

# POLIRANJE Z LASERSKIM ŽARKOM

Tadej Muhič<sup>1</sup>, Janez Tušek<sup>2</sup>, Janez Možina<sup>2</sup>, Matej Pleterski<sup>2</sup>, Ladislav Kosec<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tehnološkokonzultantski center Ljubljana, Trnovska ulica 8, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva cesta 6, 1000 Ljubljana

<sup>3</sup>Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana

## POVZETEK

V delu je opisan najnovejši razvojni dosežek na področju laserskega poliranja kovin s poudarkom na postopku laserskega poliranja s pretaljevanjem.

## Polishing with laser beam

### ABSTRACT

The present work describes the novelities in the field of laser polishing of metals, with special emphasis on the process of laser polishing by remelting.

## 1 UVOD

Število laserskih sistemov za različne industrijske aplikacije se v svetu povečuje (medicina, industrija, druga strateška področja) <sup>(1)</sup>. Ena izmed prodirajočih tehnologij laserske obdelave je laserska obdelava površine. Ker so se na trgu pojavili novi, zmogljivejši laserji in so se zahteve za kvaliteto površin zaostrele, so se nekateri proizvajalci zahtevnejših izdelkov odločili za uporabo lokalne toplotne obdelave kovinske površine.

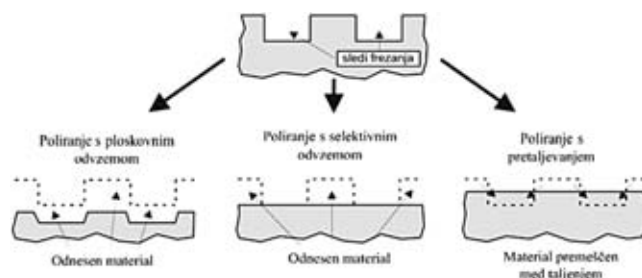
Za izboljševanje kakovosti površine se laserska tehnologija za poliranje optičnih elementov uporablja že 10 let. Analiza eksperimentalnega dela pokaže, da je bil postopek laserskega poliranja uporabljen predvsem na diamantnih površinah <sup>(2-4)</sup> in optičnih lečah <sup>(5)</sup>. Kakorkoli že, obstaja le nekaj del, ki preučujejo lasersko poliranje kovinskih površin, in le stežka najdemo oprijemljive rezultate. Nadalje, citirane reference kažejo na to, da je na tem področju pomanjkanje sistematičnega in logičnega raziskovanja.

## 2 TEORETIČNE OSNOVE POLIRANJA Z LASERSKIM ŽARKOM

Pri poliranju z laserskim žarkom lahko v literaturi najdemo opise treh načinov obdelave: poliranje z odvzemanjem velikega področja (ploskovni odvzem), poliranje s selektivnim odvzemanjem in v tem delu poliranje s pretaljevanjem.

Poliranje s ploskovnim odvzemanjem se večinoma izvaja s pulznim laserjem, ki temelji na intenzivnejšem odnašanju štrlečih vrhov in konic ter zmanjšanjem odnašanju dolin.

Pri poliranju s selektivnim odvzemanjem se najprej natančno izmeri dejanski profil in nato se selektivno odnaša lokalne vrhove in ostanke predhodnih obdelo-



Slika 1: Procesni načini poliranja z laserskim žarkom na primeru površine, obdelane s frezanjem

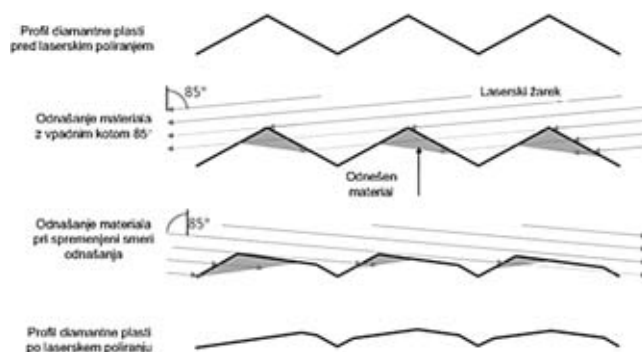
valnih postopkov. Zato je treba uporabiti zelo občutljivo merilno napravo.

Tretja procesna možnost je poliranje s pretaljevanjem. Ko je tanka površinska plast staljena, kot posledica površinske napetosti nastaja tok materiala z vrhov v doline. Tu ne gre za odstranjevanje materiala, vendar zgolj za njegovo premikanje zaradi taljenja. Natančno poznanje mesta vrhov in dolin ni potrebno.

Nadalje bodo predstavljene vse tri procesne variante v odvisnosti od vrste materiala.

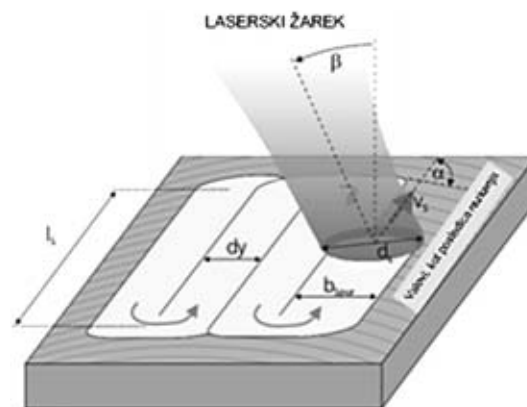
### 2.1 Poliranje s ploskovnim odvzemanom materiala

Poliranje s ploskovnim odnašanjem je večinoma uporabljeno za CVD diamantne plasti in plošče <sup>(6-8)</sup>. Za večino materialov se uporabljajo ekscimerski laserji (ArF, KrF, XeCl). Za debelejšje plasti in plošče so primerni tudi ionski argonski laserji, bakreni parni laserji in frekvenčno podvojeni Nd:YAG-laserji, ki jih navadno kombinirajo z ekscimerskimi laserji za končno obdelavo. Da bi lahko zagotovili povečano odstranjevanje materiala s profilnih vrhov, se izvede



Slika 2: Shematični prikaz poliranja diamantnih plasti in plošč z laserjem

lasersko poliranje z naklonom laserskega žarka vse do  $85^\circ$  glede na normalo površine (slika 2). Dodatno odzemanje lahko dosežemo, če med obratovanjem rotiramo obdelovanec. Hrapavost tankih plasti ( $<100 \mu\text{m}$ ) z izhodiščno  $R_a = 0,1\text{--}1 \mu\text{m}$  se lahko zmanjša za faktor od 2 do 4. Za debele plasti z začetnim  $R_a = 20\text{--}30 \mu\text{m}$  so možne še višje stopnje zmanjšanja hrapavosti. Procesni čas je med nekaj minutami pa vse do nekaj ur za kvadratni centimeter. To je odvisno od laserskega izvira, števila stopenj procesa in začetne hrapavosti.



Slika 3: Shema laserskega poliranja

## 2.2 Poliranje z lokalnim odvzemom materiala

Poliranje z lokalnim odvzemom materiala temelji na kontroliranem odvzemu vrhov profila s pulznim laserskim žarkom. Za določitev pozicije vrhov profila je potrebna natančna analiza profila površine. Princip tega procesa je opisan v patentni prijavi <sup>(9)</sup>, vendar niso podani detajli procesnih parametrov, dosežena hrapavost površine in čas trajanja procesa. Do danes proces še ni bil detajlno raziskan in opisan. V industriji se proces lokalnega odnašanja materiala uporablja predvsem za strukturiranje površin.

## 2.3 Poliranje s pretaljevanjem

Poliranje z laserskim žarkom omogoča nov postopek avtomatskega poliranja 3D-oblik <sup>(10-11)</sup>. Prednosti laserskega poliranja so:

- visoka zmožnost za avtomatizirano obdelovanje in s tem visoka ponovljivost postopka;
- visoka hitrost procesa laserskega poliranja v primerjavi z drugimi postopki, zlasti v primerjavi z ročnim poliranjem;
- ni nikakršnega onesnaževanja z odpadki, ki nastanejo kot posledica brušenja oz. poliranja;
- ena laserska naprava nam lahko omogoča tako poliranje kot strukturiranje površine;
- proizvodnja definira nastavljivo kakovostno stanje površine.

## 3 POLIRANJE KOVIN PO POSTOPKU LASERSKEGA PRETALJEVANJA POVRŠINE

### 3.1 Parametri laserskega žarka

V primerjavi s klasičnimi postopki brušenja in poliranja je lasersko poliranje večstopenjski proces. Površine se z večkratnim prehodom laserskega žarka poravnajo in tako dobimo bolj ravno površino (slika 3). Najpomembnejši parametri postopka so prikazani na sliki 3 in v tabeli 1.

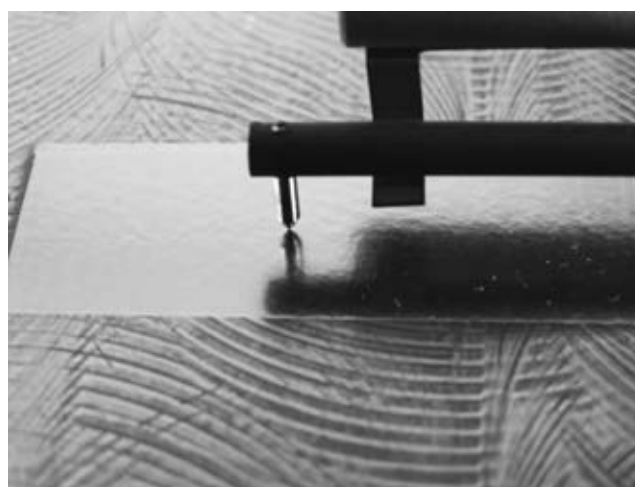
Tabela 1: Vplivni parametri laserskega postopka

Parametri postopka	oznaka
Premer laserskega žarka na obdelovancu	$d_L$
Kot obdelave glede na smer freziranja	$\alpha$
Zamik poti laserskega žarka	$d_v$
Hitrost	$v_s$
Povprečna moč laserskega sevanja	$P_L$
Število laserskih poti	$n$
Način delovanja laserja kontinuirno/pulzno	LM
Čas trajanja pulza	$t_p$
Frekvenca	$f_L$
Kot vpada laserskega žarka	$\beta$
Dolžina poti laserskega žarka	$l_s$
Porazdelitev intenzitete	$I_{(x,y)}$

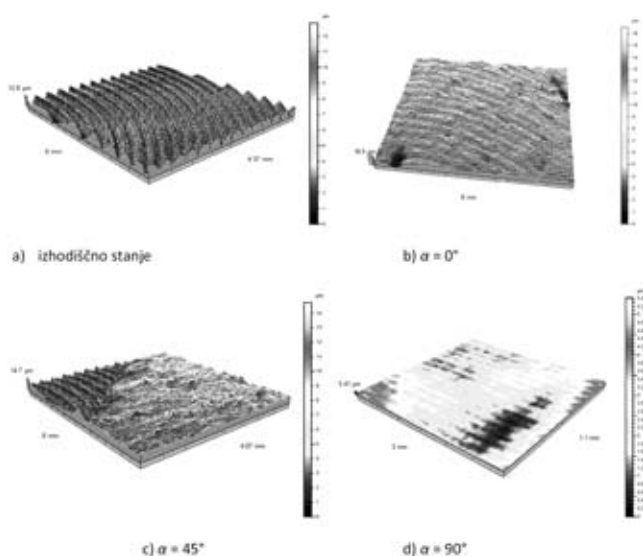
### 3.2 Procesni parametri

Proces mora biti izveden vse od rezkanja ali erozije (v nadaljevanju bomo uporabljali izraz **makropoliranje**) pa vse do izboljšave stopnje hrapavosti (v nadaljevanju bomo uporabljali izraz **mikropoliranje**).

Pri makropoliranju s kontinuirnim laserskim žarkom je raztaljena tanka površinska plast materiala debeline  $20\text{--}80 \mu\text{m}$ . V raztaljenem stanju nastaja



Slika 4: Površina, obdelana s frezanjem in nato polirana z laserskim žarkom



**Slika 5:** 3D-topografija površine v odvisnosti od kota obdelave laserskega žarka glede na smer frezanja;  $P = 390$  W,  $d_y = 0,01$  mm,  $d_L = 0,6$  mm,  $v = 20$  mm/s, CW,  $n = 1$

glajenje površine kot posledica izbire ustreznih procesnih parametrov zaradi delovanja mejne površinske napetosti.

Mikropoliranje s pulznim laserskim žarkom je kombinacija procesov pretaljevanja in uparjanja mikrovrhov na površini. Mikrostruktura površine se lahko tako določa z dolžino pulzov.

### 3.3 Zmožnosti procesa poliranja

Doseženi parametri hrapavosti so odvisni od naslednjih vplivnih parametrov:

- od začetne hrapavosti površine;
- od termične lastnosti materiala (toplotna prevodnost, koeficient prevodnosti, viskoznost taline, temperatura uparjanja ...);
- od homogenosti materiala (segregacije in vključki negativno vplivajo na kvaliteto površine);
- od velikosti zrn materiala (z manjšanjem velikosti zrn se izboljšuje stopnja poliranja).

Omejitev za minimalno dosegljivo površinsko hrapavost je stanje oz. valovitost površine po poliranju s kontinuirnim laserskim žarkom (po koraku 1).

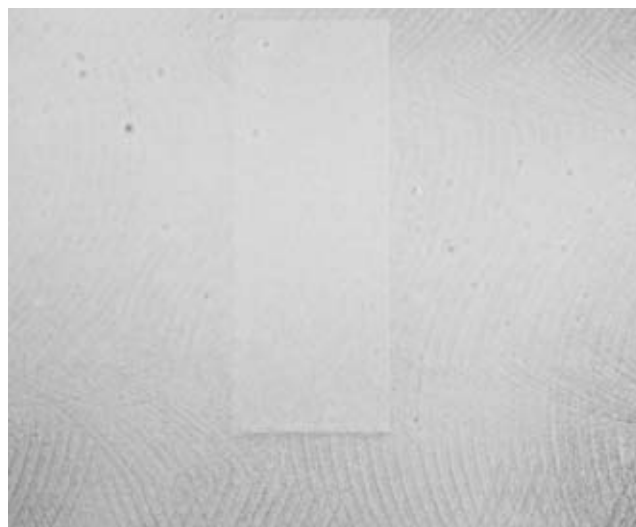
Površinska valovitost nastaja predvsem kot posledica načina laserskega poliranja. Oscilacije stroja in nehomogenosti v materialu negativno vplivajo na povečanje valovitosti in na zmožnost materiala za poliranje. Toplotna obdelava in mikrostruktura materiala pa po dosedanjih raziskavah jekla 1.2343 nimajo značilnega vpliva na lasersko poliranje.

Lasersko lahko poliramo tako orodna jekla (1.2343, 1.2344, 1.2316), legirana jekla (1.4404, 1.4435), titanove zlitine (TiAl6V4) in legure (Co-Cr, Cu-Al). Erodirane in brušene površine lahko pri orodnih jeklih obdelamo do velikostnega razreda hrapavosti od  $R_a = 1-3$   $\mu\text{m}$  do  $R_a = 0,15-0,25$   $\mu\text{m}$ . Minimalna stopnja hrapavosti je odvisna od izhodiščnega stanja in vrste jekla.

Tipične hitrosti obdelave površine so  $0,2-6$   $\text{s/cm}^2$ . Odvisne so predvsem od moči laserskega žarka, materiala in zahtevane hrapavosti.

### 3.4 Metalografska analiza polirane površine

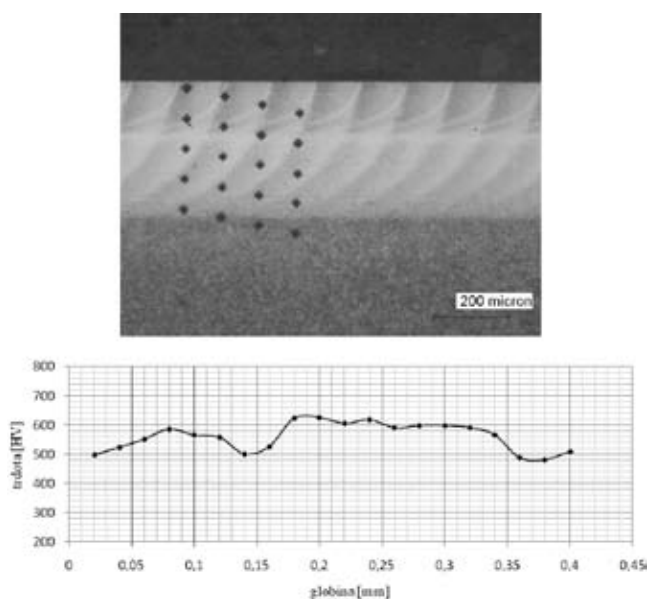
Preiskava pretaljene plasti na površini in na poliranem prerezu z optičnim mikroskopom dokazuje, da ni por in razpok v materialu. Dokaz o tem je izveden z difuzijo penetranta.



**Slika 6:** Odkrivanje razpok s penetrantsko metodo

**Tabela 2:** Rezultati laserskega poliranja različnih materialov <sup>(10,12)</sup>

material	Varianta laserskega poliranja	Začetna hrapavost $R_a$	Hrapavost po 1. poliranju $R_a$	Procesni čas
Orodno jeklo 1.2343, 1.2344, 1.2316, 1.2365	makro	1–4 $\mu\text{m}$	0,07–0,15 $\mu\text{m}$	60–180 $\text{s/cm}^2$
1.3344	mikro	0,5–1 $\mu\text{m}$	0,3 $\mu\text{m}$	3 $\text{s/cm}^2$
titanova zlitina, TiAl6V4	makro	3 $\mu\text{m}$	0,5 $\mu\text{m}$	10 $\text{s/cm}^2$
	mikro	0,3–0,5 $\mu\text{m}$	0,1 $\mu\text{m}$	3 $\text{s/cm}^2$
Bron	makro	10 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	10 $\text{s/cm}^2$
1.4435, 1.4571	makro	1–3 $\mu\text{m}$	0,2–1 $\mu\text{m}$	60–120 $\text{s/cm}^2$



**Slika 7:** Prečni prerez in profil trdote polirane površine po laserskem pretaljevanju,  $P = 390$  W,  $d_s = 0,01$  mm,  $d_L = 0,6$  mm,  $v = 20$  mm/s, CW,  $n = 1$ , material: 1.2343

Pri pretaljevanju površinske plasti se predhodna struktura popolnoma pretali in tako nastane homogenizacija strukture v pretaljenem področju. Kot posledica visoke hitrosti strjevanja je nastajanje strukture, prikazane na sliki 7. Globina pretaljene cone je  $135\ \mu\text{m}$ . Toplotno vplivana cona sega do globine  $350\ \mu\text{m}$ .

### 3.5 Obdelovalna naprava za 3D-lasersko poliranje

Naprava za lasersko poliranje je bila razvita pod okriljem projekta z imenom "POLAR". Osnova naprave je konvencionalni frezalni stroj. Vsi drugi potrebni sistemi so bili nato vgrajeni v že obstoječo napravo.

Laserski žarek je s 3D-lasersko skenirno pripravo voden in odklanjan. Hitrost laserskega skenirnega sistema je do  $5\ \text{m/s}$ . Pozicioniranje obdelovanca poteka



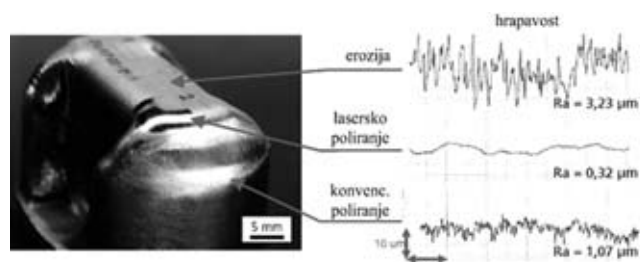
**Slika 8:** Naprava za 3D-lasersko poliranje <sup>(13)</sup>

prek 5-osnega sistema (3 linearne osi, 2 rotacijske osi). Krmiljenje parametrov laserskega žarka, laserskega skenerja, dovoda zaščitnega plina je voden s krmilnikom (Siemens 840 D). Pri razvoju obdelovalnih strategij za zahtevnejše 3D-geometrije se kaže dodatna potreba po obsežnejših raziskavah. Raziskave se nanašajo predvsem na obdelovanje ostrih robov in zaokrožitev. Razvoj naprave temelji na napredku strežne tehnike, ki bi omogočila uspešnost tridimenzionalnega poliranja. Zato je še posebej pomemben razvoj industrijske naprave za lasersko poliranje z integriranim CAD/CAM-sistemom.

### 3.6 Primeri uporabe laserskega poliranja

#### Izdelava orodij in form

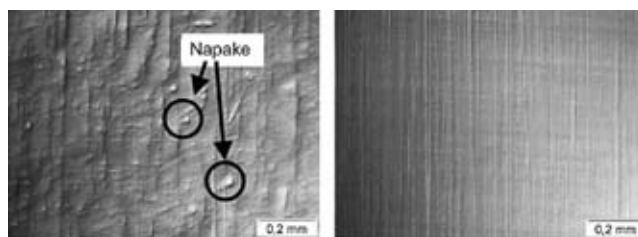
Pri izdelavi orodij in form obstajajo višje zahteve po avtomatizirani obdelavi postopka poliranja zahtevnejših 3D-oblik. Veliko orodij in form ne moremo polirati z avtomatiziranimi postopki, zato je tu še vedno prevladujoča oblika ročnega poliranja. Navadni časi ročnega poliranja so  $10\text{--}30\ \text{min/cm}^2$



**Slika 9:** Kovaški bat iz jekla 1.2343, delno lasersko poliranega <sup>(10)</sup>

#### Porozni materiali

S konvencionalnimi postopki brušenja in poliranja, kot je npr. mehansko brušenje in poliranje ali elektropoliranje, ne moremo doseči takega stanja površine, ki ne bi vsebovalo defektov. S postopkom odnašanja vedno znova odkrivamo pore v materialu. Z laserskim pretaljevanjem lahko tako pri poroznih materialih pore v pretaljeni plasti zapremo in s tem dobimo površino brez defektov.



**Slika 10:** Prikaz površine materiala titanove zlitine (TiAl6V4); slika levo: mehansko brušeno; slika desno: lasersko polirana površina, kasneje obdelana z brušenjem <sup>(10)</sup>

*Farmaceutvska, prehranska in biotehnologija*

S postopkom konvencionalnega mehanskega brušenja in poliranja nastajajo na površini obdelovanca lokalni vrhovi in doline. Pri nadaljnjem postopku poliranja se ti lokalni vrhovi vtisnejo v lokalne doline in jih tako deloma zaprejo. Te majhne nepravilnosti ni mogoče vizualno zaznati. V teh mikroskopskih vdolbinicah se nato začnejo nabirati in razmnoževati bakterije. Le te lahko kontaminirajo izdelke in povzročijo veliko gospodarsko škodo.

Kot posledica laserskega poliranja s pretaljevanjem je površina brez lokalnih vdolbinic.

**4 LITERATURA**

- <sup>1</sup>H. Golnabi, M. H. Mahdieh, *Optics and Laser Technology*, 38 (2006), 122–131
- <sup>2</sup>A. Erdemir, M. Halter, G. R. Fenske, A. Krauss, D. M. Gruen, S. M. Pimenov, V. I. Konov, *Surface and Coatings Technology*, 94–95 (1997), 537–542
- <sup>3</sup>G. A. Shafeev, S. M. Pimenov, E. N. Loubnin, *Applied Surface Science*, 86 (1995), 392–397
- <sup>4</sup>S. Hogmark, P. Hollman, A. Alahelisten, P. Hedenqvist, *Wear* 200 (1996) 1–2, 225–232
- <sup>5</sup>S. Gloor, W. Lüthya, H. P. Weber, S. M. Pimenov, V. G. Ralchenko, V. I. Konov, A. V. Khomich, *Applied Surface Science*, 138–139 (1999), 135–139
- <sup>6</sup>S. M. Pimenov, V. V. Kononenko, V. G. Ralchenko, V. I. Konov, S. Gloor, W. Lüthy, H. P. Weber, A. V. Khomich, *Applied Physics A*, May 1999, Band 69, S. 81–88
- <sup>7</sup>R. K. Singh, D. G. Lee, *Journal of electronic materials*, 1996, Band 25, Heft 1, S. 137–142
- <sup>8</sup>A. P. Malshe, B. S. Park, W. D. Brown, N. A. Naseem, *Diamond and related materials*, 1999, Band 8, Heft 7, S. 1198–1213
- <sup>9</sup>A. Bestenlehrer, *Verfahren und Vorrichtung zum Bearbeiten von beliebigen 3D Formflächen mittels Laser*, Europäische Patentschrift EP 0 819 036 B1, 1996
- <sup>10</sup>E. Willenborg, *Polieren von Werkzeugstählen mit Laserstrahlung*, Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag Aachen 2006
- <sup>11</sup>J. A. Ramos, J. Murphy, K. Wood, D. L. Bourell, J. J. Beaman, *Konferenz-Einzelbericht: Solid Freeform Fabrication Proceedings, Proc. of the SFF Symp.*, 2001, 28–38
- <sup>12</sup>T. Kiedrowski, *Oberflächenstrukturbildung beim Laserstrahlpolieren von Stahlwerkstoffen*
- <sup>13</sup>Workshop – "Polieren mit Laserstrahlung" Abschlusspräsentation zum Verbundprojekt "POLAR" 11. oktober 2007