

Harddraaien en

De vraag of een snijdend (verspanend) dan wel een abrasief proces economischer is, een hogere kwaliteit geeft en minder ecologische gevolgen heeft, wordt zowel in de industriële praktijk als in de wetenschappelijke literatuur tegenstrijdig bediscussieerd. Abrasieve beweringsprocessen zoals kruipslijpen, hoge-snelheidsslijpen, slijpen met continu dressen en CBN-slijpen hebben een enorme vooruitgang gebracht in efficiëntie en kwaliteit. Als gevolg daarvan zijn slijpprocessen ontwikkeld die direct kunnen worden toegepast op gegoten of gesmeed ruw materiaal zonder voorbewerking van het zachte materiaal door draaien of frezen. Aan de andere kant zijn gereedschapmaterialen, zoals keramiek en CBN, ontwikkeld die het bewerken van geharde materialen via draaien, frezen of boren mogelijk maken. Deze zogenaamde hard-bewerkende (eng: hard machining) processen kunnen dus slijpoperaties vervangen. In talloze publicaties worden de voordelen van 'hard machining' door toepassingsvoorbeelden beschreven. Maar nog steeds zijn algemeen toepasbare criteria om een juiste keuze te maken tussen draaien of slijpen als het meest geschikte nabewerkingsproces voor gehard stalen onderdelen afwezig. De discussie over de voordelen van de verschillende beweringsoperaties zou moeten worden gebaseerd op fysische en technologische data. Dit artikel wil een bijdrage leveren aan deze basis overwegingen.

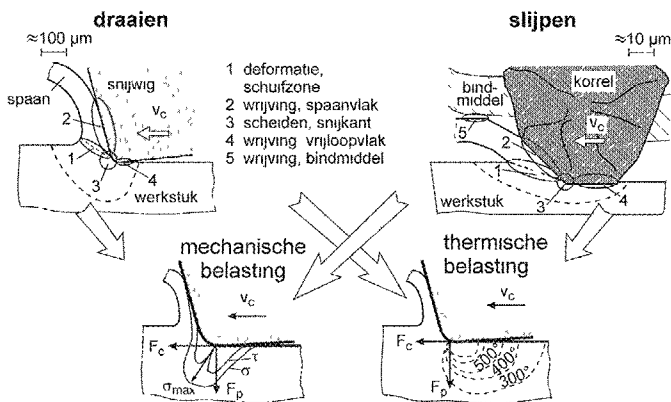
• Prof. Dr. Ing. habil. Bernhard Karpuschewski, TU Delft •

Het principe van metaalafname

Bij zowel het verspanen (in dit geval harddraaien) als het slijpen worden een of meerdere snijwiggén langs gedefinieerde paden bewogen en penetreren het bewerkingsmateriaal. Dit basisproces is voor beide gevallen hetzelfde, alleen de vorm van de wiggén is anders (afbeelding 1). Bij het slijpen moeten de relevante afmetingen, hoeken en vormen bepaald worden als statistische waarden. De gemiddel-

de spaanhoek γ is negatief, vaak kleiner dan -45° . Hoewel de nominale spaanhoek bij het harddraaien bijna 0° is, hangt de effectieve spaanhoek γ_{eff} af van de afgeronde snijkantradius r_B en van de ongedeformeerde spaandikte en is gewoonlijk ook erg negatief. Het belangrijkste verschil zit in de breedte van de snijwigg. Bij het slijpen bedraagt deze enige micrometers, bij het harddraaien kan deze in de buurt van de 1 mm komen te liggen. Dit maakt een belangrijk ver-

slijpen vergeleken

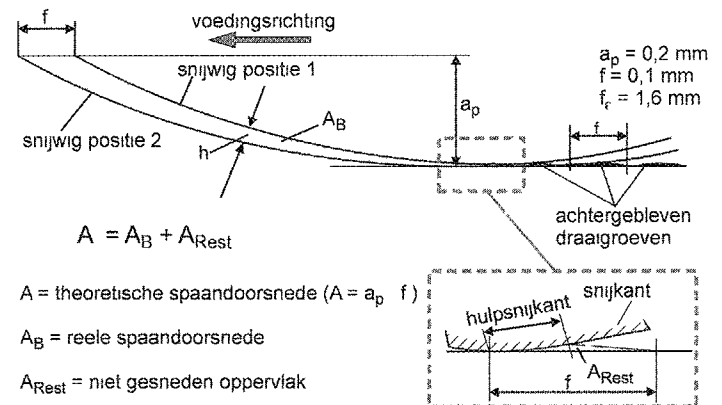


Afbeelding 1. Spaanvorming op basis van draaien of slijpen

schil voor de materiaalstroom aan de voorkant van de wig. Harddraaien kan worden gekarakteriseerd door een biaxiale rek als gevolg van een materiaalstroom langs de snijkant en door een driedimensionale spanningstoestand, behalve aan de uiteinden van de actieve snijkant. Het is zelfs mogelijk dat een hoog hydrostatisch spanningsgebied wordt gegenereerd, dat kan worden beschouwd als een voorwaarde om te komen tot de noodzakelijke hoge rekken en vormgevingsmogelijkheden en dus scheurvrije oppervlakken. Aan de andere kant zijn bij het slijpen aanzienlijke zijstromen van het materiaal en ploegeffecten aanwezig. Dit is in het bijzonder van belang voor de werking van opeenvolgende snijkanten, die dan niet het materiaal afnemen maar het oppervlak plastisch deformereren door ploegen.

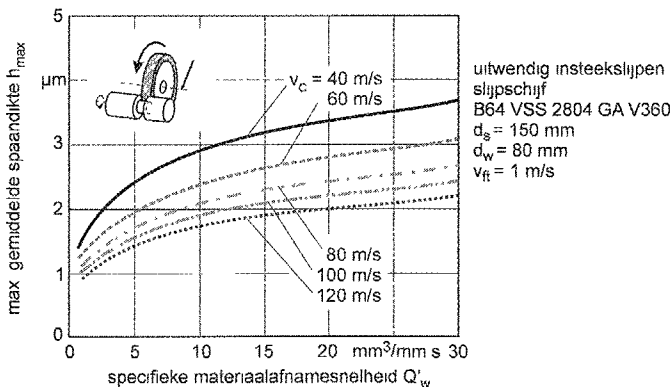
In alle mechanische bewerkingsprocessen wordt de ongedeformeerde spaandikte als de overheersende grootte beschouwd. De spaandikte bij het slijpen kan worden bepaald door de methoden gedefinieerd door Shaw, waarbij rekening wordt gehouden met de snijkantverdeling in een referentieoppervlak van de actieve snijruimte van het gereedschap. Zoals te zien in afbeelding 2, kan door gebruik te maken van verschillende materiaalafnamesnelheden en slijpsnelheden de gemiddelde maximale spaandikte worden berekend als zijnde tussen 1- 4 μm .

De dwarsdoorsnede van de ongedeformeerde spaan bij draaien onder typische condities voor het bewerken van

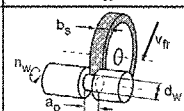
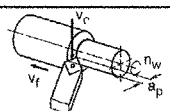


Afbeelding 3. Spaandoorsnede tijdens harddraaien

gehard staal wordt schaalgetrouw getoond in afbeelding 3. Te zien is dat de gemiddelde spaandikte in de buurt van de 30 μm ligt en als het werkstukoppervlak genererende deel van de dwarsdoorsnede wordt beschouwd, is de spaandikte zelfs nog kleiner. Deze moet worden geschat op enige micrometers. Als de afgeronde snijkantradius r_B wordt vergeleken met de spaandikte wordt het duidelijk dat ook bij het harddraaien de effectieve spaanhoek erg negatief is. Bovendien is de spaandikte niet constant langs de contactzone. Deze aspecten laten wederom overeenkomsten met het slijpen zien. De relatieve bewegingen en snelheden tussen werkstuk en gereedschap verschillen over een groot gebied. Bij het slijpen zijn snelheden van 80 m/s gunstig onder de gegeven condities, terwijl bij het harddraaien 2,5 m/s een gunstige snelheid is. Bij het draaien is de beweging spiraalvormig en hoofdzakelijk stationair;



Afbeelding 2. Van snijsnelheid afhankelijke spaandikte

| | slippen | harddraaien |
|------------------------------------|--|--|
| principe |  |  |
| materiaalafnamesnelheid | $Q_w = a_p Q'_w$ | $Q_w = a_p f v_c$ |
| specifieke materiaalafnamesnelheid | $Q'_w = d_w \pi v_{fr}$ | $Q'_w = \frac{a_p f v_c}{l_c}$ |
| oppervlaktegeneratie | $\dot{A}_w = a_p v_{fr, w}$ | $\dot{A}_w = f v_c$ |
| kenmerkende parameters | $a_p = 10 \text{ mm}$ $Q'_w = 4 - 12 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ $v_{fr, w} = 1 \text{ m/s}$ | $a_p = 0,05 - 0,3 \text{ mm}$ $f = 0,05 - 0,2 \text{ mm}$ $v_c = 50 - 200 \text{ m/min}$ |
| typische waarden | $Q_w = 40 - 120 \text{ mm}^3/\text{s}$ $\dot{A}_w = 10000 \text{ mm}^2/\text{s}$ | $Q_w = 8,3 - 133 \text{ mm}^3/\text{s}$ $\dot{A}_w = 83 - 667 \text{ mm}^2/\text{s}$ |

Afbeelding 4. Materiaalafnamesnelheid

bij het slippen worden de snijkanten epicyclisch bewogen. Ze zijn over een kleiner deel van een omwenteling in contact met het materiaal. Bij gevolg zijn de tijden dat het materiaal in contact is met de gereedschappen sterk verschillend.

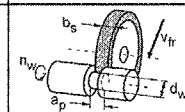
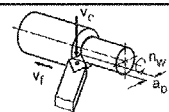
Experimentele resultaten

De volgende waarnemingen werden gedaan bij het bewerken van gecarboneerd staal 16 MnCr 5, gehard tot 60-62 HRC. Dit staal wordt veelal toegepast bij de tandwiel- en lagerfabricage. Bij het slippen worden hoofdzakelijk CBN-slijpwielen met een korrelgrootte van 64 µm en een keramische binding ingezet. Uitwendig insteekslippen werd toegepast met karakteristieke waarden voor voor- en nabewerken met emulsie als koelmiddel. Bij het verspanen werd cilindrisch draaien op een precisie-draaimachine met CBN en Al₂O₃ gereedschappen toegepast.

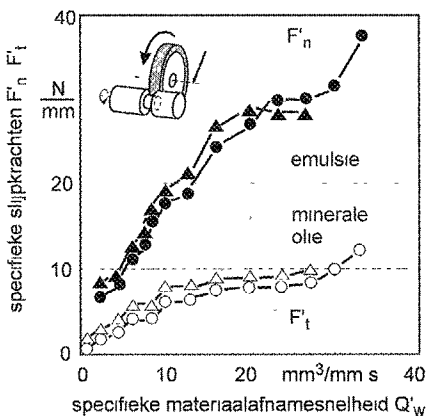
Materiaalafnamesnelheid in relatie tot volume en oppervlak

De materiaalafnamesnelheid is van belang om de productiviteit van een proces te beoordelen, hoewel het bij lange aan niet de enige term is die dit criterium beïnvloedt. De materiaalafnamesnelheid wordt berekend als het volume per tijdseenheid, maar voor nabewerkingen is het gegenereerde oppervlak per tijdseenheid ook een interessante grootte. Afbeelding 4 toont de relaties tussen de bewerkingscondities en de materiaalafname.

Bij het slippen is de bepalende grootte de afnamesnelheid per mm actieve schijfbreedte (specifieke materiaalafnamesnelheid). Voor nabewerken kan deze kleiner zijn dan $Q'_w = 1 \text{ mm}^3/\text{mm s}$, bij het voorbewerken kunnen waarden van meer dan $Q'_w = 20 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ worden bereikt. Onder bepaalde omstandigheden zijn specifieke materiaalafnamesnelheden van meer dan $200 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ haalbaar. Van deze waarden zijn de resulterende materiaalafnamesnelheden Q_w voor slippen minstens zo hoog als voor draaien. Naast de volume gerelateerde materiaalafnamesnelheid is de oppervlaktegeneratie een belangrijk criterium. Bij de voorbeeldberekening is te zien dat de oppervlaktegeneratie bij het slippen veel hoger is dan die bij het draaien. Dat betekent dat de zuivere slijptijd vaak korter is dan de verspaningstijd bij het draaien. Het criterium oppervlaktegeneratie neemt tegenover het criterium materiaalafnamesnelheid aanzienlijk in belangrijkheid toe bij het bewerken van kleinere werkstukdiameters en kleinere toegiften. Een typisch voorbeeld hiervoor is de hoge efficiëntie van centerloos slippen van rollagerringen. Deze kan nauwelijks worden bereikt met draaien. Het productiviteitseffect van het draaiproces in specifieke gevallen is het gevolg van de hoge vormflexibiliteit; namelijk wanneer verschillende oppervlakken en vormen kunnen worden bewerkt met één gereedschap. Bovendien is vaak slechts één draaimachine nodig voor het bewerken van binnen- en buitendiameters. Harddraaien kan vanwege deze voordelen in veel toepassingen de bewerkingstijd aanzienlijk verkorten. De uiteindelijke bepaling van de bewerkings-tijden en kosten kan echter alleen gemaakt worden aan de hand van een specifieke productietaak.

| | slippen | harddraaien |
|------------------------------------|--|--|
| principe |  |  |
| materiaalafnamesnelheid | $Q_w = a_p Q'_w$ | $Q_w = a_p f v_c$ |
| specifieke materiaalafnamesnelheid | $Q'_w = d_w \pi v_{fr}$ | $Q'_w = \frac{a_p f v_c}{l_c}$ |
| oppervlaktegeneratie | $\dot{A}_w = a_p v_{fr, w}$ | $\dot{A}_w = f v_c$ |
| kenmerkende parameters | $a_p = 10 \text{ mm}$ $Q'_w = 4 - 12 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ $v_{fr, w} = 1 \text{ m/s}$ | $a_p = 0,05 - 0,3 \text{ mm}$ $f = 0,05 - 0,2 \text{ mm}$ $v_c = 50 - 200 \text{ m/min}$ |
| typische waarden | $Q_w = 40 - 120 \text{ mm}^3/\text{s}$ $\dot{A}_w = 10000 \text{ mm}^2/\text{s}$ | $Q_w = 8,3 - 133 \text{ mm}^3/\text{s}$ $\dot{A}_w = 83 - 667 \text{ mm}^2/\text{s}$ |

Afbeelding 5. Specifieke energie en krachten



proces:
 uitwendig insteekslipen
 $V_w = 250 \text{ mm}^3/\text{mm}$
slijpschijf:
 B64 VSS 2804 GA V360
 $d_s = 150 \text{ mm}$
 $v_c = 80 \text{ m/s}$
werkstuk:
 16 Mn Cr 5, 775 HV
 $d_w = 80 \text{ mm}$
 $v_f = 1 \text{ m/s}$
dressen:
 cup dress gereedschap
 D 301
 $a_d = 2 \mu\text{m}$
 $U_d = 10$
 $q_d = 0,5$
koeling:
 $p_{\text{cilt}} = 30 \text{ bar}$
 $q_{\text{cilt}} = 35 \text{ l/min}$

Afbeelding 6. Invloed van specifieke materiaalafnamesnelheid op slijpkrachten

Specifieke energie, krachten

Een kwaliteit gerelateerde grootte is de specifieke energie, omdat deze de warmte-ontwikkeling in het proces bepaalt. De essentiële relaties zijn samen met enige typische procescondities bij het bewerken van gehard staal gegeven in afbeelding 5

Het benodigde vermogen wordt bij slijpen gewoonlijk afgeleid uit gemeten tangenciaalkrachten F'_t in relatie tot de actieve schijfbreedte (afbeelding 6) en bij draaien uit de snijkkrachten F_c (afbeelding 7). Deze krachten worden sterk beïnvloed door de materiaalafnamesnelheid. Bij het harddraaien is er een aanzienlijke invloed van de zijkantlijtage. Zoals te verwachten was is in de gegeven voorbeeldberekening (afbeelding 5) de specifieke energie bij het slijpen veel hoger dan bij het draaien.

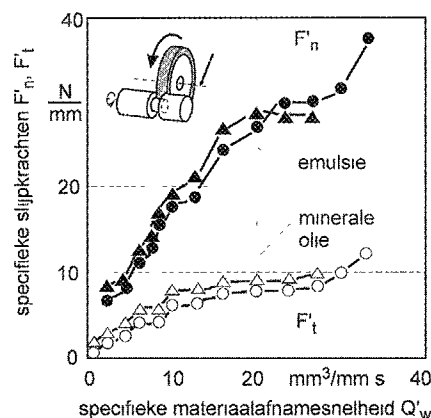
Voor de kwaliteit is de normaalkracht F_n of de teruggedrukkracht F_p belangrijk omdat deze de elastische vervorming van werkstuk, machine en gereedschap bepaalt. Uit afbeelding 5 valt op te maken dat er onder de gegeven condities geen principiële verschillen zijn tussen de krachten van de vergeleken processen. Echter, er dient rekening mee te worden gehouden dat bij het slijpen de normaalkracht kan worden geminimaliseerd door uitvonden, terwijl er bij het draaien een minimale spaandikte aanwezig moet zijn om een stabiel proces te garanderen. Deze minimum spaandikte hangt af van de stijfheid van het machine-werkstuk-gereedschap

systeem en van de afgeronde snijkantradius. Daarom is het met hoge-precisie-draaimachines met hydrostatische spijlersystemen vaak mogelijk de kwaliteit van hard-gedraaide werkstukken aanzienlijk te verhogen.

Thermische beïnvloeding van het werkstuk

De thermische belasting op het werkstuk kan worden beschouwd als de hoofd-invloedsfactor op oppervlaktebeschadigingen. Uit de specifieke energie e_c kan de thermische belasting van het werkstukoppervlak worden bepaald indien de ratio R bekend is. R is gedefinieerd als dat deel van het totale vermogen dat in het werkstuk gaat zitten. Voor het slijpproces wordt de ratio R geschat op 0,29. Dit is gebaseerd op uitgebreid experimenteel onderzoek.

Voor draaien wordt de ratio R lager geschat vanwege de "vaste stof convectie"; dat wil zeggen dat de warmte direct met de spaan wordt afgevoerd vanwege de hoge snijsnelheid. Dit is tegenstelling tot het slijpen, waar de voedingsnelheid van het gereedschap tegen het werkstuk relevant is. Bij gevolg is de contacttijd van de hittebron met het werkstuk bij het slijpen veel langer dan bij het harddraaien. De contactlengte is de geometrische – of meer precies gezegd de effectieve – contactlengte van het slijpwiel bij slijpen of de breedte van de vrijloopvlaklijtage VB bij draaien. Hieruit kan een aspect van de grote invloed van de vrijloopvlaklijtage op de toestand van het oppervlak bij het draaien worden afgeleid. De contacttijd bij het draaien is veel



proces:
 uitwendig insteekslipen
 $V_w = 250 \text{ mm}^3/\text{mm}$
slijpschijf:
 B64 VSS 2804 GA V360
 $d_s = 150 \text{ mm}$
 $v_c = 80 \text{ m/s}$
werkstuk:
 16 Mn Cr 5, 775 HV
 $d_w = 80 \text{ mm}$
 $v_f = 1 \text{ m/s}$
dressen:
 cup dress gereedschap
 D 301
 $a_d = 2 \mu\text{m}$
 $U_d = 10$
 $q_d = 0,5$
koeling:
 $p_{\text{cilt}} = 30 \text{ bar}$
 $q_{\text{cilt}} = 35 \text{ l/min}$

Afbeelding 7. Gereedschapslijtage en snijkkrachten voor harddraaien

| | slippen | harddraaien |
|----------------------------|---|--|
| bewegende warmtebron | | |
| intensiteit | $q''_w = R \cdot P''_c$ | $q''_w = R \cdot P''_c$ |
| specifiek vermogen | $P''_c = \frac{P'_c}{l_g} = \frac{e_c \cdot Q'_w}{l_g}$ | $P''_c = \frac{P'_c}{VB_c \cdot l_c} = \frac{e_c \cdot Q_w}{VB_c \cdot l_c}$ |
| contacttijd | $t_c = l_g / v_{ft}$ | $t_c = VB_c / v_c$ |
| bewegings-energie | $E''_w = q''_w \cdot t_c$ | $E''_w = q''_w \cdot t_c$ |
| karakteristieke parameters | $Q'_w = 12 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ $e_c = 40 \text{ J/mm}^3$, $R = 0,29$ $v_{ft} = 1 \text{ m/s}$, $l_g = 0,8 \text{ mm}$ | $Q_w = 50 \text{ mm}^3/\text{s}$, $VB_c = 0,2 \text{ mm}$ $e_c = 10 \text{ J/mm}^3$, $R = 0,15$ $v_c = 2,5 \text{ m/s}$, $l_c = 0,8 \text{ mm}$ |
| typische waarden | $q''_w = 174 \text{ W/mm}^2$ $t_c = 0,8 \text{ ms}$ $E''_w = 139 \text{ m J/mm}^2$ | $q''_w = 469 \text{ W/mm}^2$ $t_c = 0,08 \text{ ms}$ $E''_w = 38 \text{ m J/mm}^2$ |

Afbeelding 8. Thermische belasting van het werkstuk

korter en de temperatuurgradiënt is veel hoger. De metallurgische transformatiecondities zijn daarom zeer verschillend. Voor de thermische beïnvloeding is de "bewegingsenergie" van belang; dit is de energie die tijdens het contact met het gereedschap in het werkstuk is opgewekt in een specifiek punt. De bewegingsenergie E''_w is essentieel voor het bepalen van de maximum diepte van de opgewarmde zone, terwijl de intensiteit q''_w informatie geeft over de oppervlakte-temperatuur. De bewegingsenergiebron verplaatst zich bij het draaien met de snijsnelheid v_c en bij het slippen met de voedingssnelheid v_f . Alhoewel de intensiteit q''_w bij het slippen veel kleiner is, is de bewegingsenergie E''_w aanzienlijk groter vanwege de grotere contacttijden ten opzichte van het draaien (afbeelding 8).

Een andere factor met betrekking tot de belasting van het werkstuk kan worden bepaald uit de mechanische beïnvloeding door het vrijloopvlak van het draaigereedschap.

Mechanische beïnvloeding van het werkstuk

Om de mechanische belasting op het oppervlak van het gedraaide onderdeel te berekenen moet de kracht op het werkstuk die wordt opgewerkt door het vrijloopvlak bekend zijn. Onder de veronderstelling dat de wrijving op het vrijloopvlak en op het spaanvlak zich gedraagt volgens de wet van Coulomb, dat de passiekracht F_p loodrecht op de snijkant staat en dat de invloeden van de spaanhok en hel-

lingshoek verwaarloosbaar zijn, kunnen de volgende relaties gedefinieerd worden:

Uit de gemeten waarden van afbeelding 7 kunnen de minimum en maximum gemiddelde druk p (gemiddeld omdat aangenomen wordt dat de krachten op het vrijloopvlak uniform verdeeld zijn; min. en max. geven de slijtagetoestand aan) op het werkstuk worden afgeleid:

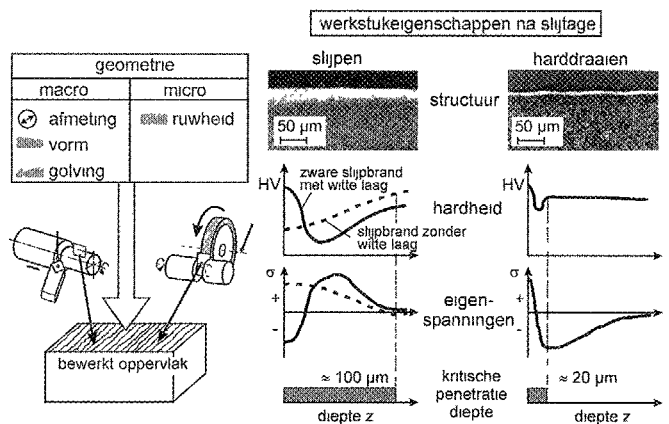
$$p_{VB,min} = F_p / VB_c \cdot l_c = 2500 \text{ N/mm}^2; p_{VB,max} = 2250 \text{ N/mm}^2$$

Het is twijfelachtig of de gemiddelde normaaldruk op eenzelfde manier voor het slijpproces kan worden gegeven omdat in feite alleen de korrels het werk doen en niet de gehele contactzone. Evenwel zal de actie van de aparte korrels over enige afstand van de contactzone worden uitgesmeerd. Bijgevolg wordt hier de gemiddelde druk gegeven, waarbij er rekening mee wordt gehouden dat deze grootte de actie alleen over een afstand van het oppervlak kan beschrijven die groter is dan de gemiddelde korrelafstand in het actieve oppervlak van het slijpgereedschap. Zoals verwacht is de slijpdruk p_{sl} veel lager dan bij het harddraaien en deze kan onder bovenstaande overwegingen worden berekend met de gemeten waarden van afbeelding 6 als zijnde:

$$p_{sl} = F_N / l_g \cdot a_p = 8...26 \text{ N/mm}^2$$

Werkstukkwiteit

De micro- en macro-geometrische eigenschappen van geslepen en gedraaide oppervlakken zijn erg afhankelijk van externe invloeden. In het bijzonder bij het draaien zijn



Afbeelding 9 Werkstukkwiteit na het slippen of harddraaien

het dynamisch en statisch gedrag van machine en werkstuk essentieel. Met geschikte spillagersystemen, zoals bijvoorbeeld hydrostatische lagers, kan een oppervlakteruwheid van $R_z = 1 \mu\text{m}$ en minder worden bereikt.

Deze wordt echter slechter als de slijtage van het gereedschap toeneemt. Bij het slijpen is deze ruwheid, zelfs met CBN-schijven, ook geen probleem. Gewoonlijk zijn de vormfouten bij het draaien kritischer dan bij het slijpen. Dit is enerzijds toe te schrijven aan de mogelijkheid van uitvallen bij het abrasieve proces en anderzijds aan de grens van een minimum spaandikte bij het harddraaien. Met betrekking tot de oppervlaktesteldheid (*eng surface integrity*) moeten zowel de structuur- en hardheidsveranderingen als de eigenspanningen (inwendige spanningen) in beschouwing genomen worden. Afbeelding 9 rechts toont de resultaten van de verschillende processen na zware slijtage van het gereedschap. Beide processen kunnen witte etslagen (*eng. WEA white etching areas*) genereren. Deze lagen worden gekenmerkt door hoge hardheidswaarden, gevolgd door een uitgloeizone met gereduceerde hardheid. Evenzo zijn de eigenspanningen in het werkstuk te wijten aan thermische en mechanische effecten. Eigenspanningen zijn een belangrijke eigenschap om het functionele gedrag van een werkstukoppervlak te bepalen. Bij slijpbrand met witte etslagen zijn gewoonlijk drukeigenspanningen in het oppervlak aanwezig; trekeigenspanningen zijn echter aanwezig in de sub-oppervlaktelagen. Bij lagere materiaalafnamesnelheden zonder slijpbrand worden alleen drukeigenspanningen gegenereerd, hetgeen gunstig is voor een aantal functies. Bij toenemende gereedschapslijtage worden bij harddraaien altijd trekeigenspanningen aangetroffen, terwijl drukeigenspanningen tot grotere diepten worden opgewekt. Dit is het gevolg van een dominant effect door wrijving tussen vrijloopvlak en werk-

stuk. Een ander belangrijk verschil heeft te maken met de penetratiediepte van het proces. Slijpen doet zijn invloed gelden tot een diepte van ongeveer $100 \mu\text{m}$, terwijl harddraaien deze begrenst op $20 \mu\text{m}$. De invloed van deze verschillende oppervlaktesteldheden op het functioneel gedrag van het werkstuk is onderwerp van verder onderzoek.

Conclusies

Het nemen van de juiste beschikking met betrekking tot draaien of slijpen als het meest geschikte nabewerkingsproces voor gehard stalen componenten is in de hedendaagse productie een steeds meer aan belang winnende taak. De vergelijking van de hoofdmechanismen in beide nabewerkingsprocessen biedt een basis voor evaluatie met betrekking tot fysieke en technologische data. De beschouwing van de materiaalafnamesmechanismen laat in beide processen overeenkomsten zien tussen de negatieve spaanhoek en de zich voortdurend wijzigende ongedeformeerde spaandikte. De relatieve bewegingen en snelheden tussen gereedschap en werkstuk verschillen over een groot gebied. Materiaalafnamesnelheden zijn van dezelfde orde, maar de oppervlakte-generatiesnelheid is bij het slijpen veel beter dan bij het draaien. Aan de andere kant is de bewegingsenergie, welke essentieel is voor de bepaling van de maximum diepte van de opgewarmde zone, bij het harddraaien aanzienlijk lager vanwege de kortere contacttijden in vergelijking met het slijpen. Naar de oppervlaktesteldheid en haar invloed op de vermoeiingsterkte van hard-gedraaide werkstukken wordt momenteel verder onderzoek verricht. Dit aspect buiten beschouwing gelaten zijn onder geschikte condities bij het draaien en slijpen geometrische werkstukqualiteiten van IT6 haalbaar.