeeld wordt de selectiemethodiek van gereedschappen uitgebreid toegelicht.

Bewerken van AISI 304: In dit voorbeeld worden de verschillen tussen hoge- en lage-snelheidsmethode voor het verspanen van roestvaste stalen toegelicht.

Bewerken van Inconel 718: In dit voorbeeld ligt de nadruk op de bewerkingsvolg-orde en de gekozen gereedschappen.

10.1 BEWERKEN VAN MONEL 400

Monel 400 is een Nikkel gebaseerde legering met minimaal 63% Nikkel. Het primaire legeringselement is koper 28 - 34%.

| | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Dichtheid [kg/dm ³] | 8,8 |
| Smelttemp [°C] | ca 1300 |
| E-modulus [GPa] | 180 (vergelijk staal 200) |
| Breukrek [%] | 45 (vergelijk koolstofstaal 15) |

Tabel 10.1: Eigenschappen van Monel 400.

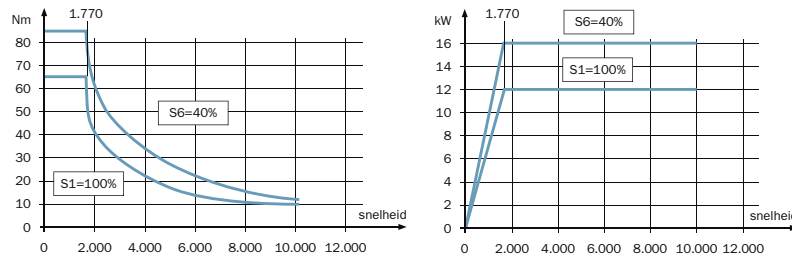
Monel 400 is niet “hard”, het is moeilijk bewerkbaar door grote versteviging bij vervorming en de grote vervorming voor breuk.

Door corrosiebestendigheid en taaiheid lijkt Monel 400 in principe erg op RVS. Monel 400 is de handelsbenaming van Special Metals Company. Het materiaal is gepatenteerd in 1906 en genoemd naar de toenmalige directeur Ambrose Monell. Monel 400 wordt toegepast vanwege zijn corrosie vastheid in maritieme omgevingen en in chemische apparatuur.



10.1.1 Machinekeuze

In het kader van het project “Verspanen van moeilijk bewerkbare materialen” is er gekozen dit materiaal te bewerken bij TNO in Eindhoven op een Mikron VCP 710. De machine heeft een maximaal toerental van 12.000 RPM. De koppel- en vermogensgrafieken uit de documentatie van Mikron staan hieronder weergegeven.



Figuur 10.1: Koppel en vermogenscurve van Mikron VCP 710.

10.1.2 Gereedschapskeuze

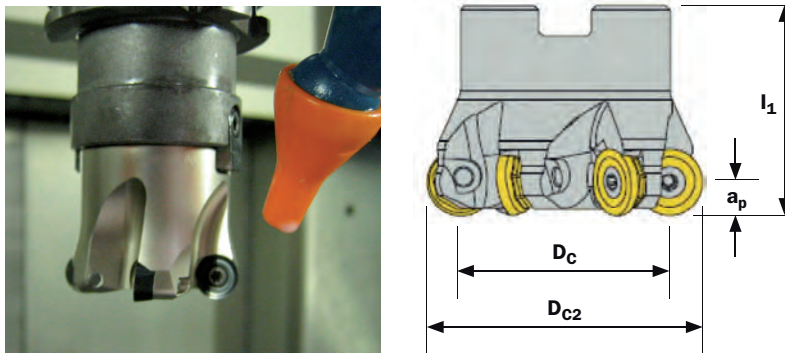
Het gereedschap is in overleg met Seco gekozen. Allereerst is een wisselplaat frees toegepast voor het vlakfreesen. Voor de verdere bewerking is gekozen voor een volhardmetaalfrees uit het Seco-Jabro assortiment.

10.1.3 Vlakfreesen met wisselplaat frees

Belangrijke aandachtspunten bij de keuze zijn:

- > gebruik een positieve spaanhoek
- > gebruik waar mogelijk ronde snijplaten;
- > gebruik veel snijkanten over de omtrek;

Vanuit stabiliteitsoogpunt is gekozen voor een gehard stalen body (Seco-code: R220.24-0050-12.5A met 5 ronde wisselplaten met een diameter van 12 mm.



Figuur 10.2: Afbeelding van het wisselplaatgereedschap.

Monel valt bij Seco in materiaal groep 20.

| | |
|-----------|--|
| 20 | Nikkel-, Kobalt- en diverse superlegeringen met een hardheid van < 30 Rc. Incoloy 800 en Inconel 601, 617 en 625. Monel 400. |
|-----------|--|

Figuur 10.3: Materiaalgroep indeling voor Monel 400 bij Seco.

De voorkeurswisselplaat voor materiaalgroep 20 in deze frees is terug te vinden in figuur 10.4.

Insert selection - R217/220.24-12

Cutting data - Full engagement

| Seco Material group No. | Roughing First choice | Seco Material group No. | T350M | MS2500 |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------|--------|
| 1 | ROHT1204MOT-M08 T350M | 1 | 370 | 460 |
| 2 | ROHT1204MOT-M08 T350M | 2 | 320 | 405 |
| 3 | ROHT1204MOT-M08 T350M | 3 | 270 | 335 |
| 4 | ROHT1204MOT-M08 T350M | 4 | 245 | 305 |
| 5 | ROHT1204M0-M12 MS2500 | 5 | 200 | 250 |
| 6 | ROHT1204M0-M12 MS2500 | 6 | 145 | 180 |
| 7 | ROHT1204M0-M15 MS2500 | 7 | 45 | 50 |
| 8 | ROHT1204M0-M12 MS2500 | 8 | 225 | 265 |
| 9 | ROHT1204M0-M12 MS2500 | 9 | 200 | 230 |
| 10 | ROHT1204M0-M12 MS2500 | 10 | 170 | 195 |
| 11 | ROHT1204M0-M12 MS2500 | 11 | 130 | 155 |
| 12 | ROHT1204MOT-M15 MS2500 | 12 | 215 | 270 |
| 13 | ROHT1204MOT-M15 MS2500 | 13 | 190 | 240 |
| 14 | ROHT1204MOT-M15 MS2500 | 14 | 175 | 220 |
| 15 | ROHT1204MOT-M15 MS2500 | 15 | 145 | 180 |
| 16 | ROHT1204M0-E05 MS2500 | 16 | 995 | 1250 |
| 17 | ROHT1204M0-E05 MS2500 | 17 | 805 | 1010 |
| 20 | ROHT1204M0-M12 MS2500 | 20 | 60 | 70 |
| 21 | ROHT1204M0-M12 MS2500 | 21 | 35 | 45 |
| 22 | ROHT1204M0-M12 MS2500 | 22 | 60 | 70 |

Figuur 10.4: Wisselplaat selectie voor een R220.24 body (links); Snij snelheidsdata (m/min) voor deze wisselplaat (rechts).

De gekozen wisselplaat is nu de ROHT1204M0-M12 - MS2500.

De spaanhoek bij deze combinatie van body en insert is 5 graden positief.

Het vlakfreesen zal gebeuren met nagenoeg 'Full-engagement' van 75%:

$a_e/D_{c2}=0,75$; a_e wordt dus 37,5 mm.

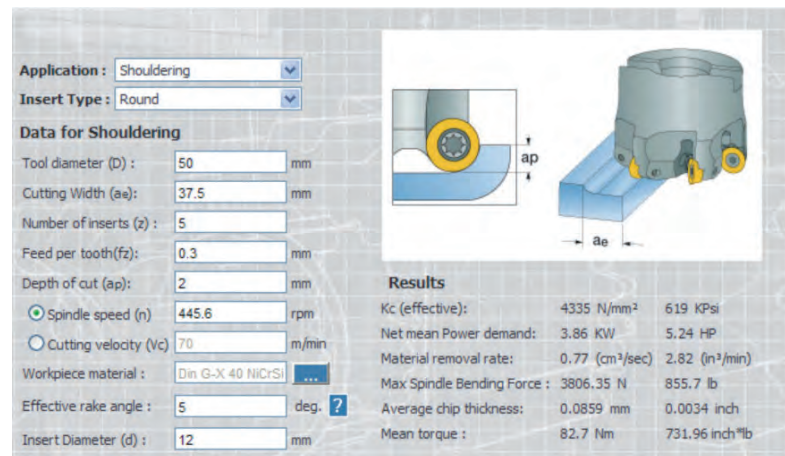
Vanuit Figuur 10.5 wordt de snedediepte en de voeding per tand in eerste instantie gekozen op respectievelijk 2 mm en 0,3 mm/tand.

Cutting data

| Roughing | | | | | |
|-----------------|-------------------------|------------------------|------|------|-------------------------|
| D.O.C, a_p mm | Profiel hoogte, H mm | a_e/D_{c2} | | | Full engagement 100% |
| | | 15% | 20% | 30% | |
| | | Feed, f_z (mm/tooth) | | | |
| 3,5 | 0,261 | 0,40 | 0,35 | 0,30 | 0,25 |
| 3 | 0,191 | 0,45 | 0,40 | | |
| 2,5 | 0,132 | | | | |
| 2 | 0,084 | 0,50 | 0,45 | 0,35 | 0,30 |
| Speed factor | | 1,40 | 1,35 | 1,25 | 1,00 |

Figuur 10.5: Snijscondities voor een R220.24 body.

De aanbevolen snijsnelheid is 70 m/min (figuur 10.4 rechts).



Figuur 10.6: Berekening benodigd vermogen en koppel met de ISCAR machining power applicatie.

In figuur 10.6 is te zien dat het benodigde snijvermogen 3.86 KW bedraagt bij 445 RPM.

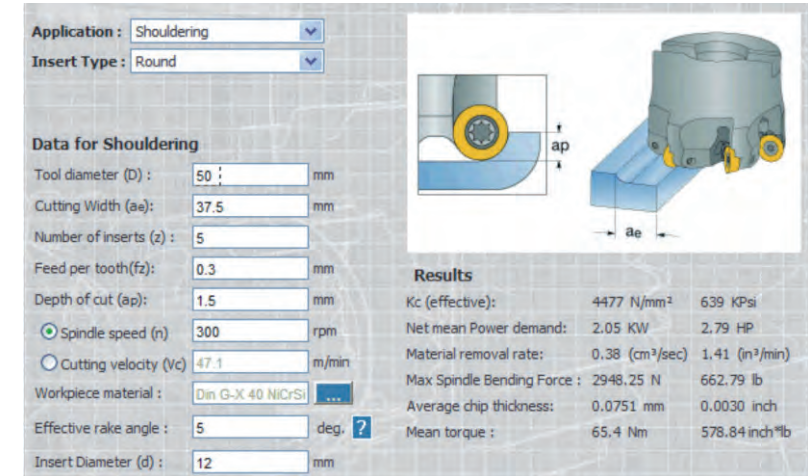
| @445 RPM | Gevraagd | Beschikbaar |
|---------------|----------|-------------|
| Koppel [Nm] | 82,7 | 65 |
| Vermogen [KW] | 3,86 | 2,96 |

Tabel 10.2: Gevraagd en beschikbaar vermogen.

Verlagen van het toerental (en dus de snijsnelheid) zal wel het benodigde vermogen verlagen, echter niet het benodigde koppel.

Om het koppel te verlagen zal de snediediepte aangepast moeten worden.

Verlaging van de snediediepte naar 1.5 mm levert de gewenste verlaging naar een koppel van 65 Nm en een vermogen van 3.05 KW op. Dit zit nog erg op de rand van het kunnen van de machine. Voor een bedrijfszeker proces wordt gekozen voor het terugschroeven van de snijsnelheid tot 47 m/min. De uiteindelijke parameters zijn te vinden in figuur 10.7.



Figuur 10.7: Uiteindelijk gekozen snijparameters.


10.1.4 Vol hardmetaal frees

Voor de volhardmetalen frezen is gekozen voor de Seco-Jabro HPM-JHP 780 serie. Deze frezen zijn specifiek ontwikkeld voor het verspanen van hitte bestendige superlegeringen. In de demonstratie zijn frezen met een diameter van Ø10 en Ø16 gebruikt om 'slots' te frezen. De aanbevolen snijdata staat in figuur 10.8.



JABRO™ - HPM - JHP780 - Cutting data



| Seco material group no. | $a_p \times D_c$ | $a_e \times D_c$ | V_c (m/min) |  | Slotting D_c (mm) | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|---------------|---|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 | 23 |
| E 20 | 0,8 | 1 | 35 (33-38) | n (rev/min) | 5570 | 3710 | 2790 | 2230 | 1860 | 1390 | 1110 | 930 | 700 | 560 | 450 |
| | | | | f_z (mm) | 0,008 | 0,012 | 0,016 | 0,020 | 0,024 | 0,032 | 0,040 | 0,048 | 0,064 | 0,080 | 0,100 |
| | | | | v_f (mm/min) | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| E 21 | 0,6 | 1 | 25 (22-28) | n (rev/min) | 3980 | 2650 | 1990 | 1590 | 1330 | 990 | 800 | 660 | 500 | 400 | 320 |
| | | | | f_z (mm) | 0,004 | 0,006 | 0,008 | 0,010 | 0,012 | 0,016 | 0,020 | 0,024 | 0,032 | 0,040 | 0,050 |
| | | | | v_f (mm/min) | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 |

Figuur 10.8: Snijsparameters voor Jabro JHP780 volhardmetaal frees.

De uiteindelijk gekozen bewerkingsparameters staan in tabel 10.3 weergegeven.

| | Ø10 | Ø16 |
|---------------------------|----------------|-------------------|
| Toerental [rpm] | 1100 | 700 |
| vc [m/min] | 35 | 35 |
| fz [mm/tand] | 0,040 | 0,064 |
| f [mm/min] | 180 | 180 |
| ae =Dc | 10 | 16 |
| ap/max = 0,8*Dc [mm]/[mm] | 5 (= 0,5*Dc)/8 | 8 (= 0,5*Dc)/12,8 |

Tabel 10.3: Bewerkingsparameters vol hardmetaal frezen van Monel 400.

Doordat dit type frees een differentiaal tandverdeling hebben, wat inhoud dat de tanden niet in hoeken van 90° over de omtrek verdeeld zijn, is het verspaangedrag van elke tand iets verschillend. Hierdoor worden freestrillingen effectief onderdrukt. De frees geeft danook een zeer rustig verspaangedrag.

10.2 BEWERKEN VAN AUSTENITISCH ROESTVASTSTAAL


Austenitisch roestvaststaal kan op twee manieren bewerkt worden:

De hoge-snelheidsmethode en de lage-snelheidsmethode.

In het kader van het project “Verspanen van moeilijk bewerkbare materialen” zijn deze methodes gedemonstreerd in het demo-centrum van Seco in Waterloo.

De bewerkingen zijn uitgevoerd op een OKK VP600-5AX freesmachine.

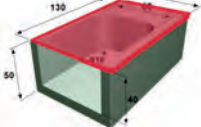
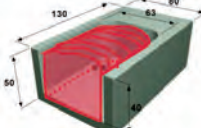
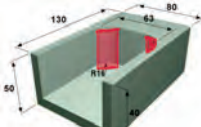
Het werkstukmateriaal was AISI 304, geleverd door Hamel Metaal.

| | Hoge-snelheidsmethode | Lage-snelheidsmethode |
|----------------------------|---|---|
| Gereedschap |  |  |
| Body [Seco-code] | R220.24 - 0063 - 12.6SA | R217.29 - 1225.RE - 06.2A |
| Insert [Seco-code] | ROTH1204M0 - M12, MS2500 | RPHT1204M0T - M08, MS2500 |
| Aantal snijkanten | 6 | 2 |
| Verspaningsparameters | | |
| Snijnsnelheid vc [m/min] | 250 | 80 |
| Toerental n [rpm] | 1263 | 1019 |
| Snedediepte ap [mm] | 1,25 | 1,5 |
| Snedebreedte ae [mm] | max. 45 | 10 – 25 |
| Voeding per tand [mm/tand] | 0,5 | 0,5 |
| vf voeding [mm/min] | 3789 | 1019 |
| Koeling | Intern en externe luchtdruk ter bevordering van de spaanafvoer | Met interne en externe koelvloeistof |
| Verspaand volume [cm³/min] | 213 | 38 |

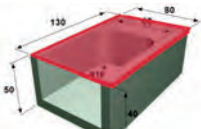
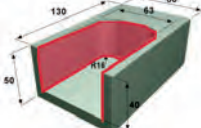

Tabel 10.4: Bewerken van roestvaststaal AISI 304 met hoge- en lage-snelheidsmethode.

10.3 BEWERKEN VAN INCONEL 718

Als laatste wordt een volledige bewerkingsafloop voor het ruw en finish-bewerken van een Inconel 718 werkstukmateriaal weergegeven. Zie tabel 10.5 voor de voorbereiding en tabel 10.6 voor de nabewerking

| | |
|---|--|
| vlakken bovenzijde | |
|  | Cutter: R220.43-0125-07, d = 125 mm, L = 6 mm, z = 8 Insert: OFER070405TN-ME15, F40M ae = 100 mm, ap = 2 mm snijnsnelheid vc = 30 m/min; toerental n = 76 rpm voeding f = 0,20 mm/tand; vf = 122 mm/min |
| plungen van de kamer | |
|  | Cutter: R220.79-0063-16, d = 63 mm, L = 15 mm, z = 4 Insert: APFT160416L-M13, T25M ae = 63 mm, ap = 12 mm snijnsnelheid vc = 30 m/min, toerental n = 150 rpm voeding f = 0,12 mm/tand; vf = 72 mm/min |
| plungen van de hoeken | |
|  | Cutter: R217.79-2532.3-09A d = 32 mm, L = 6 mm, z = 4 Insert: XOMX090308TR-ME06, T25M ae = mm; ap = 3 mm Cutting speed = 40 m/min, toerental n = 400 rpm voeding f = 0,07 mm/tand; vf = 112 mm/min |

Tabel 10.5: Bewerkingsafloop voor het verspanend voorbereiden van Inconel 718.

| | |
|---|---|
| Semifinish-bewerking | |
|  | Cutter: R215.59-3239.3S.048-08.4A, d = 39 mm, L = 48 mm, z = 2 Inserts: CCMX08T308T-M08, T25M XCMX13T308TR-M11, T25M Speed factor (< 5% in snede) = 1,6 snijnsnelheid Vc = 1,6 x 30 = 48 m/min; toerental n = 392 rpm ap = 40 mm; ae = 0.8 mm; voeding f = 0,34 mm/tand; vf = 266 mm/min In de hoeken: voeding f = 0.08 mm/tand; vf = 62 mm/min |
| Finish-bewerking | |
|  | Cutter: R235.15-2532.0-40; d = 32 mm, L = 40 mm, z = 2 Insert: R235.15-032-E05, HX Speed factor (< 2% in snede) = 2,0 snijnsnelheid vc = 2,0 x 30 = 60 m/min; toerental n = 600 rpm ap = 40 mm; ae = 0.2 mm voeding f = 0.2 mm/tand; vf = 240 mm/min |
| Resultaat |  |

Tabel 10.6: Bewerkingsafloop voor het verspanend nabewerken van Inconel 718.

11. BRONNEN

Voor het samenstellen van deze brochure zijn vele bronnen gebruikt. Veel van deze bronnen zijn via internet te vinden en in te zien.

Werkstukmateriaal:

- > www.stellite.com
- > www.specialmetals.com
- > www.alleghenytechnologies.com
- > www.matweb.com

Gereedschapsleveranciers:

- > www.secotools.com
- > www.sandvik.com
- > www.iscar.com
- > www.kennametal.com

De volgende figuren zijn overgenomen uit documentatie van diverse leveranciers. Ter referentie is de homepagina van het betreffende bedrijf genoemd.

Figuur 2.2: www.sandvik.com

Figuur 3.1: www.imoa.info

Figuur 3.2: www.sandvik.com

Figuur 3.3: www.castmetalsindonesia.com

Figuur 3.4: www.schulzerchemtech.com

Figuur 3.5: www.valpro.it

Figuur 4.1: www.ceratizit.com

Figuur 4.2: www.amg-nv.com

Figuur 5.1: www.sandvik.com

Figuur 5.2: Afgeleid van M. C. Shaw, P. K. Wright, and S. Kalpakjian

Figuur 5.4: www.turbonetics.com

Figuur 5.5: www.supertechperformance.com

Figuur 6.4: www.sandvik.com

Figuur 6.6: www.nttool.com

Figuur 6.9: www.sandvik.com

Figuur 7.1 – 7.3: www.sandvik.com

Figuur 7.4: www.secotools.com

Figuur 7.5: www.oerlikon.com/balzers



Figuur 8.3: www.cimcool.nl
Figuur 8.4: www.sandvik.com

Figuur 9.1: www.cncconsult.nl
Figuur 9.2: 9.4: www.secotools.com

Figuur 10.1: Gebruikshandleiding Mikron VCP 710
Figuur 10.2 – 10.5: www.secotools.nl
Figuur 10.6, 10.7: www.iscar.com
Figuur 10.8: www.secotools.nl



NOTITIES

TNO VERBINDT MENSEN EN KENNIS OM INNOVATIES TE CREËREN
DIE DE CONCURRENTIEKRACHT VAN BEDRIJVEN EN HET WELZIJN VAN
DE SAMENLEVING DUURZAAM VERSTERKEN.

TNO.NL