

Konstrukcijski materiali in tehnike spajanja

Structural Materials and Joining Processes

G. Rihar¹, Institut za varilstvo, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-04-21

Da bi zmanjšali lastno maso nosilnih konstrukcij in čim boljše izkoristili porabljena gradiva, iščemo nove materiale, ki bodo imeli čim boljše mehanske lastnosti ter jih je mogoče spajati v zanesljive in trdne zveze. Tudi v bodoče bo ostalo jeklo, ki ima dobro nosilnost in nizko ceno, najpomembnejši konstrukcijski material. Zvarni spoj po trdnosti prekaša vse druge načine neločljivega spajanja, zato bodo za izdelavo konstrukcij prišli v poštev le materiali, ki jih bo mogoče variti v tako trdne spoje, da bodo izkoriščene vse dobre lastnosti osnovnega materiala. Vedeti pa moramo, da ima varjenje v primerjavi z razvojem novih materialov manj možnosti. Nikoli se ne bomo mogli izogniti lokalnemu segrevanju na visoko temperaturo in hitremu ohlajanju, kar ima za posledico neugodno strukturo zvarnega spoja.

Ključne besede: konstrukcijski materiali, zvarni spoji, varjenje, lepljenje, lastnosti zvarov

In order to reduce the own weight of supporting structures and to make the best use of the materials applied, new materials are searched which should have mechanical properties as good as possible and would still permit the making of reliable and durable joints. Steel is characterized by high bearing strength and low price, and will remain the most important structural material also in future. Welded joints, due to their strength, surpass all other methods of permanent joining; therefore, only the materials permitting high-strength joints making use of the good properties of the parent metal will be taken into consideration in engineering design. One should be aware that with the development of new materials, welding will have less chances left. Local heating to a high temperature and high cooling rates, the result of which is an unfavourable structure in the welded joint, can namely never be avoided.

Key words: structural materials, welded joints, welding, adhesive bonding, weld properties

1 Uvod

Z razvojem novih tehnologij za proizvodnjo in predelavo kovin pridobivajo nekateri materiali, ki so bili v glavnem poznani že prej, uporabno vrednost. Govorimo o novih materialih, ki jih uporabljamo v različne namene. Poleg materialov za površinske prevleke, delo pri visoki temperaturi ter delovne površine orodij so pomembni tudi tisti za izdelavo nosilnih konstrukcij, o katerih bomo govorili. Pri tej skupini materialov ustreza tehnologija spajanja sestavnih delov v celoto šele omogoča njihovo uporabo. Nenadomestljivi so za izdelavo dvigal, železniških in cestnih vozil, ladij, procesne opreme, cevovodov, tlačnih posod, strojev, pa tudi mostov in zgradb. Prav tako je nenadomestljivo tudi varjenje, kajti le redko lahko uporabimo druge načine spajanja.

2 Novi materiali

V zadnjem času veliko govorimo na splošno o novih materialih. Z ozirom na uporabo jih lahko razdelimo v nekaj skupin:

- trde prevleke za površine, ki morajo biti čim odpornejše proti obrabi
- materiali, ki jih uporabljamo v težkih delovnih razmerah, pri visokih in nizkih temperaturah, v agresivnih medijih
- materiali za orodja
- materiali za izdelavo nosilnih konstrukcij.

Glede na veliko porabo imajo slednji prav gotovo velik gospodarski pomen. Pričakujemo lahko, da se bodo pojavili novi konstrukcijski materiali z vse boljšimi lastnostmi. Mišljene so predvsem visoka napetost tečenja, dobra žilavost, odpornost proti pokljivosti in krhkem lomu, pa tudi dobra varivost.

Če pogledamo v preteklost, lahko ugotovimo, da smo često preveč pričakovali od novih materialov. Mnogi so napovedovali, da bodo novi materiali nadomestili nekatere klasične, ki jih človeštvo uporablja že več sto let. Postavimo si lahko naslednja vprašanja:

- Ali bo jeklo ostalo najpomembnejši material za konstrukcije?
- V katere smeri bo potekal razvoj novih konstrukcijskih jekel?
- Kakšno perspektivo imajo lahke kovine, kot so aluminijeve in titanove zlitine?
- Kakšne so možnosti uporabe kompozitnih materialov?

Pri iskanju odgovorov na ta vprašanja moramo upoštevati nekatere dejavnike, kot so:

- proizvodni stroški
- lastnosti materiala
- možnosti spajanja v neločljivo zvezo.

Ena od karakteristik, na osnovi katerih presojamo uporabnost konstrukcijskih materialov, je razmerje (K_1) med zgornjo napetostjo tečenja (R_{eH}) in gostoto materiala (ρ).

$$K_1 = \frac{R_{eH}}{\rho} \text{ (J/kg)} \quad (1)$$

Ta je npr. za:

¹ Doc. dr. GABRIEL RIHAR
Institut za varilstvo
Pljuška 19, 1000 Ljubljana

- osnovno konstrukcijsko jeklo ($S\ 235$) = $30 \cdot 10^3$ J/kg
- kakovostno konstrukcijsko jeklo ($S\ 355$) = $45 \cdot 10^3$ J/kg
- visokotrdnostno jeklo ($S\ 890\ QL1$) = $128 \cdot 10^3$ J/kg
- $AlMg5$ (poltrdo) = $98 \cdot 10^3$ J/kg
- $AlCu4SiMg$ (izločevalno utrjeno) = $166 \cdot 10^3$ J/kg

Še boljši pokazatelj ekonomske vrednosti materiala za konstrukcije pa je kvocient (K_2) med dopustno napetostjo (σ_{dop}) in gostoto (ρ) ter ceno materiala (C), ki ga lahko izračunamo šele, ko smo določili dopustne napetosti na posameznih elementih konstrukcije.

$$K_2 = \frac{\rho_{dop}}{\rho \cdot C} \text{ (J/kg, SIT)} \quad (2)$$

Napovedovanje razvoja je često nevhvaležno. Težko bi bilo oporekati trditvi, da bo jeklo tudi v bodoče ostalo najpomembnejši material za konstrukcije. Navedemo lahko nekaj najpomembnejših razlogov:

- nizki proizvodni stroški
- z legiranjem, toplotno in mehansko obdelavo dobimo izvrstne lastnosti
- z varjenjem spajamo jekla v trdne zveze.

Jeklu lahko resno konkurira le železobetonski, ki pa je kompozit jekla in mineralnih snovi. Predvsem zaradi nizke cene in širokih možnosti oblikovanja često dajemo pri gradnji stavb in mostov prednost železobetonski.

Zaradi večjih proizvodnih stroškov aluminijeve zlitine ne morejo v večji meri konkurirati jeklu. Uporabljajo se predvsem za konstrukcije, pri katerih sta lastna masa in korozijska odpornost bistvenega pomena.

Titanove zlitine imajo zelo dobre lastnosti. Odlikuje jih nizka gostota, so odporne proti koroziji, s toplotno obdelavo pa jih lahko poboljšamo. Zaradi tega so titan, ki ga je v zemeljski skorji več kot železa, proglasili za kovino bodočnosti. Za pridobivanje potrebujemo veliko energije, zato se titan in zlitine uporabljajo predvsem tam, kjer izdelek prenese visoko ceno. Titanove zlitine se uporabljajo v vojaškem letalstvu in raketni tehniki, za civilno letalstvo pa so predrage.

V zadnjem času veliko govorimo o kompozitih, ki imajo zelo dobre lastnosti, predvsem v smeri ene osi, zato so primerni za izdelavo nosilcev. Širšo uporabo kompozitov zaenkrat ovirata visoka cena in slaba varivost¹.

V zadnjem času prihajajo na trg nova konstrukcijska jekla, ki jih odlikujejo visoka napetost tečenja, dobra žilavost in zadovoljiva varivost. Pri izdelavi teh jekel uporabljamo nekatere znane postopke, razvijajo pa tudi nove. Poznamo celo vrsto novih jekel, ki imajo naslednje skupne značilnosti:

- majhno vsebnost ogljika
 - majhno vsebnost legirnih elementov
 - čim manjša kristalna zrna
 - visoko napetost tečenja.
- Pri proizvodnji uporabljamo:
- hitro ohlajanje (kaljenje, poboljšanje)

- termomehansko obdelavo
- ponovno rafinacijo
- zmanjševanje kristalnega zrna.

Pričakujemo lahko razvoj novih jekel, pri katerih bomo z manjšo vsebnostjo ogljika in legirnih elementov dosegli še boljše lastnosti. S kontrolirano toplo predelavo (termomehansko obdelavo) bomo že v fazi valjanja dosegli ugodno strukturo. Novi postopki rafinacije bodo omogočili izdelavo še čistejših jekel. Uporabljali bomo tudi izločevalno utrjanje².

Varilna stroka bo morala slediti razvoju v jeklarstvu, kajti le tako bodo nova jekla dobila svoje mesto v proizvodnji konstrukcij.

3 Primerjava tehnik spajanja

Konstrukcije so navadno sestavljene iz več elementov, ki jih med seboj neločljivo povezujemo. Za spajanje mineralnih in keramičnih elementov uporabljamo v gradbeništvu malto in cement. Organske in sintetične materiale lepimo, kovinske materiale pa navadno varimo in spajamo. Kovinske konstrukcije izdelujemo praviloma iz toplo in hladno valjanih polizdelkov, ki jih spajamo v celoto z varjenjem, lepljenjem in spajkanjem.

Če primerjamo vse tri načine neločljivega spajanja, ugotovimo, da varjeni spoji po trdnosti prekašajo spajkane in lepljene spoje.

Varjenje ima še nekaj prednosti:

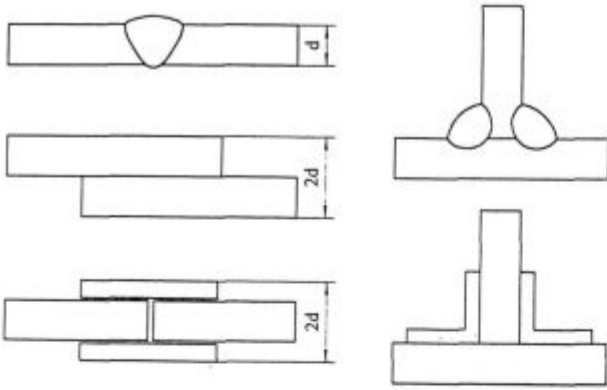
- je produktiven način spajanja
- spoj nastane v nekaj sekundah
- z varjenjem lahko tudi spenjamo
- ne zahteva natančne priprave
- z varjenjem izpolnimo velike praznine
- spoj prenese visoke temperature.

Lepljenje ima glede izvedbe sicer nekatere prednosti pred varjenjem. Za vezavo ne uporabljamo toplotne energije. Že sedaj z lepljenjem izdelujemo lahke konstrukcije iz tanke pločevine, kjer lahko uporabljamo prekrivne spoje, npr. v letalski industriji. Pri izdelavi avtomobilskih karoserij se lepljenje tudi že uveljavlja³.

Zaradi razmeroma majhne trdnosti lepljenega sočelnega spoja uporabljamo prekrivne spoje, ki pa imajo znatno večje dimenzije kot varjeni sočelni spoji (slika 1).

Na vprašanje, ali bomo kdaj iznašli tako dobra lepila, da bodo lahko konkurirala varjenju, danes ni mogoče odgovoriti. Vsekakor pa bi z razvojem močnejših lepil omogočili tudi uporabo novih materialov. Omejeni ne bi bili več s pogojem, da mora biti material dobro variv. Za izdelavo nosilnih konstrukcij bi npr. lahko uporabili jekla za poboljšanje, utrjene aluminijeve zlitine in kompozite.

Že dolgo so poznani različni postopki varjenja kompozitov^{4,5}. V strokovnem tisku je največ poročil o poskusih varjenja $SiC/Al-MMC$ ^{6,7}. Zvarni spoji pa v glavnem ne dosegajo trdnosti osnovnega materiala. Zaradi heterogene strukture kompozitov tudi ni mogoče pričakovati večjih uspehov.



Slika 1: Primerjava sočelnega zvarnega spoja s prekrovnim lepljenim ali spajkanim spojem

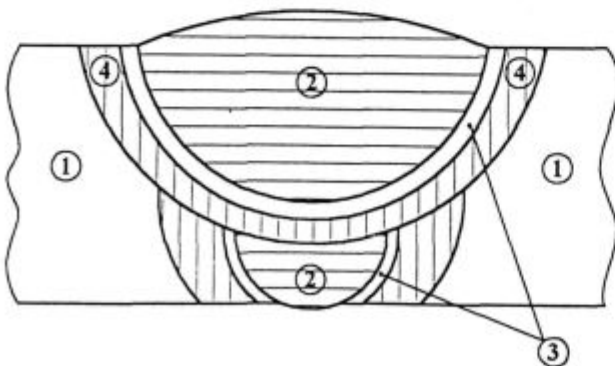
Figure 1: Comparison of a butt welded joint with adhesive-bonded or brazed lap welded joints

Dokler bo jeklo najpomembnejši konstrukcijski material, bo talilno varjenje najpomembnejši postopek spajanja. Uporaba novih visokotrdnostnih materialov bo zato v veliki meri odvisna prav od razvoja varilne stroke. Ta pa ima v primerjavi z razvojem novih kovinskih materialov na voljo manj razvojnih možnosti.

4 Pomen zvarnega spoja

Varjena konstrukcija je heterogena zgradba iz osnovnega materiala in zvarnega spoja. Če primerjamo obe stanji, lahko ugotovimo, da je osnovni material izdelek visoke tehnologije, ki ga lahko na različne načine toplotno in mehansko obdelamo. Na drugi strani pa je zvarni spoj ročni izdelek, katerega kakovost je v veliki meri odvisna od pogojev dela in usposobljenosti osebja.

Na strukturo zvarnega spoja lahko le delno vplivamo. Zaradi hitrih toplotnih sprememb pri varjenju nastanejo v zvaru in toplotno vplivanem področju različne strukture (slika 2); pojavljajo se tudi take, ki močno poslabšujejo



Slika 2: Heterogena struktura zvarnega spoja: 1 - osnovno stanje, 2 - lito stanje, 3 - delno pretaljeno področje, 4 - toplotno obdelano stanje

Figure 2: Heterogeneous structure of welded joint: 1 - basic condition, 2 - as-cast condition, 3 - partially remelted zone, 4 - heat-affected zone

mehanske lastnosti zvarnega spoja, kot npr. grobo zrno, Widmannstättнова struktura, martenzit. Njihovega nastanka pogosto ne moremo preprečiti, lahko le skušamo zmanjšati njegov obseg. Pri vseh načinih talilnega varjenja potekajo v principu procesi na enak način, zato tudi razvoj novih izvirov toplotne energije, od katerih pogosto pričakujemo preveč, ne bo prinesel revolucionarnih novosti.

Poleg tega pa se v zvarnih spojih vedno pojavljajo napake, kot so nekovinski vključki, pore, razpoke in zlepi, ki povečujejo tveganje. S poznanimi neporušnimi preiskovalnimi metodami sicer lahko odkrijemo nekatere napake, marsikatera pa ostane neodkrita.

Z vsemi temi težavami, ki spremljajo varjenje, moramo računati tudi v bodoče. Na drugi strani pa lahko pričakujemo, da bodo na trg prihajali novi kovinski materiali z vse boljšimi mehanskimi lastnostmi. Varilna stroka se bo tako srečala z novimi nerešenimi vprašanji in vse višjimi zahtevami po kakovosti zvarnih spojev⁸.

5 Mehanske lastnosti zvarnega spoja

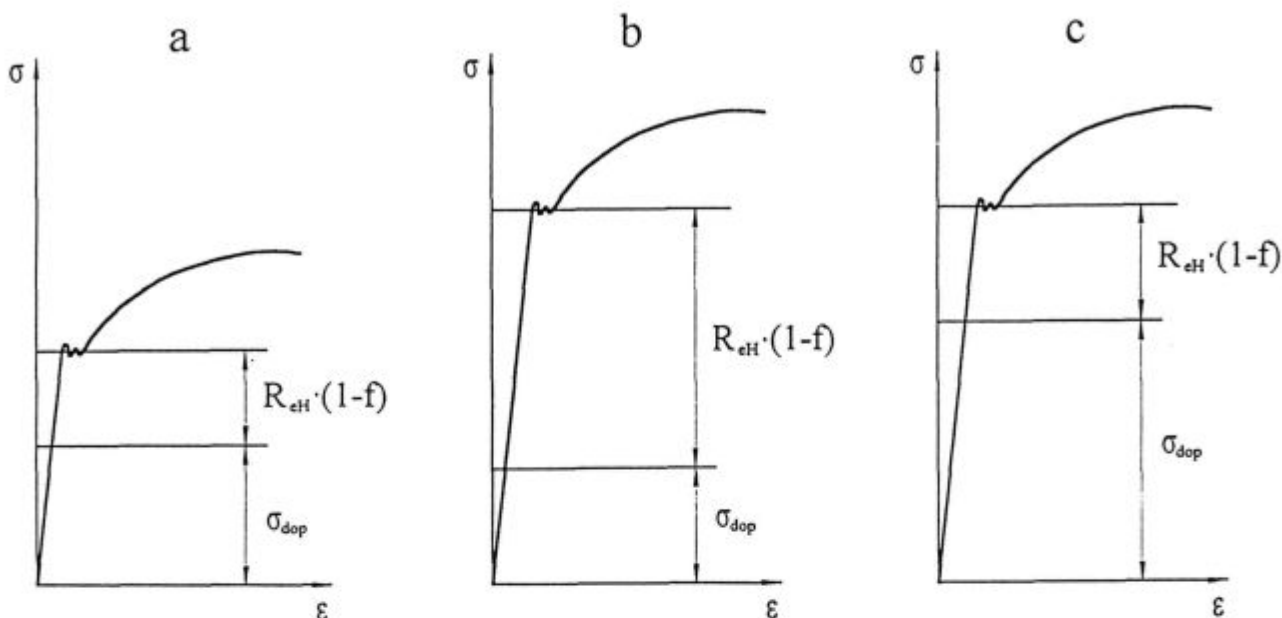
Dopustno obremenitev varjene konstrukcije v veliki meri pogojujejo mehanske lastnosti spojev. Trdnostni izračun nosilnih delov konstrukcij namreč temelji na napetosti tečenja (R_{eH}), ki pomeni zgornjo teoretično mejo, do katere je mogoče obremeniti material. Z varnostnim faktorjem (f) pa nato zmanjšamo obremenitev do dopustne napetosti (σ_{dop}).

Varnostni faktor med drugim upošteva tudi oslabitev konstrukcije zaradi spojev (slika 3). Zato je sposobnost materiala za spajanje v neločljivo zvezo tako pomembna lastnost. Na primer materialov, ki imajo sicer visoko trdnost, pa so slabo varivi, ni mogoče dobro izkoristiti, kajti s slabim spojem izničimo sicer dobre lastnosti osnovnega materiala.

Mehanske lastnosti zvarnega spoja navadno preverjamo z nateznim preizkusom. Če pride do porušitve zunaj zvara, sklepamo, da je le-ta boljši od osnovnega materiala. V mnogih primerih pomeni takšna ugotovitev grobo poenostavljanje.

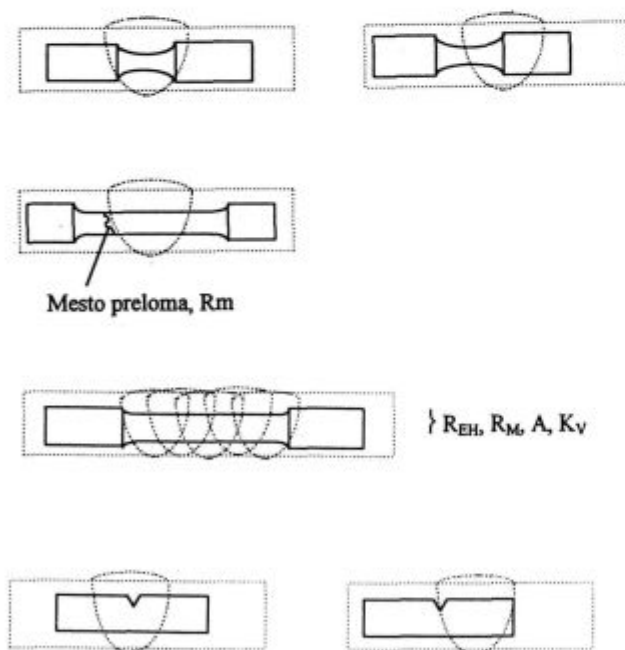
Pogosto je merilo kakovosti zvarnega spoja kar natezna trdnost. Druge mehanske lastnosti zvarnega spoja namreč težko izmerimo. Zvarni spoj je heterogena tvorba, zato je npr. izmerjena vrednost udarne žilavosti močno odvisna od odvzema vzorca. Zaradi kratke merilne dolžine pa ne moremo točno izmeriti napetosti tečenja in raztezka spoja. Pomagamo si z mehanskimi lastnostmi čistega vara, ki jih sicer lahko izmerimo, so pa bolj pokazatelj lastnosti dodatnega materiala kot pa zvarnega spoja⁵.

Mehanske preiskave zvarnih spojev, ki jih danes največ uporabljamo, so bile razvite za preskušanje homogenih materialov. Zvarni spoj pa je sestavljen iz različnih struktur, ki se lahko med seboj močno razlikujejo, zato je izmerjena vrednost često odvisna od odvzema vzorca (slika 4).



Slika 3: Dopustne napetosti za: a - osnovno jeklo, b - poboljšano jeklo, c - mikrolegirano drobnozrnato jeklo

Figure 3: Maximum safety stresses regarding: a - base steel, b - heat-treatment steel, c - micro-alloyed fine-grained steel



Slika 4: Možni načini odvzem vzorcev za mehanske preiskave

Figure 4: Some methods of sampling for mechanical testing

Po klasičnem načinu razmišljanja naj bi pri varjenih konstrukcijah mehanske lastnosti zvarnega spoja dose-gale lastnosti osnovnega materiala. Ta pogoj mora biti izpolnjen le takrat, kadar se zvarni spoji nahajajo v po-dročju maksimalnih nateznih napetosti, npr. vzdolžni

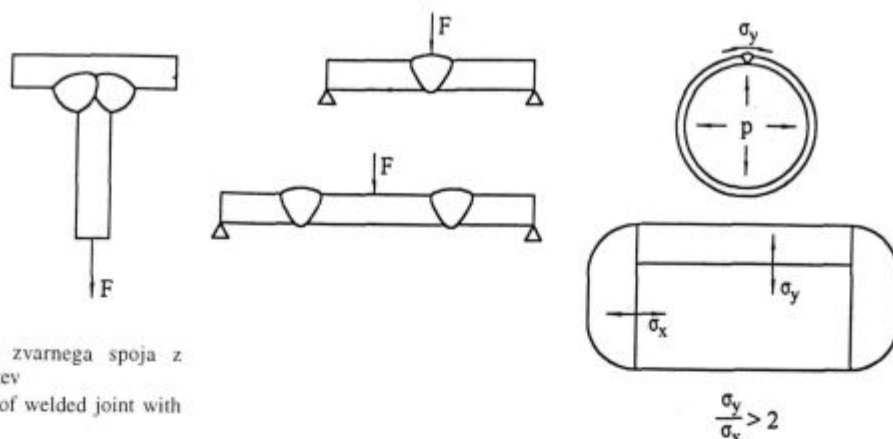
spoji na tlačnih posodah in cevovodih ter sočelni zvari v področju maksimalne natezne obremenitve. V mnogih primerih pa lahko s preišljeno zasnovo konstrukcije zvarne spoje namestimo na manj obremenjena mesta (slika 5). V takih primerih ni potrebno, da imajo zvarni spoji tako visoko trdnost kot osnovni material, morajo pa biti žilavi in brez takih napak, ki bi povzročale zrezne učinke.

Primernejši način preskušanja mehanskih lastnosti zvarov je merjenje lomne žilavosti. Poskusi temeljijo na principih lomne mehanike. Preučujemo predvsem način porušitve spoja. Merimo odpornost materiala proti šir-jenju razpoke, ki v končni fazi pripelje do porušitve. Omenjeni preskusi sicer dajo boljše podatke o zvarnem spoju, žal pa so razmeroma zapleteni.

6 Sklep

Pri razvoju novih konstrukcijskih materialov in teh-nik spajanja bo tudi v bodoče potrebno računati na nekatera dejstva, ki bodo predstavljala meje, v okviru katerih bo potrebno iskati rešitve. Čeprav je napove-dovanje pogosto nevhvaležno, naj omenimo najpomemb-nejše smeri razvoja:

- Tudi v bodoče bo jeklo najpomembnejši material za izdelavo nosilnih konstrukcij. S skrbno toplotno ob-delavo in legiranjem bo mogoče izdelati jekla z vse boljšimi mehanskimi lastnostmi.
- Talilno varjenje bo najpomembnejši postopek spa-janja. Lepljenje in spajkanje se bosta uporabljala v manjšem obsegu.



Slika 5: Lokacija zvarnega spoja z ozirom na obremenitev

Figure 5: Location of welded joint with regard to load

- Pri talilnem varjenju se ne bo nikoli mogoče izogniti lokalnemu segrevanju na visoko temperaturo in hitremu ohlajanju ter litemu stanju, kar bo tudi v bodoče največja ovira pri doseganju dobrih lastnosti spoja.
- Uveljavili se bodo novi izviri toplotne energije, varilne procese pa bodo še v večji meri vodili mikroprocesorji. Vse to pa bo pomenilo za varilno stroko le boljše orodje, s katerim bo mogoče dosegati večjo natančnost.
- Cilj raziskav naj bi bil najti take konstrukcijske materiale, ki bi imeli čim boljše lastnosti že v litem stanju. Biti pa bi morali čim manj občutljivi za lokalno pregrevanje.
- Dobre mehanske lastnosti bo torej potrebno doseči predvsem z legiranjem in zmanjševanjem nečistoč ter oligoelementov, manj pa z zapletenimi načini toplotne obdelave in hladno deformacijo.
- Uporaba kompozitov in toplotno obdelanih materialov bi omogočila šele iznajdba močnejših lepil, na kar pa v bližnji bodočnosti še ne moremo računati.

7 Literatura

- ¹ W. Tillmann, E. Lugscheider: Möglichkeiten des stoffschlüssigen Fügens metallischer Verbundwerkstoffe - eine Übersicht. *Schweißen und Schneiden*, 46, 1994, 11, 543-549
- ² T. Varga: Safety of Welded Modern High Strength Steel Constructions in particular Bridges. (1996 Houdremont Lecture). *Offprint from the Proceedings of the International Conference on Welded Structures in particular Welded Bridges*, Budapest 1996
- ³ M. Wörner: Neuerungen und Entwicklungen bei der schweisstechnischen Instandsetzung von PKW-Karosserien. (*DVS Berichte Band 162*). DVS Verlag GmbH, Düsseldorf 1994, 224 - 228
- ⁴ M. S. Hersh: Resistance Welding of Metal Matrix Composite. *Welding Journal*, 47, 1968, 9, 404s-409s
- ⁵ J. R. Kennedy: Microstructural Observations of Arc Welded Boron-Aluminium Composites. *Welding Journal*, 52, 1973, 3, 120-124
- ⁶ J. S. Ahearn, C. Cooke, S. G. Fishman: Fusion Welding of SiC-Reinforced Al Composite. *Metal Construction*, 14, 1982, 4, 192-197
- ⁷ J. D. Devletian: SiC/AL Metal Matrix Composite Welding by a Capacitor Discharge Process. *Welding Journal*, 66, 1987, 6, 33-39
- ⁸ Neues in der Schweisstechnik 1994. *Schweißen und Schneiden*, 47, 1995, 5, 366-433