

POVRŠINSKA OBDELAVA MATERIALA – OBSTRELJEVANJE S KROGLICAMI

Uroš Zupanc

Institut za varilstvo, Ptujška 19, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Proces obstreljevanja površine s sferičnimi delci je pomembna in že dolgo poznana površinska obdelava v hladnem. Namen obstreljevanja površine različnih strojnih in konstrukcijskih elementov s kroglicami je povečati trajno dinamično trdnost in korozijsko odpornost obremenjenih površin elementov. Ta postopek utrjevanja z lokalno površinsko plastično deformacijo v materialu ustvari zaostale tlačne napetosti in poveča trdoto v tankem površinskem sloju, kar zavira nastanek in rast razpok.

Surface treatment of materials – shot peening

ABSTRACT

Shot peening has been an important and well-known surface cold-hardening process applicable to various machine parts and tool surfaces for quite a long time since it improves fatigue strength and corrosion resistance of the stressed surface. Because of plastic deformation, hardening by shot peening provides an increase in hardness and induces compressive residual stresses in the thin surface layer, which reduces material fatigue and prevents the generation and propagation of cracks.

1 UVOD

Proces obstreljevanja površine z delci (angl: *shot peening*, nem: *Kugelstrahlbearbeitung*) je pri nas in v tujini dobro poznana površinska industrijska obdelava materiala, katere namen je povečati uporabnost dinamično obremenjenih izdelkov, izboljšati njihove mehanske lastnosti ter obrabno in protikorozijsko odpornost. *Shot peening* (v nadaljevanju SP) je podoben klasičnemu "peskanju" izdelkov s to razliko, da se med obdelavo uporablja sferični medij, ki ga sproti kontroliramo. Pomembno je, da je medij (kroglice) brez ostrih robov in znotraj po standardih določenih toleranc oblike, materiala in velikosti (mase). Pri SP-postopku gre torej za t. i. "mikrokovanje" celotne površine s kroglicami, ki jih pospešujemo v avtomatiziranih sistemih. Postopek je standardiziran po SAE AMS-2430M, ki je nadomestil dosedanji standard z oznako SAE AMS-13165.

Udarne energija medija je odvisna od hitrosti (20–150 m/s), udarnega časa (nekaj nanosekund) in seveda mase medija. Pri SP ob udarcu kroglice v tankem površinskem sloju ustvarimo lokalno plastično deformacijo zaradi razrivanja materiala (slika 1). Tlačno obremenjena kristalna zrna se po deformaciji poskušajo povrniti v prvotno obliko. Ovirana relaksacija privede do zaostalih tlačnih napetosti v globini do nekaj desetink milimetra. Te zaostale tlačne napetosti so ugodne, saj zavirajo nastanek in rast površinskih razpok na sami površini in pod njo. Poleg

tega intenzivna površinska plastična deformacija vpliva na mikrostrukturne spremembe oblike kristalnih zrn, utrditev tankega površinskega sloja in povečanje števila dislokacij. SP-obdelava tudi izboljša odpornost v korozijskih atmosferah z zaviranjem širjenja korozijskih razpok. SP ima še poseben pomen pri delih, ki ne smejo biti toplotno obdelani, a zahtevamo obrabno površinsko odpornost. Lastnosti utrjevanja površine so seveda odvisne od mehanskih lastnosti kovine oz. njene zlitine.

Induciranje kontroliranih zaostalih napetosti z SP-postopkom se s pridom uporablja v industriji. Še posebej je postopek aktualen v letalski, avtomobilski, medicinski in jedrski industriji. Uporabnost SP-postopka zaradi ugodnih vplivov na mehanske lastnosti obdelovancev se kaže v zmanjšanju mase strojnih elementov, ki morajo biti ustrezno dimenzionirani za dane obremenitve (npr. pri vzmetnih mehanizmih v avtomobilski industriji, zobniških sistemih, rotorskih sistemih in vzletno-pristajalnih mehanizmih v letalski tehniki). Posledično omogoča razvoj manj konzervativnih dizajnov, kjer lahko v kombinaciji z ostalimi postopki obdelave površine zagotovimo ustrezno kakovost. Nadalje lahko določimo terminsko natančnejši sistem vzdrževanja, ki temelji na natančnem planiranju trajne dinamične trdnosti.

SP-postopek je le eden izmed postopkov "peening" za induciranje zaostalih napetosti. V zadnjih letih se pospešeno razvija sodoben način tehnologije "peening", kjer induciramo zaostale napetosti z udarnimi valovi, nastalimi s pulzirajočo lasersko svetlobo visokih energij. Postopek se imenuje "*laser shot peening*" in se že uporablja v letalski in vesoljski industriji. Omejitve industrijske uporabe so zaenkrat zelo visoki investicijski in posledično obratovalni stroški. Ena izmed možnih variacij obdelave z uporabo SP-tehnologije je razvoj v smeri natančnega oblikovanja obdelovanca (t. i. proces *shot peen forming*). Pri tem lahko s preciznim enostranskim ali obojestranskim



Slika 1: Zaradi udarne energije medija prihaja na površini do razrivanja materiala (levo), ki ustvari zaostale napetosti na površini in pod njo (desno) ⁽¹⁾.

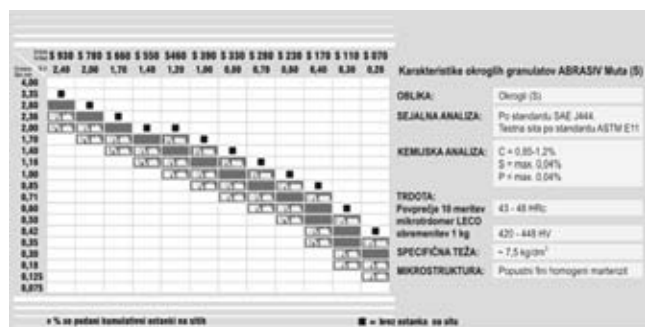
obstreljevanjem posameznih področij obdelovanca dosežemo zeleno spremembo oblike z izbočenjem materiala zaradi visokih lokalnih zaostalih napetosti. Nadalje je mogoče z izborom ustreznih nastavitvev SP-obdelave popravljati zvitost ali valovitost materiala zaradi predhodnih obdelav. Ker poteka SP-obdelava v hladnem, je posledično stabilnost same oblike zelo dobra.

2 KONTROLA IN IZVEDBA SP-POSTOPKA

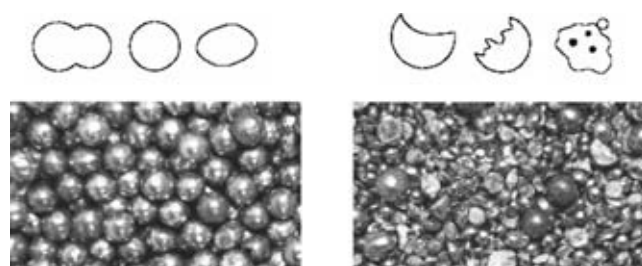
SP-tehnologija je za doseg želene kvalitete dokaj kompleksna tehnologija, čeprav je na prvi pogled videti enostavna. Da bi dosegli ustrezno produktivnost, učinkovitost in praktično uporabnost naših obdelanih izdelkov, je pri samem postopku treba spremljati parametre, ki opisujejo obdelovanec ter parametre same SP-obdelave. Določiti je tako treba ⁽²⁾: a) medij obdelave; b) stopnjo prekrivanja; c) intenziteto obdelave (energija medija); d) stopnjo nasičenja (saturacija).

Naprave za SP-obdelavo lahko delimo v dve kategoriji. Eno predstavljajo naprave, katerih princip delovanja temelji na principu rotacije, kjer medij usmerjamo na površino obdelovanca. Prednost rotirajočega pospeševalnega sistema je v usmerjanju medija z velikimi hitrostmi na površino, kjer je zato posledično potreben krajši čas obdelave. Ker pa pri samem postopku potrebujemo velike količine medija, je nujno potrebno obdelovanec zapreti v ustrezno komoro. Pripomniti velja, da seveda dimenzije komore omejujejo dimenzije obdelovancev. Zaradi kinetične energije medija prihaja do obrabe glave, lopatic in ostalih usmerjevalnih elementov ter tudi sten komore. Nadaljnji problem predstavljajo visoki stroški obdelovalnih naprav večjih dimenzij, zato se po navadi investicije v opremo namenjajo za procesiranje točno določenih obdelovancev. V velikih proizvodnjah se ta kategorija izkaže za najugodnejšo.

Drugo kategorijo predstavljajo sistemi, ki medij pospešujejo v curku stisnjene zraka. Obstaja več



Slika 2: Okrogel jekleni visokoogljčni (toplotno obdelan) granulati, primeren za SP-obdelavo, slovenskega proizvajalca Abrasiv Muta, d. o. o. ⁽³⁾

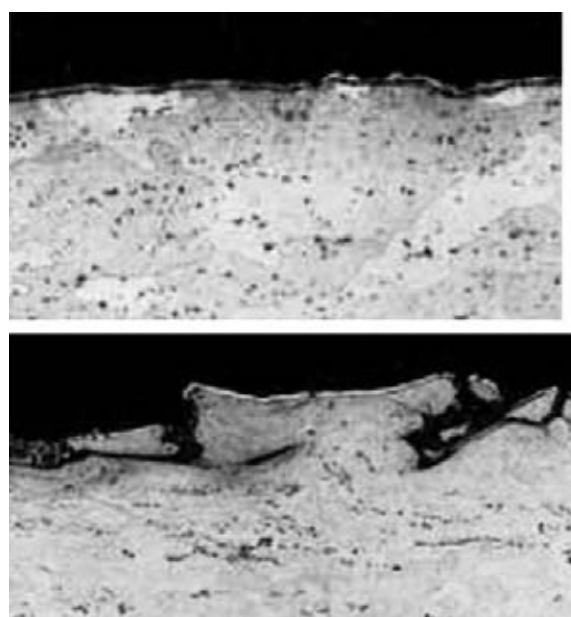


Slika 3: Primerna (levo) in neprimerna (desno) oblika medija SP ^(1,4)

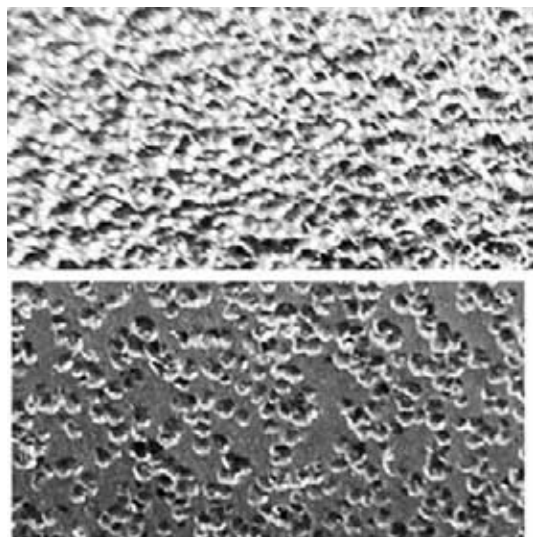
sistemov kot npr. črpanje z vakuumom, potiskanje v curek zraka, z izkoriščanjem gravitacije itd. Tudi tu se v večini primerov uporablja zaščitna komora zaradi zaščite operaterja. Glavna prednost te kategorije je njena možnost prilagajanja. Šoba se lahko giblje poljubno nad površino obdelovanca, fiksna postavitev in vpetje le-tega tako nista potrebna. Možna je uporaba za najrazličnejše tipe in oblike obdelovancev, takšne naprave so tako mnogo primernejše in cenejše v manjših obratih. Možna je tudi obdelava na terenu.

Uporaba medija je odvisna od mehanskih in uporabnih lastnosti obdelovanca. Uporabljajo se lahko jeklene, steklene ali keramične kroglice. Praktično se največ uporabljajo jeklene kroglice. Na sliki 2 so navedene lastnosti medija slovenskega proizvajalca podjetja Abrasiv Muta, d. o. o. Kako ugotoviti premer kroglice? Oznaka medija S170 npr. pomeni, da je povprečni premer kroglic 0,0170 inča oz. 0,4 mm.

Pri spremljanju kvalitete medija je zelo pomembno, da ga med proizvodnjo sprotno kontroliramo in neustreznega izločamo. Praktična je uporaba gravitacijskega spiralnega ločevalnika. Kako kvaliteta



Slika 4: Stanje površine po SP-obdelavi z ustreznim (zgoraj) in neustreznim (spodaj) medijem ⁽¹⁾

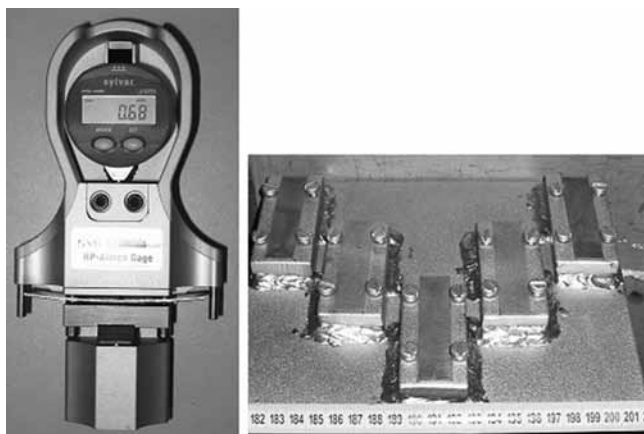


Slika 5: Primerjava med ustrezno dokončano (zgoraj) in nedokončano (spodaj) SP-obdelavo površine ⁽¹⁾

medija pomembno vpliva na kontrolo samega procesa, je prikazano na slikah 3 in 4 ^(1,3).

Stopnja prekrivanja je zelo pomembna, saj lahko premajhna gostota na eni oz. pregosto prekrivanje na drugi strani povzročita redukcijo ugodnih mehanskih karakteristik materiala. Standard ⁽²⁾ navaja, naj bo stopnja prekrivanja 100 % (*complete visual coverage*). V industrijski rabi zadostimo praktično popolnemu prekrivanju s stopnjo pokritosti 98 %, večkrat pa se uporabi stopnja 150 % ali 200 %. V zadnjem primeru naj bi teoretično na vsako točko obdelovanca udarili dve kroglici. Za kontrolo stopnje prekrivanja obstajajo posebni postopki, tudi programska oprema. Ena najenostavnejših možnosti je premaz površine s fluorescentnim sredstvom, ki se mora npr. po 100-odstotni stopnji prekrivanja v celoti odluščiti s površine. Kontrolo izvedemo z uporabo UV-luč.

Merjenje hitrosti medija v praksi zaradi raznih omejitev ni vpeljano, zato se skladno s standardom intenziteta obdelave določa oziroma meri s t. i. Almen

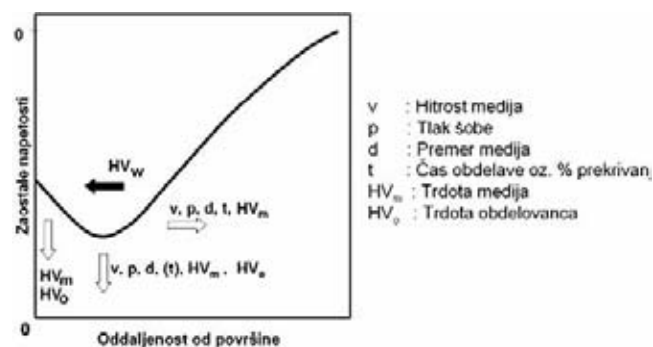


Slika 6: Praktična uporaba merjenja intenzitete obdelave po Almenu v slovenskem podjetju. Levo merilnik izbočenja ploščice ter njihov način pritrditve med obdelavo (desno)

testom. Pri Almen testih se uporabljajo standardizirane jeklene ploščice treh debelin (oznake A, C in N). Pri SP-obdelavi se ploščice zaradi nastalih zaostalnih napetosti zvijejo konveksno glede na stran obdelave. Maksimalna višina ali odklon je funkcija dovedene energije, ki se poda kot številčna vrednost intenzitete obdelave. Npr. intenziteta 8A, pomeni uporabo ploščice tipa A (debelina 1,27 mm), ki se je pri SP upognila za 0,008 inča oz. 0,2 mm. Poleg same intenzitete obdelave se uporabljajo ustrezne krivulje nasičenja (saturacije), ki nam povedo, kako dolgo naj bo posamezen obdelovanec v obdelavi. Dodati je treba, da podatek o intenziteti obdelave daje kvantitativno primerjalno vrednost raznih SP-obdelav. Treba je še opozoriti, da te vrednosti ne moremo direktno primerjati z mikrostrukturnimi spremembami in natančno vrednostjo zaostalnih napetosti v materialu. V kolikor je podana zahteva naročnika, zaostale napetosti po obdelavi merimo na več možnih načinov. Ta postopek je dokaj zahteven in večinoma poteka po sami obdelavi. Uporabljajo se večinoma porušne metode merjenja: merjenje z vrtnjem izvrtin, z rentgensko ali nevtronsko defrakcijo. Razvijajo se tudi neporušne metode kot npr. z uporabo ultrazvoka, akustične emisije, termokamere ipd.

Po SP-obdelavi je površina obdelovanca zaradi udarjanja medija hrapava, vendar lahko to, če je to seveda potrebno, z brušenjem ali poliranjem ustrezno izboljšamo. Pri tem pa moramo paziti, saj s tem vplivamo na profil zaostalnih napetosti. Nadalje lahko za boljšo kvaliteto površine vplivamo s t. i. dvojnim ali "dual" SP, kjer površino v drugo obstreljujemo z delci manjših premerov in manjšo gostoto obdelave ter tako znižamo stopnjo hrapavosti.

Toplotna stabilnost zaostalnih napetosti po samem procesu je ključna. Pri SP-procesu je treba opozoriti na sproščanje zaostalnih napetosti v izdelku, v kolikor je le-ta izpostavljen povišanim temperaturam bodisi zaradi uporabnosti ali naknadne toplotne obdelave. Spremembe vrednosti zaostalnih napetosti so za določen material seveda odvisne od maksimalne

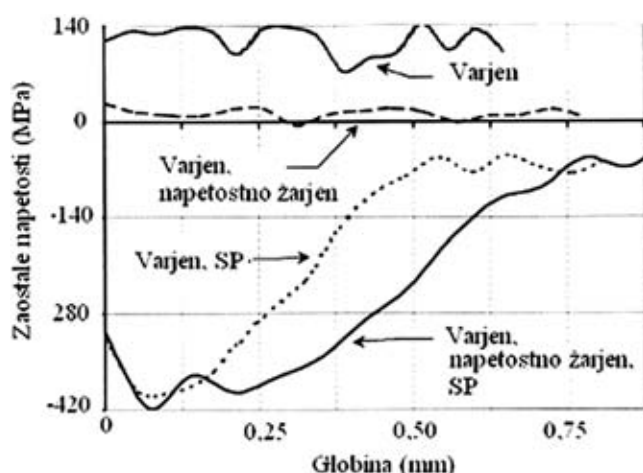


Slika 7: Shematski prikaz vpliva ključnih parametrov SP-obdelave na zaostale tlačne napetosti v materialu ⁽¹⁾

temperature in časa izpostave. Tako standard ⁽²⁾ v izogib neželenemu sproščanju priporoča maksimalno temperaturno mejo npr. za nizkoogljčno jeklo in titanove zlitine 250 °C, za aluminijeve zlitine pa 100 °C. Pri pogostem izpostavljanju strojnih elementov temperaturnim spremembam se moramo zavedati pojava toplotnega utrujanja materiala z menjajočimi se pogostimi toplotno-hladilnimi cikli, katerih vpliv ni zanemarljiv. Tako nastajajo v materialu različni temperaturni gradienti, katerih rezultat sta neenakomerno raztezanje in krčenje ter posledično neugodno notranjenapetostno stanje.

3 PRAKTIČNI PRIMERI UPORABE SP-TEHNOLOGIJE

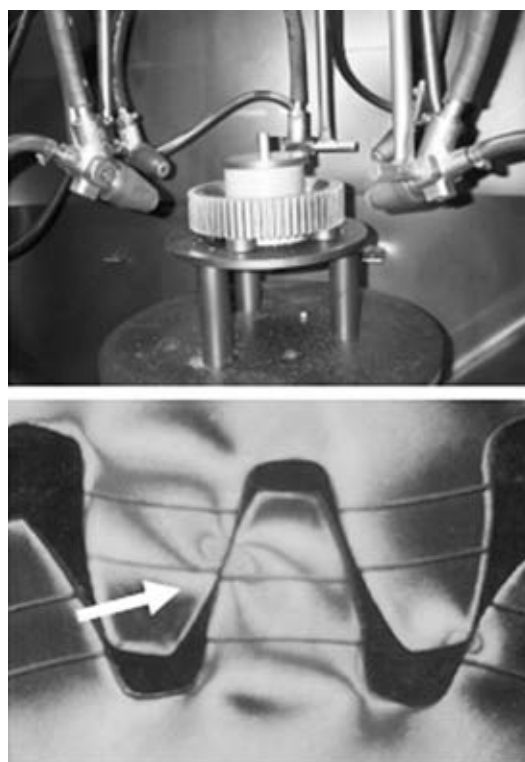
Ključna lastnost SP-procesa je torej značilno povečanje odpornosti materiala pri dinamičnem utrujanju. To dosežemo z induciranimi zaostalimi tlačnimi napetostmi, saj zaviramo nastanek in širjenje razpok v strukturi obremenjenega materiala. Danes obstaja v industriji mnogo aplikacij te tehnologije. Tako se SP uporablja konkretno na naslednjih strojnih delih avtomobilske, letalske, procesne in ostale industrije: ojnice, osi, zobniški, cilindrični, membranski in vzmetni sistemi, kardanske gredi in spoji, sklopke, turbinski sistemi, rotorji in ventilatorji, posamezni sestavni deli kompresorjev in črpalke, pnevmatskih orodij, pristajalni mehanizmi pri letalih, toplotni izmenjevalci, ventili, tlačne posode, mešalni sistemi idr. Skupna lastnost vseh omenjenih elementov so dinamične obremenitve. Nadalje se SP pri jeklenih konstrukcijah uporablja na področjih večjih koncentracij napetosti kot npr. ob izvrtinah, zarezah, dimenzijskih prehodih, vogalih, zvarnih spojih, posameznih detajlih tankostenskih konstrukcij in ostalih posebnostih ali oblikah. Obstajajo še številne druge



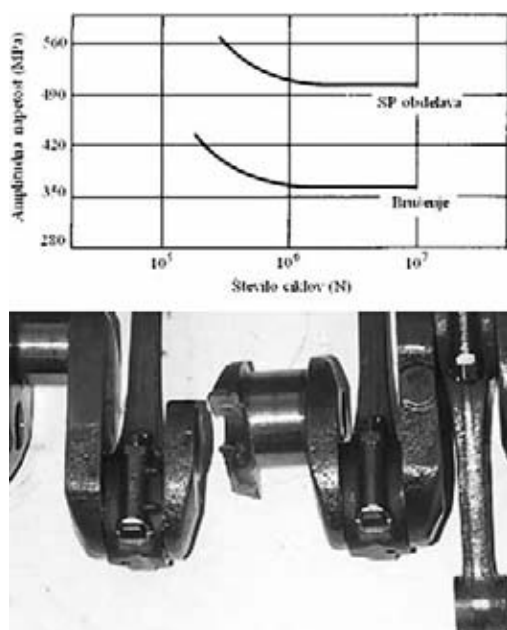
Slika 8: Analiza zaostalih napetosti po varjenju jekla ter po kombinacijah naknadnih obdelav, ki vplivajo na odpornost materiala pri dinamičnih obremenitvah ⁽¹⁾

možnosti uporabe, in sicer: zmanjšanje anomalij po toplotni obdelavi materiala (npr. po procesu karbo-niziranja, nitriranja ali karbonitriranja jekla), čiščenje in dekontaminacija površin obdelovanca, odprava manjših podpovršinskih poroznosti v materialu, obdelava po varjenju, povečevanje ali zmanjševanje hrapavosti površine, obdelava implantov, upogibanje ali izravnavanje, povečanje trdote tankega sloja pod površino, zaobljenje ostrih robov obdelovancev, različne estetske obdelave itd. Tudi v Sloveniji se ta postopek namensko uporablja. Tako npr. ravensko podjetje Styria vzmeti, d. o. o., izvaja SP pri obdelavi listnatih vzmeti za tovorni program. Tudi livarne "peskajo" ulitke s sferičnim medijem.

Predstaviti podrobnosti vpliva induciranih zaostalih napetosti z SP-postopkom na delovanje posameznih strojnih delov je na tem mestu zaradi obsega članka nemogoče. Prikazane so posamezne analize. Po varjenju nastanejo na zvarnih spojih neželene zaostale natezne napetosti, katerih vzrok je toplotna ekspanzija oz. krčenje taljenega osnovnega in dodajnega materiala. Staljen dodajni material se veže z osnovnim materialom, katerega temperatura je precej nižja. Tako se v zvaru temperatura hitro zniža, s tem pa prihaja do krčenja materiala, ki je ovirano zaradi nastale vezave taline z osnovnim materialom. Rezultat tega je raztezanje materiala zvara na meji z osnovnim materialom. To toplotno vplivano področje (TVP) je



Slika 9: SP-obdelava zobnika s pospeševanjem medija v curku stisnjene zraka (zgoraj) ter shematski prikaz napetosti v zobniškem prenosu, ki jih želimo z SP-tehnologijo ustrezno zmanjšati (spodaj) ⁽¹⁾



Slika 10: Prikaz dinamičnega obremenjevanja za različne končne stopnje obdelave gredi, kjer lahko analiziramo ugoden vpliv SP-tehnologije (zgoraj) ter utrujenostni zlom gredi (spodaj) ⁽⁵⁾

tako zaradi zaostalih nateznih napetosti najbolj izpostavljen nastajanju in širjenju razpok pri dinamično obremenjenih spojih. Poleg navedenega se z neenakomernim dodajanjem materiala, raznoliko kemijsko in strukturno sestavo osnovnega in dodajnega materiala, oteženo geometrijo varjenja, napakami itd. te napetosti samo še povečujejo. Namen SP-obdelave pri varjenih spojih je odprava ali vsaj zmanjšanje teh zaostalih (nateznih) napetosti v zvarjencih. Z znižanjem teh napetosti se tako poveča trajno dinamično trdnost materiala. Kombinacija toplotne obdelave (žarjenje za odpravo notranjih napetosti) in naknadne SP-obdelave daje najboljše rezultate po samem postopku varjenja (slika 8).

Pri izdelavi gredi je SP pomembna obdelava kritičnih prehodnih področij, saj so ti detajli močno dinamično in obrabno obremenjeni. Primer utrujenostnega zloma je prikazan na sliki 10. Izkušnje uporabe SP-postopka na kovanih in litih jeklenih grede kažejo povečanje odpornosti na dinamično utrujanje v rangu 10–30 % ⁽¹⁾.

SP-postopek se uspešno uporablja tudi pri galvaniziranju materiala (kromiranje, nikljanje). Ko je material obremenjen z zunanjo napetostjo, lahko pride do nastanka razpok, ki se nadalje širijo v osnovni material. Če pred galvanizacijo osnovni material obdelamo z SP-tehnologijo, se te težave zmanjšajo, kar je shematsko prikazano na sliki 11. Površinska plast z zaostalimi tlačnimi napetostmi prepreči širjenje mikrorazpok v osnovni material.

Nadalje se SP-postopek uporablja tudi v medicini. Pomembna aplikacija je obdelava implantov, kjer se



Slika 11: Preprečitev širjenja mikrorazpok z SP-obdelavo ⁽¹⁾

večinoma uporablja titan, tantal ali niobij oz. njihove zlitine. Raziskave ⁽⁶⁾ kažejo, da z induciranjem zaostalnih napetosti z SP izboljšamo uporabnost implantov v rangu 10–50 %. Npr. implant v ustni votlini so izpostavljeni kombinaciji visokocikličnega utrujanja (tudi do 10 milijonov ciklov na leto) in korozijskega okolja, zato je uporaba SP-tehnologije smotna. Seveda se v teh primerih uporablja poseben medij obdelave (npr. prah SiZrO_2 dimenzij nekaj deset mikrometrov), po SP-obdelavi pa se površina za odpravo potencialnih kontaminacij ustrezno ionsko jedka.

4 SKLEP

Kot že uvodoma omenjeno, postopki "peening" dokazano ugodno vplivajo na dinamično in korozijsko obremenjen material. Na tem področju se z razvojem novih tehnologij in opreme venomer širi tudi aplikativnost procesa. Bralcem, ki bi jih zanimalo še kaj več o SP-postopku, priporočam ogled spletne strani www.shotpeener.com. Stran je aktualna že od leta 1995 in na njej lahko najdete priporočila uporabe SP-postopka, aktualne informacije o dogajanju na tem področju, ključna svetovna podjetja za opremo in storitve itd. Tisti, ki pa se želijo še detajlneje seznaniti o osnovah in aplikacijah, pa lahko brezplačno prebirajo članke in predstavitve mednarodnih konferenc ter sodelujejo na forumu. Uredniki omenjene spletne strani jo (upravičeno) kar imenujejo univerza za SP-obdelavo. Sicer tudi na našem inštitutu v sodelovanju s Fakulteto za strojništvo v Ljubljani in

Institutom "Jožef Stefan" izvajamo raziskave na tem področju.

5 LITERATURA

¹Shot Peening Applications, 8th Edition, Metal Improvement Company, 2005

²SEA AMS 2430M. Shot peening, Automatic. 2003

³Spletni katalog podjetja Abrasiv Muta, d. o. o.,
<http://www.abrasivmuta.si>

⁴SEA AMS-S-13165. Shot peening of metals parts. 1997

⁵J. Champaigne, Shot peening overview, 2001, <http://www.shotpeener.com/learning/spo.pdf>

⁶M. Papakyriacou, H. Mayer, International Journal of Fatigue 22 (2000) 873–886