



Aleksija Đurić ^{1,a}, Dragan Milčić ², Damjan Klobčar ³, Biljana Marković ¹, Miodrag Milčić ²

TEHNOLOGIJE SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA I LEGURA ALUMINIJA – PREGLED STANJA

JOINING TECHNOLOGY OF STEEL AND ALLUMINUM ALLOY SHEETS – STATE OF THE ART

Pregledni rad / Review

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Maj 2023.

Ključne reči: tehnologije spajanja, raznorodni materijali, čelik i legure aluminijuma

Rezime

Multi-materijal dizajn je razvijen kao savremeni koncept dizajna za lake konstrukcije (Lightweight design -LW) koji ima za cilj integrisanje različitih vrsta materijala u jednu strukturu. Osnovni problem pri spajanju limova od raznorodnih materijala, prvenstveno čelika i legura aluminijuma, su različita mehanička, fizička i hemijska svojstva materijala koji se spajaju. Kroz ovaj rad biće analizirano stanje tehnike kada su u pitanju savremene tehnologije spajanja limova od čelika i legura aluminijuma. Pod pojmom savremene tehnike spajanja misli se na sve inovativne tehnologije spajanje koje su razvijene ili su značajniju primjenu doživjele u posljednjih nekoliko godina.

Adresa autora / Author's address:

¹ Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Vuka Karadžića 30, 71123 Istočno Sarajevo, RS, Bosna i Hercegovina

² Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija

³ Mašunski fakultet u Ljubljani, Univerzitet u Ljubljani, Aškerčeva cesta 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

email: ^a aleksija.djuric@ues.rs.ba

Keywords: joining technologies, dissimilar materials, steel and aluminum alloys

Abstract

Multi-material design was developed as a modern design concept for lightweight structures (Lightweight design - LW) which aims to integrate different types of materials into one structure. The main problem when joining sheets made of different, i.e. dissimilar materials, primarily steel and aluminum alloys, are the different mechanical, physical and chemical properties of the materials being joined. Through this paper, the state of the art will be analyzed when it comes to modern technologies for joining steel and aluminum alloys sheets. The term "modern joining technique" refers to all innovative joining technologies that have been developed or have seen significant application in the last few years.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku radova sa 32. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2022“ održanog na Tari, Srbija od 12. do 15. oktobra 2022. godine



1. Uvod

Dizajn za lake konstrukcije (*eng. Lightweight desing* - LW) nastaje kao rezultat potrebe za održivim dizajnom i razvojem proizvoda, te radi potrebe za pogodnim izborom materijala. Pravilnim izborom materijala može se smanjiti masa kako pojedinih elemenata, tako i ukupne konstrukcije, što direktno utiče na smanjenje energije i resursa, te očuvanje životne sredine [1-3]. Dizajn za lake konstrukcije pronalazi svoju primjenu u raznim oblastima, mada je njegova primjena najzastupljenija u automobilskoj i avionskoj industriji. Kada je riječ o primjeni LW dizajna u automobilskoj industriji onda se kao glavni motiv navodi ispunjenje zahtjeva kupaca u pogledu lakšeg rukovanja, smanjivanje potrošnje goriva i povećavanja pokretačke snage. Opšti cilj ovog pristupa jeste smanjenje ukupne težine vozila, kroz smanjivanje mase pojedinih komponenti.

Multimaterijal dizajn je razvijen kao savremeni koncept dizajna za lake konstrukcije (LW dizajn) koji ima za cilj integrisanje različitih vrsta materijala u jednu strukturu [4]. Na primjer, težina karoserije automobila može biti smanjena upotrebom različitih vrsta materijala. Različiti tipovi lakih karoserija razvijeni su primjenom čelika, aluminijuma i kompozitnih materijala. Istraživanja pokazuju da se masa automobila može smanjiti i za 50% ukoliko se legure aluminijuma primjenjuju u karoseriji automobila [5]. S druge strane, jedan od najvećih nedostataka značajnije primjene aluminijuma je visoka cijena. Kada je riječ o primjeni čelika, onda treba napomenuti da se tu prvenstveno misli na čelik 2. i 3. generacije kao što su ugljenični čelici za obradu u toplom stanju, austenitni ugljenik-mangan čelik, AHSS (*eng. Advanced High-Strength Steel*) čelici, itd. Zamjena konvencionalnih ugljeničkih čelika AHSS čelicima rezultovala je smanjenjem mase automobila za 15–20% [6]. Preduslov za postizanje multimaterijal strukture je primjena efikasnih i jeftinih tehnologija spajanja raznorodnih materijala. Osnovni problem pri spajanju limova od raznorodnih materijala su različita mehanička, fizička i hemijska svojstva materijala koji se spajaju, pa vrlo često konvencionalne tehnologije zavarivanja nisu pogodne za spajanje.

Kroz ovaj rad biće najprije analizirano stanje tehnike kada su u pitanju savremene tehnologije spajanja limova od čelika i legura aluminijuma. Pod pojmom savremene tehnike spajanja misli se na sve inovativne tehnologije spajanje koje su razvijene ili su značajniju primjenu doživjele u posljednjih nekoliko godina. Same tehnologije

spajanja limova raznorodnih materijala u suštini se mogu podijeliti u četiri osnovne grupe: zavarivanje, mehaničko spajanje, lijepljenje i hibridne tehnologije (kombinacija više postupaka spajanja).

2. Tehnologije spajanja zavarivanjem

Zavarivanje je proces spajanje dva ili više istih ili različitih materijala u jednu nerazdvojivu strukturu. Kada se govori o spajanju materijali manje debljine, tj. spajanju limova, onda su najzastupljeniji postupci: Elektrootporno tačkasto zavarivanje (*eng. Resistance spot welding* – RSW), Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima (*eng. Resistance element welding* – REW), Zavarivanje trenjem sa miješanjem (*eng. Friction stir welding* - FSW), Zavarivanje trenjem sa mješanjem pomoću dodatnih elemenata (*eng. Friction element welding* - FEW), zavarivanje laserom, zavarivanje vibracijama, infracrveno (IR) zavarivanje i elektromagnetno zavarivanje [4, 7-9].

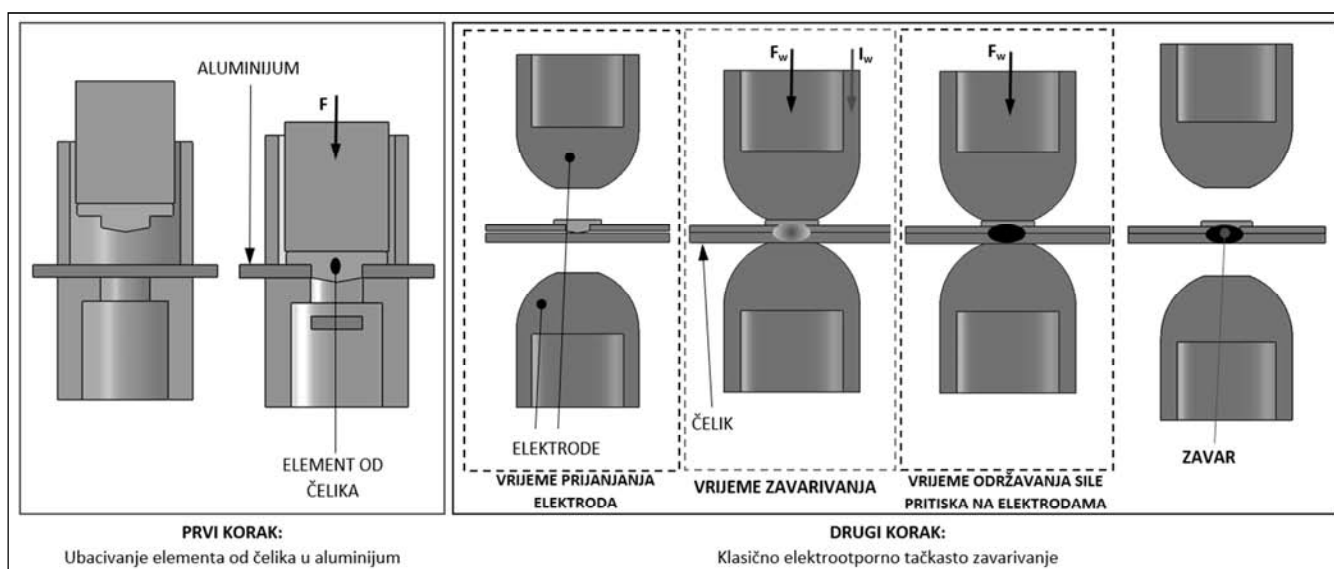
Elektrootporno tačkasto zavarivanje (RSW) je najčešće korištena metoda spajanja limova u automobilskoj industriji, tako jedan automobil ima preko 5000 RSW spojeva [10], a svaka fabrika automobila ima više od 200 izbora struje za zavarivanje navedenim postupkom [11]. Trenutni trend razvoja RSW tehnologija ide u pravcu analize spojeva različitih, tj. raznorodnih materijala, posebno aluminijuma i čelika [12-15]. Zbog materijalne razlike, zavarivanje legure aluminijuma i čelika nailazi na mnoge probleme, najprije zbog razlika u termičkim i fizičkim svojstvima, te zbog pojave lomljivog Fe-Al intermetalnog jedinjenja (*eng. Intermetal compound* - IMC). Postojanje IMC-a značajno utiče na nosivost i kvalitet samog spoja [16-19]. Pournvari [20] je u svojoj studiji objavljenoj 2017. godine kao jedan od budućih pravaca istraživanja vezanih za spajanje RSW tehnologijom naveo analize vezane za redukciju IMC sloja kao i razvoj alternativnih postupaka zavarivanja/spajanja čelika i aluminijuma.

Jedna od alternativnih tehnologija spajanja elektrootpornom tačkastom zavarivanju je elektrootporno zavarivanje elementima (REW), prvenstveno razvijena za spajanje različitih kombinacija čelika i lakih legura koje su metalurški nespojive i teško se mogu zavarivati zajedno [21, 22]. Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima je postupak koji počinje umetanjem (presovanjem) umetka (elementa) od čelika u aluminijum ili neki drugi laki materijal. Nakon što se element upresuje u laki materijal, slijedi postupak klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja.



Šema postupka data je na slici 1. Dodatni element kod REW postupka se naziva zakovica, pa se ovaj postupak još može nazvati elektrootporno tačkasto zavarivanje sa zakovicama odnosno RSR (*eng. Resistance Spot Riveting*) [23]. Osnovna prednost REW postupka je što u poređenju sa RSW postupkom se razlikuje samo za fazu ubacivanja elementa od čelika u aluminijum, što se može jednostavno automatizovati, tako da ovaj način

spajanja ne zahtijeva velika dodatna ulaganja u postojeće fabrike za sklapanje automobila. S druge strane istraživanja koja su do sada obavljena pokazuju da REW spoj aluminijuma i čelika ima bolja integralna mehanička svojstva nego spoj ova dva materijala dobijen RSW tehnologijom spajanja [13, 22-25]. Takođe, životni vijek elektroda značajno je duži kod REW nego kod RSW tehnologije spajanja [25].



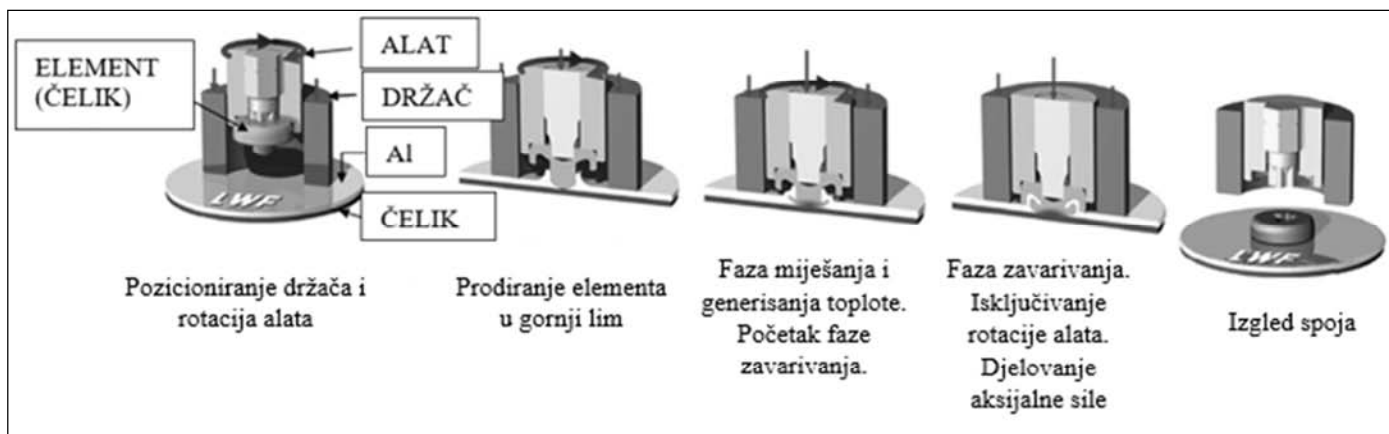
Slika 1. Šema elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima [25]

Figure 1. Scheme of electric resistance element welding [25]

Istraživanja na polju spajanja čelika i legura aluminijuma dominantna su i u pogledu primjene zavarivanja trenjem sa miješanjem (FSW) [26, 27], tačkastog zavarivanja trenjem sa miješanjem (FSSW) [28] i zavarivanja trenjem sa miješanjem pomoću dodatnih elemenata (FEW) [29]. Zavarivanje trenjem sa miješanjem je postupak zavarivanja koji se izvodi pomoću specijalnog alata koji vrši zagrijavanje radnih komada i miješanje materijala dijelova koji se spajaju. Šavno zavarivanje trenjem sa miješanjem (FSW) može se podijeliti u četiri faze: (I) prodiranje trna alata u materijal, (II) miješanje i generisanje toplote – početak procesa zavarivanja, (III) translatorno kretanje alata – zavarivanje, (IV) izlaz alata iz materijala – kraj zavarivanja [30]. Suštinska razlika između šavnog i tačkastog zavarivanja trenjem sa miješanjem (FSSW) je u tome što kod tačkastog zavarivanja nema faze III, tj. alat ne vrši translatorno kretanje, nego se proces sastoji samo od faze prodiranja alata, faze miješanja i generisanja toplote, koja je ujedno i faza zavarivanja, te, na kraju, od faze izlaza alata iz materijala. Long Wan¹ i Yongxian Huang [31] u studiji koja se bavi analiziranjem stanja tehnike

vezanim za spajanje čelika i aluminijuma zavarivanjem trenjem sa miješanjem navode da se ova dva raznorodna materijala mogu spojiti navedenom tehnologijom, ali da postoje brojni izazovi koje treba prevazići prije masovnije upotrebe ovo tehnologije. Navode da se istraživanja u budućnosti trebaju fokusirati na izbor materijala i dizajn oblika alata kako bi se smanjila veličina intermetalne faze koja se pojavljuje pri spajanju čelika i aluminijuma. Takođe, analiza uticaja premaza na habanje alata, kao i mogućnost dodatnog odvođenja toplote pri zavarivanju, prema navodima autora, trebaju biti fokus budućih istraživanja.

Zavarivanje trenjem sa miješanjem pomoću dodatnog elementa (FEW) u suštini predstavlja FSSW postupak koji podrazumijeva da se na alat postavlja dodatni element, kao npr. zakovica, koji nakon procesa zavarivanja ostaje u spoju (slika 2). Ovo način spajanja sličan je REW postupku, a primjenjuje se kako bi se izbjeglo spajanje raznorodnih materijala jer suštinski posmatrano zavarivanje se vrši između dva čelika spajajući tako aluminijumski lim mehanički.



Slika 2. Šema zavarivanja trenjem sa miješanjem pomoću dodatnog elementa [7]

Figure 2. Scheme of friction element welding [7]

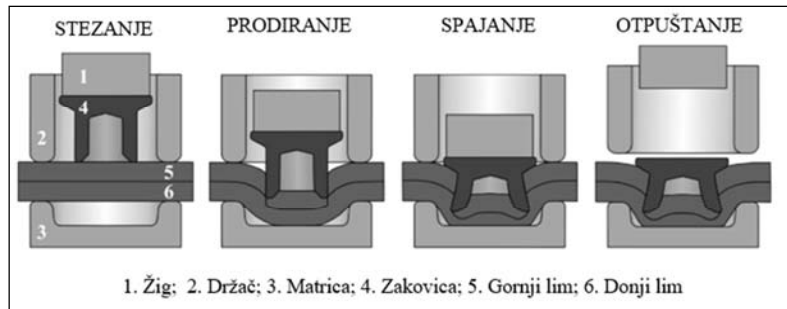
Lasersko zavarivanje je postupak spajanja materijala toplotom dobijenom energijom snopa svjetlosnih čestica. U odnosu na gustinu snage laserskog zavarivanja može se podijeliti na postupak uvarivanja laserom i lasersko zavarivanje topljenjem. Lasersko zavarivanje, zbog velike gustine snage i malog unosa toplote, ima brojne prednosti pri zavarivanju aluminijuma i čelika u odnosu na druge postupke zavarivanja. Međutim, problemi s nastankom defekata i reflektivnošću i dalje postoje u procesu. Kada se aluminijum topi, zbog različite tačke topljenja, čelik ostaje u čvrstom stanju. Brzina apsorpcije laserske energije se povećava značajno kada se tečnost formira na površini aluminijuma i rezultuje stvaranjem laserski indukovane plazme koja vodi do nestabilnosti postupka zavarivanja [32]. Ova metoda spajanja različitih materijala, koja se naziva još i daljinsko lasersko zavarivanje, koristi se za širok spektar automobilskih aplikacija kao što su zatvarači, stubovi i sjedala [33].

Ultrazvučno zavarivanje je postupak spajanja materijala u čvrstom stanju pomoću ultrazvučnih vibracija visokih frekvencija. Generator visoke frekvencije isporučuje električnu energiju koja se piezoelektričnim pretvaračem pretvara u mehaničke vibracije iste frekvencije. Poseban tip ovog postupka je ultrazvučno tačkasto zavarivanje. Kod ovog postupka vibracije prolaze kroz sonotrode i tako omogućavaju stvaranje spoja [33]. Dosadašnje studije o ultrazvučnom zavarivanju aluminijuma i

čelika uglavnom su fokusirane na analizu mehaničkih i metalografskih svojstava spoja tipičnih predstavnika aluminijumskih i čeličnih limova [34, 35].

3. Mehaničke tehnologije spajanja

Mehanička spajanje limova može se podijeliti na spajanje sa dodatnim komponentama i bez dodatnih komponenti [25]. Mehaničko spajanje pomoću dodatnih komponenti u suštini podrazumijeva upotrebu dodatnih spoljašnjih komponenata kao što su zavrtnji i zakovice. S druge strane, kada je riječ o savremenim mehaničkim tehnologijama spajanja pomoću dodatnih komponenti, onda dominantna istraživanja idu u pogledu spajanja materijala samoprobijajućim zakovicama (*eng. Self piercing riveting - SPR*) [36, 37] i samoproduirujućim zavrtnjem (*eng. Flow drilling screws - FDS*) [38, 39]. Samoprobijajuće zakivanje (SPR) ne zahtijeva pretpranje površine ili prethodno bušenje rupa, te tako omogućava kratko vrijeme spajanja i uštede troškova [40]. Šema SPR postupka data je na slici 3. Rezwanul Haque [41] samtra da nedostaje istraživanja u pogledu spajanja više od dva materijala SPR tehnologijom, te takođe preporučuje da buduća istraživanja trebaju još ići i u pravcu uticaja poznatih nezavisnih varijabli (geometrija i materijal matrice, žiga, zakovica i držača) na parametre kvaliteta spoja kao što su širenje zakovice, visinu glave, debljinu dna i efektivna dužina zakovice u donjem limu.

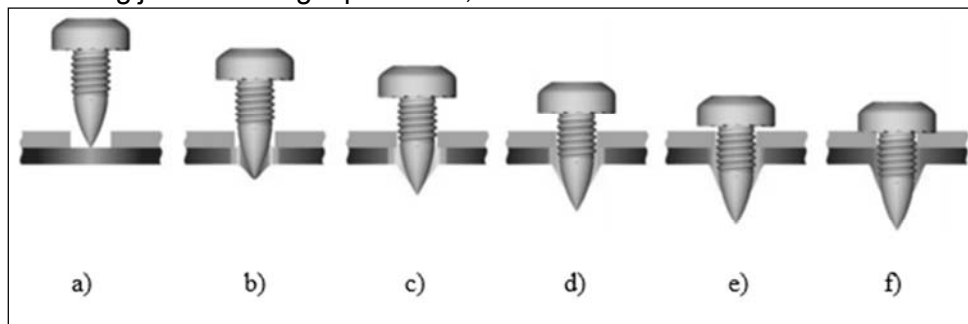


Slika 3. Šema SPR (samoprobijajuće zakivanje) postupka spajanja materijala [42]

Figure 3. Schematic presentation of the SPR (self-piercing riveting) procedure for joining materials [42]

FDS postupak je proces trenja koji koristi vijak kao pričvršivač i alat. Šema FDS postupka data je na slici 4. Ova tehnologija ima mnoge prednosti,

poput jednostrane pristupačnosti, jednostavne odvojivosti i velike čvrstoće spoja [43].

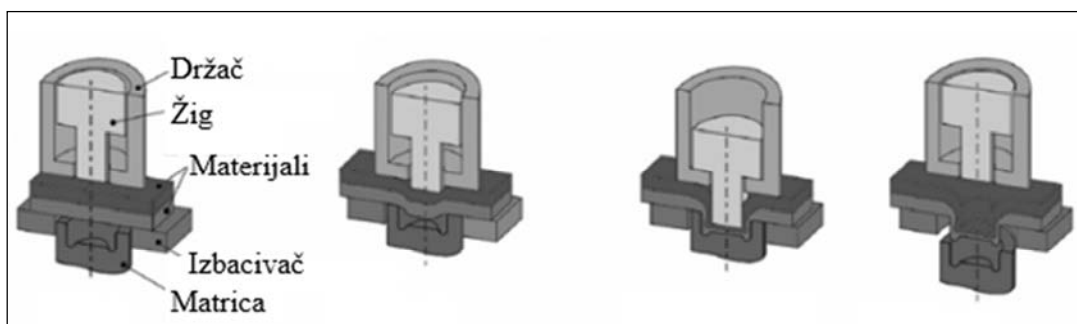


Slika 4. Šema FDS (samoproduirajući zavrtnji) postupka spajanja materijala: a) zagrijavanje; b) penetracija; c) istiskivanje; d) formiranje navoja; e) zavrtnje (potpuno formirana zavrtnajska veza); f) zatezanje [44]

Figure 4. Schematic of the FDS (flow drilling screws) material joining procedure: a) heating; b) penetration; c) extrusion; d) thread formation; e) screwing (fully formed screw connection); f) tensioning [44]

Mehanička tehnologija spajanja koja ne podrazumijeva upotrebu dodatnih spoljnih komponenti je zakivanje bez zakovica (eng. *mechanical chliching* - MC). Ovaj način spajanja hladnim oblikovanjem izvodi se postupkom lokalnih deformacija uz pomoć oblikača (žiga) i matrice [25]. Prilikom spajanja oblikač (žig) pritiskuje spojene limove unutar šupljina kalupa, tj. matrice, formirajući tako oblik koji te limove spaja. Šema postupka data je na slici 5. Osnovni parametar ovog postupka spajanja je sila kojom žig djeluje na lim, te geometrija žiga i matrice. Ova tehnologija, zbog svoje jednostavnosti, pogodnija je za

automatizaciju u odnosu na druge mehaničke tehnologije spajanja [45]. Pored navedenog, ovog tehnologija ima brojne prednosti, kao što je ušteda energije, jednostavni alati, pogodnost za spajanje raznorodnih materijala, te to da nema potrebe za uklanjanjem zaostalih napona jer ne dolazi do unošenja toplote tokom spajanja [46-48]. Brojni autori istražili su MC spajanje čelika i legura aluminijuma koristeći, analizirajući statičnu nosivost [49-51], dinamičnu nosivost [52, 53], geometriju žiga i matrice [54], te načine odnosno modove otkaza [55].



Slika 5. Šema MC (zakivanje bez zakovica) postupka spajanja materijala [45]

Figure 5. Scheme of the MC (mechanical chliching) material joining procedure [45]



4. Lijepljenje i hibridne tehnologije

Kada je riječ o spajanju raznorodnih materijala, onda se kao najreprezentativniji predstavnik hemijskog postupka spajanja nameće lijepljenje. Poznato je da se postupkom lijepljenja mogu spajati gotovo svi materijali. Ovakav postupak spajanja ima brojne prednosti, a jedna od njih je smanjenje korozije. S druge strane, kada je riječ o nedostacima lijepljenja, tu se prvenstveno misli na smanjena mehanička svojstva, pogotovo u pogledu čvrstoće i krutosti [56]. Pored navedenog, lijepkovi imaju i nedostatak u pogledu potrebne pripreme površina za spajanje, kao i dugog vremena potrebnog za očvršćavanje lijepka. Brock Watson i dr. [57] navode da je trenutni fokus istraživanja zalijepljenih spojeva na analizi mehaničkih svojstava dobijenih ispitivanjem na zatezanje - smicanje. Takođe, autori navode da buduća istraživanja idu u pravcu analize uticaja pripreme površina lijepljenja na tip loma, tj. mod otkaza spoja.

Ljepkovi se često koriste u kombinaciji sa nekim od postupaka spajanja kao što je zakivanje, elektrootporno tačkasto zavarivanje ili elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima [58-60]. Ovakav način spajanja naziva se hibridno spajanje. Prednosti kombinovanja lijepkova i tehnologija zavarivanja ili mehaničkih tehnologija spajanja su [61]:

- generalno poboljšanje mehaničkih svojstava (statičkih i dinamičkih);
- povećanje krutosti spoja;
- izrada neprekidnog i nepropusnog spoja;
- nije potrebno fiksiranje spoja tokom procesa očvršćavanja lijepka.

5. Poređenje tehnologija spajanja

G. Meschut i drugi [62] poredili su REW i FEW (zavarivanje trenjem sa miješanjem sa elementom) tehnologije spajanja, te zaključili da bolju zateznu čvrstoću ima FEW spoj u odnosu na REW spoj, kada je riječ o spajanju čelika HDT1200M ZE50/50 (1.5 mm) i legure aluminijuma EN-AW5182 (2.0 mm). Takođe, G. Meschut i drugi [63] su u svojoj studiji prikazali dijagram sila – izduženja za različite spojeve legure aluminijuma AW-6016 (1,5 mm) i čelika 22MnB5 (2 mm), sa kojeg se jasno uočava da je najveću vrijednost sile kidanja pri ispitivanju na zatezanje imao spoj dobijen FEW tehnologijom spajanja, dok je SPR imao najmanju vrijednost sile. Kod REW spoj vrijednosti sile je nešto manji, dok je vrijednost izduženja veća od

RSW spoja dva lima od aluminijuma. S druge strane Junya Naito i Reiichi Suzuki [64] su u svojoj studiji dali dijagram poređenja maksimalne sile dobijene pri ispitivanju na zatezanje za tehnologije spajanja čelika DP 980 i legure aluminijuma A6022. Sa dijagrama se može vidjeti da, u ovom slučaju, spoj dobijen REW tehnologijom ima bolju zateznu čvrstoću u odnosu na FEW spajanje i zakivanje zakovicama. H. Jiang i drugi [65] poredili su mehanička svojstva tri spoja: SPR, lijepljenje i hibridni spoj (SPR i lijepljenje) od čelika DC52D i legure aluminijuma 5052, te su zaključili da je hibridni spoj superioran u odnosu na pojedinačne spojeve.

R. Suzuki i drugi [66] u svojoj studiji poredi tehnologije spajanja raznorodnih materijala prema 6 kriterijuma, a svakom od istih dodjeljuje vrijednosti: odlično primjenljivo/moguće; djelimično primjenljivo/djelimično moguće; nije primjenljivo/nije moguće. Na osnovu analize prikazanih rezultata može se zaključiti da najveći broj ocjena „odlično primjenljivo/moguće“ ima REW tehnologija, dok, sa druge strane, najveći broj ocjena „nije primjenljivo/nije moguće“ ima tehnologija zakivanje bez zakovica.

M. M. Eshtayeh i drugi [67] predstavili su poređenje različitih tehnologija spajanja na osnovu 17 kriterijuma. Ocjenjivanje izvršeno opisno (lingvistički), a na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da su tehnologije spajanja zakivanje bez zakovica i SPR superiorne u odnosu na tehnologiju lijepljenja. Tehnologija lijepljenja zasebno možda nije najpogodnija, ali je već zaključeno da u kombinaciji sa mehaničkim tehnologijama spajanja značajno poboljšava mehanička svojstva spoja.

Probleme rangiranja tehnologija spajanja raznorodnih materijala za potrebe automobilske industrije razmatrali su i autori J. H. Kim i drugi [68]. Ovi autori su u svojoj studiji predstavili aplikaciju pod nazivom Multi-Material Joining Design Explorer koja predstavlja savjetodavni sistem baziran na znanju, namijenjen konstruktorima u ranoj fazi konstruisanja, a sve s ciljem izbora adekvatne tehnologije spajanja koja će se primjenjivati za izradu multimaterijal strukture.



6. Zaključak

Na osnovu sprovedene analize stanja tehnike iz oblasti tehnologija spajanja limova od čelika i legura aluminijuma, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Odabir adekvatne tehnologije za spajanje limova od čelika i legura aluminijuma zavisi od aspekta posmatranja, odnosno očekivanih rezultata. Sve tehnologije imaju i prednosti i nedostatke, zato je za poređenje tehnologija potrebno odabrati adekvatne kriterijume;
- Elektrootporno tačkasto zavarivanje i dalje je najzastupljenija tehnologija spajanja u masovnog proizvodnji, zato što alternativne tehnologije spajanja kao što su REW, FDS, SPR nisu još uvijek u potpunosti istražene, te ne mogu u cijelosti zamijeniti konvencionalne postupke iako imaju brojne prednosti.
- Kada je riječ o lijepljenju, treba napomenuti da ova tehnologija zasebno nije najpogodnija, ali se na osnovu pregleda literature može zaključiti da u kombinaciji sa drugim tehnologijama spajanja (mehaničko spajanje ili tehnologije zavarivanje) značajno poboljšava mehanička svojstva spoja. Fokus budućih istraživanja treba ići u pravcu analize mehaničkih svojstava hibridnih spojeva (lijepljenje + mehaničke tehnologije ili tehnologije zavarivanja).

Zahvalnost

Ovaj rad je rezultat istraživanja u okviru bilateralnog projekta između Bosne i Hercegovine i Republike Slovenije: "Istraživanje i analiza savremenih tehnologija spajanja raznorodnih materijala koji se primjenjuju pri razvoju lakih konstrukcija" u projektnom ciklusu 2021-2023 (br.projekta 451-03-9/2021-14/200109).

Literatura / References

- [1] Klein, B. (2009), Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, Vieweg and Reubner.
- [2] Degischer, H. P., Luftl S., Leichtbau, (2012), Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten, E-Book.
- [3] Albers, A., Burkardt N. (2013), Systemleichtbau Gewichtsreduzierung, u F. Henning, E. Moeller: Handbuch Leichtbau, Hanser Verlag München, 115-132.

6. Conclusion

Based on the analysis of the state of the art in the field of joining technologies of steel and aluminum alloys sheets, the following conclusions can be made:

- The selection of an adequate technology for joining steel and aluminum alloys sheets depends on the aspect of observation, or of the expected results. All technologies have both advantages and disadvantages, so for the comparison of technologies it is necessary to choose adequate criteria;
- Electric resistance spot welding is still the most common joining technology in mass production, because alternative joining technologies such as REW, FDS, SPR have not yet been fully explored, and cannot completely replace conventional procedures, although they have numerous advantages.
- When talking about gluing, it should be noted that this technology alone is not the most suitable, but based on a review of the literature, it can be concluded that in combination with other joining technologies (mechanical joining or welding technology) it significantly improves the mechanical properties of the joint. The focus of future research should be in the direction of analyzing the mechanical properties of hybrid joints (gluing + mechanical technologies or welding technologies).

Acknowledgement

This paper is the result of research within the framework of a bilateral project between Bosnia and Herzegovina and the Republic of Slovenia: "Research and analysis of modern joining technologies of dissimilar materials used in the development of light constructions" in the project cycle 2021-2023 (project no. 451-03-9/ 2021-14/200109).

- [4] Shashank, M., Stevens, M., Chess, M. (2017), Mixed Material Joining Advancements and Challenges, Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI.

- [5] Taub, A. I., Luo, A. A. (2015), Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive application, MRS Bulletin, 40, 1045-1053.

- [6] Tisza, M., Lukács, Z. (2018), High strength aluminum alloys in car manufacturing, International Deep Drawing Research Group 37th Annual



Conference, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 418.

[7] Meschut, G., Janzen, V., Olfermann, T. (2013), Innovative and Highly Productive Joining Technologies for Multi-Material Lightweight Car Body Structures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 5, 23, 1515-1523.

[8] S. R. - o. t. r. project (2017), Development and evaluation of advanced, Acronym: InnoJoin, Project nr. 130368.

[9] Tatsuya, S., Gen, M., Yasuaki, N., Kenji, S., Yasunobu, M., Hatsuhiko, O., Tetsuro, N. (2013), Dissimilar Metal Joining Technologies for Steel Sheet and Aluminum Alloy Sheet in Auto Body, *Nippon steel technical report*, 91-98.

[10] Bertin, L. (2014), Tensile Strength of Automotive Aluminum Joints Using Resistance Spot Welding, Self-Piercing Riveting and Adhesive Hybrid Joining -Electronic Theses and Dissertations, University of Windsor,.

[11] Thongchai, A., Kawin, S., Phisut, A., Kreangsak, T. (2014), Resistance Spot Welding Optimization Based on Artificial Neural Network, *International Journal of Manufacturing Engineering*.

[12] Jianbin, C., Xinjian, Y., Zhan, H., Ting, L., Kanglong, W., Ci, L. (2017), Improvement of resistance-spot-welded joints for DP 600 steel and A5052 aluminum alloy with Zn slice interlayer, *Journal of Manufacturing Processes*, 30, 398-405.

[13] Zhanxiang, L., Yang, L., Zhen, L., Sansan, A., Zhanghua, Y., Yunlong, G., Qiang, C. (2017), Microstructure and fatigue behavior of resistance element welded dissimilar joints of DP780 dual-phase steel to 6061-T6 aluminum alloy, *Int J Adv Manuf Technol*, 92, 5-8, 1923-1931.

[14] Hamed, A.-S., Mahmoud, S.-K., Azadeh, N.-B., Seyed, F. K.-B. (2020), Dissimilar resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy/St-12 carbon steel using a high entropy alloy interlayer, *Intermetallics*, 124.

[15] Shanqing, H., Amberlee, S. H., Yunwu, M., Yongbing, L., Blair, E. C., Zhongqin, L. (2021), Sensitivity of dissimilar aluminum to steel resistance spot welds to weld gun deflection, *Journal of Manufacturing Processes*, 68 A.

[16] Yang, J., Xue S., i dr. (2016), Development of Zn-15Al-xZr filler metals for

Brazing 6061 aluminum alloy to stainless steel, *Materials Science & Engineering A*, 651, 425-434.

[17] Arghavani, M.R., Movahedi, M., Kokabi A.H. (2016), Role of zinc layer in resistance spot welding of aluminium to steel, *Materials & Design*, 102, 106-114.

[18] Nannan, C., Min, W., Hui-Ping, W., Zixuan, W., Blair, E. C. (2018), Microstructural and mechanical evolution of Al/steel interface with Fe₂Al₅ growth in resistance spot welding of aluminum to steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 34 A.

[19] Liting, S., Jidong, K., Cheng, Q., Jie, L., Babak, S.-A., Amberlee, S., Blair, E. C. (2022), Role of Fe₂Al₅ in fracture of novel dissimilar aluminum-steel resistance spot welds using multi-ringing domed electrodes, *Materials Science and Engineering: A*, 831.

[20] Pouranvari M. (2017), Critical assessment: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities, *Materials Science and Technology*, 33, 1705-1712.

[21] Manladan, S. M., Yusof, F., Ramesh, S., Zhang, Y., Luo, Z., Ling Z. (2017), Resistance Element Welding of Magnesium Alloy/austenitic Stainless Steel, *Joining and Welding Symposium*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 238.

[22] Zhanxiang, L., Yang, L., Zhen, L., Yueqiao, F., Zhengmin, W. (2016), Resistance element welding of 6061 aluminum alloy to uncoated 22MnMoB boron steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 31, 16, 2174-2180.

[23] Ranfeng, Q., Nannan, W., Hongxin, S., Lihu, C., Longlong, H., Keke Z. (2015), Joining steel to aluminum alloy by resistance spot welding with a rivet, *International Journal of Materials Research*, 106, 1, 60-65.

[24] Đurić, A., Milčić, D., Burzić, Z., Klobčar, D., Milčić, M., Marković, B., Krstić, V. (2022), Microstructure and Fatigue Properties of Resistance Element Welded Joints of DP500 Steel and AW 5754 H22 Aluminum Alloy, *Crystals*, 12, 258.

[25] Đurić, A. (2022), Istraživanje tehnologija spajanja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW-5754 u cilju razvoja lakih



konstrukcija, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Niš.

[26] Jimenez, N. M., Jacques, P., Simar A. (2016), Evaluation of the intermetallic fracture toughness in Al-to-steel welds performed by Friction Stir Welding and Friction Melt Bonding, Journées annuelles de la SF2M, Albi, France.

[27] Mohamed Abd Elnabi M., Osman, T.A., El Mokadem, A., Bakr Elshalakany A. (2020), Evaluation of the formation of intermetallic compounds at the intermixing lines and in the nugget of dissimilar steel/aluminum friction stir welds, Journal of Materials Research and Technology, 9, 5, 10209-10222.

[28] Saleh, A., Eslam, R., Seyyed, E. M. (2021), Joining mechanism in pinless FSSW of aluminum-steel with or without Zn and brass interlayers, Materials Characterization, 180.

[29] Chae, L. Y., Warren, D. C., Chen, J., Zhili, F. (2019), Joining of Lightweight Dissimilar Materials by Friction Self-Piercing Riveting, In: Y. Hovanski, R. Mishra, Y. Sato, P. Upadhyay, D. Yan (eds) Friction Stir Welding and Processing X. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham.

[30] Milčić, M. (2020), Istraživanje uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na dinamičku izdržljivost zavarenog spoja legure aluminijuma 2024 T351, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu.

[31] Long, W., Yongxian, H. (2018), Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys and steels: a review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99, 1781–1811.

[32] Wang, P., Chen, X., Pan, Q., Madigan, B., Long J. (2016), Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87, 3081–3090.

[33] Gullino, A., Matteis, P., D’Aiuto F. (2019), Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications, Metals, 9, 315.

[34] Zhao, D., Ren, D., Zhao, K., Pan, S., Guo, X. (2017), Effect of welding parameters on tensile strength of ultrasonic spot welded joints of aluminum to steel—By experimentation and

artificial neural network. J. Manuf. Process, 30, 63–74.

[35] Michael, B., Balle, F. (2021), Multi-Spot Ultrasonic Welding of Aluminum to Steel Sheets: Process and Fracture Analysis, Metals, 11, 5.

[36] Ken-ichiro, M., Yohei, A. (2018), A review on mechanical joining of aluminium and high strength steel sheets by plastic deformation, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture.

[37] Zhanpeng, D., Baolv, W., Zhicheng, H., Aiguo, C., Libin, D., Guangya, Z. (2021), Experimental and numerical investigations of aluminium–steel self-piercing riveted joints under quasi-static and dynamic loadings, Thin-Walled Structures, 169.

[38] Weixue, L., Xuwu, Z., Qiaoying, Z., Hong, H., Jianpeng, L., Congchang, X., Luoxing, Li. (2020), Modeling and simulation of the flow drill screw process of a DP590/Al6061-T6 multi-material joint used for vehicle body, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 110, 1189–1201.

[39] Tae-Young, K., et al. (2022), Study on Effect of Process Variable on Fastening Quality Using Process Monitoring Data of Flow Drill Screwed 590DP Steel/AA5052 combination, Journal of Welding and Joining, 40 3. 256-264.

[40] Dezhi, L., Andreas, C., Imran, P., Geraint, W. (2017), Self-piercing riveting—a review, Int J Adv Manuf Technol, 92, 1777–1824.

[41] Rezwani, H. Quality of self-piercing riveting (SPR) joints from cross-sectional perspective (2018), A review, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18, 1, 83-93.

[42] Uhe, B., Kuball, M. C., Merklein, M. i dr. (2020), Improvement of a rivet geometry for the self-piercing riveting of high-strength steel and multi-material joints, Prod. Eng. Res. Devel, 14, 417–423.

[43] Carmen, S., Gundolf, K., Horst E. F. (2016), Influence of Corrosive Conditions on the Mechanical Performance of Flow Drill Screw Joints between Light Metals, Materials Science Forum, 879, 1725-1730.

[44] Sønstabø, J. K., Holmstrøm, P. H., Morin, D., & Langseth, M. (2015), Macroscopic strength and failure properties of flow-drill screw



connections. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 1-12.

[45] Mucha, J. (2017), Clinching technology in the automotive industry. *Archiwum Motoryzacji*, 76 2.

[46] Zhang, X., Chen, C. (2022), Experimental investigation of joining aluminum alloy sheets by stepped mechanical clinching. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 566-577.

[47] Peng, H., Chen, C., Ren, X., & Wu, J. (2021), Development of clinching process for various materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119, 99-117.

[48] Carboni, M., Beretta, S., Monno, M. (2006), Fatigue behaviour of tensile-shear loaded clinched joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 2, 178-190.

[49] Jónás, S., et al. (2019), Experimental and numerical study of dissimilar sheet metal clinching. In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2113, 1.

[50] Wiesenmayer, S., Graser, M., Merklein, M. (2020), Influence of the properties of the joining partners on the load-bearing capacity of shear-clinched joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 283, 116696.

[51] Song, Y., et al. (2019), Numerical and experimental study on failure behavior of steel-aluminium mechanical clinched joints under multiple test conditions. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2, 1, 72-79.

[52] Barimani-Varandi, A., Aghchai, A. J. (2020), Electrically-assisted mechanical clinching of AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel: effect of geometrical features on material flow and mechanical strength. *Mechanics & Industry*, 21, 5, 529.

[53] Hörhold, et al. (2016), Mechanical properties of an innovative shear-clinching technology for ultra-high-strength steel and aluminium in lightweight car body structures. *Welding in the World*, 60, 3, 613-620.

[54] Tenorio, M. B., Lajarin, S. F., Gipiela, M. L., Marcondes, P. V. P. (2019), The influence of tool geometry and process parameters on joined sheets by clinching. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, 2.

[55] Lei, L., He, X., Yu, T., Xing, B. (2019), Failure modes of mechanical clinching in metal sheet materials. *Thin-Walled Structures*, 144.

[56] Chastel, Y., Passemard, L. (2014), Joining technologies for future automobile multi-material modules. *Procedia Engineering*, 81, 2104-2110.

[57] Watson, B., et al. (2019), Metallic multi-material adhesive joint testing and modeling for

vehicle lightweighting. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 95, 102421.

[58] Maggiore, S., Banea, M. D., Stagnaro, P., Luciano, G. A (2021), Review of Structural Adhesive Joints in Hybrid Joining Processes. *Polymers*, 13, 22, 3961.

[59] Jeevi, G., Nayak, S. K., & Abdul Kader, M. (2019), Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33, 14, 1497-1520.

[60] Zvorykina, A., et al.(2020), Dissimilar metal joining of aluminum to steel by hybrid process of adhesive bonding and projection welding using a novel insert element. *Journal of Materials Processing Technology*, 282, 116680.

[61] European Aluminium Association: Aluminium Automotive Manual – Joining, Hybrid joining techniques (www.european-aluminium.eu, pristupljeno 29.03.2022).

[62] Meschut, G., et al.(2017), Process characteristics and load-bearing capacities of joints welded with elements for the application in multi-material design. *Welding in the World*, 61, 3, 435-442.

[63] Meschut, G., et al. (2014), Innovative joining technologies for multi-material structures. *Welding in the World*, 58, 1, 65-75.

[64] Naito, J., Suzuki, R. (2020), Multi-material automotive bodies and dissimilar joining technology to realize multi-material. *Kobelco Technol. Rev*, 38, 32-37.

[65] Suzuki, R., Ryo, C. (2018), Dissimilar metals Joining Process using GMAW has High strength and One side access characteristic, and the Automation robot system. *Arc Welding Processes and Production Systems*. 71ST IIW Annual Assembly, Bali Nusa Dua Convention Center, Bali, Indonesia.

[66] Eshtayeh, M. M., Hrairi, M., Mohiuddin, A. K. M. (2016), Clinching process for joining dissimilar materials: state of the art. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 1, 179-195.

[67] Kim, J. H., et. al. (2019), Knowledge based design advisory system for multi-material joining. *Journal of Manufacturing Systems*, 52, 253-263.

[68] Jiang, H., et al., (2021), Comparative study on joining quality of electromagnetic driven self-piecing riveting, adhesive and hybrid joints for Al/steel structure. *Thin-Walled Structures*, 164, 107903