

SPAJANJE LIMOVA I PROFILA OD AL-LEGURA PRI REKONSTRUKCIJI ŽELJEZNIČKIH VAGONA

AL-ALLOYS PLATES AND PROFILES JOINING AT RECONSTRUCTION OF RAILWAY WAGONS

Samardžić, I., Strojarski fakultet u Slav. Brodu, Trg I.B. Mažuranić 18, Slav. Brod
(HR), tel.(+385) (0) 35 / 446-188, fax. (+385) (0) 35 / 446-446

Kovač, F., Brzica Ruža, Tvornica tračničkih vozila, d.o.o., Holding Đuro Đaković d.d.,
(HR) Dr. M. Budaka 1, Slav. Brod,
tel. (+385) (0) 35 / 445 - 926, fax. (+385) (0) 35 / 447 - 454

Ključne riječi: Al-Mg-Si legure, zavarivanje, lijepljenje, željeznički vagoni
Key words: Al-Mg-Si alloys, welding, adhesive bonding, railway wagons

Sažetak:

U radu se obrazlaže pristup spajanju limova i profila od Al-Mg-Si legure pri rekonstrukciji željezničkih vagona. Budući da se radi o spajanju limova i profila velikih gabaritnih dimenzija (6000×1915 mm i 6000×1335 mm) i mali debljina stijenke (od 1.6 do 3 mm), a imajući u vidu zahtjeve za kvalitetu zavarenog proizvoda, ovome problemu potrebno je posvetiti posebnu pozornost. Spajanje limova i profila izvedeno je tehnikom "zavarivanja u provrtu", uz korištenje suvremene opreme za zavarivanje MIG postupkom. Kao druga moguća tehnologija spajanja limova i profila na vratima željezničkih vagona navodi se spajanje lijepljenjem, a jedna od otežavajućih okolnosti je to što spajanje lijepljenjem nije dovoljno obuhvaćeno važećim propisima i standardima za područje strojarstva i gradnje komponenata željezničkih vozila.

Summary:

The paper describes approach to Al-Mg-Si alloys plates and profiles joining, during the railway wagons reconstruction. Due to big dimensions (6000×1915 mm and 6000×1335 mm) and small thickness plates and profiles (1.6 to 3 mm) joining and high quality requirements, it is necessary to take attention to problem of Al-alloys connection. Joining of plates and profiles was provided by "welding in the hole" technique, using modern MIG welding equipment. As a second another possible technology for joining them plates and profiles for railway wagons doors, the adhesive bonding was mentioned. Adhesive bonding was not enough regulated by codes and standards for mechanical engineering and railway vehicles components building, and that is one of difficult circumstances for the application.

1. Uvod

U nastojanju da se postignu različite uštede i pogodnosti ostvarene kroz smanjenje težine strojarskih konstrukcija, uočava se nastojanje gradnje lakih konstrukcija ili dijelova konstrukcija od lakih materijala. Tako se danas na strojarskim konstrukcijama upotrebljavaju aluminijski profili i limovi gdje god je to ekonomski i tehnološki opravdano. Problem spajanja Al-legura najčešće se rješava zavarivanjem, jer to omogućava suvremena i kvalitetna oprema za zavarivanje koja je raspoloživa na tržištu. Kao primjer opravdanosti primjene Al-legura obrazlaže se primjena Al-Mg-Si legura pri obnovi i rekonstrukciji željezničkih vagona, konkretno primjena tankih limova i profila za izradu vrata željezničkih vagona. Spajanje limova i profila izvodi se MIG postupkom, tehnikom zavarivanja u provrtu. Kod ove tehnike lim se zavaruje na profil kroz provrte promjera 7, 8 i 10 mm koji se buši na limu ili na profilu, ovisno o tome koja je unutrašnja, a koja vanjska strana oplata, odnosno vrata. Iako dobiveni zavareni spoj nema otežane uvjete rada u eksploataciji, važno je na neke specifičnosti kratkih zavora, moguće probleme i rješenja problema kod primjene spomenute tehnike zavarivanja na Al-legurama.

2. Kratki opis nove konstrukcije vagona za suvremeni prijevoz roba

Nova konstrukcija suvremenog vagona Hbills (slika 1) nastala je rekonstrukcijom starog tipa vagona željezničke oznake Gbs [1]. Kod novog je vagona korišten obnovljeni vozeći stroj i donje postolje starog vagona Gbs, koje udovoljava svim propisima UIC. Sanduk vagona se sastoji od dva čela, okvira i uskog krova koji učvršćuje konstrukciju, a izrađen je od čeličnog lima i profila. Jedna od specifičnosti novog vagona su dvodjelna aluminijska bočna vrata koja kližu jedna preko drugih i mogu se otvarati i zatvarati pomoću sustava polužja na čelima vagona. Takva konstrukcija krova i vrata daju veliki otvor i pružaju mogućnost za lak utovar i istovar paletiziranih tereta. Danas je u svijetu uobičajena primjena Al-legura na svim željezničkim vozilima, pa čak i na lokomotivama, a ovo je prvi opsežniji primjer primjene Al-legura za potrebe Hrvatskih željeznica.



Slika 1. Novi Hbills vagon sa lakom konstrukcijom vrata od Al-legura.

U konstrukciji vrata željezničkog vagona Hbills pojavljuju se dvije vrste Al--Mg-Si legura koje su u grupi 23, sukladno UIC normama. Materijal profila je AlMgSi 0.7 - F26, a materija lima je AlMgSi 1- F28. Vrata od Al-legura su sastavljena i zavarena iz različitih profila debljina 2-3 mm i limova debljine 1.6 mm. Gabaritne dimenzije jednog dijela dvodjelnih vrata su 6440×2998 mm (vrata su na vagonu dvodjelna i sa obje su strane vagona).

3. Općenito o zavarljivosti legura Al-Mg-Si

Opće je poznato da zavarljivost Al-legura otežavaju različiti čimbenici, a među najznačajnijima su:

1. postojanje prirodne oksidne kože Al_2O_3 (na hladnom materijalu debljine oko 0.01μ) koja ima visoku temperaturu taljenja ($2050^\circ C$), dok je talište čistog aluminija $660^\circ C$,
2. velika toplinska vodljivost (za zavarivanje potrebni snažni koncentrirani tokovi energije, ako se zavaruje nedovoljno koncentriranim tokovima energije nastaje široka ZUT sa omekšanom strukturom),
3. veliki koeficijent toplinskog istezanja (uzrokuje veća stezanja i deformacije pri hlađenju, pa je moguća pojava pukotina uslijed jakog stezanja),
4. velika rastvorljivost ugljika u rastaljenom metalu (moguća poroznost),
5. sklonost vrućim i hladnim pukotinama, ovisno o kemijskom sastavu i uvjetima zavarivanja, te
6. omekšanje na mjestu zavarenog spoja.

Al-Mg-Si legure imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva i dobra antikorozivna svojstva. Relativno niska čvrstoća leguras ovog tipa postiže se toplinskom obradom, koja ima puni efekt kada su dodatni elementi magnezij i silicij u točno određenom omjeru. Magnezijev silicid Mg_2Si koji se stvara u temperaturnom intervalu kristalizacije uvjetuje najvažnija svojstva voih legura. Ako ga je premalo, ne postiže se efekt toplinske obrade. Ako ga je previše, taloži se na granicama zrna i uzrokuje jake unutrašnje napetosti, te izaziva krhkost materijala [2,3]. Baš zbog zadnje spomenutog, ove legure su osjetljive na tople pukotine.

Al-Mg-Si legure spadaju u grupu kaljivih legura (prema standardu SAD legure serije 6000) i mogu se podijeliti u dvije skupine:

- a) legure bogatije sa sadržajem silicija i magnezija, koje uz dodatak mangana, kroma i cirkonija imaju bolja mehanička svojstva, a upotrebljavaju se za nosive elemente.
- b) legure siromašnije u sadržaju silicija i magnazija, što im omogućuje velike brzine prešanja i odličnu oblikovljivost uz nešto lošija mehanička svojstva. Ova skupina ima široku primjenu kao npr. za dekoracije, prozore, vrata, jarbole, karoserije, vagonске i profile za metro i dr.

Uz strogo poštivanje mjera osiguranja kvalitete koje smanjuju utjecaje prethodno spomenutih otežavajućih čimbenika, kod zavarivanja Al-Mg-Si legura, unatoč svemu može se reći da je zavarljivost ovih legura dobra.

Za zavarivanje Al-Mg-Si legura mogu se uspješno koristiti dodatni materijali Al-Si 5, Al-Si 10 i Al-Mg 5. Kada se koristi žica Al-Si 5 manja je vjerojatnost nastanka pukotina, dok su mehanička svojstva i korozijska otpornost nešto niže u odnosu na zavareni spoj kada se koristi žica Al-Mg 5.

Al-Mg 5 žica se koristi kada se zahtijeva nešto viša čvrstoća zavarenog spoja [3]. Inače, rad sa obje vrste žica je bez razlike lagan.

4.0. Spajanje limova i profila od Al-Mg-Si legura zavarivanjem u provrtu

Spajanje tankostijenih limova od Al-Mg-Si 1 legure i profila od Al-Mg-Si 0.7 legure zavarivanjem u provrtima promjera 7, 8, i 10 mm izvedeno je MIG postupkom, uz korištenje impulsnih struja. Budući da zavareni spoj nije izložen posebnim naprezanjima i korozijskim utjecajima, kao dodatni materijal odabrana je žica Al-Si 5, promjera 1.2 mm. Ovaj dodatni materijal ima uži interval skrućivanja, pa je s time i manja opasnost od pukotina. U tablici 1 dani su podaci za sadržaj kemijskih elemenata za materijal profila i materijal lima, te dodatni materijal, dok su u tablici 2 dani podaci za mehaničke karakteristike materijala lima i materijala profila.

Tablica 1. Sadržaj kemijskih elemenata materijala profila, lima [8] i dodatnog materijala [9]

Kemijski element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
Profil od Al-Mg-Si 0.7	0,69	0,23	0,17	0,24	0,52	0,16	0,006	0,08	0,046
Lim od Al-Mg-Si 1	0,98	0,32	0,042	0,63	0,73	0,013	0,004	0,008	0,013
MIG žica od Al-Si 5	4,5 do 5,5	0,4	0,05	max. 0,2	max. 0,1	-	-	0,2	max. 0,15

Tablica 2. Mehanička svojstva materijala lima i materijala profila [8].

Kemijski element	R _{p 0,2}	R _m	A ₅	HB
Profil od Al-Mg-Si 0.7	265	298	11,6	108
Lim od Al-Mg-Si 1	227	288	15,9	86

MIG zavarivanjem uz korištenje impulsnih struja postignuta je dovoljno visoka koncentriranost energije za zavarivanje i manje zagrijavanje osnovnog materijala, pa je i slabljenje u zavarenom spoju manje jer je uže područje zagrijavano uslijed zavarivanja. Taj se efekt povećava ako se pri zavarivanju koriste veće brzine zavarivanja, jer je razvijena toplina manja i kraće vrijeme zagrijava materijal u području oko zavarenog spoja [3].

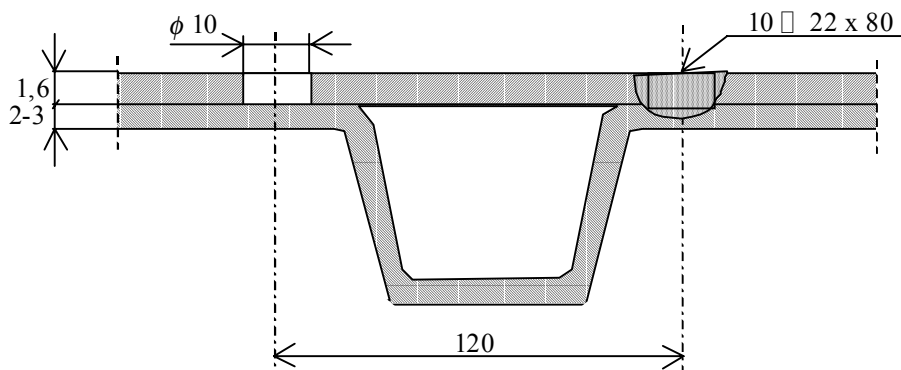
Al-Mg-Si legure uspješno su se zavarivale još 60-tih godina plinskim postupkom i ručnim elektrolučnim postupkom zavarivanja. Danas, kada se raspolaze suvremenom opremom za zavarivanje, Al-legure kao konstrukcijski materijal i dalje su zanimljive, kako zbog mogućnosti spajanja limova i profila manjih debljina, tako i zbog mogućnosti postizanja visoke kvalitete zavarenih spojeva.

Zavarivanje u provrtu kao tehnika spajanja u praksi se rijetko primjenjuje, a kada se primjenjuje, to je uglavnom kod dobro zavarljivih čeličnih limova i profila velikih gabaritnih dimenzija. Sličan je princip korišten i kod spajanja limova i profila od Al-Mg-Si legura pri izradi vrata željezničkog vagona. Lim i profil zavaruju se kroz provrte 7, 8 i 10 mm, međusobno razmaknuta 80 mm (kod ravnog dijela vrata na duljini 1915 mm, a kod kosog dijela vrata na duljini 1335 mm). Ovisno o tome da li je lim ili profil sa vanjske strane vagona (zavari u provrtu ne vide se sa vanjske strane vagona), zavarivanje se izvodi u provrtu napravljenom u limu (u većini slučajeva) ili u profilu. Pri izradi vrata od Al-legura za jedan vagon izvedeno je 1872 zavarivanja u provrtu. Zavarivanje u provrtu se izvodi u krug, započne se po obodu provrta i kreće se po obodu prema centru provrta. Ukupno trajanje gorenja električnog luka pri jednom zavarivanju je približno 2 sekunde.

Slika 2 prikazuje detalj iz proizvodnje pri izradi vrata željezničkog vagona zavarivanjem profila i limova od Al-Mg-Si legura, dok je na slici 3 prikazana karakteristična priprema za zavarivanje u provrtu.



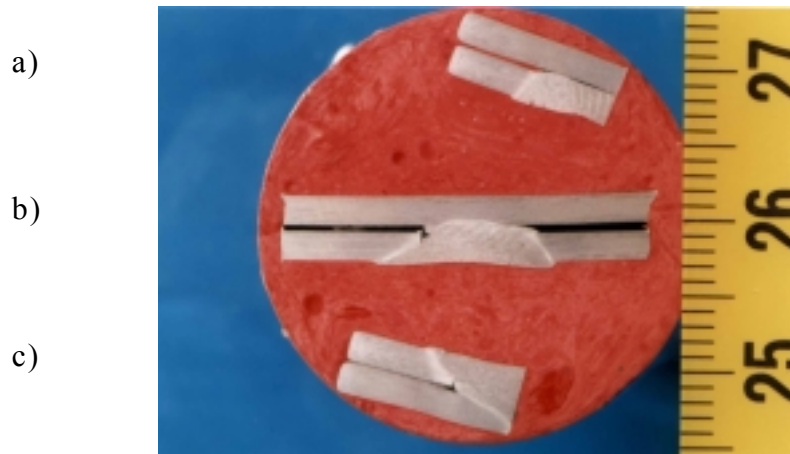
Slika 2. Detalj spajanja limova i profila od Al-legura zavarivanjem u provrtu.



Slika 3. Priprema za spajanje limova i profila od Al-legura zavarivanjem u provrtu

Obzirom da se radi o leguri niskog tališta i male debljine stijenke, te da se zavarivanje izvodi poluautomatskim MIG postupkom zavarivanja, potrebno je znanja i vještine kako bi se postigla i održala kvaliteta zavarenog spoja u provrtima. Jasnija slika o kvaliteti zvara u provrtu dobije se poprečnim presijecanjem zvara, ispitivanjima i analizom kvalitete zvara. Jedna je krajnost da je zbog nepravilne tehnike zavarivanja i/ili, prevelikog unosa topline došlo do pretjeranog protaljivanja materijala sa donje strane lima, a druga da je zbog nepravilne tehnike zavarivanja i/ili, nedovoljnog unosa topline došlo do nepotpunog provarivanja i nalijepljivanja (slika 4c). Na slici 4 prikazana su 3 makro izbruska presjeka zvara u provrtu sa nekim karakterističnim greškama. Kod zavarivanja u provrtu potrebno je ostvariti što bolje nalijezanje limova i profila, kako se ne bi pojavio preveliki zazor između lima i profila (slika 4b). Također je potrebno

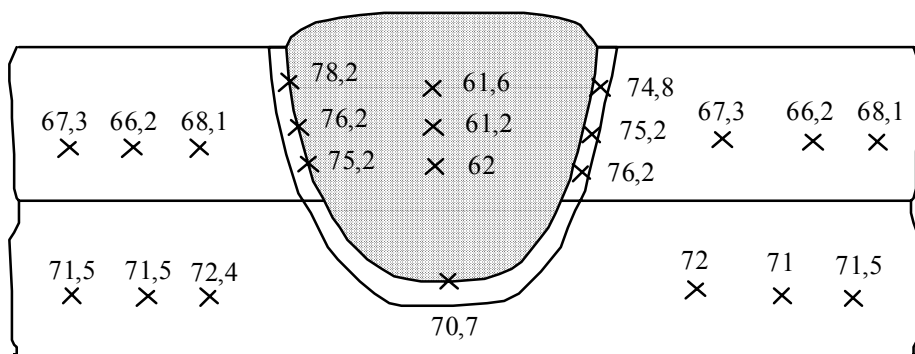
ostvariti pravilno provarivanje u provrtu kako bi se izbjegle greške vidljive na slici 4a i 4b. Razmak između dvije crtice na skali ispod slike 4 je 1 mm.



- a) nepotpuno bočno provarivanje u provrtu
- b) prevelik zazor između lima i profila, te nepravilno i nepotpuno bočno provarivanje u provrtu
- c) zadovoljavajuće bočno provarivanje, ali nema provara u donjem limu (nalijepljivanje zavora)

Slika 4. Makro izbrusci presjeka zavora u provrtima sa nekim karakterističnim greškama

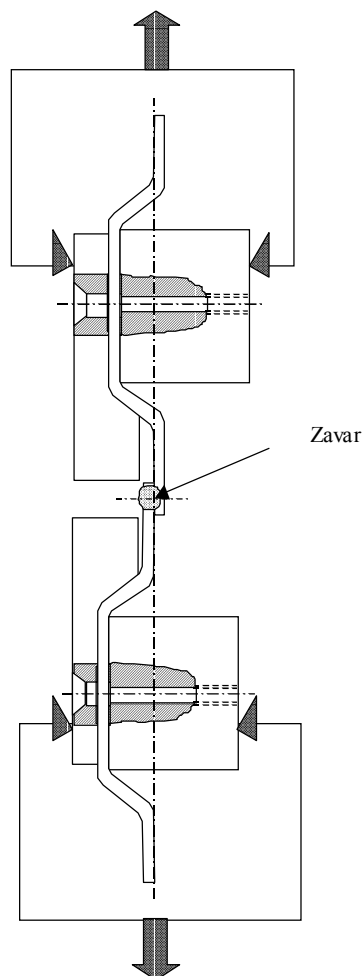
Zbog izrazite ne stacionarnosti temperaturnog polja pri zavarivanju u malim provrtima velike su brzine hlađenja, pa kod ovih legura može doći do samozakaljenja, ali je i veća opasnost od nastanka poroznosti ukoliko nisu ispoštovani zahtjevi za osiguranje kvalitete. Na slici 5 se daje pregled tvrdoće HV1 (opterećenje 9.81 N) na presjeku zavarenog spoja u provrtu 10 mm. Zavarivanje je izvedeno uz parametre zavarivanja pohranjene u programu br. 19 koji je isporučen uz uređaj za impulsno MIG zavarivanje. Uz te parametre izvodi se zavarivanje u provrtima u pogonu.



Slika 5. Rezultati tvrdoće HV1 (9.81N) kod zavarenog spoja u provrtu

4.1. Smično kidanje zavarenih spojeva u provrtu

Za ocjenu kvalitete zavarenih spojeva u provrtima 7, 8 i 10 mm izvedeno je zavarivanje po pet zavora za svaki promjer provrta, uz parametre iz tekućeg proizvodnog procesa, te naknadno kidanje na kidalici. Pri ispitivanju su korišteni ostaci materijala (profil debljine stijenke na mjestu spoja 2 mm). Nakon zavarivanja uzorci se stavljaju u pomoćno izrađenu napravu (slika 5) koja pruža mogućnost smičnog opterećanja zavarenog spoja u provrtu. Ista naprava koristi se za opterećivanje lijepljenih spojeva.

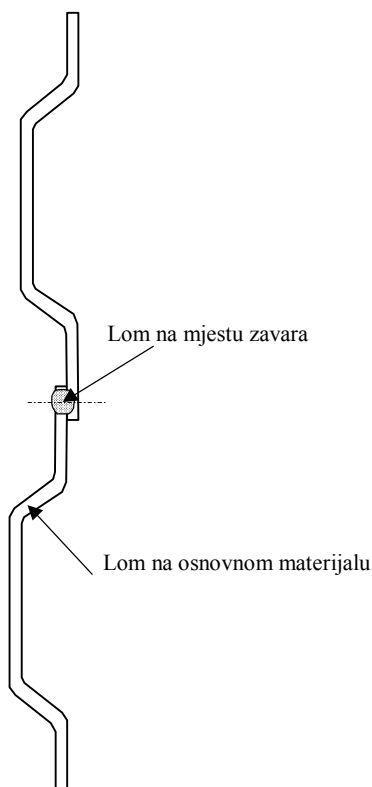


Slika 6. Shematski prikaz smičnog opterećivanja zavarenih uzoraka

Nakon vlačnog ispitivanja dobiveni su podaci prikazani u tablici 3.

Promjer provrta, mm	Prekidna sila, N	Napomena
7 mm	2020 1880 1640 aritmetička sred.=1806 1740 1750	Kod svih uzoraka lom na mjestu zavora (slika 7).
8 mm	1960 2220 2310 aritmetička sred.=2200 2220 2290	Lom na os. mat. (slika 7). Lom na os. mat. (slika 7). Lom na mjestu zav. (slika 7). Lom na mjestu zav. (slika 7). Lom na mjestu zav. (slika 7).
10 mm	3000 2160 2280 aritmetička sred.=2356 2070 2270	Kod svih uzoraka lom na osnovnom materijalu (slika 7).

Provedene probe kidanja su pokazale da su najčvršći zavareni spojevi kod zavora u provrtima 10 mm jer je do loma došlo na osnovnom materijalu, a sam bi zavar mogao podnijeti još viša naprezanja (da je širina aluminijskog profila bila dovoljno velika). Najniže vrijednosti prekide sile (srednja vrijednost 1806 N) dobivene su u provrtima 7 mm, a zavareni spoj je bio mjesto u svim provedenim pokusima. Kod zavora u provrtima 8 mm u dva je slučaja do loma došlo na osnovnom materijalu uzorka, a u preostala tri na mjestu zavarenog spoja.



Slika 7. Lokacije loma kod ispitivanih uzoraka

4.1. Nekoliko praktičnih napomena vezano uz zavarivanje u provrtu

Nakon uspješnog provedenog procesa obnove i rekonstrukcije 60 željezničkih vagona i uspješne primjene Al-Mg-Si legura, uočeni su neki detalji na koje treba paziti kod naredne proizvodnje (započete aktivnosti na obnovi i rekonstrukciji narednih 30 vagona), budući da mogu prouzročiti greške i odstupanja u kvaliteti na zavarenom proizvodu.

Prije svega potrebno je:

- ostvariti kvalitetan stezni spoj između profila i limova (bez zazora), za što su potrebne kvalitetne stezne naprave s umecima od tvrde gume za kontakt s površinom Al-legure, a koje su inače uspješno korištene u dosadašnjoj proizvodnji,
- kvalitetno otkloniti Al-oksidi s naliježućih površina lima neposredno prije pripajanja i zavarivanja (imati na umu da je vrijeme ponovnog formiranja oksidnog sloja kratko),
- dobro zaštititi radni prostor od strujanja zraka i propuha,
- obratiti pozornost na često prisutan problem kvalitete zaštitnog plina, bez obzira što se traži potrebna čistoća argona,
- ugrađivati ravne profile od Al-legura u naprave za sastav, da ne dođe do deformacija na oplati, te
- periodično provjeravati kvalitetu zavariva pomoću radioničkih proba

5. Lijepljenje kao alternativa za zavarivanje u provrtu

Spajanje materijala lijepljenjem danas se uspješno primjenjuje na različitim strojarskim konstrukcijama i proizvodima. Iako lijepljenje nema dugu tradiciju primjene u praksi kao npr. zavarivanje i lemljenje, ova metoda spajanja doživjela je jaki razvoj zahvaljujući u prvom redu zahtjevima primjene u zrakoplovnoj industriji, ali isto tako i zahtjevima primjene na drugim strojarskim proizvodima. Sa stajališta tehnološkiosti može se nekada pokazati da je spajanje lijepljenjem tehnološkiosti riješenje, uz uvjet da su ispunjene nužne pretpostavke za spajanje materijala lijepljenjem. No, nekada s obzirom na uvjete eksploatacije proizvoda ili neke druge uvjete, spajanje lijepljenjem ne dolazi u obzir.

Ako se razmatra mogućnost lijepljenje limova i profila od Al-legura pri izradi vrata željezničkog vagona može se konstatirati da lijepljenje kao tehnologija spajanja zaslužiuje ozbiljan pristup kada se traži tehnološkiosti riješenje. Obzirom na zahtjeve u eksploataciji, potrebne investicije u opremu i naprave za zavarivanje, potrebne kvalifikacije zavarivača i postupka zavarivanja, procijenjuje se da se ukupni troškovi izrade vrata željezničkog vagona mogu smanjiti ako se primjenjuje spajanje lijepljenjem tamo gdje je to moguće, a u ostalim slučajevima spajanje zavarivanjem. U tom su smjeru poduzete određene aktivnosti, pa su tako predviđena istraživanja koja će pokazati mogućnosti primjene spajanja limova i profila na vratima i oplati željezničkog vagona lijepljenjem. Ispitivanja će obuhvatiti vlačno kidanje nestarenih i umjetno starenih lijepljenih uzoraka u istoj napravi u kojoj su kidani i zavareni uzorci. Do sada su pomoću Visorite 3950 lijepila s primjenom za metale (proizvodi firme Loctite) zalijepljeni uzorci koji su spremni za ispitivanje, ali će se rezultati tih i ostalih ispitivanja koja će se provoditi objaviti tek kada se kompletiraju svi rezultati ispitivanja.

6.0. Zaključci

Pri obnovi željezničkih vagona uspješno se primjenjuju Al-legure, a stečena su i značajna praktična iskustva koja se mogu uspješno primijeniti i na druge komponente i proizvode, kako bi se ostvarile uštede i pogodnosti koje proizilaze iz primjene lakih metala. U ovom slučaju uštede proizilaze iz smanjenja težine pokretne konstrukcije

(željezničkog vagona) i uštede u energiji potrebne za transport (ukupna težina dvojnih dvodjelnih vrata od Al-legura na željezničkom vagonu iznosi približno 980 kg, a identična konstrukcija od čeličnih limova i profila bila bi približno 2,9 puta teža). Kada se u analizu uzme kompozicija vagona, onda se dobivaju prave uštede. Uštede proizilaze i kroz smanjenje troškova održavanja, te produženje vijeka trajanja konstrukcije.

Pokazalo se da je za postizanje kvalitetnih zavarenih spojeva potreban kako kvalitetan zavarivački kadar, tako i kvalitetna i suvremena oprema. Bez obzira na specifičnosti kod zavarivanja Al-legura, uz strogo poštivanje propisane tehnologije zavarivanja i kontrole može se postići visoka kvaliteta zavarenih spojeva. Kvaliteta zavara provjeravala se radioničkim probama i metalografskim ispitivanjima. Obzirom na broj i kvalitetu izvedenih zavara u provrtu, nosivu površinu pojedinog zavara u provrtu, a na osnovu provedenih radioničkih ispitivanja, proizvođač garantirada postignuta kvaliteta zavarenih spojeva zadovoljava uvijete i predviđeni vijek eksploatacije zavarenog proizvoda.

Kao alternativna tehnika spajanja navodi se spajanje lijepljenjem. Autori su u suradnji sa stručnjacima iz područja spajanja lijepljenjem započeli eksperimentalna istraživanja koja će dati određene pokazatelje u pogledu tehnoločnosti i kvalitete lijepljenih spojeva, u odnosu na zavarivanje u provrtima.

7.0. Literatura

1. KAURIĆ, A.: Novi teretni vagoni za Hrvatske željeznice. "DD"-Vjesnik, br. 1/1997.
2. RICHTER, Ž.: Zavarivanje aluminija i njegovih legura. Zavarivanje 7/1962. (176-183)
3. RICHTER, Ž.: Reparaturno zavarivanje Al-Mg-Si legura s posebnim osvrtom na titrajnu čvrstoću vara. Bilten br.6, DZTZ Zagreb, 1959.(131-136)
4. RICHTER, Ž.: Lokalna i operativna zavarljivost Aluminijskih legura. Bilten br.3, DZTZ Zagreb, 1959 (50-54)
5. ANDRIĆ, Š.: Točkasto MIG zavarivanje aluminijskih legura. Zavarivanje 27(1984)5, 417-426
6. ANDRIĆ, Š.: Utjecaj pojedinih činilaca na poroznost zavarenih spojeva aluminijskih legura. Zavarivanje 24(1981)5, 267-274
7. BAN, Ž.: Zavarljivost aluminija i aluminijskih legura. Zavarivanje 23 (1980)4, 201-209
8. Certifikati (No. 130124 i 130095) izdani od tvornice Alusuisse, a u arhivi tvornice Tračničkih vozila d.o.o. - Đuro Đaković
9. DIN 1732 Teil 1, Tachenbuch 8/1990, Seite 2, Tabelle 1.
10. RICHTER, Ž.: Lijepljenje aluminija. Bilten br. 4, DZTZ Zagreb, 1959. (79-82)
11. KORDIĆ, Z.: Neki aspekti primjene točkastog zavarivanja i lijepljenja umjesto klasičnog načina spajanja zakovicama u zrakoplovstvu. Zavarivanje 23(1980)3, 141-146.

Zahvala. Autori zahvaljuju svim djelatnicima tvornice Đuro Đaković-Tračnička vozila koji su na bilo koji način sudjelovali u projektu obnove i rekonstrukcije željezničkih vagona, te pomoći kod provedbe dijela istraživanja na području spajanja limova i profila od Al-legura.