

LASERSKI POSTOPKI ZAŠČITE POVRŠIN

Miha Čekada, Peter Panjan

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

V prispevku so opisani sodobni postopki zaščite površin z laserjem. Zaščita površin lahko poteka na tri načine: (1) Pri laserskem utrjevanju površin lokalno pregrejemo in zakalimo tanko podpovršinsko plast; varianta je lasersko pretaljevanje površin, kjer temperatura površine za kratek čas preseže tališče. (2) Lasersko peskanje uporabljamo za hladno utrjevanje površin. (3) Difuzijskim postopkom je skupna aktivacija površine ob sočasnem vnašanju dodatnega materiala. V uporabi so lasersko plinsko nitiranje, lasersko legiranje in lasersko oplašanje.

Laser methods for surface protection

ABSTRACT

State of the art in laser surface treatment techniques is described in this paper. The protection of the surfaces can be achieved in three ways: (1) At laser surface hardening the surface is locally annealed and quenched; its variant is laser surface melting, where the surface temperature exceeds the melting point. (2) Laser shot peening is used for cold hardening of the surfaces. (3) The diffusion techniques share a common feature of simultaneous laser activation of the surface and incorporation of the alloying material. The following methods are in use: laser gas nitriding, laser surface alloying and laser surface cladding.

1 UVOD

Ustrezna trdota materiala je eden od ključnih dejavnikov, ki odločajo o uporabnosti in trajnosti orodja oz. strojnega dela. Intrinzična (lastna) trdota je snovna lastnost materiala in je odvisna od kemijske sestave. Pri dani kemijski sestavi pa lahko trdoto močno variramo z ustrezno mikrostrukturo, tj. velikostjo zrn in fazno sestavo. Največkrat trdoto povečamo s toplotno obdelavo ali z obdelavo v hladnem.

Postopki utrjevanja masivnih materialov, najbolj razširjeno je seveda utrjevanje jekel, je dobro poznano in ga tukaj ne bomo predstavljali. Pač pa se bomo osredotočili na metode, pri katerih je postopek utrjevanja omejen na tanko območje neposredno ob površini, tj. od nekaj desetink milimetra do nekaj milimetrov. Osnovna prednost utrjevanja površin proti utrjevanju celotnega kosa je v tem, da je lahko osnovni material mehkejši in s tem tudi bolj žilav. Dobimo torej preprost kompozit: trda površina na žilavi podlagi.

Postopki utrjevanja površin niso ostro ločeni od postopkov nanosa prevlek na površino. Medtem ko pri nekaterih metodah le spremenimo mikrostrukturo površine (npr. toplotna obdelava), pa pri drugih vgrajujemo dodatne snovi v material (npr. anodna oksidacija, nitiranje), čeprav o prevleki v klasičnem pomenu besede še ne moremo govoriti. Pri nekaterih postopkih sicer pripravimo prevleko, a zaradi širokega

difuzijskega spoja ni ostro ločena od podlage (npr. lasersko oplašanje). Zares ločeno prevleko pa dobimo šele s postopki nanosa iz parne faze (PVD in CVD).

2 TOPLOTNA OBDELAVA POVRŠIN

O toplotni obdelavi površin govorimo tedaj, ko lokalno segrejemo podpovršinsko plast, nato pa jo hitro ohladimo (kaljenje). Če je ohlajanje dovolj hitro, pride do fazne transformacije in/ali spremembe velikosti kristalnih zrn. Metoda se najpogosteje uporablja pri jeklih, kjer odvisno od hitrosti ohlajanja dobimo različne strukture: martenzitno, bainitno itd. Precej manj je toplotna obdelava razširjena pri drugih kovinskih materialih (npr. titanove zlitine). Medtem ko je pri toplotni obdelavi masivnih kosov v večini primerov potrebno kalilno sredstvo (voda, olje), pa je pri toplotni obdelavi površin to večkrat nepotrebno zaradi majhne toplotne kapacitete segrete površine – okoliški material namreč deluje kot dober ponor toplote.

2.1 Klasični postopki toplotnega utrjevanja površin

Indukcijsko utrjevanje (*induction hardening*) poteka tako, da nad površino postavimo navitje (tuljavo), skozi katero spustimo močan električni tok⁽¹⁾. Zaradi indukcije se površina segreje, značilno do globine 5 mm. Postopek je primeren za utrjevanje rotacijsko simetričnih izdelkov, kot so gredi, in za izdelke enostavnih geometrij, npr. zobov zobnikov. Tehnologija je relativno nezahtevna in omogoča masovno uporabo za nizko ceno.

Poglavitna slaba stran postopka pa je nefleksibilnost, saj moramo obliko tuljave prilagoditi posameznemu izdelku, kar je povezano z večjimi stroški in mrtvim časom pri menjavi tuljave. Postopek ni primeren za utrjevanje izdelkov kompleksnih geometrij, težave so tudi pri utrjevanju manj dostopnih delov. Precejšen problem je tudi izguba dimenzijskih toleranc, zaradi česar je pogosto potrebna dodatna obdelava.

Plamensko utrjevanje (*flame hardening*) je dobro poznan in razširjen postopek, ki se odlikuje po zelo nizkih kapitalnih stroških in veliki fleksibilnosti. Ker je energija, ki jo dovajamo na površino, precejšnja, je potrebno dodatno kalilno sredstvo. S tem so povezane tudi precejšnje deformacije izdelka. Uporablja se ga za utrjevanje površin zobnikov, gredi, kokil itd. Zaradi

same narave plamena je ponovljivost postopka relativno slaba. Obseg področja, ki ga utrjujemo, je neenakomeren, obstaja pa tudi nevarnost lokalnega taljenja, zato zahteva plamensko utrjevanje precejšnje znanje operaterja. Dodatna ovira je ekološka problematičnost postopka in precejšnja poraba energije.

Utrjevanje z oblokom (*arc hardening*) je primerljivo s plamenskim utrjevanjem. Zaradi stohastične narave obloka je tako kot pri plamenskem utrjevanju področje utrjevanja slabo definirano. Analogno so prednosti postopka velika fleksibilnost in nizka cena.

Utrjevanje z elektronskim curkom (*electron beam hardening*) poteka v vakuumu. Površino izdelka lahko segrejemo z defokusiranim elektronskim curkom, s katerim zaobjamemo večje področje, ali pa izdelek skeniramo s fokusiranim curkom, podobno kot pri utrjevanju z laserjem (glej spodaj). Postopek je dobro ponovljiv, z minimalnimi deformacijami izdelka, vakuumsko okolje pa obenem ščiti pred oksidacijo. Slabe strani pa izvirajo prav iz vakuumske narave postopka, saj je velikost izdelka omejena z velikostjo vakuumske posode, črpalna faza pa zahteva dodaten čas.

2.2 Utrjevanje površin z laserjem (*laser surface hardening*)

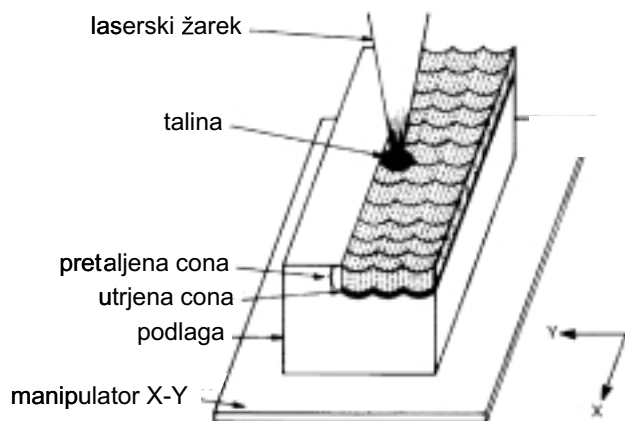
Uporaba laserja je zelo razširjena na področju varjenja, rezanja in litografije, precej manj pa na področju toplotne obdelave, čeprav je laserski žarek zelo dobro definiran, lahko vodljiv in primeren za različne geometrije izdelkov. Do pred nedavnim je bila omejitev nizka gostota moči dostopnih laserskih izvirov. Ena bistvenih prednosti je možnost utrjevanja poljubno omejenih področij, tudi takih, ki so klasičnim postopkom težko dostopni (izvrtine, vogali itd.). Utrjeno področje ima značilno debelino 0,2–3 mm in ima visoko trdoto, večjo obrabno obstojnost in večjo odpornost proti koroziji. Kalilna sredstva niso

potrebna, saj je segrevanje zelo lokalizirano in je okoliški material dober ponor toplote.

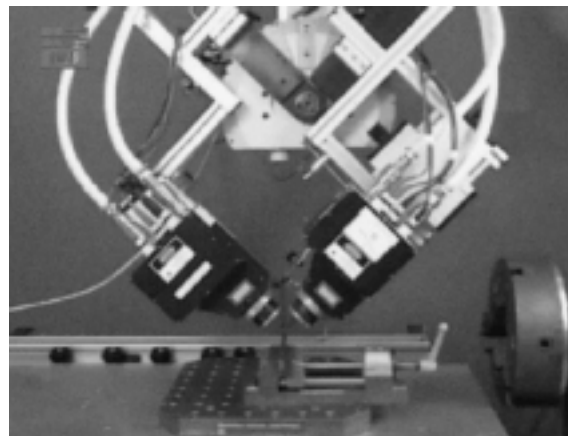
Lasersko utrjevanje poteka tako, da žarek skenira površino (slika 1 sicer prikazuje lasersko pretaljevanje, geometrija pa je podobna pri vseh laserskih postopkih obdelave površin)^(2,3). Osnovni problem je precejšnja odbojnost kovinskih površin, npr. pri CO₂-laserju od 90 do 98 %. Odbojnost lahko zmanjšamo z večjo hrapavostjo površine, s segrevanjem površine ali uporabo linearno polarizirane svetlobe, največ pa je v uporabi dodajanje absorptivnih prevlek. Primerna prevleka je grafit v koloidni suspenziji, značilna debelina prevleke je 10–20 μm, kar zmanjša odbojnost pod 20 %. Primerna debelina je pomembna: če je prevleka pretanka, prehitro odpari, če je predebela, pa lahko odparjeni material vpliva na dinamiko utrjevanja. Polega grafita so v uporabi še prahovi iz sljude, nekaterih fosfatov (mangana, cinka, železa) in oksidov (cinka in bakra). Zaradi zaščite izdelka pred oksidacijo kakor tudi zaradi zaščite laserske optike pred parami je potrebno preprihanje z inertnim plinom, največkrat z argonom ali dušikom.

Le dobrih pet let nazaj je bil edini primeren laserski izvir (dovolj velika gostota moči in dolg čas interakcije) CO₂-laser z valovno dolžino 10 μm (infrardeče področje). Danes je na voljo Nd:YAG-laser z desetkrat manjšo valovno dolžino, kar omogoča prenašanje snopa z optičnimi vlakni. Tako je fleksibilnost postopka precej večja. Najnovejši razvoj diodnih laserjev pa je omogočil tudi njihovo uporabo v postopkih utrjevanja. Zaradi majhnih dimenzij jih lahko pritrdimo direktno na glavo manipulatorja (slika 2). Značilna moč laserjev pri utrjevanju površin je nekaj kilovatov, gostota moči pa v obsegu 1–100 W/mm².

Velik pomen ima pravilna izbira oblike pramena (žarka) in parametrov skeniranja. Namesto ostre konice Gaussove oblike je primernejši nekoliko defokusiran žarek, ki ima bolj mizasto porazdelitev gostote



Slika 1: Postopek skeniranja pri laserskem pretaljevanju površin⁽⁶⁾; enak princip se uporablja pri vseh laserskih postopkih obdelave površin



Slika 2: Lasersko utrjevanje robnikov avtomobilskih vrat z diodnimi laserji (Volkswagen)⁽²⁾

moči. Značilen čas interakcije laserskega žarka na danem mestu površine je 0,01–2 sekunde. Če so pasovi skeniranja preblizu skupaj, lahko pride do efekta lokalnega popuščanja. Tik ob utrjenem področju je namreč ozek pas, ki je bil izpostavljen nekoliko nižji temperaturi, tako da lahko področje, ki smo ga v prejšnjem ciklu utrdili, v naslednjem popustimo.

Lasersko utrjevanje površin je najbolj razširjeno v **avtomobilski industriji**, kjer je tudi prvi dokumentiran primer uporabe z začetka 70-ih let ⁽²⁾. Gre za litoželezno ohišje pogonske gredi z dobro natezno trdnostjo, obdelovalno sposobnostjo in relativno nizko trdoto. Poskusili so naslednje metode utrjevanja:

- uporabo litega železa z višjim odstotkom ogljika; to bi pomenilo težje obdelovanje in višje stroške orodja
- indukcijsko ali plamensko utrjevanje; to bi bilo povezano s prevelikimi deformacijami izdelka
- nitiranje; zahtevalo bi dodatno pregrevanje, kar bi povišalo stroške izdelave.

Odločili so se za utrjevanje s CO₂-laserjem z naslednjimi parametri: širina pasu utrjevanja 2 mm, globina utrjene cone 0,3 mm. S tem so povečali trdoto iz HV 170 na 700 in zmanjšali obrabo za 80 %. Deformacij izdelka skoraj ni bilo, saj je bilo utrjenega materiala le 28 g v celotni masi izdelka 6,3 kg.

Primer iz **strojne industrije** je utrjevanje litoželeznih ležišč za nože, ki se uporabljajo v proizvodnji valjev za izdelavo papirja ⁽²⁾. Zahtevana trdota je bila HV 580 do globine 1 mm. Izdelovalec (Artekno-Metalli Oy, Finska) je ležišča utrjeval indukcijsko, pri čemer je imel velike težave z deformacijami. Odpravljal jih je z ekstenzivno kasnejšo obdelavo, zaradi česar je moral biti izdelek že vnaprej nekoliko predimenzioniran. Ker je postopek utrjevanja prevzel podizvajalec, je to pomenilo še dodatno izgubo časa.

Vpeljava laserskega utrjevanja je prinesla vrsto prednosti: čas obdelave se je zmanjšal na 1 uro; ves postopek je bil opravljen na enem mestu; trdota je dosegla HV 900; deformacije so se močno zmanjšale, tako da so bile potrebne le manjše korekcije. V prihodnje nameravajo zmanjšati debelino utrjene cone na 0,5 mm, kar bi pomenilo dokončno odpravo kasnejše obdelave.

Dodatni primeri so še ⁽²⁾:

- preše za preoblikovanje pločevine: zmanjšanje deformacij na minimum, odprava dodatne obdelave;
- lopate parne turbine iz nerjavečega jekla: zmanjšanje časa obdelave za 90 %, večja odpornost proti utrujanju;

- robniki avtomobilskih vrat (Volkswagen): eden prvih primerov uporabe diodnih laserjev v industriji (slika 2);
- batni obročki za ladijske motorje: dvakratno povečanje trajnostne dobe.

V prihodnosti se obeta široka uporaba v ladjedelništvu in na področju hladnega preoblikovanja in tlačnega litja.

2.3 Lasersko utrjevanje površin s pretaljevanjem (laser surface melting)

Postopek laserskega utrjevanja s pretaljevanjem se od prej opisanega laserskega utrjevanja razlikuje le v tem, da povečamo gostoto moči laserskega žarka do te mere, da temperatura površine izdelka naraste preko tališča. Kontakt laserskega žarka s površino je torej talina, ki potuje skupaj z žarkom, takoj za njim pa se zaradi hitrega ohlajanja strdi (slika 1). V talini pride do popolne homogenizacije materiala, po strjevanju pa nastane nova mikrostruktura. V uporabi je tudi izraz lasersko glaziranje (*laser glazing*).

Osnovni namen segrevanja preko tališča je v tem, da zaradi zelo visokih hitrosti ohlajanja (10²–10⁸ K/s) nastanejo mikrostrukture, ki jih s klasičnimi postopki ne moremo pripraviti. Gre za nastanek metastabilnih struktur in visoke topnosti. Takšna mikrostruktura je pogosto povezana z visoko trdoto (slika 3a). Ta postopek se mnogo bolj uporablja pri utrjevanju aluminijevih in magnezijevih zlitin, pri jeklih pa je taljenje večinoma nezaželen pojav. Pri slednjih namreč pride do zmanjšanja trdote v pretaljenem materialu.

Z laserskim pretaljevanjem jim je uspelo povečati trdoto zlitine Al-Cu za faktor 3 ⁽⁴⁾. Pri aluminijevih zlitinah so dobili dobre rezultate šele po kasnejšem peskanju: boljšo korozijski obstojnost in odpornost proti utrujanju ⁽⁵⁾. Pri magnezijevih zlitinah poročajo o povečanju trdote za faktor 3 in odpornosti proti koroziji ⁽⁶⁾.

Pri **keramičnih materialih** se z laserskim pretaljevanjem (utrjevanje v tem primeru ni najbolj primeren izraz) zapira pore in s tem izboljša nekatere mehanske lastnosti. Keramični materiali na osnovi SiO₂, Al₂O₃ in ZrO₂ se široko uporabljajo v visokotemperaturnih aplikacijah kot konstrukcijski elementi, cevi itd. Njihova osnovna mikrostruktura pomanjkljivost je poroznost, zaradi katere so ti materiali krhki, s poroznostjo pa je tudi povezana korozijska obstojnost.

Čeprav imajo keramični materiali visoko tališče, pa lahko to temperaturo z laserjem dosežemo s primerno visoko gostoto moči. Nastane tanka plast taline, ki zalije pore in ima po strjevanju nasprotno od masivnega materiala precej manjšo poroznost (ta je po

navadi posledica termičnih napetosti) (slika 3b). V nekaterih primerih pride tudi do tvorbe drugih faz, npr. pasivacijske plasti in do značilne dendritske mikrostrukture.

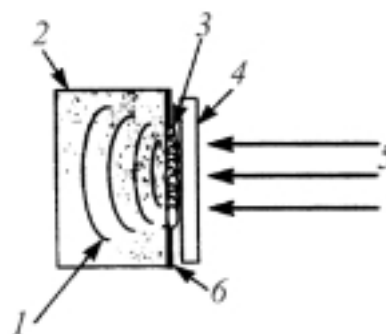
Z laserskim pretaljevanjem je uspelo povečati odpornost keramike $ZrSiO_4$ proti toplotnim šokom in zmanjšati visokotemperaturno korozijo v solni kopeli za razred velikosti ⁽⁷⁾.

3 HLADNO UTRJEVANJE

Hladno utrjevanje je proces, analogen toplotni obdelavi. V obeh primerih gre za spremembo mikrostrukture ob nespremenjeni povprečni kemijski sestavi. Pri hladnem utrjevanju dobimo povečanje trdote z vnašanjem dislokacij in spremembo velikosti kristalnih zrn, medtem ko do sprememb faze v večini primerov ne pride. Dodaten efekt je vnos kompresijskih notranjih napetosti, ki zavirajo rast razpok.

Globoko valjanje (*deep rolling*) je postopek valjanja pod velikim kontroliranim pritiskom, s katerim utrdimo površino. Nasprotno od peskanja je površina bolj gladka kot pred obdelavo. Postopek je relativno poceni, a je omejen na gladke geometrije.

Pri **peskanju** (*shot peening*) površino utrdimo z obstreljevanjem z jeklenimi (steklenimi, keramičnimi)



Slika 4: Shema laserskega peskanja: (1) udarni val, (2) vzorec, (3) oblak plazme, (4) zaporna plast, (5) laserski žarek, (6) absorptivna prevleka ⁽²²⁾

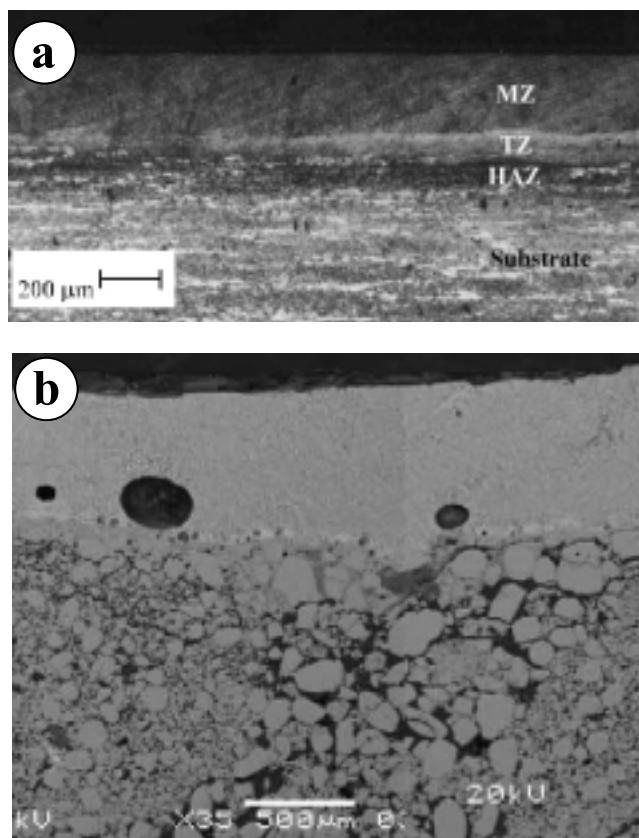
kroglicami. Značilna globina utrjene cone je 100–200 μm . Postopek je enostaven in poceni, vendar je globina utrjevanja neenakomerna. Udarec kroglice spremlja nastanek kraterja, kar poveča hrapavost površine, to pa ima poleg lepotnih lahko tudi funkcionalne slabe strani. Trajnost izdelka med utrujanjem se poveča za faktor 3–10.

3.1 Lasersko peskanje (*laser shot peening*)

Izraz "lasersko peskanje" je povzet po podobnih efektih na površini izdelka kot pri klasičnem peskanju, čeprav se postopka močno razlikujeta. Medij, ki utrjuje površino pri laserskem peskanju, je pregret oblak materiala, uparjenega z laserjem (slika 4). Izdelek prekrijemo z absorptivno prevleko (največkrat kar črna barva) in jo obstreljujemo z laserjem. Prevleka se upari, nastane oblak plazme in udarni val utrdi površino. Efekt se močno poveča, če preko absorptivne prevleke postavimo še t. i. zaporno plast (največkrat tekoča voda), ki prepreči uhajanje uparjenega oblaka v okolico. Tlak je velikostnega reda nekaj GPa. Postopek je podoben laserskemu utrjevanju, s to razliko, da je pri laserskem peskanju absorptivna prevleka debelejša, zato so termični efekti omejeni le nanjo.

V primerjavi s klasičnim peskanjem dosežemo pri laserskem za skoraj red velikosti večjo globino utrjene cone (preko 1 mm). Globlje utrjena plast pomeni boljšo zaščito pred nastankom podpovršinskih razpok. Prednosti pred klasičnim peskanjem so še odsotnost kraterjev, boljša dostopnost notranjih površin in lažja obdelava omejenih površin. Poglavitni slabosti sta visoka cena in majhna hitrost obdelave.

Lasersko peskanje se veliko uporablja v letalski industriji, predvsem pri utrjevanju robov turbin ⁽⁸⁾. Uporabili so ga tudi že za zaščito železniških tirov ⁽⁹⁾.



Slika 3: SEM-posnetek prereza lasersko pretaljene površine: (a) kovinska podlaga (MZ – pretaljeno področje, TZ – prehodno področje, HAZ – utrjeno področje) ⁽²⁴⁾; (b) keramična podlaga ⁽⁷⁾

4 DIFUZIJSKI POSTOPKI UTRJEVANJA

Pri toplotni obdelavi spremenimo mikrostrukturo izdelka na površini, medtem ko povprečna kemijska sestava ostane enaka. Le-to pa lahko spremenimo tako, da na površino dodajamo material, bodisi v obliki plina, prahu ali suspenzije. Tedaj govorimo o difuzijskih postopkih.

4.1 Termokemijski postopki

Termokemijska obdelava je postopek utrjevanja površine podlag iz jekla, uporablja pa se tudi za titanove zlitine. Najpogosteje s temi postopki obogatimo površino z dušikom in/ali ogljikom do značilne globine nekaj 100 μm . Glede na temperaturo in dodani element razlikujemo nitriranje, nitrocementiranje, cementiranje in karbonitriranje.

Za **nitriranje** se uporablja dušik, za **nitrocementiranje** mešanica dušika in enega od nižjih ogljikovodikov pri temperaturi med 490 °C in 580 °C. Dušik oz. ogljik difundirata v feritno zlitino, kjer se vežeta z legirnimi elementi. Pri teh temperaturah poteka proces nitriranja v feritnem območju, zato po nitriranju oz. nitrocementiranju nasprotno od **cementiranja** in **karbonitriranja** (ki potekata pri temperaturi avstenizacije) ni potrebno popuščanje. Pri termokemijskih postopkih utrjevanja površin nastane na površini spojinska (bela) plast, pod njo pa relativno debela difuzijska cona. Bela plast, ki jo sestavljata fazi $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ in $\eta\text{-Fe}_{2,3}\text{N}$, je sicer zelo trda, vendar so v njej velike notranje napetosti, zaradi katerih je krhka. Zato je nezaželena in jo moramo pred uporabo orodij kemijsko ali mehansko odstraniti. Z ustreznimi izbiro parametrov termokemijske obdelave pa lahko njeno debelino zmanjšamo na minimum.

Vsa jekla lahko med termokemijsko obdelavo pri določeni temperaturi tvorijo železove nitride in karbide. Proces nitriranja je intenzivnejši v jeklih, ki vsebujejo enega ali več legirnih elementov, kot so: Al, Cr, V, W ali Mo. Drugi legirni elementi (Ni, Cu, Si ali Mn) ne vplivajo bistveno na proces nitriranja. Zato ta ni odvisen samo od parametrov obdelave (temperatura, čas nitriranja), ampak tudi od sestave jekla. S termokemijsko obdelavo orodnih jekel povečamo trdoto površinske plasti (do nekaj 100 μm) in obrabno obstojnost, izboljšamo odpornost proti utrujanju in korozijsko obstojnost (z izjemo nerjavečega jekla). Na tako obdelano podlago je pogosto smiselno nanesti trdo PVD-prevleko. Tako dosežemo sinergijski učinek obeh metod utrjevanja. Če uporabimo plazemsko nitriranje oz. nitrocementiranje, potem lahko oba postopka naredimo v isti vakuumski posodi. Plazemsko difuzijsko utrjevanje omogoča tudi boljšo kontrolo sestave in debeline spojinske plasti.

4.2 Laserski difuzijski postopki

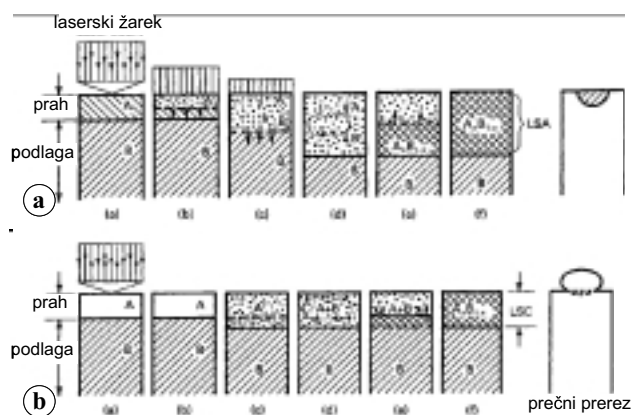
Kot smo že opisali v poglavju o laserskem utrjevanju, je laser medij, s katerim modificiramo lastnosti površine, ne da bi katerikoli material dodajali. Logična nadgradnja tega postopka je prav dodajanje materiala, bodisi v obliki plina, prahu ali suspenzije. Laserski žarek torej katalizira reakcijo med podlago in dodanim materialom ali pa stimulira difuzijo dodanega materiala v podlago. Razlikujemo dva postopka: **lasersko legiranje površin** (*laser surface alloying*), kjer obogatimo površinski del z dodanim materialom, in **lasersko oplaščenje površin** (*laser surface cladding*), kjer pa gre za lasersko induciran nanos prevleke. Meja med tema dvema postopkoma ni ostra, tudi terminologija ni ustaljena. Večkrat namreč naletimo na opis "laserskega legiranja", ki bi mu po gornji definiciji morali reči "lasersko oplaščenje". Za lasersko oplaščenje se večkrat uporablja tudi izraz "lasersko inženirstvo površin" (*laser surface engineering*), čeprav je pojem v osnovi precej bolj splošen.

Medtem ko imajo laserski difuzijski postopki vrsto prednosti, pa je njihova skupna slabost visoka cena in nizka hitrost obdelave. Značilna hitrost pri laserskem legiranju je 2 m/min (pri laserskem oplaščenju le 0,5 m/min), širina obdelovanega področja pa je le nekaj milimetrov.

4.3 Lasersko legiranje površin (*laser surface alloying*)

Lasersko legiranje z dušikom iz dušikove atmosfere je dejansko le varianta plinskega nitriranja in ga tudi imenujemo **lasersko plinsko nitriranje** (*laser gas nitriding*). Z laserskim curkom segrejemo površino, da nastane difuzijska in/ali spojinska nitridna plast. Večinoma se ga uporablja na titanu in titanovih zlitinah. Lasersko nitriranje lahko izvedemo tudi tako, da nanese prah spojine, bogate z dušikom, in induciramo legiranje z laserjem (glej spodaj). Tak postopek je tudi v uporabi na titanu in njegovih zlitinah, nanese material pa je TiN.

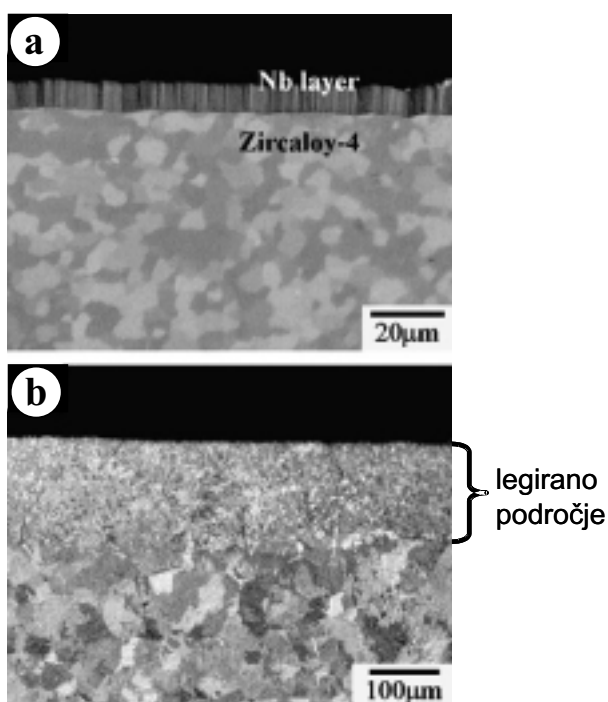
Lasersko legiranje površin (sliki 5a in 6) izvedemo tako, da površino prekrijemo s plastjo legirnega elementa. Variantno lahko prah sproti dodajamo. Ko na plast posvetimo z laserjem, se v celoti stali dodana plast kakor tudi del podlage. Dobimo homogeno mešanico podlage z dodanimi legirnimi elementi. Ko se le-ta strdi, nastane legirana površina z želenimi mehanskimi in mikrostrukturnimi lastnostmi. Pri laserskem legiranju je delež legirnih elementov le nekaj odstotkov v površinski plasti. Glavni razlogi za poboljšanje lastnosti so: utrjevanje s trdno raztopino,



Slika 5: Shema laserskega legiranja površin (a) in laserskega oplaščenja površin (b) ⁽¹⁵⁾

nastanek novih faz in mikrostrukturni efekti zaradi hitrega ohlajanja.

Tako so uspešno povečali korozijsko obstojnost in trdoto zlitine zircaloy (zlitina na osnovi cirkonija za jedrske aplikacije) z legiranjem z niobijem ⁽¹⁰⁾. Nekaj uspešnih poskusov je bilo tudi z zaščito magnezija z legiranjem s Cr, Al, Fe in Cu ⁽¹¹⁾. V kombinaciji z nitriranjem je uspelo zaščititi titan, tako da so ga posuli z aluminijevim prahom v dušikovi atmosferi ⁽¹²⁾. Nastala površina je vsebovala intermetale (Ti-Al) in nitride (Ti-N in Ti-Al-N). Zgolj z nitriranjem podlage iz Ti-6Al-4V pa so nastali dendriti iz TiN, kar je povečalo obrabno obstojnost ⁽¹³⁾. Poročajo tudi o poboljšanju obstojnosti proti kavitacijski koroziji za faktor 12.



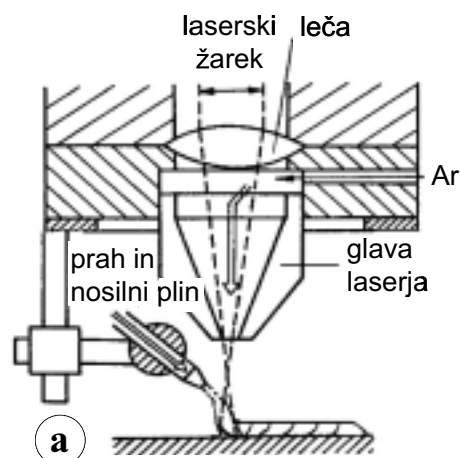
Slika 6: SEM-posnetek prereza plasti pred laserskim legiranjem (a) in legiranega področja po laserskem legiranju (b); povečavi nista enaki ⁽¹⁰⁾

4.4 Lasersko oplaščenje površin (laser surface cladding)

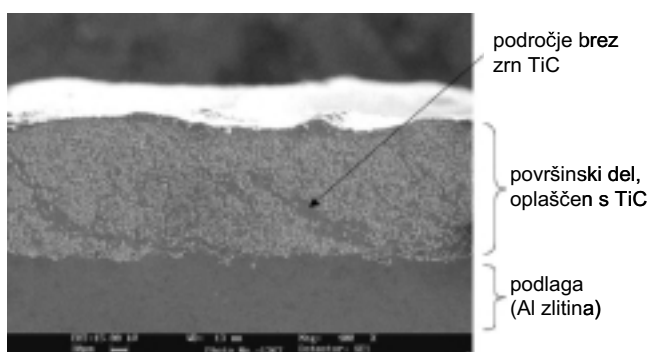
Lasersko oplaščenje (slika 5b) se od laserskega legiranja loči po tem, da gre pri oplaščenju za nanos plasti dodanega materiala, delež elementov podlage v plasti pa je majhen.

Postopki so precej občutljivi na parametre laserskega žarka (poskušali so tudi z večkratnim skeniranjem), poleg tega je še precej tehničnih problemov, ki še niso bili dokončno rešeni: nekompatibilni termični raztezki, slabo omakanje, krhkost ob povišani trdoti itd. Ena od najbolj perspektivnih rešitev so gradientne prevleke (*functionally graded materials*), kjer se lastnosti (sestava, velikost zrn, notranje napetosti) nameroma spreminja od podlage proti površini.

V večini primerov laserskega oplaščenja gre za sintezo plasti iz t. i. **kompozitov kovina-matrica** (*metal-matrix composites*), tudi poznanih pod kratico MMC. Postopek priprave je tak (slika 7), da najprej prekrijemo površino s prahom refraktornega materiala (npr. SiC, WC, TiN, TiB₂), ki mu primešamo prah kovine (npr. Al, Cu). Tako pripravljena površina ima torej komponenti z visokim in nizkim tališčem. Če posvetimo nanjo z ne premočnim laserskim žarkom, bo le-ta raztopil komponento z nizkim tališčem



Slika 7: Lasersko oplaščenje površin: (a) shema postopka ⁽²¹⁾, (b) primer uporabe – prekrivanje roba turbine ⁽¹⁴⁾



Slika 8: SEM-posnetek prereza lasersko oplaščene površine (23)

(kovino), v trdnem stanju pa bodo ostali refraktorni delci. Nastala bo torej talina dodane kovine, v njej pa bodo dispergirani trdi delci. Ko se bo struktura strdila, bomo dobili kovinski kompozit s trdimi refraktorni delci. Debelina takšne utrjene plasti je v milimetrskem področju (slika 8).

Poleg elementov predhodno nanese plasti se pod vplivom laserskega žarka raztopi tudi vrhnji del podlage. Nastane torej difuzijski spoj med podlago in plastjo, ki zagotavlja dobro adhezijo.

Lasersko oplaščenje s kompoziti MMC se uporablja pri zaščiti konic plinskih turbin (14,15). Opravljenih je bilo že več uspešnih študij zaščite jekel, aluminijevih in titanovih zlitin s kompoziti MMC. Zanimiva aplikacija je legiranje nerjavečega jekla z WC (16). Poleg povečanja trdote s HV 200 na 1000 je uspelo kavitacijsko erozijo zmanjšati za faktor 30. Poročajo tudi o znatnem povečanju abrazijske obstojnosti jekel (dodani prah bora in borovih spojin, WC, SiC) (17). Zlitino na osnovi **aluminija** je uspelo zaščititi s prahom TiC, prekritim z bakrom (18). Tako so dobili intermetal Al-Cu, v katerem so bili dispergirani delci TiC. Obrabna obstojnost se je povečala za faktor 6. Na podoben način so zaščitili zlitino na osnovi **magnezija** s prahom Al₂O₃ + Al (19). Dobili so kompozit zrn Al₂O₃ v matrici Al-Mg. Trdota se je povečala za red velikosti, obrabna obstojnost pa za skoraj dva reda velikosti. Lasersko oplaščenje se uporablja tudi v avtomobilski industriji, konkreten primer je zaščita aluminijevih cilindrov z FeO (20). Prav tako je že v komercialni uporabi zaščita **titanovih** zlitin s kompozitom Al₂O₃ / TiO₂.

5 SKLEP

Opisanim laserskim postopkom poboljšanja površin je skupna vrsta prednosti (ponovljivost, možnost avtomatizacije, natančno nastavljanje parametrov, širok spekter materialov), bistveni slabosti pa sta nizka hitrost obdelave in visoka cena. Zato se večinoma uporabljajo le v proizvodnji najzahtevnejših izdelkov (npr. v letalski industriji). Predvsem lasersko utrjevanje površin pa se že širi v masovno proizvodnjo in pričakovati je, da se bodo v naslednjih letih ti postopki uveljavili tudi širše.

6 LITERATURA

- ¹J. Grum, Induction hardening, *University of Ljubljana*, 2003
- ²J. C. Ion, *Surf. Eng.* **18** (2002) 1, 14–31
- ³J. Grum, Laser surface hardening, *University of Ljubljana*, 2003
- ⁴M. A. Pinto, N. Cheung, M. C. F. Ierardi, A. Garcia, *Mat. Charact.* **50** (2003), 249–253
- ⁵C. P. Chan, T. M. Yue, H. C. Man, *J. Mater. Sci.* **38** (2003), 2689–2702
- ⁶J. D. Majumdar, B. R. Chandra, R. Galun, B. L. Mordike, I. Manna, *Comp. Sci. and Technol.* **63** (2003), 771–778
- ⁷A. H. Wang, W. Y. Wang, C. S. Xie, W. L. Song, D. W. Zeng, *Appl. Surf. Sci.* **227** (2004), 104–113
- ⁸W. Kaysser, *Surf. Eng.* **2001** (2001) 17, 305–312
- ⁹R. K. Nalla, I. Altenberger, U. Noster, G. Y. Liu, B. Scholtes, R. O. Ritchie, *Mat. Sci. Eng. A* **355** (2003), 216–230
- ¹⁰S. Lee, C. Park, Y. Lim, H. Kwon, *J. Nucl. Mat.* **321** (2003), 177–183
- ¹¹J. E. Gray, B. Luan, *J. Alloys Compounds* **336** (2002), 88–113
- ¹²I. García, J. de la Fuente, J. J. de Damborenea, *Mat. Let.* **53** (2002), 44–51
- ¹³H. C. Man, Z. D. Cui, T. M. Yue, F. T. Cheng, *Mat. Sci. Eng. A* **355** (2003), 167–173
- ¹⁴Y. P. Kathuria, *Surf. Coat. Technol.* **132** (2000), 262–269
- ¹⁵D. Wolfe, J. Singh, *J. Mater. Sci.* **33** (1998), 3677–3692
- ¹⁶K. H. Lo, F. T. Cheng, C. T. Kwok, H. C. Man, *Surf. Coat. Technol.* **165** (2003), 258–267
- ¹⁷G. Thawari, G. Sundarajan, S. V. Joshi, *Thin Solid Films* **423** (2003), 41–53
- ¹⁸S. Tomida, K. Nakata, S. Saji, T. Kubo, *Surf. Coat. Technol.* **142–144** (2001), 585–589
- ¹⁹J. D. Majumdar, B. R. Chandra, B. L. Mordike, R. Galun, I. Manna, *Surf. Coat. Technol.* **179** (2004), 297–305
- ²⁰N. B. Dahotre, S. Nayak, O. O. Popoola, *JOM*, Sep. 2001, 44–46
- ²¹J. Przybyłowicz, J. Kusiński, *J. Mat. Proc. Technol.* **109** (2001), 154–160
- ²²O. I. Balytskyi, G. Mascalzi, *Mat. Sci.* **38** (2) (2002), 293–303
- ²³P. H. Chong, H. C. Man, T. M. Yue, *Surf. Coat. Technol.* **154** (2002), 268–275
- ²⁴C. T. Kwok, K. I. Leong, F. T. Cheng, H. C. Man, *Mat. Sci. Eng. A* **357** (2003), 94–103