

Priporočila za lasersko varjenje v industrijskem okolju

Damjan KLOBČAR, Janez TUŠEK

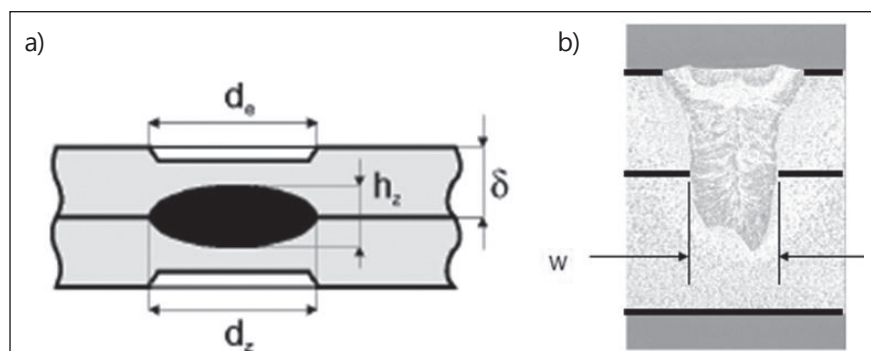
Izvleček: V zadnjem času postajajo laserski sistemi bolj dostopni za množično proizvodnjo. Smotrnost takšne uvedbe v proizvodni proces mora imeti tehnološke in ekonomske prednosti. Te lahko dosežemo ob upoštevanju priporočil za oblikovanje spojev in zvarov. Namen prispevka je podati prednosti in opisati omejitve, ki jih je potrebno upoštevati pri oblikovanju in izdelavi izdelka v proizvodnih pogojih.

Ključne besede: lasersko varjenje, lasersko hibridno varjenje, natančno pozicioniranje in vpenjanje, nihanje

Pri zamenjavi uporabnega točkovnega varjenja z laserskim varjenjem je potrebno določiti število zvarnih točk ekvivalentno dolžino laserskih varov. Najprej je potrebno določiti

Trdnost laserskega zvarnega spoja je odvisna od osnovnega materiala, velikosti zvarne rege in izdelanega vara, količine pretaljenega zvara, pri čemer poraznost v zvaru in za-

jede ob zvaru niso zaželeni, vrste obremenitve (strig, nateg, upogib, statična, dinamična, večosna, ...) in faktorja oblike zvara (raven, C, S, ...).



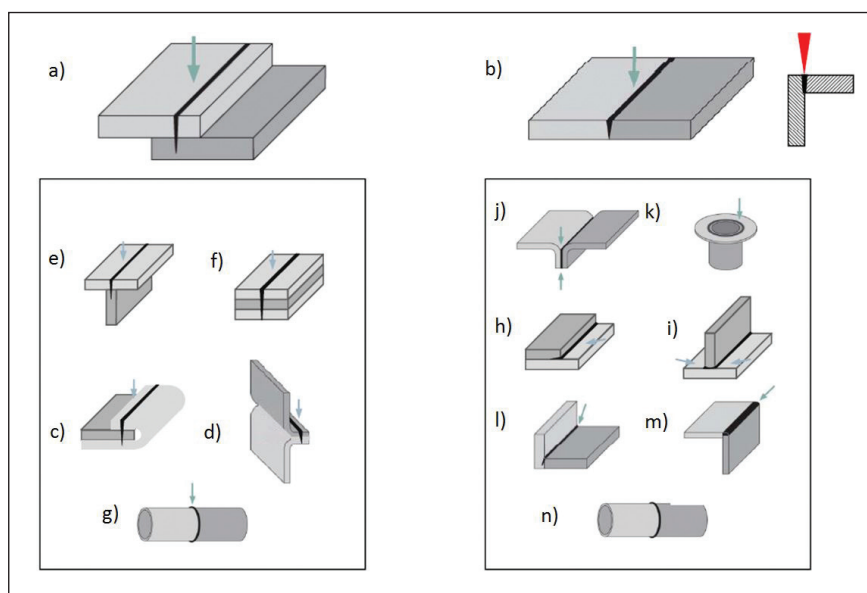
Slika 1. Površina a) uporabnega točkovnega vara in b) laserskega vara [1]

■ Priporočila za oblikovanje laserskih zvarnih spojev

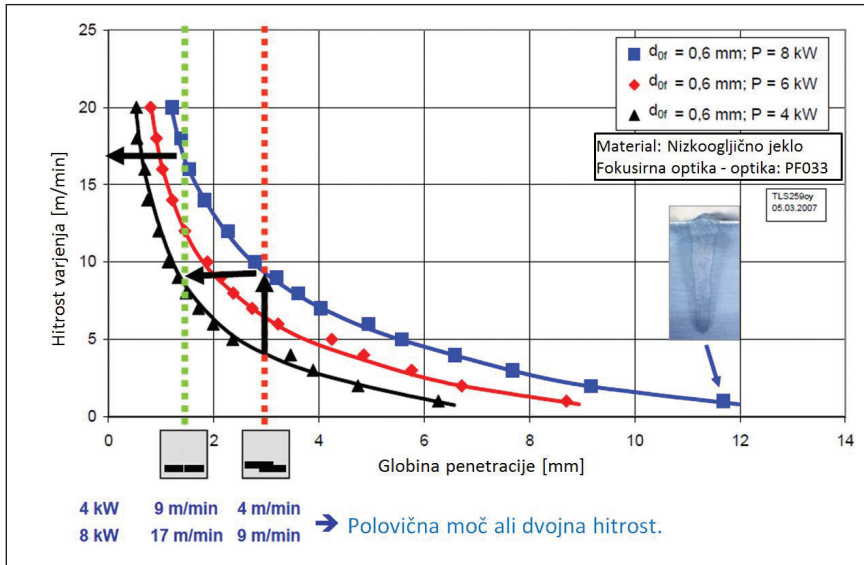
Za lasersko varjenje se priporoča izdelava prekrivnih ali sočelnih zvarnih spojev (slika 2). Prednosti sočelnih zvarnih spojev so povezane z optimalno postavitvijo zvara, kar omogoča prihranke materiala (teža in cena). Za izdelavo spoja uporabimo manj energije, zato je var-

premer elektrodne konice, ki je približno enaka premeru zvarne leče (slika 1). Ta po AWS znaša $d_e = 2 \cdot d + 2,5$ [mm] ter po DVS $d_e = k \times (d)^{1/2}$ [mm], pri čemer je k funkcija vrste in debeline varjencev in znaša med 5 in 10. Višina elipse zvarne leče h_z je približno enaka 1,4-kratniku debeline pločevine. Iz teh vrednosti je potrebno določiti strižno površino zvarne točke. Ekvivalentno dolžino laserskega vara določimo z delitvijo strižne površine zvarne točke s povprečno širino laserskega vara w : $L = A_{ZT} / w$.

Doc. dr. Damjan Klobčar, univ. dipl. inž., prof. dr. Janez Tušek, univ. dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 2. a) Prekrivni in b) sočelni zvarni spoji, primerni za lasersko varjenje [1]



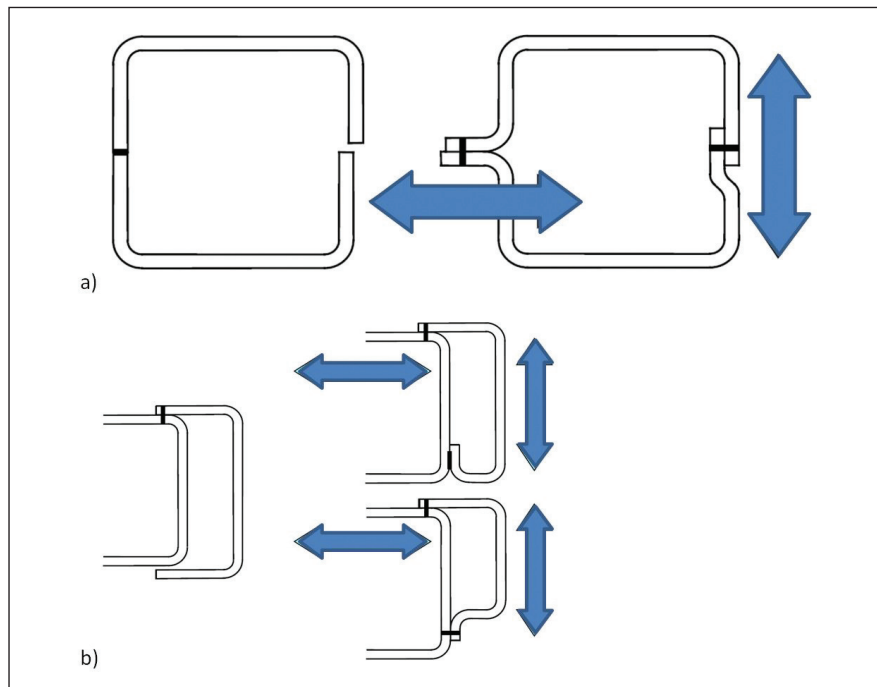
Slika 3. Hitrost laserskega varjenja glede na debelino pločevine [1]

nja za lasersko varjenje konstrukcijskega jekla z laserskimi viri moči 4 kW, 6 kW in 8 kW. Na grafu lahko vidimo, da je pri isti moči laserskega vira hitrost varjenja sočelnega zvarnega spoja še enkrat večja kot pri prekrivnem spoju oz. da za isto hitrost varjenja potrebujemo laserje s polovično močjo.

Uspešno lasersko varjenje je mogoče, če je sočelni spoj izdelan tako, da reza ne presega 3–10 % debeline tanjše pločevine, in če je zamik pločevin manjši od 5–12 % širine tanjše pločevine (slika 14a). Pri prekrivnem spoju širina reže ne sme presežati 5–10 % debeline tanjše zgornje pločevine (slika 4b). Ta ge-

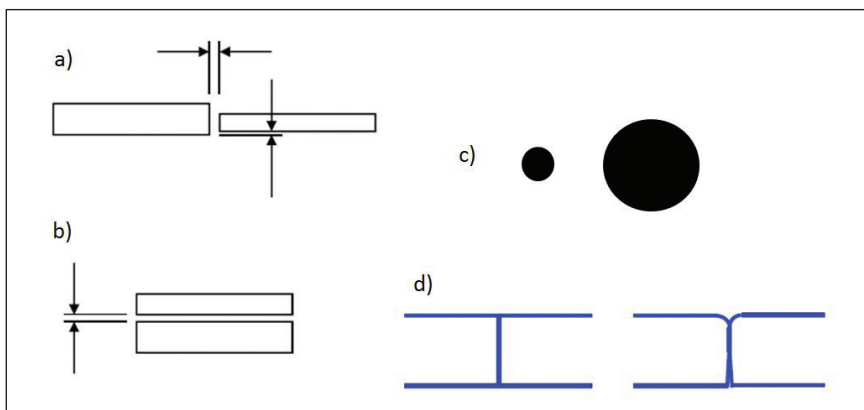
jenje hitrejša, manjša je TVP in posledično deformacije izdelka, manj težav je s cinkovimi površinskimi prevlekami, sam spoj pa je izdelan brez stopnice. Slabost tovrstnega spoja so visoke tolerančne zahteve izdelanih varjencev, saj se spoj brez rege težko pripravi.

Prednost prekrivnih spojev so nižje zahteve pozicioniranja varjencev, ki omogočajo večje procesno okno in izdelavo estetskih zvarov na nasprotni strani varjenja. Slaba stran tovrstnih zvarov je potrebna večja velikost zvarov (količina pretaljenega materiala), ki posledično zahteva varjenje z večjimi energijami laserskega žarka, manjšimi hitrostmi, pojavijo se lahko večje deformacije varjencev in večje TVP.



Slika 3 prikazuje primerjavo med hitrostmi rezanja in debelino varje-

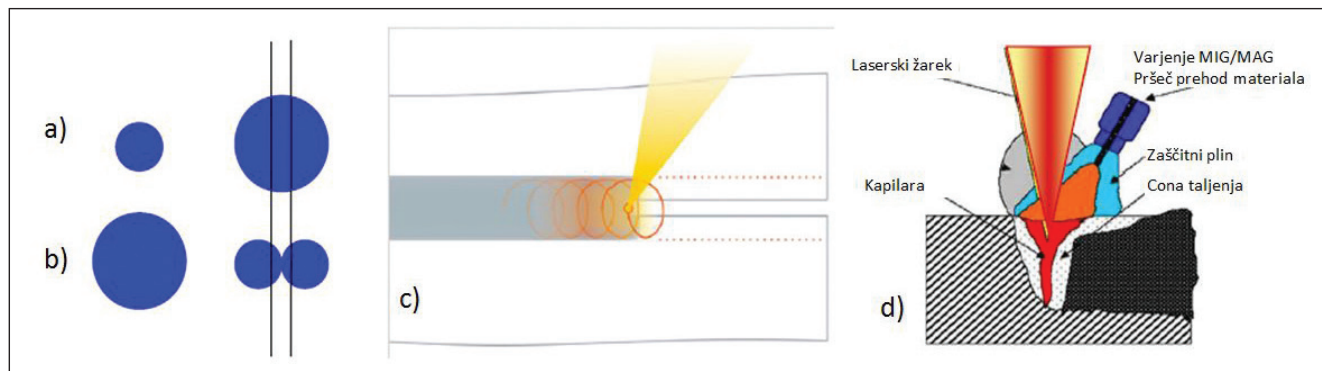
Slika 5. Možnosti oblikovanja spojev za lažje lasersko varjenje: a) sočelnih in b) prekrivnih zvarnih spojev



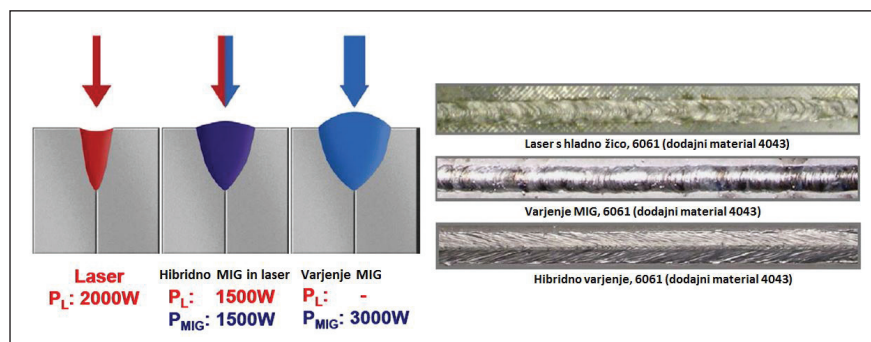
Slika 4. Priporočila glede velikosti rege zvarnega roba in možnosti za premoščanje večjih toleranc [1]

neralna priporočila lahko obidemo s spremembo velikosti zvarne točke ali s slabše pripravljeno geometrijo zvarnega roba, če je sprejemljiva manjša nosilnost zvarnega roba (slika 4c, d).

Če posameznih delov ne moremo izdelati v dovolj visokih tolerancah ali bi bila taka izdelava predraga, si lahko oblikovanje spoja poenostavimo s katerim od naslednjih priporočil, ki so prikazana na sliki 5. Tolerančne zahteve lahko zmanjšamo, če namesto sočel-



Slika 6. Tehnike za premoščanje večjih špranj pri laserskem varjenju: a) z večjim premerom laserskega žarka, b) z dvema žarkoma, c) z nihanjem in d) s hibridnim varjenjem [1]



Slika 7. Primerjava varjenja aluminija: laserskega, hibridnega in MIG 6061 [1]

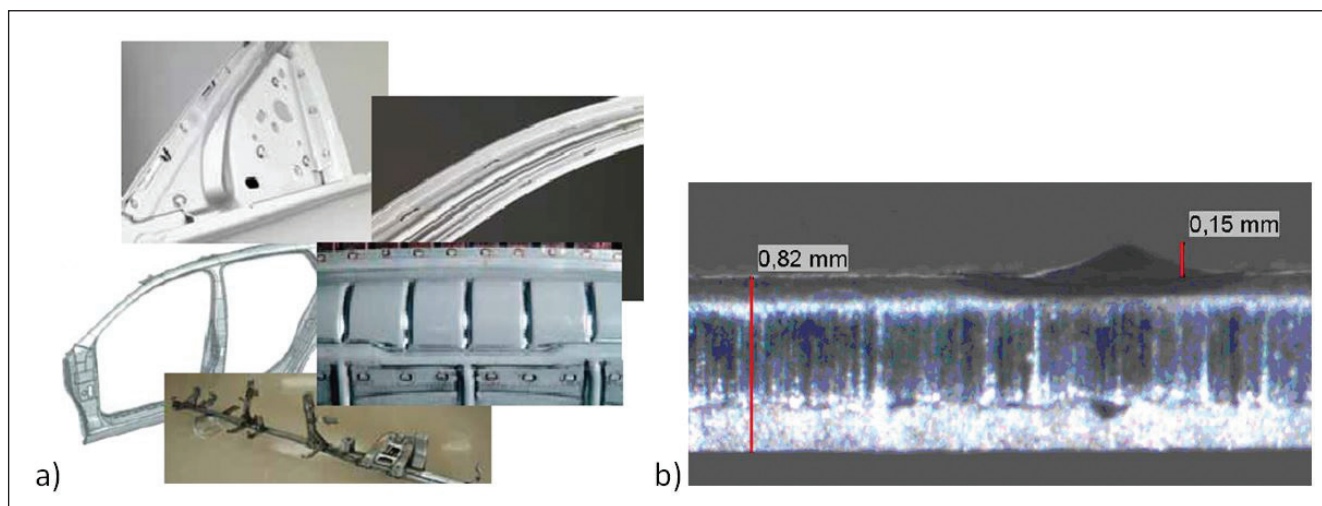
nih spojev uporabimo prekrivne spoje v različnih smereh (slika 5a). Dva prekrivna spoja lahko na primer nadomestimo s kombinacijo prekrivnega in sočelnega spoja ali s kombinacijo dveh prekrivnih spojev. Pri konstruiranju izdelkov za lasersko spajanje velja upoštevati priporočilo, da je potrebno z enim spojem kompenzirati tolerance v eni smeri, z drugim pa v drugi smeri.

■ Tehnike varjenja za premoščanje špranj

Tehnike laserskega varjenja za premoščanje špranj so uporaba laserskega žarka z večjim premerom v fokusu, razdelitvijo laserskega žarka v dve točki, nihanjem laserskega žarka ali s hibridnim varjenjem z uporabo postopka MIG in laserskega varjenja (slika 6). Pri uporabi laserskega žarka z večjim

premerom v fokusu dobimo večje TVP, samo varjenje pa je počasnejše (slika 6a). Uporaba dveh žarkov (twin spot) omogoča dvakrat večje gostote moči in manj izgubljene energije, kar ima za posledico večjo varilno hitrost (slika 6b). Varjenje z nihanjem varilnega obloka poteka hitro, natančno, omogoča prihranek dodatnega materiala in zahteva manj natančno pripravo zvarnih robov (slika 6c). Manjša slabost te tehnike je lahko usmerjena struktura nastalega zvara. Hibridno lasersko varjenje in varjenje MIG omogoča premoščanje večjih zvarnih reg, zvar pa je tudi metalurško izredno kakovosten (slika 6d). Težavi hibridnega varjenja sta nekoliko višja cena sistema in kompleksnost, saj za uspešno varjenje včasih potrebujemo tudi sistem za nadzor s kamero.

Slika 7 prikazuje geometrijo in videz temena zvarov na aluminiju se-



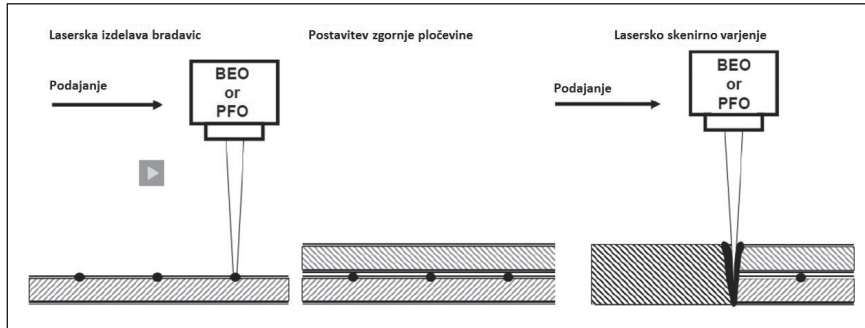
Slika 8. a) Primeri lasersko spojene pocinkane pločevine in b) izdelava bradavice za uspešno odvajanje uparjenega cinka [1]

rije 6061 po laserskem varjenju, hibridnem varjenju in varjenju po postopku MIG. Primerjava kaže, da z obločnim varjenjem dosežemo bolj gladko teme zvara in širši koren zvara. Lasersko varjenje zmanjša konveksnost temena vara in vpliv zajede v zvaru. Dodatno povečuje

globino prevaritve in omogoča varjenje z večjimi varilnimi hitrostmi. Hibridno varjenje združuje prednosti obeh postopkov varjenja in omogoča premoščanje večjih zvarnih reg, izboljša kakovost spojev, laser pa pri tem poveča hitrosti varjenja, globino penetracije in stabili-

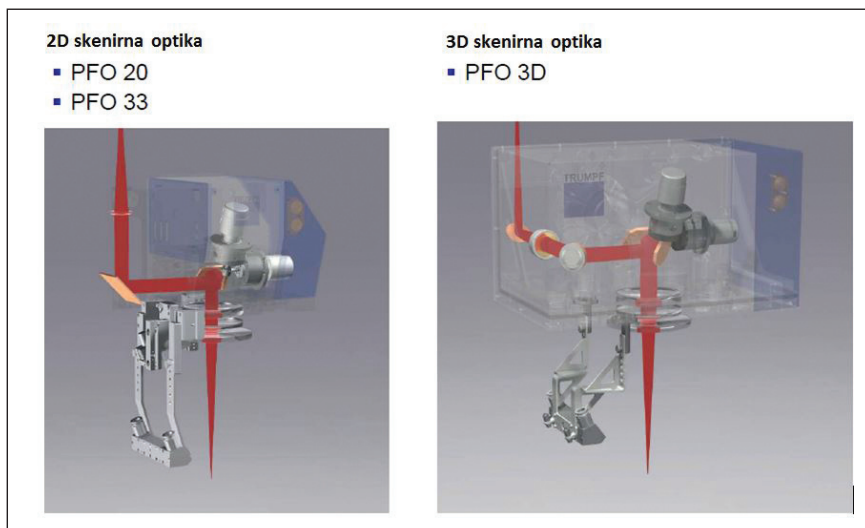
zira proces varjenja MIG. Za serijsko proizvodnjo lahko to pomeni manjše število varilnih celic, kar vodi do prihrankov.

■ **Oddaljeno ali skenirno varjenje**



Slika 9. Postopek izdelave bradavic in laserskega varjenja pocinkane pločevine [1]

V zadnjem času se vse bolj uveljavlja tudi lasersko skenirno varjenje, ki se pogosto uporablja za varjenje v visokoserijski proizvodnji pri izdelavi delov avtomobilske karoserije. Tu se običajno varijo vrata, stranice, deli sedežev in deli, ki so skupni več modelom (slika 8a). Pri tem se običajno vari pocinkana pločevina v prekrovnem spoju, kjer prihaja do uparjanja cinka, zato je za uspešno spajanje potrebno predhodno izdelati bradavice (slika 8b). Pri varjenju neprevlečenih nizkoogljičnih jekel izdelava bradavic ni potrebna.

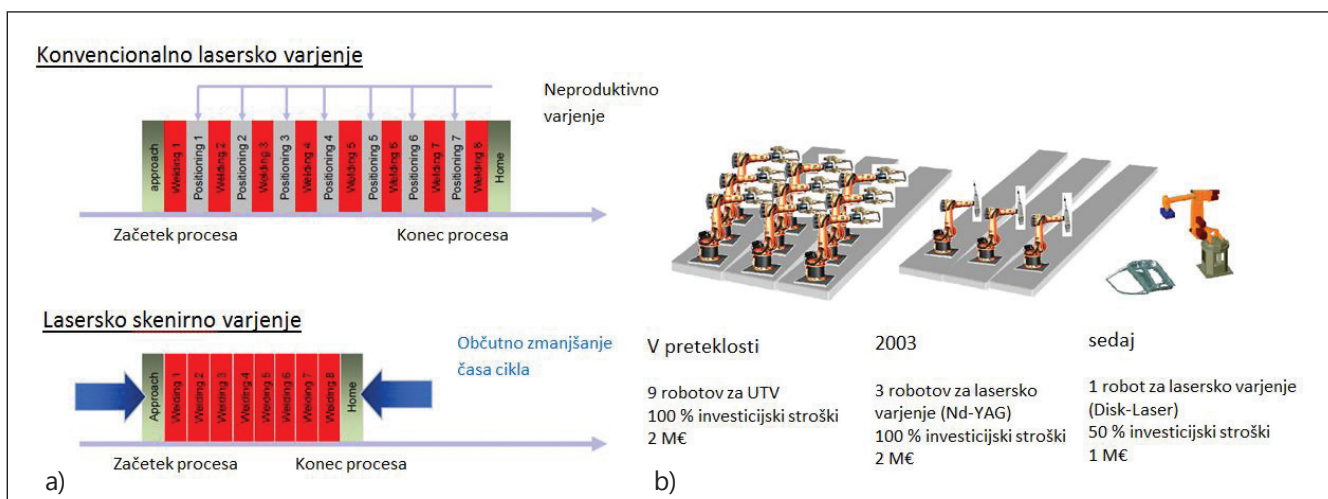


Slika 10. Programabilna fokusirna optika za 2D skenirno varjenje in 3D skenirno varjenje

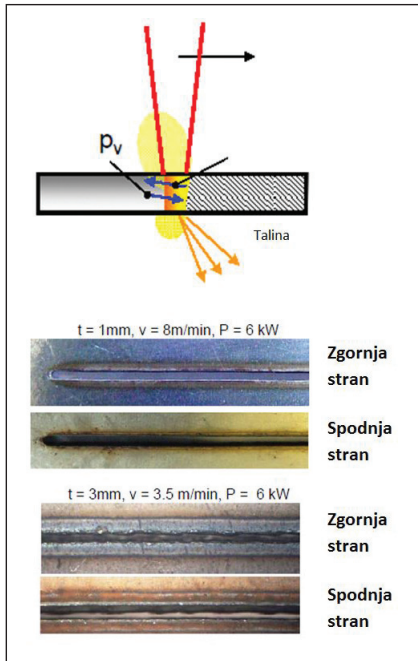
Spajanje pocinkane pločevine se začne z izdelavo bradavic, ki so visoke od 0,15 do 0,2 mm. Velikost bradavic je odvisna od parametrov laserskega žarka. Temu sledita pozicioniranje zgornje pločevine in skenirno varjenje, kot prikazuje slika 9.

Skenirno varjenje se izvaja z uporabo programabilne fokusne optike, ki je prikazana na sliki 10. Obstajata sistem za varjenje v ravnini in sistem za varjenje v prostoru (3D).

Prednosti uporabe oddaljenega ali skenirnega laserskega varjenja



Slika 11. Primerjava a) časov cikla med konvencionalnim laserskim varjenjem in laserskim skenirnim varjenjem ter b) investicijskih stroškov in opreme za spajanje avtomobilskih vrat

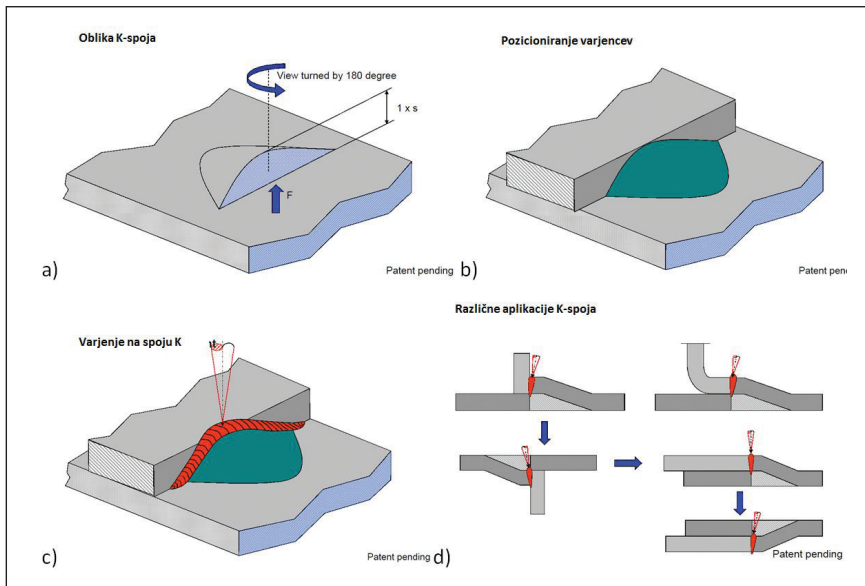


Slika 12. Princip skenirnega rezanja in dva primera izdelanih rezov

pred konvencionalnim laserskim varjenjem je več. Glavna prednost so krajši časi ciklov, ki se dosežejo zaradi nepotrebne pozicioniranja pred vsakim ponovnim varjenjem (slika 11a). Ilustrativen primer na sliki 11b prikazuje prihranke zaradi krajših časov ciklov. Za spajanje avtomobilskih vrat je bilo v preteklosti potrebnih 9 varilnih robotov z varilnimi kleščami in viri za uporovno točkovno varjenje. Investicija v opremo je znašala okoli 2 milijona evrov, za postavitev celic pa je bilo potrebna več proizvodnega prostora. Z uporabo laserskega skenirnega varjenja se je investicija zmanjšala za polovico, bistveno manjši pa je tudi potreben prostor v proizvodni dvorani. Enako serijo izdelkov lahko sedaj uspešno izdelamo z uporabo enega varilnega robota s sistemom za lasersko skenirno varjenje.

Laserski sistem za oddaljeno ali skenirno varjenje se lahko brez rezalne šobe uporablja tudi za rezanje. To poteka z odstranjevanjem staljene kovine s talilnim tlakom. Pri tovrstnem rezanju dobimo kakovosten rez brez srha, ki pa je zaradi rezanja brez zaščitnega plina nekoliko oksidiran. Rezanje lahko izvajamo do debeline pločevin 4 mm. Pri tem je hitrost rezanja približno pol manjša kot hitrost varjenja. Slika 12 prikazuje princip rezanja in dva primera rezov, izdelanih na dveh debelinah pločevin z različnimi parametri rezanja. Pri rezu na debelejši pločevini je opazen pojav srha, medtem ko se na obeh pločevinah opazi toplotno vplivano območje z oksidirano površino.

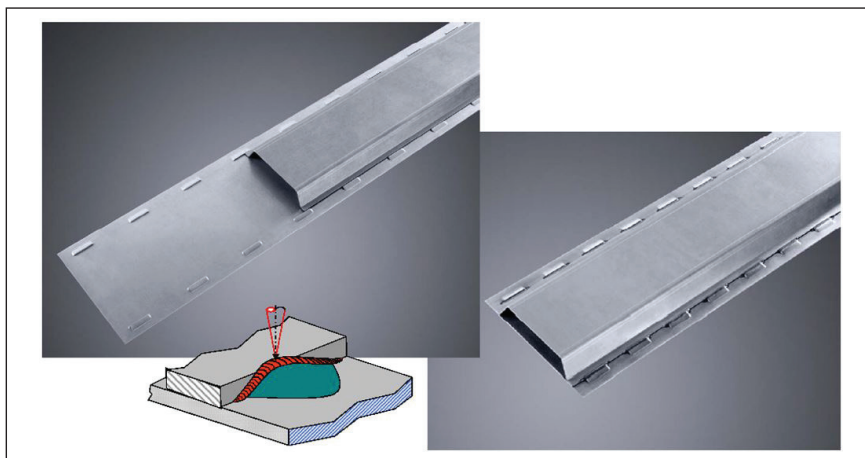
■ Spenjanje in pozicioniranje



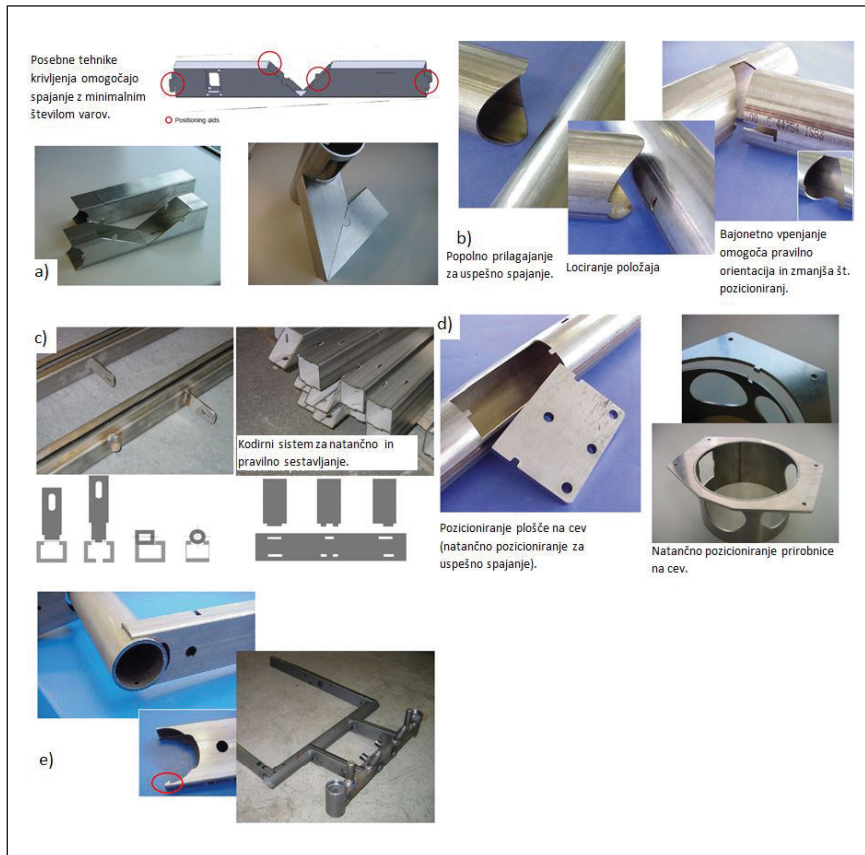
Slika 13. Izdelava K-spoja, pozicioniranje varjencev in lasersko varjenje [1]

Pri izdelavi nosilcev, konstrukcij ali delov karoserij vozil se za lažje pozicioniranje in izdelavo izdelkov lahko uporabljajo različni načini pozicioniranja. Eden izmed njih je z uporabo t. i. K-spoja, ki ga izdelamo s postopkom preoblikovanja. Prednost uporabe tega spoja je natančno pozicioniranje varjencev, ki olajša kasnejše lasersko varjenje. Lasersko lahko tak spoj, kot je prikazano na sliki 13d, varimo na različne načine. Prednost takšnega spoja je manjša prirobnica in s tem manjša teža izdelka (slika 14).

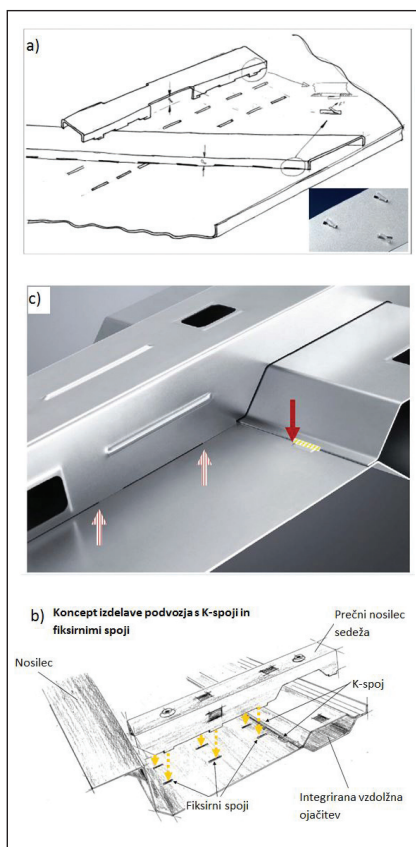
Pri spajanju cevastih varjencev si lahko pomagamo z različnimi pripomočki za pozicioniranje in spenjanje, kot prikazuje slika 15. Z njihovo pomočjo zagotovimo izredno natančno pozicioniranje, ki je primerno tudi za lasersko varjenje v sočelnem zvarnem spoju. Posamezne dele za pozicioniranje in spenjanje lahko izdelamo z laserskim rezanjem ali s preoblikovanjem. Slika 15a prikazuje tehniko priprave cevi, ki za spajanje potrebuje le malo zvarov. Slika 15b prikazuje primer odrezane cevi, ki omogoča natančno prilaganje sosednji cevi, desna slika pa primer bajonetnega spajanja, ki omogoča natančno orientiranje, pozicioniranje in vpe-



Slika 14. Uporaba K-spoja za pozicioniranje in lasersko varjenje [1]



Slika 15. Primeri pozicioniranja cevastih varjencev med seboj ali s pločevinami za potrebe laserskega varjenja [1]



Slika 16. Integracija pozicioniranja in spenjanja pri pripravi izdelkov za lasersko varjenje [1]

njanje. Slika 15c prikazuje primer kodiranja, ki omogoča pravilno pozicioniranje izdelkov pri sestavljanju v sestav. Na sliki 15d sta prikazana primera natančnega pozicioniranja med pločevino in cevjo. Primer natančnega pozicioniranja in vpenjanja med okroglo in kvadratno cevjo je prikazan na sliki 15e.

Slika 16 prikazuje idejne primere pozicioniranja in spenjanja pri izdelavi avtomobilske karoserije, ki ob pravilni uporabi olajšajo lasersko varjenje v visokoserijski proizvodnji. S shem so razvidni koncepti, ki omogočajo ponovljivo vpenjanje, ki je osnova za uspešno lasersko spajanje.

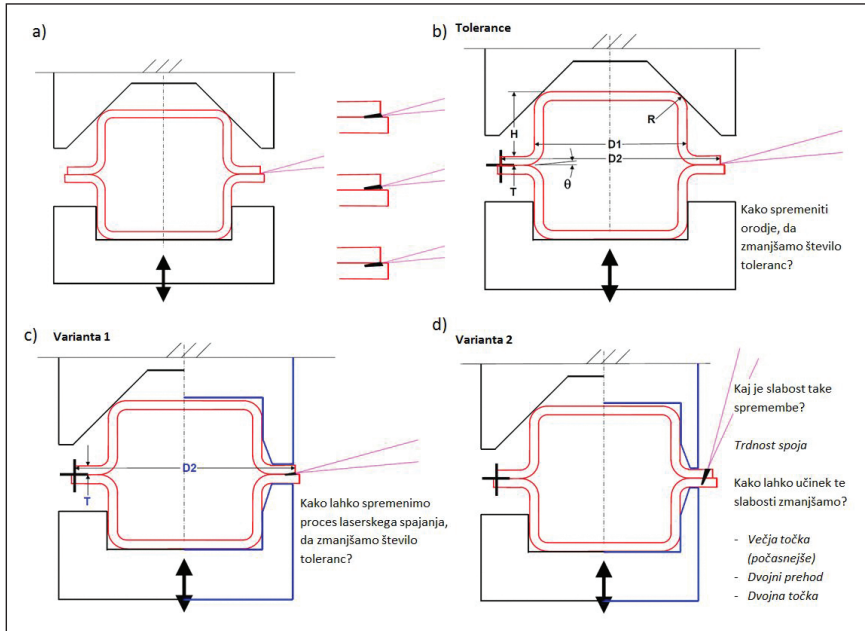
■ Vpenjanje polizdelkov

Vpenjanje polizdelkov pri izdelavi izdelka je pri laserskem varjenju izredno pomembno, saj je velikost laserskega žarka majhna, podobno, kot je globina fokusa žarka. Pozicija zvarnega spoja je odvisna od toleranc izdelkov, toleranc orodij in po-

novljivosti sistemov za gibanje (manipulatorjev). Parametri, s katerimi vplivamo na uspešno lasersko varjenje, so premer laserskega žarka v fokusu, globina fokusa, moč žarka, hitrost spajanja in geometrija zvarnega spoja. Pri varjenju sočelnega spoja je toleranca zvarne rege odvisna od velikosti laserskega žarka v fokusu, medtem ko je za uspešno spajanje pri prekrivnem spoju pomembna fokusna razdalja.

Pri izdelavi vpenjal za lasersko spajanje je potrebno upoštevati številne zahteve in priporočila. Cena investicije v vpenjala mora biti primerna dodani vrednosti izdelka. Vpenjanje in izpenjanje izdelkov naj bo izvedeno preprosto in enostavno. Pozicioniranje podsestavov, spojev in kosov naj bo izvedeno čim bolj natančno in ponovljivo. Pri vpenjanju ne smemo poškodovati izdelka. Dostop do mest za spajanje naj bo enostaven. Izogibati se je potrebno prekrivanju zvarov. Poskrbeti je potrebno, da ne pride do obrabe vpenjalnih delov, za odvod toplote z mesta varjenja, za zaščito pred obrizgi, sevanjem in odboji laserske svetlobe, za odsesavanje dimnih plinov. Zagotoviti je potrebno ponovljivost vpenjanja in pozicioniranja z odvodom odvečne toplote iz vpenjalnih sistemov. Vpenjanje naj bo izvedeno čim bližje mestu zvara, pri tem pa je potrebno upoštevati krčenje in zvijanje izdelka. Vpenjalne naprave je potrebno pripraviti tudi za popolno prevartev. Pri postavitvi zaščite za varilno celico je potrebno upoštevati tudi možnosti za dovod zaščitnih plinov.

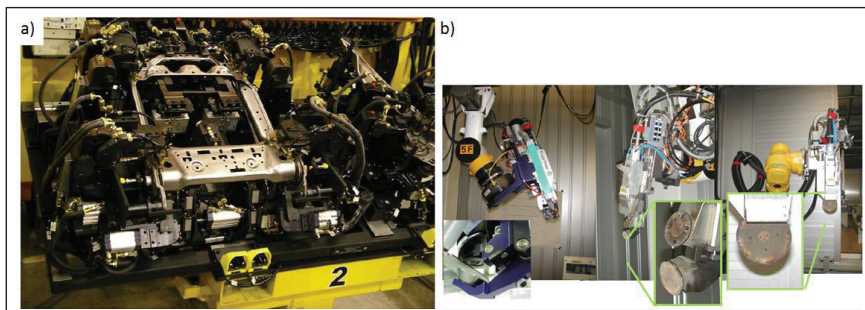
Slika 17 prikazuje idejno zasnovo vpenjanja in laserskega varjenja nosilca. Slika 17a prikazuje sistem vpenjanja in pozicioniranja varjen-cev ter mesto in način laserskega varjenja v sočelnem zvarnem spoju. Slabo pozicioniranje lahko vodi do neprevarjenosti, če pride do spremembe pri pozicioniranju po višini. Slika 17b prikazuje potrebne tolerance vpenjalne naprave za uspešno izdelavo spoja z laserskim varjenjem, slika 17c pa preoblikovanje vpenjalnega orodja, ki omogoča zmanjšanje potrebnega števila



Slika 17. Vpenjalno orodje in spajanje nosilca: a) način laserskega varjenja sočelnega spoja, b) potrebne tolerance spoja, c) zmanjšanje potrebnih toleranc varjencev s spremembo vpenjalnega orodja in d) možni načini laserskega spajanja v industrijskih pogojih

toleranc na varjencih z dodajanjem dodatnih omejitev v vpenjalno orodje. Na *sliki 17d* je prikazana sprememba smeri dovoda laserkega žarka, ki ima za posledico spremembo lokacije zvara. Ta sprememba omogoča bolj ponovljivo varjenje v serijski proizvodnji ob nekoliko manjši trdnosti zvarnega spoja. Varivost in ponovljivost varjenja v industrijskih pogojih lahko izboljšamo tudi pri sočelnem zvaru, če uporabimo širši premer žarka, dva žarka ali tehniko nihanja (*slika 6*). Vse to zmanjša hitrost laserskega varjenja na račun višje trdnosti zvarnega spoja.

Na *sliki 18a* je prikazano kompleksno vpenjalno orodje za lasersko varjenje avtomobilskega sedeža, na *sliki 18b* pa primeri robotskih vpenjalnih naprav za lasersko varjenje



Slika 18. a) Vpenjalna naprava za lasersko varjenje sedežev in b) robotske vpenjalne naprave za lasersko varjenje

material. Zvijanje varjencev lahko zmanjšamo z manjšo velikostjo zvarne točke, deljenjem laserskega žarka, s hitrimi spenjalnimi varki ali z oddaljenim skenirnim laserskim varjenjem.

Da dosežemo prednosti laserskega spajanja, se priporoča upoštevanje naslednjih smernic:

- Oblikuj komponente za lasersko varjenje tako, da zmanjšaš velikost prirobnic, debelino pločevin, odpraviš luknje za dostop z zadnje strani za uporabno točkovno varjenje ter odpraviš naknadne obdelave. S temi ukrepi zmanjšaš težo komponent in stroške materiala, olajšaš dostop v vozilo in preglednost iz vozila ter povečaš togost izdelka. Togost komponent izboljšaš tudi z uporabo pločevin različnih debelin (tailored blanks) ter z optimalno geometrijo in postavitvijo laserskih zvarov.
- Povečaj izkoristek laserskega žarka z deljenjem žarka ali z uporabo skenirnega laserskega varjenja.
- Omogoči ustrezno ujemanje in vpenjanje varjencev. Velikost špranje pri sočelnih in prekrivnih zvarnih spojih naj ne presega 10 % minimalne debeline pločevine. Uporabi prednosti, ki jih nudijo različno oblikovani zvarni spoji. Upoštevaj vrsto oblikovnih možnosti, ki omogočajo primerno pozicioniranje in vpenjanje za lasersko varjenje (K-spoj, bajonetni spoj, pozicionirne luknje, ...)
- Varjenci morajo biti pred varjenjem čisti in suhi, da dosežete optimalno kakovost spoja (brez rje, umazanije, maščob, olj, hladilnih sredstev, barv, lepil, ...).
- Spajanje pocinkane pločevine zahteva posebno pripravo za odstranjevanje uparjenega cinka.
- Ustrezna izbira inženirjev, ki bodo razumeli proces varjenja in bodo pripravljene učiti druge. V proces je potrebno vključiti tudi drugo proizvodno osebje (lastnike, vzdrževalce, varstvo pri delu).
- Izbira dobavitelja laserskega sistema z ustreznim znanjem, izkušnjami in dobrim imenom.

Literatura

- [1] Dave Locke, David Havrilla, Design for Laser Welding Seminar, Trumpf, 2013.
- [2] David Havrilla, Design Principles for Laser Welding, UVA 2014.
- [3] Tim Morris, VW Golf V Laser Processing Concept and Production Implementation, www.autosteel.org. 2004.
- [4] Jamie Vondruska, Golf 7 tech highlights, <http://www.vwvortex.com/features/technical-features/golf-7-technicalpreview/>.
- [5] Rüdiger Brockmann, Laser Joining of Aluminium in the European Automotive Industry, TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH.
- [6] Thomas Fittkau, Mariana Forrest, Laser beam welding – the alternative solution, Energy-Efficient Transportation Systems Conference, 13 May, 2014.
- [7] Roger O'Brian, Richard Hewitt, Remote fibre laser welding benefits when applied to leading edge chassis structural and suspension products, LTS 2011 – WMG, 20th July, 2011.
- [8] Wobbling the weight off cars, http://www.laser-community.com/technology/laser-remote-welding-wobbling_3448/.
- [9] <http://www.iws.fraunhofer.de/>.
- [10] Jorg Neukum Laser based polymer welding in medical device manufacturing, <http://www.industrial-lasers.com/articles/2010/07/laser-based-polymer.html>.

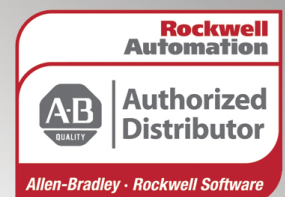
Recommendations for laser welding in industrial environment

Abstract: Recently, laser systems are becoming more affordable for mass production. Advisable introduction of laser technologies into the production process must reflect technological and economic advantages. These advantages can be achieved by taking into account the recommendations for the design of joints and welds. The purpose of this paper is to describe the advantages and limitations that need to be considered in the design and manufacture of the products in industrial environment.

Keywords: laser welding, laser hybrid welding, precision positioning and fixturing, wobbling



Rešitve za mehatroniko, avtomatizacijo in informatiko



Novo v programu:

Osvetljene tipke 22,5 mm na osnovi piezo tehnologije

- Stopnja zaščite IP69K, material nerjaveče jeklo 316
- Primerni so za uporabo v živilski in farmacevtski industriji (pranje s čistili pod pritiskom)
- So brez vdolbin, kjer se lahko nabirajo kontaminanti
- Standardni izrez 22,5 mm, napetost 24VDC
- Gravirani napisi po naročilu

info@tehna.si www.tehna.si
Tehnološki park 19 · Ljubljana

