

Kaj morajo načrtovalci novih proizvodov vedeti o tehniki spajanja?

What should Designers of New Products Know about Joining Methods?

J. Tušek¹, Institut za varilstvo, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-01-17

Namen članka je v splošnem pokazati na nekatere osnovne značilnosti tehnike spajanja materialov, na katere pozabljajo načrtovalci in oblikovalci novih varjenih proizvodov. V začetku članka so opisane osnovne in splošne zahteve varjenih izdelkov, ki jih mora izpolnjevati zvar in zvarni spoj oziroma končni uporabni varjeni proizvod. Prav tako so shematsko prikazani dejavniki, ki so vključeni v proces nastajanja varjenega izdelka, na katere je možno vplivati za doseg optimalnih rezultatov. Med te dejavnike spada izbira materiala, izbira varilnega postopka, vključno z ukrepi pred varjenjem, med njim in po njem, načrt konstrukcije oziroma oblikovanje izdelka in strokovno izobraženo in atestirano osebje, ki je porok za kvalitetno izvedbo varjenja.

Ključne besede: varjeni izdelek, varivost, predgrevanje, preddeformacije, zvarni spoj iz različnih materialov, varilni postopek

The aim of the paper is to show some basic characteristics of joining technique for materials, which are often forgotten by designers of new welded products. In the first place basic and general requirements regarding welded products, which should be fulfilled by the weld, the welded joint and the final welded product fit for use respectively, are stated. Factors making part of the manufacturing process for the welded product and which may be affected in order to obtain optimum results are shown schematically as well. Some of these factors are material selection, welding procedure selection, including measures taken before, during and after welding, structure plan, i.e. product design, and skilled and certified personnel who guarantee high quality of welding operation.

Key words: welded product, weldability, preheating, preliminary deformations, welded joint of various materials, welding procedure

1 Uvod

Tehnika spajanja materialov v trajno neločljivo zvezo je prav gotovo veda, ki je v zadnjih desetletjih dosegla nesluten razvoj. Skoraj ni področja ali dejavnosti oziroma končnega uporabnega proizvoda, pri katerem ne bi bil uporabljen eden ali drugi način tehnike spajanja. Danes se v praksi z varjenjem, lotanjem ali lepljenjem spajajo vse vrste materialov od kovin, keramike, plastike prek tekstila do raznih kompozitnih materialov, kakor tudi različni materiali med seboj. Tehnika spajanja in termičnega rezanja se v praksi uporablja na morju in v morskih globinah, pod zemljo v rudnikih, na terenu pri varjenju jeklenih cevovodov, mostov in drugih konstrukcij, od tropskih krajev pa do sibirskih step ter vse do vesoljske tehnike in celo v vesolju. Spajanje materialov torej ni samo stvar strojnikov ali metalurgov in gradbenikov, ampak tudi kemikov, elektrotehnikov, fizikov, tekstilcev in praktično vseh, ki delajo na tehničnem področju.

Varilci, varilski tehnologi in inženirji pogosto naletimo na težave, ker načrtovalci novih proizvodov ali materialov pri razvoju že od samega začetka ne upoštevajo osnovne zakonitosti tehnike spajanja. S pravilnim načinom s poznavanjem in z upoštevanjem tehnologije varjenja, lotanja in lepljenja je pogosto možno poceniti izdelavo proizvoda, razširiti njegovo uporabnost in podaljšati trajnost.

Ideja za nastanek članka je nastala na osnovi številnih zgledov reševanja težav pri spajanju različnih materialov pri proizvodnji končnih izdelkov v slovenski industriji.

2 Splošne zahteve na varjenih in lotanih spojih

Zvarjeni, spajkani in zlepljeni spoji so med uporabo podvrženi različnim obremenitvam in obtežbam. Na **sliki 1** so shematsko prikazane splošne zahteve, ki jih mora zvarni spoj po izdelavi izpolnjevati. Za izdelavo zvarnega spoja potrebujemo ustrezen material, ki mora imeti ustrezne ateste in mora biti pred varjenjem ustrezno pripravljen. K pripravi varjencev pred varjenjem spada priprava zvarnega robu in morebitno predgrevanje ali preddeformacija (**slika 1**).

Za izdelavo zvarjenega spoja potrebujemo izobražene varilce. Poleg ustrezne izobrazbe se od varilca zahteva atest, izdan od pooblaščenice institucije. Poleg ustreznega osebjia ima pri izdelavi zvara zelo pomembno vlogo izbira varilnega postopka.

Od varjenega izdelka v splošnem zahtevamo, da ima zadostno trdnost, čim manjšo maso, da je odporen proti kemičnim in termičnim vplivom, da ima dobro vizualno oceno in v specifičnih primerih, da izpolnjuje še druge zahteve.

Iz povedanega sledi, da moramo za kvaliteten zvarni spoj poiskati harmonijo med materialom, varilnim postopkom in konstrukcijsko izvedbo. Na **sliki 2** je ta povezava tudi shematsko prikazana^{1,2}.

Pogosto pa pri izbiri materiala naletimo na težave. V gradbeništvu, v energetskih in kemijskih napravah

¹ Doc.Dr. Janez TUŠEK
Institut za varilstvo
Pujska 19, 1000 Ljubljana, Slovenija



Slika 1: Splošne zahteve, ki jih morajo izpolnjevati zvarjeni spoji med eksploatacijo oziroma uporabo

Figure 1: General requirements to be fulfilled by welded joints in exploitation

moramo večkrat variti različne materiale med seboj. Včasih to narekuje tehnološki proces, mnogokrat pa je z varjenjem različnih vrst materiala možno dobiti kvalitetnejši izdelek, ki je lažji ali pa ima daljšo obstojnost. Na sliki 3 je prikazano pet različnih izdelkov, zvarjenih iz različnih materialov po različnih postopkih.

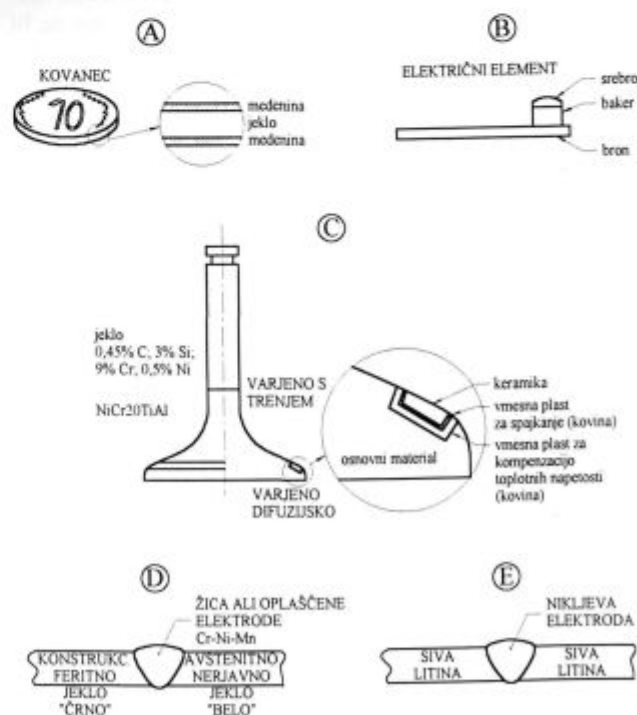
Zgled A prikazuje kovanec, izdelan iz jeklene pločevine, prevlečene z medenino. Medenina se lahko navari na jekleno pločevino z eksplozijskim varjenjem ali po kakšnem drugem postopku navarjanja, ali pa se nanese s

posebnim postopkom valjanja. Takšen način izdelave kovancev je sicer nekoliko dražji od klasičnega, toda material je cenejši in ponarejanje kovancev je onemogočeno.

Pri zgledu B vidimo električni element, zvarjen iz treh različnih materialov. Nosilni element mora prenašati dinamične mehanske obremenitve, zato je izdelan iz bron. Funkcija srednjega dela je le prevajanje električnega toka, zato je izdelan iz bakra. Baker je prevlečen s srebrom zaradi čim manjše obrabe, dobre električne prevodnosti in dobrega električnega kontakta. Celoten element je možno izdelati po več varilnih postopkih, odvisno od dimenzij varjencev in tudi od količine proizvodnje. Najpogosteje se prikazani električni element vari elektroporovno.

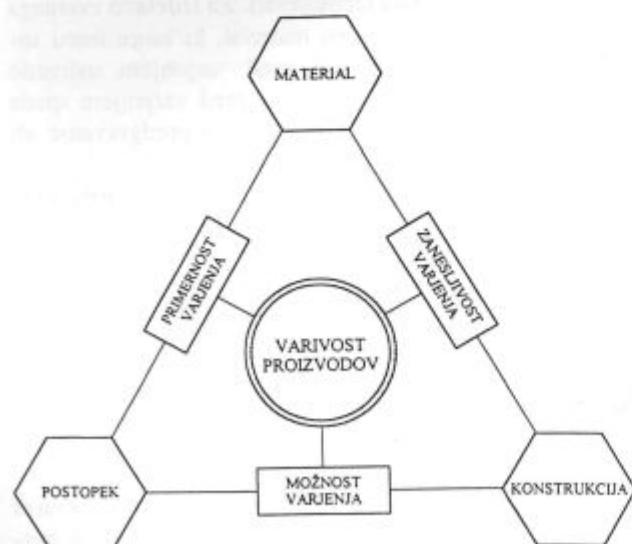
Zgled C prikazuje ventil z motorjem z notranjim izgorevanjem. Izdelan je iz treh različnih materialov, ki so med seboj zvarjeni po dveh različnih postopkih. Steblo ventila je izdelano iz jekla, ki je legirano s kromom in silicijem, ker mora prenašati natezne obremenitve brez toplotnih dilatacij pri povišani temperaturi. Glava ventila je izjemno toplotno obremenjena. Izdelana je iz zlitine niklja in kroma z dodatkom titana in aluminija. Na površino glave ventila je zaradi manjše obrabe in daljše obstojnosti privarjen keramični obroč.

Steblo ventila in glava sta zvarjena s trenjem. To je postopek varjenja z mehansko silo, ki ga je mogoče popolnoma avtomatizirati in ki zagotavlja izjemno dobro kvaliteto zvarnih spojev. Keramični obroč pa je privarjen na glavo ventila difuzijsko z vmesno plastjo.



Slika 3: Nekaj zgledov uporabnih proizvodov, zvarjenih iz različnih materialov in po različnih postopkih

Figure 3: Some cases of usable products made of various materials and welded with various welding processes



Slika 2: Na varivost proizvodov vplivajo vrsta materiala, konstrukcijska izvedba in postopek varjenja

Figure 2: Weldability of products is affected by type of material, engineering design and welding procedure

"Črno-belo" varjenje - to je varjenje navadnega konstrukcijskega jekla z nerjavnim visokolegiranim avstenitnim jeklom je prikazano na zgledu D. Takšni zvarni spoji se najpogosteje izdelujejo v gradbeništvu, v termoelekttrarnah in v kemičnih napravah³.

Varjenje s taljenjem je glede na Schafflerjev diagram nemogoče ustrezno izvesti brez dodatnega materiala. S praktičnimi in teoretičnimi raziskavami je bilo ugotovljeno, da je možno za "črno-belo" varjenje uporabiti več vrst dodatnih materialov. Najpogosteje varijo z oplasčeno elektrodo ali z golo varilno žico v sestavi 18% Cr, 8% Ni, 6% Mn, ostalo je železo.

Pri zadnjem zgledu vidimo varjenca iz sive litine, varjena z nikljevo elektrodo. Nikelj je namreč edina kovina, ki v tekočem stanju topi ogljik in ga med ohlajanjem izloča v obliki grafita in ne v obliki cementita. Zaradi te zakonitosti je možno sivo litino variti v hladnem le z elektrodo, ki vsebuje več kot 50% niklja.

4 Konstrukcijske rešitve

Pri optimalni varjeni konstrukciji moramo poleg razporeditve zvarov in njihovih dimenzij zaradi mehanskih obremenitev upoštevati tudi druge dejavnike. Med nje prav gotovo sodi čim ugodnejši pristop do zvarnega mesta zaradi same izdelave zvarov, zaradi morebitnih dodatnih tehnoloških ukrepov in tudi zaradi kontrole zvarov po varenju. Pri zaprtih varjenih konstrukcijah je še posebej pomemben vrstni red varjenja, na katerega mora biti vezan tudi vrstni red kontrole zvarov.

Prav gotovo je zvarni spoj oziroma prehodno področje zvara najšibkejši oziroma najobčutljivejši del vsake varjene konstrukcije. Dober konstruktor mora zato zvarne spoje locirati na mesta, na katerih skupaj s prehodno cono ne bodo kritično obremenjeni².

3 Izbira materiala

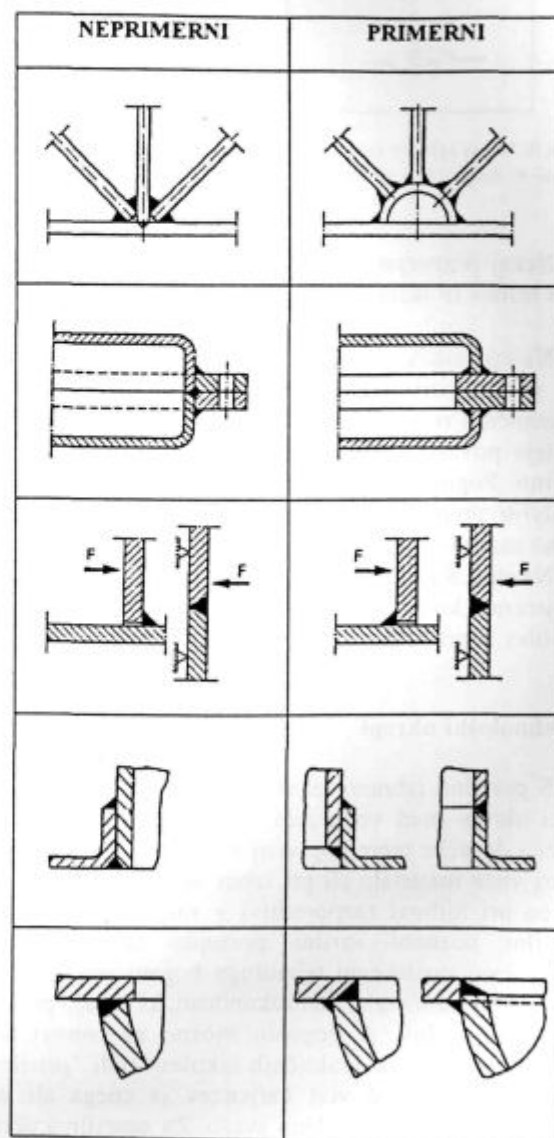
Načrtovalci novih varjenih proizvodov morajo pri izbiri materiala poleg drugih značilnosti, ki so pomembne za izdelek, upoštevati tudi njihovo varivost. Nekateri materiali imajo dobro varivost pri normalnih razmerah, drugi le pri posebnih. Na splošno velja, da se z višanjem kvalitete materiala, kot so mehanska trdnost, korozijska obstojnost in drugo, slabša varivost.

Poznamo varjenje s taljenjem in brez njega. Pri varjenju s taljenjem moramo varivosti posvečati še posebno pozornost. Le z dobrim poznavanjem materiala med ohlajanjem lahko zanesljivo izdelamo kvaliteten zvarni spoj. Pri zvarjanju različnih materialov med seboj in pri uporabi dodatnega materiala, različnega od osnovnega je treba dobro poznati topnost ene kovine v drugi.

Kot zgled naj omenim varjenje čistega aluminija in bakra. Zaradi zelo majhne topnosti ene kovine v drugi obločno ali plamensko talilno varjenje brez dodatnega materiala ni možno. Varjenca iz omenjenih kovin pa je mogoče zvariti z mehansko silo brez taljenja. Med postopke varjenja z mehansko silo brez taljenja spadajo: ultrazvočno, eksplozijsko, varjenje v hladnem z mehansko silo, difuzijsko varjenje in drugo. Z mehansko silo brez taljenja ne moremo variti različnih materialov, ki se zelo razlikujejo v trdnostnih lastnostih, kot na primer svinec in jeklo, v trajno vezo.

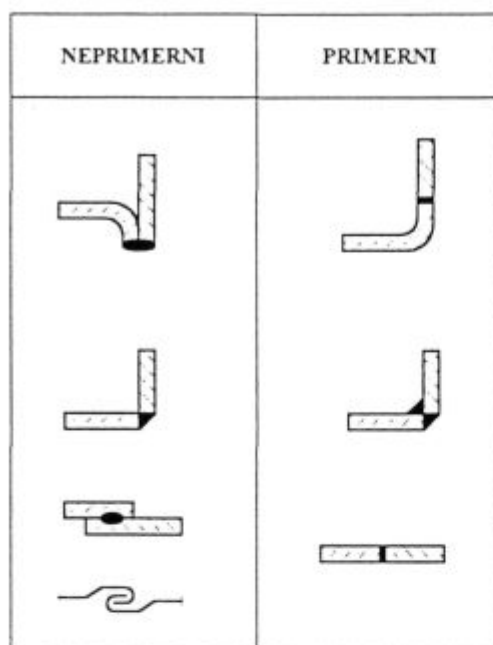
Pri izbiri materiala je potrebno upoštevati tudi njihove lastnosti glede korozije. Če izdelamo zvarni spoj iz aluminija in bakra brez dodatnega materiala, lahko zelo hitro pride do kontaktne korozije, ker se z vlago v zraku tvori galvanski člen.

Razvoj novih visokotrdnostnih jekel, ki so izdelana s termomehansko obdelavo, je pred varilce postavil nov izziv. V tem trenutku še ni poznan varilni postopek, s katerim bi bilo mogoče izdelati zvar enakih trdnostnih lastnosti, kot jih ima termomehansko obdelano jeklo.



Slika 4: Primerne in neprimerne razporeditve zvarov oziroma konstrukcijske rešitve

Figure 4: Suitable and unsuitable arrangements of welds, i.e. engineering solutions



Slika 5: Nekaj zgledov neustrezne in ustrezne izvedbe zvarnih spojev
Figure 5: Some cases of unsuitable and suitable welded-joint designs

Nekaj primerjav ugodnih in neugodnih konstrukcijskih rešitev in razporeditev zvarov je prikazanih na **sliki 4**.

Na kovinskih varjenih konstrukcijah se lahko pojavi več vrst korozij, ki nastanejo zaradi kemičnih in elektrokemičnih reakcij. Korozijo na varjenih spojih najpogosteje povzročajo mediji, ki so v dotiku z zvarjeno kovino. Pogosto je možno z optimalno konstrukcijsko rešitvijo preprečiti nastanek korozije ali vsaj omiliti njeno napredovanje.

Na **sliki 5** je shematsko prikazanih nekaj ustreznih in neustreznih konstrukcijskih rešitev za preprečitev ali vsaj omilitev napredovanja korozije.

5 Tehnološki ukrepi

S pravilno izbrano tehnologijo varjenja in z dodatnimi ukrepi pred varjenjem, med njim in po njem je možno do neke mere popraviti napake, ki so nastale pri izbiri vrste materiala ali pri izbiri vrste zvarnega spoja, ali pa pri njihovi razporeditvi v varjeni konstrukciji. Številni poznani varilni postopki in tehnologije omogočajo varilskemu tehnologu bogato izbiro. Poleg vseh kemijsko-metalurških zakonitosti, ki veljajo pri spajanju materialov, je pogosto možno na osnovi teoretičnega znanja in praktičnih izkušenj tudi "prisilno" spojiti dva ali več vrst varjencev iz enega ali več različnih materialov v trajno zvezo. Za zanesljivo oceno primernosti varilnega postopka za neki material pa je potrebno napraviti atest postopka, ki potrdi ali zavrže njegovo uporabo. Poleg izbire varilnega postopka imajo pri izdelavi kvalitetnega zvarnega spoja izjemno vlogo

ukrepi pred varjenjem, med njim in po njem. Sem spadajo toplotni postopki, kot so predgrevanje pred varjenjem in toplotna obdelava med varjenjem in po njem. Drugi so mehanski ukrepi. Pred varjenjem so to preddeformacije in po njem mikrokovanje, obdelava z ultrazvokom, vibracijsko odpravljanje zaostalih napetosti, obdelava z odrezovanjem in drugo.

K celotni tehnologiji varjenja spada tudi preizkušanje materialov. Posebno pri varivostnih preizkusih in pri varjenju talonov za mehanske preizkuse je potrebno variti v popolnoma realnih razmerah. Preizkuse brez porušitve pa je potrebno izvesti v zakonskem obsegu oziroma v obsegu, ki je za dano varjeno konstrukcijo smiseln.

Posebno poglavje pri izdelavi varjenih produktov pomeni varilno osebje. Po evropskih izobraževalnih programih, ki nastajajo že od leta 1992 in jih uvajamo tudi v slovenski prostor, je znanih pet nivojev izobraževanja za varilsko osebje. Najnižja stopnja je varilec za različne postopke varjenja. Varilec lahko po nekaj letih prakse in z dodatnim šolanjem napreduje do varilskega mojstra in nato še do varilskega specialista. Za izobraževanje za varilskega tehnologa se lahko odločijo tisti, ki so končali srednjo šolo tehnične smeri, za varilske inženirje pa tisti, ki imajo diplomu visoke šole tehnične smeri.

Načrtovalci novih varjenih izdelkov morajo vedeti, da je za kvalitetno izdelavo varjenih konstrukcij poleg izobraženega strokovnega kadra potrebno imeti veljavne atestirane varilce, ateste varilnega postopka, podjetje pa mora imeti ustrezno dovoljenje za izvajanje varilskih del. Vsi atesti morajo biti opravljeni pri pooblaščenih institucijah, dokumenti pa izdani od ustreznih državnih organov.

6 Sklepi

Načrtovanje in izdelava varjenih konstrukcij in drugih proizvodov je izjemno kompleksna dejavnost, ki mora vključiti strokovnjake različnih strok. Pri izbiri materiala bi morali sodelovati metalurgi in kemiki, pri konstruiranju in oblikovanju strojniki in gradbeniki, pri izbiri varilnega postopka in osebja strojniki in varilski tehnologi ter pri izpolnjevanju zakonskih predpisov (celo) pravniki. Za uspešno prodajo na trgu pa je prav tako umestno vključiti v delo ekonomiste in komercialiste. Prav zaradi kompleksnosti varilske stroke so po vseh državah že pred več desetletji nastali varilski inštituti, ki pokrivajo celotno varilsko področje. Celo več, nacionalne organizacije za varilstvo po posameznih državah so že pred petdesetimi leti organizirale Mednarodni institut za varjenje (International Institute of Welding) za celovito reševanje varilskih problemov. Podobno se je pred petimi leti ustanovila Evropska federacija za varjenje (European Welding Federation), predvsem z namenom izdelave enotnih šolskih izobraževalnih programov za vse stopnje in smeri na varilskem področju.

V članku je zelo nazorno, predvsem s **sliko 1**, ki je s tem člankom prvič objavljena, prikazano, na kaj morajo načrtovalci novih proizvodov paziti, če želijo izdelati

kvaliteten zvar oziroma kvaliteten in uporaben proizvod. Celotna vsebina članka temelji prav na **sliki 1**, ki jo avtor podrobno analizira in prikazuje praktične zglede iz vsakdanje prakse iz slovenske in svetovne industrije, nekaj primerov pa je vzetih tudi iz literature.

7 Literatura

- ¹ A. Neumann, E. Richter: *Tabellenbuch Schweiss- und Löttechnik*. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1989
- ² A. Rieberer: *Schweissgerechtes Konstruieren im Maschinenbau - Berechnungs- und Gestaltungsbeispiele*. Fachbuchreihe Schweisstechnik Band 95. DVS-Verlag GmbH Düsseldorf 1989
- ³ J. Tušek: Črno-belo varjenje. *Varilna tehnika*, 1993, 1, 8-12
- ⁴ DVS-Verlag (več avtorjev): *Fügetechnik Schweistechnische Ingenieurausbildung*. Düsseldorf - 1995