

# Primjena zavarivanja u autoindustriji s odabranim primjerima

---

**Medvidović, David**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **VERN University / Sveučilište VERN**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:146:107162>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-26**



*Repository / Repozitorij:*

[VERN' University Repository](#)



**SVEUČILIŠTE VERN'**

Zagreb

Tehnički menadžment

**ZAVRŠNI RAD**

**PRIMJENA ZAVARIVANJA U AUTOINDUSTRIJI S  
ODABRANIM PRIMJERIMA**

**David Medvidović**

**Zagreb, 2024.**

**SVEUČILIŠTE VERN'**

Stručni prijediplomski studij

Tehnički menadžment

**ZAVRŠNI RAD**

**PRIMJENA ZAVARIVANJA U AUTOINDUSTRIJI S  
ODABRANIM PRIMJERIMA**

Mentor: doc. dr. sc. Mirko Jakopčić

Student: David Medvidović

**Zagreb, listopad, 2024.**

Sveučilište VERN'

## **IZJAVA**

kojom izjavljujem da sam završni rad pod naslovom

„Primjena zavarivanja u autoindustriji s odabranim primjerima“

izradio samostalno. Svi dijelovi rada, nalazi ili ideje koje su u radu citirane ili se temelje na drugim izvorima, bilo da su u pitanju knjige, znanstveni ili stručni članci, internetske stranice, propisi i sl. u radu su jasno označeni kao takvi te adekvatno navedeni u popisu literature.

Zagreb, 10. listopada 2024.

David Medvidović

Sveučilište VERN'

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

**Student:** David Medvidović

**Zadatak:** Primjena zavarivanja u autoindustriji s odabranim primjerima

**U radu je potrebno razraditi sljedeće:**

- prikazati osnovna konstrukcijsko-tehnološka obilježja zavarenih spojeva
- identificirati konstrukcijske materijale u automobilskoj industriji
- analizirati temeljne postupke zavarivanja u automobilskoj industriji
- obrazložiti primjenu i značaj robotizacije u automobilskoj industriji
- prikazati odabrane primjere zavarivanja u autoindustriji
- definirati zaključke i preporuke za praksu.

Zadatak zadan: 11. listopada 2024.

Rok predaje: listopad 2024.

**Mentor:**

doc. dr. sc. Mirko Jakopčić

**Pročelnik studija:**

Joško Meter, dipl. ing.

# SADRŽAJ

	Stranica
SAŽETAK	III
ABSTRACT	IV
1. UVOD	1
2. OSNOVNA OBILJEŽJA ZAVARENIH SPOJEVA	2
2.1. Namjena i razvoj zavarenih spojeva	2
2.2. Vrste zavarenih spojeva	3
2.3. Postupci zavarivanja	4
3. MATERIJALI U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI	5
3.1. Čelik	5
3.2. Magnezij i magnezijske legure	7
3.3. Aluminiij i njegove legure	7
3.4. Polimerni kompoziti	9
4. POSTUPCI ZAVARIVANJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI	10
4.1. Elektrolučno zavarivanje	11
4.1.1. MIG/MAG zavarivanje	11
4.1.2. TIG zavarivanje	13
4.2. Elektrootporno zavarivanje	15
4.2.1. Elektrootporno točkasto zavarivanje	15
4.2.2. Elektrootporno bradavičasto zavarivanje	17
4.2.3. Elektrootporno šavno zavarivanje	18
4.3. Zavarivanje trenjem	20
4.4. Lasersko zavarivanje	21
4.5. Lijepljenje i zakivanje	23
5. ROBOTIZACIJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI	25

5.1. Primjena robota u zavarivanju	25
5.2. Roboti za elektrolučno zavarivanje	26
5.3. Roboti za elektrotopno zavarivanje	27
6. ODABRANI PRIMJERI ZAVARIVANJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI	29
7. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA PRAKSU	33

LITERATURA

POPIS SLIKA I TABLICA

## **SAŽETAK**

### **PRIMJENA ZAVARIVANJA U AUTOINDUSTRIJI S ODABRANIM PRIMJERIMA**

U ovome je radu pod naslovom „Primjena zavarivanja u autoindustriji s odabranim primjerima“ kao uvod u temu objašnjen povijesni razvoji i kronološki napredak procesa zavarivanja u industriji općenito. U njemu su prikazane vrste spojeva i materijali koji se najčešće zavaruju, a potom i vrste i postupci zavarivanja koji se primjenjuju u autoindustriji. Detaljnije su razjašnjeni najčešći postupci, počevši od elektrolučnoga zavarivanja s njegovim podvrstama, elektrootpornoga zavarivanja s podvrstama, preko zavarivanja trenjem sve do suvremenoga laserskog zavarivanja. Naposljetku je objašnjen i značaj primjene automatizacije i robotizacije u postupcima zavarivanja, čime se započelo upravo u automobilskoj industriji, a to je ostavilo značajan i trajan trag, sve do proizvodnje automobila današnjice.

**Ključne riječi:** zavarivanje, postupci zavarivanja, robotizacija, autoindustrija



## **ABSTRACT**

### **THE APPLICATION OF WELDING IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY WITH SELECTED EXAMPLES**

In this paper titled „The Application of Welding in the Automotive Industry with selected examples“, the historical development and chronological advancement of welding processes in the industry in general are explained as an introduction to the topic. It presents the types of joints and materials that are most commonly welded, followed by the types and methods of welding used in the automotive industry. The most common methods are explained in detail, starting with arc welding and its subtypes, resistance welding with its subtypes, trough friction welding, and finally to modern laser welding. The significance of the application of automation and robotics in welding processes is explained, which began in the automotive industry and has left a significant and lasting impact, continuing to the production to this day.

**Key words:** welding, welding processes, robotization, automotive industry

## 1. UVOD

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više istovrsnih ili raznovrsnih materijala primjenom prikladnih kombinacija tlaka, temperature i drugih parametara, taljenjem ili pritiskom, uz dodatni materijal ili bez njega, tako da se dobije homogeni zavareni spoj. Upravo je zavarivanje jedan od ključnih postupaka u proizvodnji automobila. Povijest postupka zavarivanja seže u davno doba Sumerana, a napredak postupka bio je dugotrajan. Ipak, u automobilskoj je industriji napredak postupka bio brži kako je napredovala automobilska industrija. Tijekom povijesti, od proizvodnje prvoga automobila u 19. stoljeću do danas, štošta se promijenilo pa tako i tehnike zavarivanja. Tehnike zavarivanja, tj. postupci zavarivanja, ponajviše su se mijenjali, odnosno razvijali, kako bi se povećavala iskoristivost goriva, a težina automobila smanjivala te kako bi postupak novčano bio što isplativiji. Najkorišteniji je postupak zavarivanja u proizvodnji automobila elektrootporno točkasto zavarivanje koje se ujedno smatra i ekonomski najprihvatljivijim, odnosno najjeftinijim. Postupci zavarivanja koriste se i za popravak određenih spojeva, a u ovome će radu biti objašnjeni povijest i vrste postupaka, materijali koji se koriste za postupak, koji su najzastupljeniji u autoindustriji, te naposljetku inovacija koju je upravo automobilska industrija i donijela te robotizacija postupka zavarivanja.

## **2. OSNOVNA OBILJEŽJA ZAVARENIH SPOJEVA**

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više dijelova pomoću topline ili tlaka, odnosno trenja, ili istodobno topline i tlaka, a spoj nastaje nakon hlađenja dijelova koji se zavaruju. Novonastali se spoj sastoji od dijelova koji su spajani i zavarivani. Prilikom postupka zavarivanja potrebne su mjere opreza u primjeni zavarivačkoga uređaja te zaštititi zavarivača i okoline. Prilikom postupka posebno treba obratiti pozornost na to kako je uređaj priključen, je li dobro postavljena zaštita, nosi li osoba koja se koristi uređajem zaštitne rukavice i prikladnu obuću s gumenim potplatom, masku za zavarivanje, zaštitne naočale i pregaču. Treba osigurati i okolinu tako da se svi lako zapaljivi predmeti i materijali uklone. Najčešće se zavaruju materijali poput čelika, čeličnoga lijeva, sivoga lijeva, bakra i legura, nikla, legura titana, aluminija i njegovih legura te polimernih materijala. U postupku se koriste različiti izvori energije kao što su plinski plamen, električni luk, laser, elektronski snop, trenje i ultrazvuk.

### **2.1. Namjena i razvoj zavarenih spojeva**

Povijest zavarivanja seže u davno doba Sumerana, smatra se da su se upravo oni koristili postupkom zavarivanja metala još oko četiri tisuće godina prije Krista. Međutim, napredak u razvijanju toga postupka tekao je vrlo sporo: nakon više od tisuću godina postupak se unaprjeđuje tako što su Egipćani zavarivanjem konstruirali bakrene vodove. Zatim slijedi stagnacija u napretku, a prvi veći napredak događa se tek za vrijeme Industrijske revolucije, kada dolazi do izuma Guerickova električnog stroja i Leibnizove električne iskre. Najveći je napredak napravio Rus Nikolaj Nikolajewitsch Bernardos razvivši postupak elektrolučnoga zavarivanja. On je ujedno i prva osoba koja je uspjela spojiti dva metalna dijela pomoću električnoga luka.

Dostupnost električne energije početkom 20. stoljeća pridonijela je razvoju novih postupaka zavarivanja. Pravi procvat u razvoju zavarivanja dogodio se u 20. stoljeću. Kronološki to izgleda ovako (Vural, 2014):

- EPP zavarivanje, 1936.
- TIG zavarivanje, 1936.
- MIG zavarivanje, 1948.
- MAG zavarivanje, 1953.
- plazma zavarivanje, 1960.

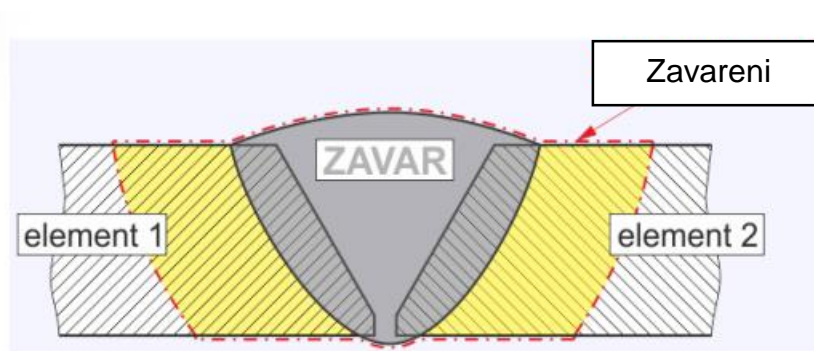
- lasersko zavarivanje, 1970.

## 2.2. Vrste zavarenih spojeva

Postupkom zavarivanja sjedinjuju se materijali spajanih elemenata u manje ili više homogenu cjelinu. Dijelovi koji se zavaruju zagrijavaju se u zoni spoja gdje se formira zajednički rastaljeni materijal ili talina koja, kada se ohladi, čini čvrst, nerastavljiv spoj dvaju prethodno odvojenih dijelova (Čorić, 2018.). Osnovna su svojstva takvih zavarenih spojeva čvrstoća i međusobna nerastavljivost.

Zavar podrazumijeva područje u kojemu tijekom zavarivanja, uslijed djelovanja visokih temperatura, dolazi do spajanja osnovnih i dodatnih materijala. Dakle, zavareni spoj obuhvaća zavar i dijelove koji su se spajali, a neposredno su spojeni zavarom, slika 2.1:

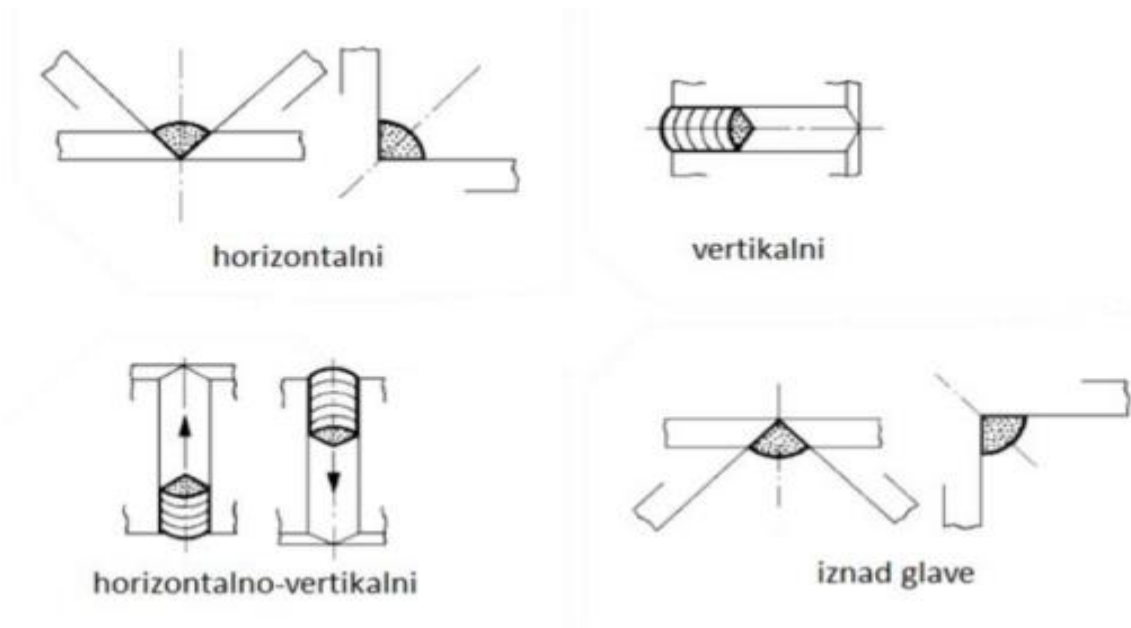
Slika 2.1. Zavareni spoj elemenata i zavar



Izvor: 11. 6. 2024.: <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/05-ZavareniIzalemljeniSpojevi.pdf>

Prema položaju zavarenih dijelova zavareni se spojevi konstrukcijski oblikuju kao križni, naliježuci, preklopni, prirubni, rubni i T -spoj. Osim prema položaju, zavareni se spojevi dijele i prema broju prolaza u zoni taljenja: jedan prolaz, više prolaza, više slojeva (Podgorski, 2015). Mogu se podijeliti i prema funkciju (brtveni, kombinirani, nosivi, spojni), kontinuiranosti (isprekidani, neprekidni, točkasti) i položaju zavara prilikom postupka zavarivanja (horizontalni, horizontalno-vertikalni, iznad glave, vertikalni), slika 2.2:

Slika 2.2. Položaji postupka zavarivanja



Izvor: 11. 6. 2024., Atlija, Nataša 2016. Diplomski rad, MAG postupak zavarivanja, Rijeka

### 2.3. Postupci zavarivanja

Tehnike zavarivanja mogu se prema načinu spajanja podijeliti u dvije glavne skupine: zavarivanje pritiskom i zavarivanje taljenjem. Zavarivanje pritiskom odvija se u krutome ili polukrutome stanju materijala i to pomoću udaraca ili pritiska, a podrazumijeva difuzijsko, elektrootporno, kovačko zavarivanje, zavarivanje trenjem, infracrvenim zračenjem te zavarivanje eksplozijom. S druge strane, zavarivanje taljenjem izvodi se taljenjem materijala koji tvore zavare, a to su: aluminotermijsko, elektrolučno, kovačko, lasersko, ljevačko, plinsko i zavarivanje elektronskim mlazom.

### **3. MATERIJALI U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI**

Razvojem industrije općenito rapidno se razvija i automobilska industrija. Prohtjevi tržišta sve su veći, a mogućnosti za materijalnim ulaganjem istodobno sve manje. Stoga ne čudi da današnja vozila moraju ispunjavati niz kriterija od kojih je jedan dio propisan zakonom, a drugi prilagođen potrebama potrošača. Sigurnost, ekonomičnost potrošnje goriva, pristupačna cijena, performanse, emisije stakleničkih plinova te mogućnost recikliranja samo su neke od zadanih forma. Većina je navedenih karakteristika izravno povezana s izborom materijala koji se danas koristi u automobilskoj industriji. Čimbenici koji utječu na odabir materijala i koji će se koristiti u proizvodnji, osim ekonomičnosti, podrazumijevaju i jednostavnu proizvodnju, jamstvo trajnosti, ali i kemijsku, mehaničku te toplinsku otpornost (Sherman i sur. 2001). S obzirom na zastupljenost materijala u automobilskoj industriji, to izgleda ovako: željezo i čelik (55 posto), oko 11 posto plastika, devet posto odlazi na aluminijske legure, guma sedam posto, staklo svega tri posto, udio obojenih legura ne prelazi jedan posto, a ostali materijali čine preostalih 14 posto (Hovorun i sur. 2017).

Čelik se tradicionalno upotrebljavao za proizvodnju pogonskih dijelova automobila, međutim kako je kao materijal podložan koroziji te takvi dijelovi imaju izuzetno veliku masu, danas se njegova upotreba nastoji minimalizirati i zamijeniti upotrebom kompozitnih materijala. Kao prednost korištenja polimernih materijala također se spominje i njihova ekonomičnost. Uz to, dokazalo se da polimerni materijali, za razliku od čelika i sličnih metala, imaju gotovo neograničen vijek trajanja, ne hrđaju te su izuzetno izdržljivi prilikom većih opterećenja.

#### **3.1. Čelik**

Premda se učestalo ističu njegovi nedostaci u korištenju u automobilskoj industriji (poglavito velika masa te sklonost koroziji) čelik je i dalje najzastupljeniji materijal u proizvodnji automobila. Istraživanja pokazuju kako gotovo pola tone mase automobila čine dijelovi automobila izrađeni od čelika. Osim karoserije automobila, čelik se koristi i kao materijal za proizvodnju dijelova poput šasije, motora, kotača i slično (Fentahun i Savaş, 2018). S jedne strane, automobilska je industrija primorana odgovoriti potražnji potrošača te udovoljiti njihovim prohtjevima, dok s druge strane postoje zakonski i ekološki normativi koje treba slijediti tijekom proizvodnje.

Čelik se koristi zbog sljedećih prednosti (Davies, 2012):

- niska cijena
- jednostavnost oblikovanja
- dosljednost ponude
- otpornost na koroziju u kombinaciji s cinkovim premazima
- lakoća spajanja
- mogućnost recikliranja
- dobra apsorpcija energije sudara.

Osim prednosti uporabe čelika, navode se i njegovi nedostaci, a glavna su dva, kao što je već spomenuto, velika masa i korozija, ako je nezaštićen. Posljednjih godina takva su se dva problema nastojala riješiti te se to učinilo razvojem širega asortimana proizvoda od lima i traka, tablica 3.1:

Tablica 3.1. Limovi koji se koriste u proizvodnji automobila

Čelik	Tip	Svojstva	Primjena
Tanki lim, hladno valjani	RRST 1405	Relativno produljenje 36%, vlačna čvrstoća 270-350 MPa, debljina 0,6 - 0,9 mm	Posebni vanjski dijelovi (krov, hauba, vrata itd.)
Tanki lim, vruće-valjani	UST 1203, UST 1303	Relativno produljenje 28-32%, vlačna čvrstoća 270-410 MPa, debljina 0,6 – 0,9 mm	Obojeni vanjski dijelovi, podni dijelovi (unutarnji okvir, pojačala itd.)
Tanki lim, toplo-valjani	ST 4	Relativno produljenje veće od 38%, vlačna čvrstoća 280-380 MPa, debljina 1,5 -2,5 mm	Dijelovi ispod tijela automobila(nosači. pojačala, prirubnice itd.)

Izvor: 12. 6. 2024., Hovorun T. P., Berladir K. V., Rudenko S. G., Pererva V. I., Martynov A. I., *Materials automotive industry*, 2017. Ukrajina

Uz to, još četiri vrste čelika različite po svojim svojstvima, spajanju i načinu rukovanja zauzimaju značajno mjesto u automobilskoj proizvodnji (Carborep, 2019). To su čelici visoke

čvrstoće, napredni čelici visoke čvrstoće, čelici iznimno visoke čvrstoće i čelici koji se lako oblikuju.

### **3.2. Magnezij i magnezijske legure**

U usporedbi s aluminijem i aluminijskim legurama, magnezij i njegove legure imaju znatno manju gustoću;  $1,74 \text{ g/cm}^3$  magnezijske, a  $2,7 \text{ g/cm}^3$  aluminijske legure. Stoga ne čudi da su zauzele primjenu u automobilskoj proizvodnji. Ipak, elastičnost magnezijevih legura u usporedbi s aluminijskima značajno je manja, magnezijeve se legure teško oblikuju, a lijevati se mogu samo do debljine od dvaju milimetara. Uobičajena je proizvodna metoda za izradu automobilskih dijelova od magnezija tlačno lijevanje koje omogućuje konsolidaciju dijelova i smanjenje troškova. Magnezijeve legure, kao i aluminijske, možemo podijeliti na kovane i lijevane. Za proizvodnju nosača, kućišta i poklopaca koristi se aluminijska legura A380, ali i magnezijeva legura AZ91, koja pripada lijevanim legurama. Od kovanih legura, u automobilskoj se industriji najčešće koriste magnezijeve legure AZ80 i AZ31. Ono što se navodi kao osnovni nedostatak magnezijevih legura jest loša korozijska postojanost, odnosno otpornost. Kako bi se smanjila korozija, koriste se aluminijske podloške, aluminijski vijci ili čelični vijci presvučeni slojem aluminija (Rowe, 2012). Magnezij se koristi u proizvodnji okvira autosjedalica, kućišta, servo pumpi, instrument ploča, naplataka kotača, stupova upravljača, jezgri volana i ostalome (Fentahun i Savaş, 2018).

### **3.3. Aluminij i njegove legure**

U novije vrijeme otkrivene su mnoge prednosti korištenja drugih materijala u automobilskoj proizvodnji. Za aluminij se prvenstveno navodi mogućnost proizvodnje dijelova raznih oblika, karoserija je lakša od čelika, dok je čvrstoća jednaka, lakoća u preradi, reciklaža nije teška, otpornost na koroziju (Hovorun i sur. 2017). Kao najvažnija prednost ističe se mala gustoća aluminija i njegovih legura koja čini svega  $2,7 \text{ g/cm}^3$  u usporedbi, primjerice sa  $7,87 \text{ g/cm}^3$  za čelike, što znači gotovo 65% manje gustoće ima aluminij u odnosu na čelik. Kao kod magnezija i njegovih legura, i kod aluminija se koriste postupci kovanja i lijevanja.

Ljevane se aluminijske legure uglavnom koriste za dijelove motora poput mjenjača i ovjesa, dok se kovane legure aluminija, u obliku limenih ploča i ekstrudata, koriste u dijelovima karoserije i vanjskim oplatama (Rowe, 2012). Vodeće su automobilske industrije koje se koriste aluminijem i njegovim legurama Audi, BMW, Jaguar i Rover. Zahvaljujući aluminiju,

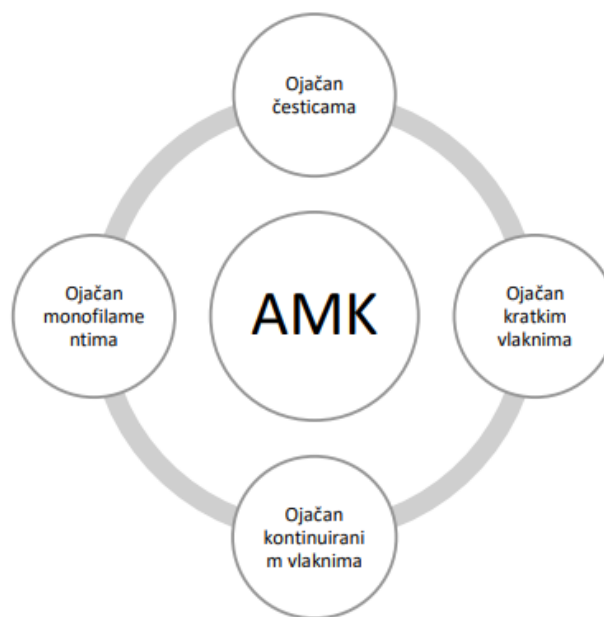


automobil postaje mnogo lakši što utječe na povećanje brzine, smanjenje emisije CO<sub>2</sub> i potrošnju goriva.

Uz čelik i aluminij, ključnu ulogu u proizvodnji automobila imaju kompozitni materijali ili kompoziti koji se dobiju spajanjem dvaju različitih materijala u jedan. Oni imaju istaknuta fizikalna, kemijska i mehanička svojstva, a sastoje se od matrice i ojačala.

AMK-aluminijski matrični kompoziti pripadaju skupini visokoučinkovitih materijala. Postoje četiri vrste AMK, slika 3.2.:

Slika 3.2. Vrste aluminijskih matričnih kompozita



Izvor: 12. 6. 2024., Hovorun T. P., Berladir K. V., Rudenko S. G., Pererva V. I., Martynov A. I., *Materials for automotive industry*, 2017. Ukrajina

Jedan je od ključnih razvoja metalnih kompozita česticama ojačani AMK. On se proizvodi u krutom ili tekućem stanju, a s obzirom na to da je AMK ojačan kontinuiranim vlaknima, ima dvije prednosti: može se oblikovati raznim postupcima kao što je, primjerice, kovanje te je znatno jeftiniji. Ipak najpoznatiji su oni koji se koriste za proizvodnju ventila, aluminijski matrični kompoziti ojačani vlaknima i česticama.

Aluminijski kompozitni materijali koji se koriste u automobilu prvenstveno se koriste kako bi smanjili masu automobila i poboljšali njegove performanse, uštedjeli ulje, smanjili zagađenje i produžili vijek trajanja automobila.

### 3.4. Polimerni kompoziti

Polimerni kompoziti u automobilskoj industriji su duromeri ojačani kratkim (staklenim) vlaknima koji se uglavnom koriste za poboljšanje performansa određenih dijelova automobila.

Unatoč svojim neporecivim prednostima, najveća je prepreka u korištenju polimernih kompozita u automobilskoj industriji njihova cijena. Upravo je cijena razlog zbog čega termo plastika ojačana vlaknima prednjači u automobilskoj industriji. S obzirom na to da se naglasak u proizvodnji vrlo često stavlja na masu automobila, grafit ojačan staklenim vlaknima mogao bi imati prednost u odnosu na aluminij, a posebice u odnosu na čelik od kojega je lakši čak za jednu polovicu. U proizvodnji automobila razlikuje se četiri vrsta plastike: ABS plastika, poliuretan, plastika ojačana staklenim vlaknima, polivinil klorid (Smojver, 2006/'07).

ABS plastika koristi se pri izradi velikih dijelova automobila. Poliuretani su materijali koji se koriste za izradu zračnih jastuka, haube i prtljažnika. Za proizvodnju tkanina korištenih za unutrašnjost automobila i okvira koristi se polivinil klorid.

Zahvaljujući toplinskoj otpornosti, mehaničkoj čvrstoći i otpornosti na kemijske reakcije, polimerni se materijali označuju kao proizvodi visoke ekonomičnosti, ali i visoke cijenenosti. Uz to, materijali ojačani dugim vlaknima kao što je Celstran pokazuju odlična svojstva: toplinsku otpornost, visoku udarnu žilavost te znatno bolja mehanička svojstva.

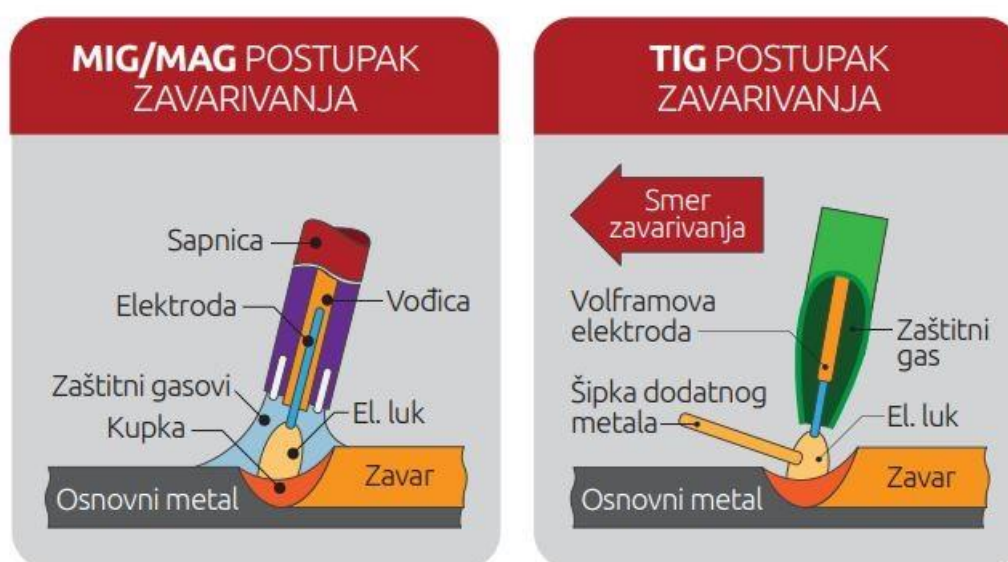
Kako vrijeme protječe, tehnologija napreduje te se tako i u automobilskoj industriji očekuju veliki iskoraci. Jednim od takvih smatra se prebacivanje barem polovice automobila na hibridni pogon, dakle kombinaciju korištenja struje i benzina ili dizela za pokretanje i vožnju. Smatra se da bi do polovice ovoga stoljeća barem 50 posto automobila na cestama trebala biti hibridna. Glavni je problem hibridnih automobila što je baterija koja se koristi za rad vrlo glomazna i teška što nikako ne ide u prilog razvoju industrije budući da istodobno teže k pronalasku što lakših materijala kako bi se masivnost automobila smanjila. Osim hibridnih baterija, kao napredak automobilske industrije navodi se buduće korištenje hidrofилnih prozora, pametnih svjetala te guma bez zraka.

U automobilskoj je industriji kombinacija polimera i metala neizbježna zbog različitih funkcionalnih zahtjeva. Radi postizanja veće ukupne čvrstoće i smanjenja težine automobila polimerima se oblažu metalni okviri. Spoj polimera i metala postiže se tehnikama termo-zavarivanja ili mehaničkoga pričvršćivanja.

## 4. POSTUPCI ZAVARIVANJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

Zavarivanje je jedan od osnovnih postupaka u proizvodnji važnijih dijelova automobila: podvozja, karoserije i vratila. Metode zavarivanja i spajanja u proizvodnji automobila određene su s obzirom na zahtjeve o višoj razini sigurnosti, nižoj potrošnji goriva i boljoj dinamici vožnje. Primjene zavarivanja u automobilskoj industriji ne nedostaje, međutim bitno je spomenuti najučestalije: elektrootporno zavarivanje sa svojim podvrstama, lasersko zavarivanje, MIG/MAG zavarivanje, TIG zavarivanje te zavarivanje trenjem, slika 4.1. Uz zavarivanje, primjenjuje se i lijepljenje te zakivanje. Među navedenim postupcima prevladava podvrsta elektrootpornoga zavarivanja – elektrootporno točkasto zavarivanje. Uz taj postupak, pred drugima prednjači i postupak MIG/MAG zavarivanja. Pri odabiru postupka kojim će se određeni dio zavarivati, postoje razni kriteriji. Primjerice, najvažnijim se smatra postizanje pouzdanih pravilno izvedenih zavara. Ono što u svakome ranije spomenutom segmentu ima veliku ulogu pri odabiru metoda jest ekonomičnost metode tj. postupka. Dakako, osim navedenih, jako su bitni i ovi uvjeti prilikom odabira prikladne metode: tehnologije i iskustva tvrtke, kvaliteta i sposobnost radnika, vrste materijala koje se spajaju, pristupačnost mjestu zavarivanja, strukturni aspekti, zahtjevi za održavanjem te investicijski i operativni troškovi (Janota i Neumann, 2008) i posljednji, ali ne i manje važan kriterij estetskoga izgleda zavara.

Slika 4.1. Usporedba postupaka zavarivanja



Izvor: 13. 6. 2024., <https://www.albo.ba/blog/tipovi-zavarivanje-i-najcesci-rizici-od-povrijeda.html>

## 4.1. Elektrolučno zavarivanje

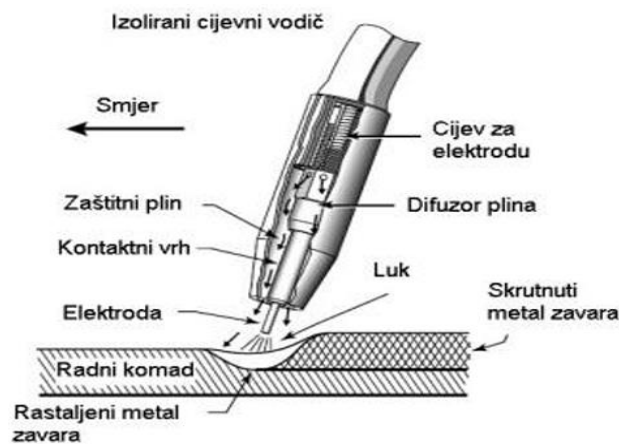
Elektrolučno zavarivanje postupak je pri kojemu se stvara toplina za taljenje i spajanje metala uz pomoću električnoga luka. Napajanje stvara električnu energiju za luk između elektrode i osnovnoga materijala. Temperatura koju stvara električni luk može iznositi sve do 3593°C. S obzirom na to da su metali reaktivni, osobito u doticaju s dušikom i kisikom, tijekom zavarivanja koristi se zaštitni plin u svrhu minimalizacije kontakta zraka i taljenoga metala. Takvi rastopljeni metali nakon hlađenja čine zavareni spoj. MIG/MAG i TIG zavarivanje najkorišteniji su postupci zavarivanja u automobilskoj industriji.

### 4.1.1. MIG/MAG zavarivanje

MIG ili Metal Inert Gas i MAG ili Metal Active Gas postupci zavarivanja uvrštavaju se u takozvane Gas Metal Arc Welding postupke. MIG je zavarivanje inertnim, a MAG zavarivanje aktivnim plinom. U obama se postupcima koristi toplina nastala električnim lukom između obratka i metalne elektrode (Garišić, 2020). I MIG i MAG zavarivanje koristi se za osiguravanje zaštitnoga plina plinske boce i odgovarajuće materijale kojima se pune, poput aluminija ili čelične žice.

Kada se za postupak kao zaštitni plinovi koriste neutralni ili inertni plinovi poput argona, helija ili mješavina, tada se postupak naziva MIG zavarivanje. S druge strane, kada se za postupak koriste aktivni plinovi, primjerice CO<sub>2</sub>, postupak se naziva MAG zavarivanje (<https://var.rs/sve-o-zavarivanju/migmag-zavarivanje-co2-zavarivanje/>). Dakle, zaključak je da je zapravo jedina razlika između ovih dvaju postupaka zavarivanja odabir zaštitnoga plina. Na slici 4.2. vidi se presjek postupka zavarivanja pištoljem.

Slika 4.2. Presjek zavarivanja pištoljem



Izvor: 13. 6. 2024., Bajs Marko, Završni rad, Provjera i specifičnosti modificiranih MAG postupaka, FSB, Zagreb 2013.

Zaštitni je plin iznimno važan zbog svojega utjecaja na ponašanje rastaljenoga materijala, ali i zbog utjecaja na stabilnost luka, stupanj prskanja te prijenos materijala. Izolirani polikabel, izvor struje, oprema za dovod žice, plinska boca s regulatorom, spremnik sredstva za hlađenje i sustav za automatsko pomicanje pištolja izravno utječu na kvalitetu zavarivanja automatskim sustavom kod MIG/MAG postupaka zavarivanja (Garašić, 2020). Značajan utjecaj ima i način prijenosa metala sa žice na radni dio koji se može odvijati na sljedeće načine: impulsnim strujama, kratkim spojem ili štrcajućim lukom. Pri visokim strujama zavarivanja koristi se prijenos štrcajućim lukom, a za rad slabim strujama koristi se prijenos kratkim spojem ili impulsnim strujama. Ovaj je postupak zavarivanja vrlo dobro automatiziran i ima široku mrežu korištenja, a koristi se i za postizanje kvalitetnih zavara. U automobilskoj industriji ponajprije se koristi za zavarivanje čeličnih dijelova debljine iznad dvaju milimetara.

Kako bi se učinkovitost postupka zavarivanja maksimalizirala, potrebno je dobro ujednačiti parametre koji utječu na postupak: brzinu zavarivanja, duljinu žice, električni induktivitet, napon, položaj pištolja, vrstu zaštitnoga plina. Promjer žice i induktivitet neposredno utječu na struju, stoga postoji mogućnost pojave prodora. Brzina kojom električni luk prolazi duž spoja podrazumijeva brzinu zavarivanja – veća brzina, manji zavar.

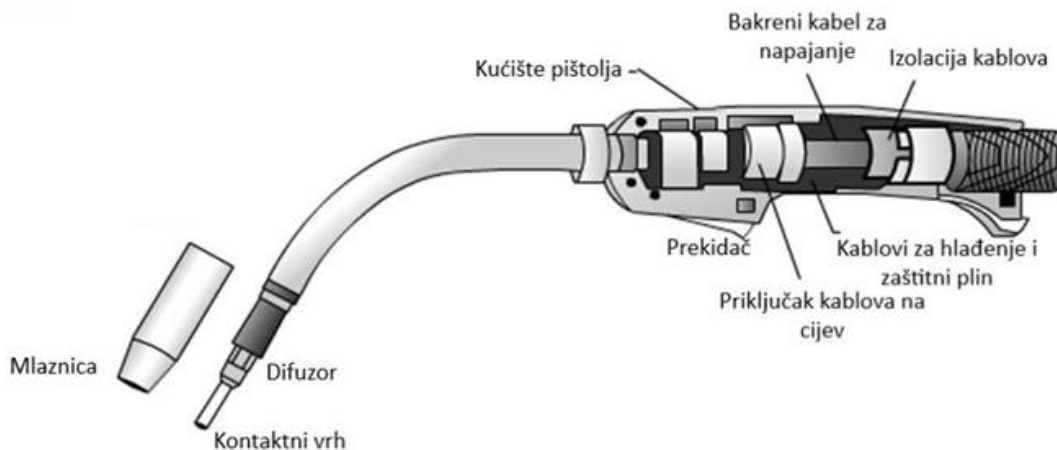
Izvor napajanja dio je neizostavne opreme kod postupka zavarivanja. Izvor služi za opskrbljivanje zone zavarivanja materijalom i održavanje električnoga luka.

Za razliku od TIG postupka, kod MIG/MAG postupka postoje dva parametra napajanja. Jedan regulira intenzitet električnoga luka dok drugi regulira brzinu napajanja žice za zavarivanje.

Dodavač žice pokreće motor, a osnovni mu je cilj gurnuti žičanu elektrodu van, odnosno prema zoni zavarivanja. Podešavanjem regulatora motora odvija se odabir brzine kojom će se žica dodavati. Zadana brzina dodavanja žice podrazumijeva određenu brzinu taljenja, a upravo ona definira vrijednost struje zavarivanja.

Važno je odabrati i prikladan pištolj za zavarivanje, slika 4.3, a potrebno je da ispunjava određene kriterije, primjerice da bude što manji i lakši za rad u uskim prostorima. Pištolj se tijekom zavarivanja zagrijava, zato ga je potrebno ohladiti nekom tekućinom ili, pak, plinom. U pištoljima za zavarivanje hlađenim plinom zaštitni plin koji teče do pištolja kroz kabel za zavarivanje istodobno djeluje kao hladilo pištolja.

Slika 4.3. Pištolj za zavarivanje



Izvor: 15. 6. 2024., Milan Milotić, BCD elektro priručnik za zavarivanje, 2014.

#### 4.1.2. TIG zavarivanje

TIG postupak zavarivanja temelji se na stvaranju električnoga luka između netaljive volframove elektrode i radnoga materijala. Premda je ovaj postupak isprva razvijen u svrhu zavarivanja magnezija i njegovih legura, imao je ključnu ulogu u postavljanju aluminija kao visokokvalitetnoga zavarivačkog metala. Budući da je i ovdje za potpuno zavarivanje potreban zaštitni plin, u tu se svrhu koriste plinovi helij i argon jer dobro štite vrh elektrode i talinu od upijanja ili taloženja s drugim plinovima. Unatoč tomu što ovakav postupak zavarivanja nije ekonomski najisplativiji, velika je potrošnja materijala, a mala brzina zavarivanja.

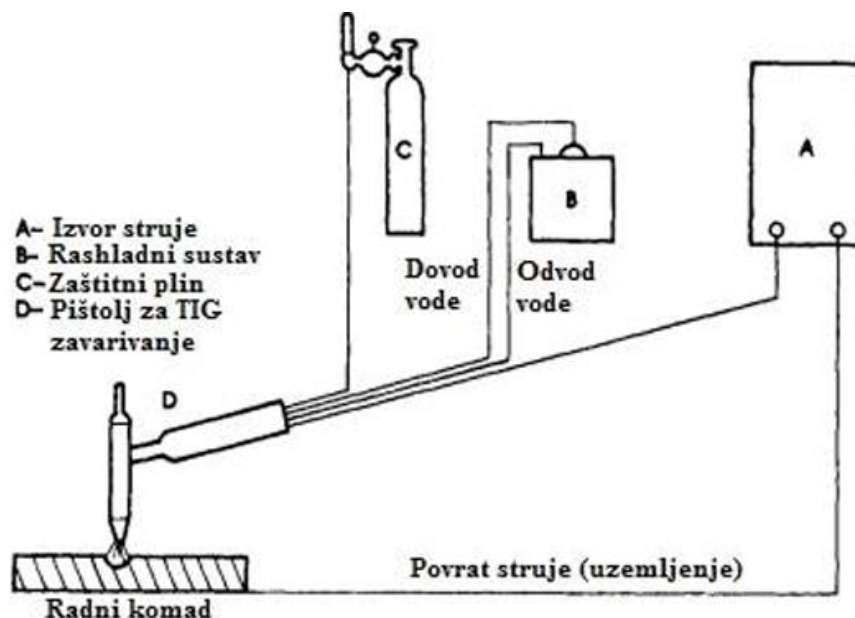
Električni je luk zapravo odgovoran zato što je upravo postupak TIG zavarivanja savršen za visoko kvalitetno i precizno zavarivanje. TIG zavarivanje može se izvesti u svim radnim

položajima te omogućuje zavarivanje radnih komada čija debljina iznosi i manje od jednoga milimetra (<https://www.zavarivanje.info/cd/2689/osnovni-postupci-zavarivanja>).

Za postupak TIG zavarivanja potreban je konstantan izvor istosmjerne ili izmjenične struje. Bitno je tijekom postupka izbjegavati velike jakosti struje jer tada dolazi do mogućnosti oštećivanja vrha elektrode. Važnu ulogu kod TIG zavarivanja ima uspostavljanje luka. Luk se može uspostaviti grebanjem po površini pri čemu se stvara kratki spoj. Struja zavarivanja teći će kad se prekine kratki spoj.

Od opreme kod TIG zavarivanja potreban je izvor napajanja, kabeli odgovarajuće veličine za provođenje struje, pištolj za zavarivanje, spremnik internoga zaštitnog plina pod tlakom (Muncaster, 1991), slika 4.4.:

Slika 4.4. Oprema za TIG zavarivanje



Izvor: 5. 6. 2024., Muncaster P. W.: A Practical Guide to TIG (GTA) Welding - Woodhead Publishing (1991)

Parametri koji imaju utjecaj na kvalitetu i ishod postupka TIG zavarivanja:

- Brzina zavarivanja – ako se poveća brzina zavarivanja, smanjuje se ulazna snaga ili toplina po jedinici duljine zavara pa se posljedično smanjuje i penetracija zavara. Brzinom zavarivanja kontrolira se penetracija i veličina zavara (Mohan, 2014).
- Inertni plinovi – izbor zaštitnoga plina ovisi o metalu radnih komada te utjecaju koji ima na brzinu zavarivanja, cijenu zavarivanja, stabilnost luka, temperaturu zavarivanja i životni vijek elektrode. Najkorišteniji su plinovi argon i helij.

- Napon zavarivanja – ovisi o opremi koja se koristi za postupak, a može biti konstantan ili podesiv. Previsok napon dovodi do enormnih promjena u postupku.
- Struja zavarivanja – veća jakost struje dovodi do oštećenja radnoga komada dok niža vrijednost struje može dovesti do sljepljivanja dodatnoga materijala.

## **4.2. Elektrootporno zavarivanje**

Elektrootporno zavarivanje postupak je u kojemu se metali spajaju primjenom tlaka provodeći snažnu električnu struju kroz metal kako bi zagrijali spoj i talili osnovni materijal pri čemu se stvara zavareni spoj. To je ujedno jedan od najkorištenijih postupaka zavarivanja. Izumio ga je 1886. godine američki inženjer i izumitelj Elihua Thomsona (Janota i Neumann, 2008). Proces elektrootpornoga zavarivanja jednostavniji je postupak od ostalih, ali i ekonomski isplativiji, a nisu mu potrebni ni dodatni materijali, zavareni spoj nastaje uz pomoć djelovanja sile određenoga iznosa na elektrode.

Elektrode služe za provođenje struje visokih jakosti, poticanje kontakta između obradaka te za usmjeravanje struje na željeno mjesto spoja. Istiskivanje iz spoja sprječava pritisak elektrode koji rastaljeni metal zadržava na mjestu spoja. Na kraju, potičući brže hlađenje zavara, elektrode odvede toplinu iz zone zavarivanja. Da bi se sila mogla prenositi elektrodama, potreban je pristup s obje strane obratka.

Najpoznatiji su postupci elektrootpornoga zavarivanja elektrootporno točkasto zavarivanje, elektrootporno bradavičasto zavarivanje i elektrootporno šavno zavarivanje. To su postupci kod kojih utjecaj imaju materijal elektrode, konfiguracija vrha elektrode, sila elektrode, struja zavarivanja i vrijeme zavarivanja.

Ovi postupci elektrootpornoga zavarivanja koriste se isključivo za spajanje metala do debljine koja iznosi maksimalno 4,8 milimetara (Jenney i O'Brien, 2001). Elektrootporno zavarivanje koristi se za proizvodnju mnogih dijelova automobila, primjerice kotača, sjedišta, kućišta, lampica, raznih spojeva.

### **4.2.1. Elektrootporno točkasto zavarivanje**

Elektrootporno točkasto zavarivanje postupak je u kojemu se barem na jednome mjestu, a najčešće i na više njih, uz pomoć topline nastale uslijed električnoga otpora, spajaju radni komadi. Ovaj se postupak zavarivanja većinom koristi za zavarivanje dvaju ili više limova čija



debljina iznosi između 0,7 i tri milimetra, a najdeblji spoj koji je moguće spojiti na ovaj način iznosi čak i do šest milimetara.

Postupak se odvija tako da se elektrode izrađene od legure bakra dodiruju s površinama limova, pri čemu se primjenjuje tlak i električna struja, a toplina nastaje prolaskom struje kroz otporne materijale.

Elektrode su izrađene od legure bakra jer su izvrsni vodiči topline. Za postupak se koristi istosmjerna ili izmjenična struja, a ako se želi postići kvalitetniji zavar, onda se koristi i trofazno napajanje. Takav se način napajanja koristi pri izradi karoserija automobila (Hlevnjak, 2016).

Količina nastale topline ovisi o toplinskoj vodljivosti i električnome otporu metala, kao i o trajanju primjene struje:  $Q = I^2 R t$ .  $Q$  označuje toplinsku energiju,  $I$  jakost struje,  $R$  električni otpor, a  $t$  vrijeme.

Poznati su i parametri elektrootpornoga točkastog zavarivanja koji su u međusobnoj ovisnosti: promjenom jednoga, mijenja se i drugi. Ovo su neki od njih: dimenzije vrha elektrode, sila na elektrodi, struja, vrijeme držanja, vrijeme pritiska i vrijeme zavarivanja. Struja, vrijeme zavarivanja i sila koja se primjenjuje parametri su s najvećim utjecajem.

Elektrootporno točkasto zavarivanje najčešće je korišten postupak zbog jednostavnosti kojom se može automatizirati u kombinaciji s robotima. Osim toga, vrlo je važan segment u odabiru procesa ekonomičnost, a ovaj postupak tu prednjači. Za jednostavnost i ekonomičnost postupka nisu potrebne stručne osobe za njegovo izvođenje. Nasuprot tomu, točkasto zavarivanje ima i određene nedostatke, primjerice troškove instalacija i mogućnost zavarivanja samo tankih metala. Unatoč nedostacima, prevladavaju prednosti te se, osim u automobilskoj industriji, ovaj postupak zavarivanja koristi i u građevinarstvu, zrakoplovstvu, proizvodnji namještaja, bijele tehnike i sl. Na slici 4.5. prikazan je uređaj koji se koristi za elektrootporno točkasto zavarivanje.

Slika 4.5 Uređaj za elektrootporno točkasto zavarivanje

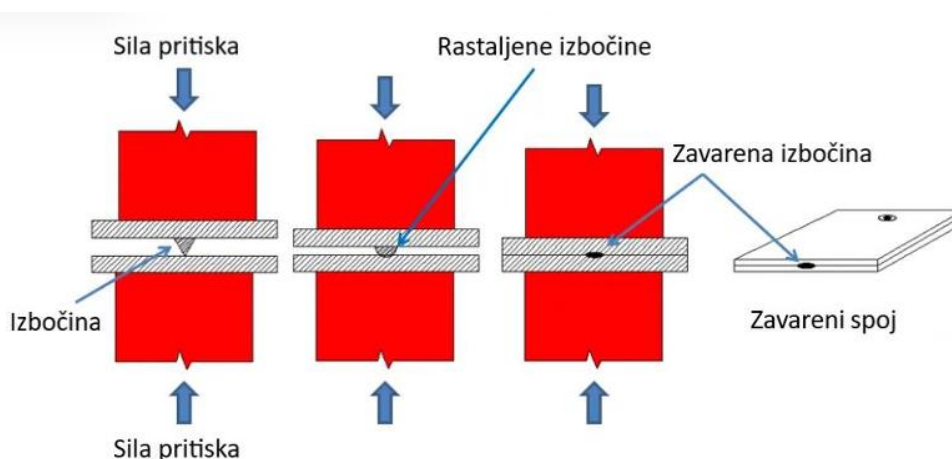


Izvor: 10. 6. 2024., <https://servus.hr/proizvodi/zavarivanje/tv-10-30-pks/>

#### 4.2.2. Elektrootporno bradavičasto zavarivanje

Elektrootporno bradavičasto zavarivanje postupak je koji je dobio ime upravo po tome što su sila i vrijeme zavarivanja usredotočeni na tzv. bradavice koje se nalaze po površini, a one mogu biti izdužene, okrugle ili rupičaste. Između dviju elektroda postavljaju se metalni dijelovi koji se spajaju, a na elektrodama se primjenjuje sila pritiska. Pri prolasku struje kroz sustav dolazi do stvaranja topline zbog unutarnjega otpora metalnih dijelova. Toplinska se energija oslobađa zbog spomenutoga otpora površine spajanja (Garašić, 2020). Izbočine koncentriraju toplinu i urušavaju se te dolazi do stvaranja zavarenoga spoja. Shematski prikaz nastanka zavarenoga spoja postupkom bradavičastog zavarivanja prikazan je na slici 4.6.

Slika 4.6 Nastanak spoja postupkom bradavičastoga zavarivanja



Izvor: 10. 6. 2024., <https://www.theweldingmaster.com/what-is-projection-welding-working-principle-advantages-disadvantages-and-application/>

Na jednome od metala izbočina stvara spoj, nakon čega se ti metali drže pod elektrodama, a sila djeluje okomito na njih. Upravo povećanjem te sile izbočine se utiskuju te nastaje zavar na površini. Izbočine nemaju karakterističan oblik, mogu biti raznolike, a najčešće se koristi sferični i konusni oblik.

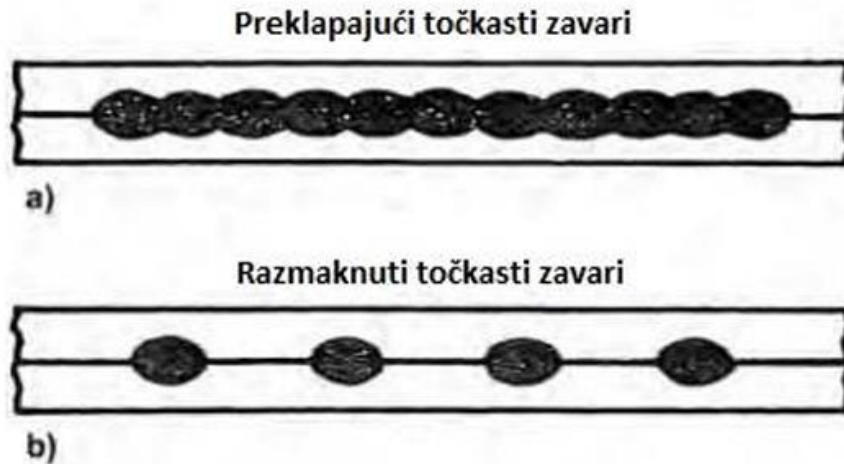
Kao i svaki postupak, i bradavičasto zavarivanje ima prednosti i nedostatke. Osnovne su prednosti, zbog kojih se (pored automobilske industrije) ovaj postupak koristi i u građevinarstvu, što zahtijeva malu opskrbu strujom, a postupak je učinkovit bez obzira na debljinu metala te učinkovito zavaruje i složene spojeve. S druge strane, kao najveći nedostatak navodi se neprimjenjivost postupka za materijale poput bakra i sličnih legura, ali i to što je vremenski vrlo zahtjevan.

### **4.2.3. Elektrootporno šavno zavarivanje**

Elektrootporno šavno zavarivanje zapravo je inačica ranije spomenutoga elektrootpornog točkastog zavarivanja. Ono predstavlja postupak kod kojega se zavar proizvodi prilikom prolaska električne struje kroz materijale za zavarivanje koji se drže pod mehaničkom silom između oblikovanih bakrenih elektroda. Mjesto na kojemu se površine dodiruju točka je najvećega otpora, ali i najveće temperature, stoga se fuzija odvija točno na tom mjestu. Pomoću aparata namijenjenoga šavnome zavarivanju mogu se izraditi dvije vrste spoja.

Spoj može biti kontinuirani i hermetički, slika 4.7. Osim toga, uređaj za šavno zavarivanje može proizvesti i niz točkastih zavora koji se međusobno ne preklapaju unatoč tomu što se tako dobiveni zavar ne može u potpunosti nazvati šavnim zavarom, ali se postupak može izvesti na standardnome uređaju za šavno zavarivanje (Lienert i sur. 2011).

Slika 4.7 Vrste spojeva šavnoga zavarivanja



Izvor: 10. 6. 2024., T. J. Lienert, S. Suresh Babu, T. A. Siewert i V. L. Acoff, ASM Metals HandBook Vol.

6A - Welding Fundamentals and Processes, Ohio: ASM International, 2011.

Uvjeti kod šavnoga i točkastoga zavarivanja poprilično su slični, poput utjecaja vremenskoga intervala protoka struje i sile pritiska, a različitost je u posljedicama kretanja radnoga komada u odnosu na elektrodu. Ipak, neprekidno šavno zavarivanje nije učestalo u primjeni jer se lako oštećuje radni komad te se ubrzano troši elektroda. Uređaji za šavno zavarivanje slični su onima koji se koriste za točkasto zavarivanje s tim da imaju veću snagu zbog izraženije pojave skretanja struje, a moraju omogućiti i kretanje elektroda.

Elektrotoporno šavno zavarivanje izrazito je popularan postupak zavarivanja u automobilskoj industriji, ali i svim ostalim industrijama u kojima je potrebno da zavareni spoj bude izveden hermetički. Najčešću primjenu u automobilskoj industriji pronalazi u proizvodnji katalizatora, spremnika za gorivo, ispušnih lonaca te krovnih spojeva premda se koristi i u proizvodnji raznih dijelova (Jurišić, 2020). Osim toga, popularni se postupak koristi u proizvodnji više vrsta limenki.

Jačina i vrijeme djelovanja struje, brzina zavarivanja, promjer i korak točaka te sila pritiska parametri su koji imaju utjecaj na elektrotoporno šavno zavarivanje.

Kao i svaki postupak, i ovaj ima svoje prednosti poput dobivanja hermetičkoga spoja i brzine postupka, ali i nedostatke poput ograničene crte zavarivanja i smanjene kvalitete prilikom zavarivanja debljih spojeva.

### 4.3. Zavarivanje trenjem

Zavarivanje trenjem postupak je koji se odvija u čvrstome stanju, a toplina potrebna za izvršavanje postupka stvara se gibanjem dvaju radnih komada koji se spajaju. Postupak se provodi pomoću relativnoga kretanja jedne komponente s obzirom na drugu, uzduž dodirne površine, uz primjenu sile pritiska na mjesto spajanja. Toplina koja nastane uslijed takvoga trenja omekša materijal te ga čini plastičnim, a materijal s površine biva istisnut izvan rubova spoja te na taj način dolazi do zavarivanja tzv. čistoga materijala (Vaamonde i sur. 2010). Pomoću ovoga postupka spajaju se raznovrsni materijali. Izrazito je privlačan proizvođačima u automobilskoj industriji jer se zbog njegove mogućnosti zavarivanja različitih materijala omogućuje reduciranje mase automobila što je u suvremenoj autoindustriji jedan od osnovnih uvjeta.

Zavarivanje trenjem podrazumijeva stvaranje topline frikcijskom abrazijom, odvođenje topline, plastičnu deformaciju i kemijsku interdifuziju. Povezanost svih navedenih čimbenika tijekom zavarivanja trenjem komplicira razvoj prediktivnih modela za ovaj postupak zavarivanja (Lienert i sur. 2011). Nekoliko je vrsta zavarivanja trenjem. Okretno zavarivanje trenjem i zavarivanje trenjem rotirajućim alatom najčešće su.

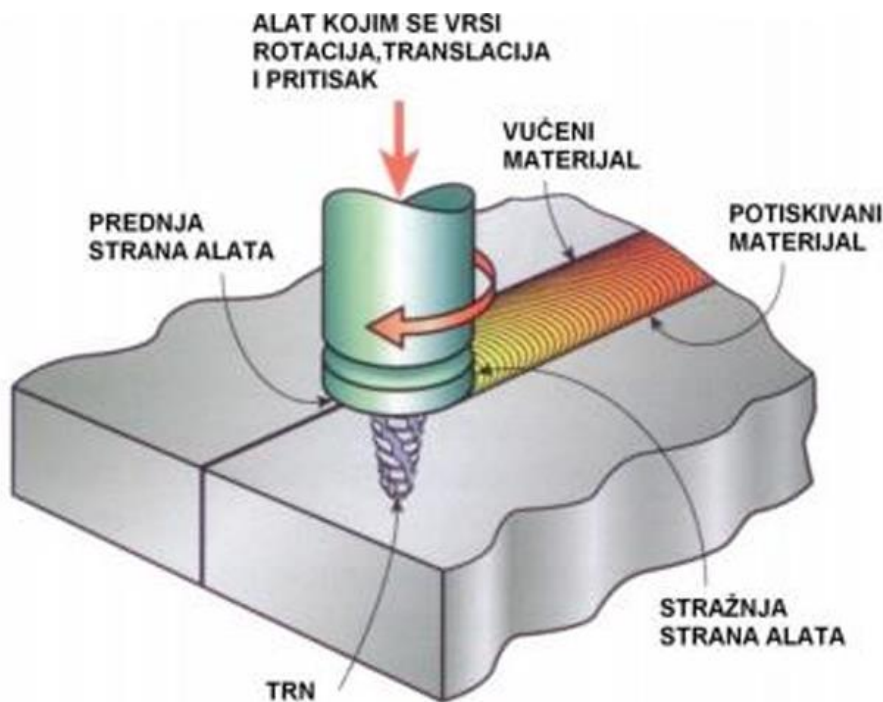
Okretno zavarivanje trenjem proces je u kojemu se, kako i sam naziv kaže, dio koji se zavaruje okreće u odnosu na drugi dio. Broj okretaja u minuti prilikom toga postupka može dosezati čak do nekoliko stotina tisuća.

Kada se postigne potrebna temperatura, rotacija prestaje, a pritisak na radni komad povećava se kako bi se dobio zavar. Glavni su parametri zavarivanja aksijalni tlak, brzina vrtnje te vrijeme zavarivanja. Njih se regulira kako bi se osigurala kombinacija topline i tlaka potrebna za stvaranje zavara (Janota i Neumann, 2008). Aksijalna se sila koristi za stvaranje kontakta površina koje se zagrijevaju. U završnoj fazi postupka dolazi do atomske difuzije te se tako omogućuje veza između materijala.

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom postupak je u kojemu trenje nastaje kao posljedica gibanja alata pritisnutoga uz dijelove koji se spajaju. Kako bi postupak bio uspješan, materijal koji provodi toplinu i putem kojega dolazi do dinamičkoga miješanja treba biti tvrdi od osnovnoga materijala. Ovaj je postupak specifičan po tome što pri njegovu izvođenju ne dolazi do nastanka taline.

Može se primjenjivati u svim položajima ako konfiguracija opreme to dopušta. Tijelo alata i trn osnovni su dijelovi alata kojim se izvodi postupak zavarivanja trenjem rotirajućim alatom. Trn alata služi za miješanje i povezivanje materijala. Postupak kojim se izvodi prikazan je na slici 4.8. Na proces zavarivanja trenjem rotirajućim alatom utječu parametri zavarivanja, geometrija i oblik alata te oblik spoja (Bušić, 2015). Kao parametre zavarivanja uključujemo sljedeće: brzinu rotacije alata  $\omega$ , min-1; brzinu zavarivanja  $v$ , mm/min; nagib alata prema osnovnom materijalu  $\alpha$ ; silu pritiska alata na materijal  $F_N$ , kN.

Slika 4.8 Postupak zavarivanja trenjem rotirajućim alatom



Izvor: 12. 6. 2024., Bušić, M.: Zavarivanje trenjem aluminijskih sendvič panela rotirajućim alatom –

Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

#### 4.4. Lasersko zavarivanje

Lasersko zavarivanje postupak je u kojemu se metal tali zbog topline kojoj je uzrok koncentrirana, monokromatska, koherentna svjetlost usmjerena k površini na kojoj se spaja. Ovaj je postupak dobio ime po laseru, odnosno njegovu prijevodu početnih slova s engleskoga jezika: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Cilj je postupka usmjeriti lasersku zraku na površinu radnoga komada čiju će energiju komad kasnije apsorbirati i pretvoriti u toplinu (Vaamonde Couso i Vázquez Gómez, 2011).

Lasersko se zavarivanje odvija u atmosferi zaštitnoga plina (He, Ar, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, plinske mješavine). Laser uzrokuje velike brzine u zagrijavanju i hlađenju, a generira i svjetlost s posebnim svojstvima: jedna valna duljina, mala divergencija, valovi iste amplitude i faze (Bauer, 2016). Laserska se svjetlost razlikuje od obične po tomu što se laser može usredotočiti i na točku čiji je promjer manji od jednoga milimetra. Laseri se razlikuju prema vrsti aktivnoga laserskog materijala u kojemu se događa pojačanje svjetlosti. Razlikuju se dva načina laserskoga zavarivanja koja ovise o gustoći snage laserske zrake na površini spoja: zavarivanje taljenjem te zavarivanje protaljivanjem, slika 4.9.

Zavarivanje taljenjem podrazumijeva apsorpciju energije laserske zrake površinom materijala i posljedični prijenos energije u okolni materijal. Ovaj se način zavarivanja uobičajeno odnosi na nisku gustoću energije čiji je iznos manji od 106 Wmm<sup>-2</sup>. Zavari nastali laserskim zavarivanjem taljenjem odlikuju se malim omjerom dubine i širine. Ovaj je način zavarivanja dobar za spajanje tankih dijelova čija debljina iznosi između 0,025 i 1,5 milimetar te za izradu finih zavara pri maloj snazi ili za spajanje debljih dijelova, debljine do tri milimetra, za čije se spajanje koristi veća snaga.

Zavarivanje protaljivanjem postupak je kod kojega je snop fokusiran na površinu radnoga predmeta s ciljem generiranja energije visoke gustoće koja uzrokuje isparavanje materijala. Uslijed višestrukoga unutarnjeg odbijanja snopa nastaje ključanica, a oko nje dolazi do taljenja metala. Kako se pomiče toplinski izvor, krater se popunjava talinom te iza snopa dolazi do njezina skrućivanja i nastajanja zavarenoga spoja. Zavarivanje protaljivanjem najčešće je korišten način laserskoga zavarivanja jer je postupak pogodan za zavarivanje debljih sekcija koje zahtijevaju duboku penetraciju (Vaamonde Couso i Vázquez Gómez, 2011).

Slika 4.9 Tehnike zavarivanja laserom



Izvor: 12. 6. 2024., Karaga Ivan, Diplomski rad, Analiza primjene tehnike njihanja pri robotiziranom MAG zavarivanju, FSB Zagreb, 2015.

Parametri laserskoga zavarivanja jesu brzina zavarivanja, promjer sapnice, promjer žarišta, položaj žarišta, snaga lasera i udaljenost sapnice od radnoga materijala. Ovaj se postupak redovito primjenjuje u autoindustriji zbog niza prednosti nad ostalim postupcima zavarivanja kao što su gotovo zanemariva zona utjecaja topline na okolni metal, velike brzine rada, visokokvalitetni zavari i jednostavna automatizacija procesa. Zbog niza svojih prednosti visoka cijena ovoga postupka gotovo je zanemarena te se ovaj postupak vrlo često primjenjuje u proizvodnji dijelova u automobilskoj industriji.

#### 4.5. Lijepljenje i zakivanje

Tehnologija zavarivanja i tehnologija lijepljenja vrlo su slične. Obje se navedene tehnike koriste za stvaranje nerazdvojivih spojeva, ali u različitim situacijama. Lijepljenjem se najčešće spajaju nemetalni materijali, a ponekad i legure lakih metala. Lijepljenje je izuzetno fleksibilan postupak, a primjena postupka izraženija je kod materijala osjetljivijih na povećanje temperature, primjerice kod različitih prirodnih materijala ili plastike (Žolo, 2008). Tehnologija lijepljenja rjeđe se koristi zbog niskih vrijednosti čvrstoće spoja. Poznato je da lijepljeni spoj najčešće ima lošija mehanička svojstva od osnovnoga materijala. Međutim, to nije slučaj kod zavarenih spojeva – kod njih zavar uvijek mora imati bolja mehanička svojstva od osnovnoga materijala. Osim zbog slabijih mehaničkih svojstava, konstruktori vrlo često izbjegavaju lijepljenje spojeva zbog teškoga određivanja dopuštenih naprezanja i sila kojima



lijepljeni spoj biva opterećen. Kao prednost lijepljenih spojeva navodi se nepropusnost i otpornost na koroziju te služe kao dobar izolator jer ne provode električnu energiju.

S druge strane, spojevi koji nastaju zakivanjem, za razliku od onih koji nastaju lijepljenjem, nerastavljivi su. Zakivanje se obavlja većinom na limovima, profilima te šipkastome materijalu na kojima su prethodno izbušeni odgovarajući provrti. Takav spoj nastaje korištenjem zakovica koje na prikladan način spajaju dijelove. Ipak, takav se spoj najčešće zamjenjuje zavarenim spojem, a postupak zakivanja primjenjuje se pri spajanju lakih metala (Gojić, 2008).

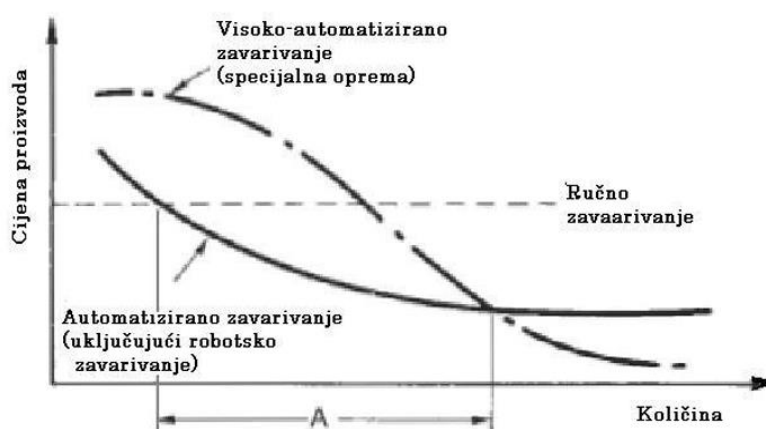
## 5. ROBOTIZACIJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

U današnje vrijeme četvrte industrijske revolucije, kada se procesi nastoje što više automatizirati, ni automobilska industrija nije iznimka. Uporabom robota postupak zavarivanja u automobilskoj industriji postao je automatiziran (Krstulović, 2003). Za automatizaciju su zaslužni industrijski roboti nove generacije. Zbog njih su montažne linije postale brže, proces isplativiji i sigurniji, a time i učinkovitiji.

### 5.1. Primjena robota u zavarivanju

Ekonomska isplativost, sigurnost i učinkovitost osnovni su razlozi zbog kojih su roboti preuzeli primat u automobilskoj industriji. Roboti su ekonomski isplativi jer nemaju radno vrijeme, mogu raditi 24 sata dnevno, sedam dana u tjednu. Jedino se ulaganje odnosi na njihovu proizvodnju, tj. kupnju, a ne iziskuju ni mjesečne plaće. Sigurnost, proces zavarivanja, a time i proizvodnja, posljedica su njihove gotovo stopostotne preciznosti jer se mogućnost pogreške uporabom robota gotovo posve uklonila. Također, mogućnost ozljeda na radu nepostojeća je jer se robot ne može ozlijediti. Roboti su, dakle, ispunili očekivanje industrije. Oni koji se koriste u automobilskoj industriji mogu dovršiti razne zadatke u malo vremena, primjerice bojanje, zavarivanje, dorade i mnoge druge. Robotsko zavarivanje ključan je proces u proizvodnji novih, naprednih i visokokvalitetnih automobila. Na slici 5.1. shematski je prikazana učinkovitost različitih oblika zavarivanja.

Slika 5.1. Shematski prikaz učinkovitosti postupaka zavarivanja



Izvor: 21. 6. 2024., Garašić, I.: Tema Elektrootporno zavarivanje – Postupci zavarivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.

Područje koje prikazuje linija A predstavlja područje najprikladnije za uporabu robota. Područje prije linije A, tj. lijevo od linije, predstavlja područje u kojemu je najbolje zavarivati ručno. Nakon linije A, odnosno s desne strane od linije, prikazano je područje masovne proizvodnje u kojemu su automatizirani procesi prikladni za korištenje.

Prilikom izbora robotske ruke treba unaprijed razmisliti o tehnologiji kojom će se spajati proizvodi, odnosno treba osmisliti proizvod tako da krivulje koje robot stvara prilikom zavarivanja budu što jednostavnije. Ako je pokret kompliciraniji, veća je vjerojatnost da će robot imati više stupnjeva slobode. Ponekad se čini nebitnim hoće li robot imati tri ili četiri stupnja slobode, međutim razlika u cijeni između robota s trima stupnjevima i onoga s četirima stupnjevima slobode uzrokuje eksponencijalni porast cijene. Takav rast cijene opravdava da robot s trima stupnjevima slobode nije ni približno komplicirano regulirati i sinkronizirati kao onaj sa šest stupnjeva slobode.

## 5.2. Roboti za elektrolučno zavarivanje

Robotski sustav koji zavaruje postupkom elektrolučnoga zavarivanja čine dva podsustava: jedan je sustav robot koji omogućuje pozicioniranje izvora topline i dijela koji se zavaruje, dok drugi čini oprema za zavarivanje koja prenosi energiju od izvora energije za zavarivanje do dijela za zavarivanje. Premda se uobičajeno koriste industrijski roboti sa šest osi, koji posjeduju sve dijelove potrebne za trodimenzionalno zavarivanje, mnogi su proizvođači proizveli ekonomski i prostorno prihvatljivije robote za elektrolučno zavarivanje. Daljnjim razvojem robotike, proizveden je i sedmoosni robot, slika 5.2., za zavarivanje kojemu upravo ta sedma os osigurava dodatnu fleksibilnost i štedi prostor.

Slika 5.2. Sedmoosni robot



Izvor: 27. 6. 2024., <https://www.twi-global.com/>

Manipulatori radnoga dijela u proizvodnoj okolini koriste se kao dio robotiziranoga sustava. Upravljanje manipulatorom često je integrirano s upravljanjem robota, što omogućuje sinkroniziranu i istodobnu kontrolu dvaju mehanizama. Robotsko zavarivanje sveobuhvatna je kombinacija robotike, senzorske tehnologije, zavarivanja, upravljačkih sustava i umjetne inteligencije. Robotsko je zavarivanje postalo ključno za razvoj suvremenih sustava zbog sve većih zahtjeva za poboljšanje fleksibilnosti, kvalitete i produktivnosti.

Za mjerenje i promatranje parametara procesa koriste se senzori, a za robotsko zavarivanje elektrolučnim postupkom koriste se dvije vrste senzora ovisno o funkcijama (Joseph, 2009): geometrijski i procesni. Geometrijski služe za traženje zavora i praćenje šavova dok procesni mjere parametre zavarivanja kao što su struja, brzina uvlačenja žice, rotacija plamenika i slično. Korištenje senzora ometaju razni čimbenici, stoga je i dalje izazovno u potpunosti im se okrenuti u svim uvjetima rada. Prednosti korištenja robota neporecive su, međutim ono što otežava proces težnje k potpunoj robotizaciji problem je složenosti programiranja robota.

### **5.3. Roboti za elektrootporno zavarivanje**

Korištenjem robota i alata automatizira se proces elektrootpornoga zavarivanja. Šestoosni roboti, slika 5.3., najčešće se koriste za automatizaciju takvoga postupka, prvenstveno za zavarivanje zakrivljenih površina na automobilskim karoserijama. Preciznost i točnost karakteristike su zbog kojih se koriste za zavarivanje. Tim se postupkom proizvede više točkastih zavarivanja bez odstupanja i većom brzinom od ručnih zavarivača.

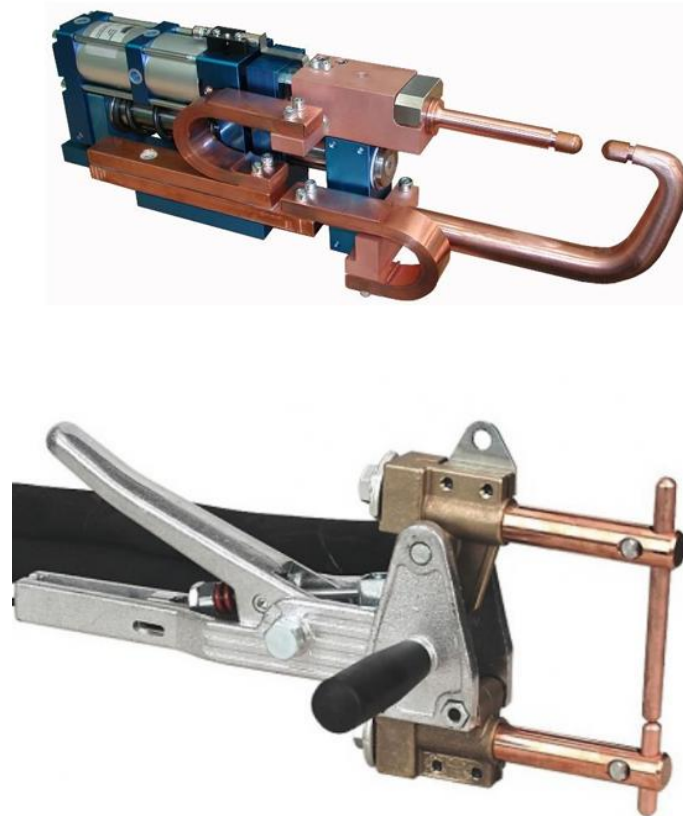
Slika 5.3. Šestoosni robot za zavarivanje



Izvor: 28. 6. 2024., <https://www.twi-global.com/>

Uz robote koriste se i pištolji za zavarivanje. U postupku elektrootpornoga zavarivanja koristi se servo pištolj koji pokreću hidraulički i pneumatski akumulatori. Pištolj se najviše koristi zbog nižih zahtjeva za održavanje i manjega trajanja ciklusa. Uz pištolj koristi se i nekoliko vrsta kliješta za zavarivanje, najčešća su C-tip i X-tip kliješta, slika 5.4.

Slika 5.4. C-tip i X-tip kliješta

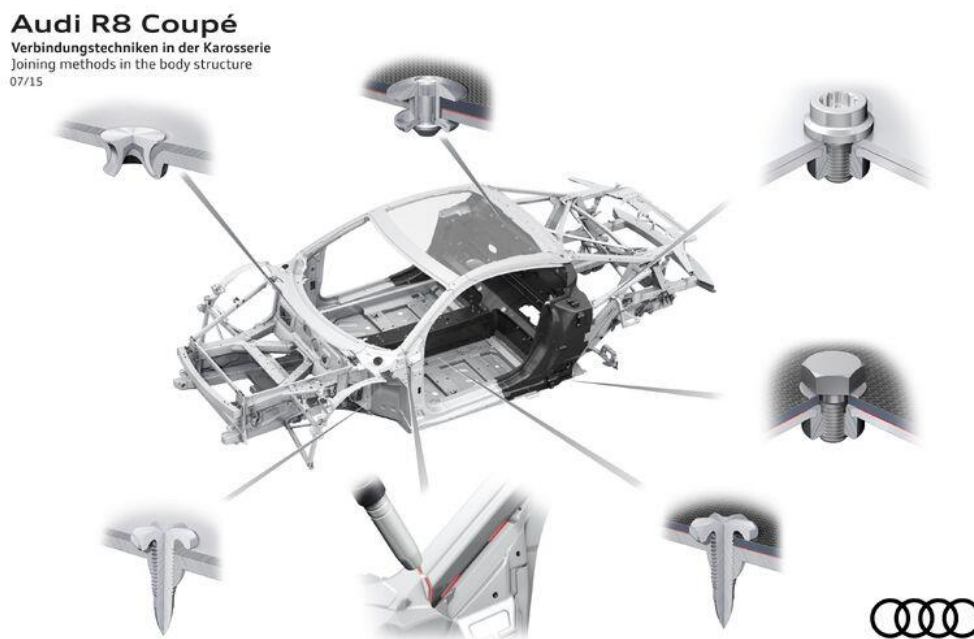


Izvor: 5. 7. 2024., Božurić Antonio, Završni rad, Ergonomska analiza radnog mjesta za točkasto zavarivanje karoserije vozila, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

## 6. ODABRANI PRIMJERI ZAVARIVANJA U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

Na slikama 6.1. i 6.2. prikazane su različite marke automobila, Audi i Mazda, te način spajanja njihovih karoserija.

Slika 6.1. Različiti postupci spajanja na modelu automobila Audi R8



Izvor: 5. 9. 2024., <https://www.audi-mediacycenter.com/en>

Na slici 6.1. prikazano je spajanje različitih dijelova na karoseriju automobila njemačke marke Audi, modela R8. Na slici su prikazane sljedeće metode: elektrootporno točkasto zavarivanje, zakivanje s polušupljim zakovicama (polušuplje se zakovice koriste za trajno spajanje dvaju materijala), zakivanje pomoću udarca prilagodbom stiska (zakovica ima određeni raspon stiska kojim može spojiti materijale u rasponu od dvaju do četiriju milimetara), lijepljenje, mehaničko spajanje te zavarivanje laserom. Na slici 6.2. prikazano je spajanje haube i stražnjih vrata na karoseriju automobila japanske marke Mazda, na modelu RX-8. Zavarivanje na Mazdi izvršeno je trenjem.

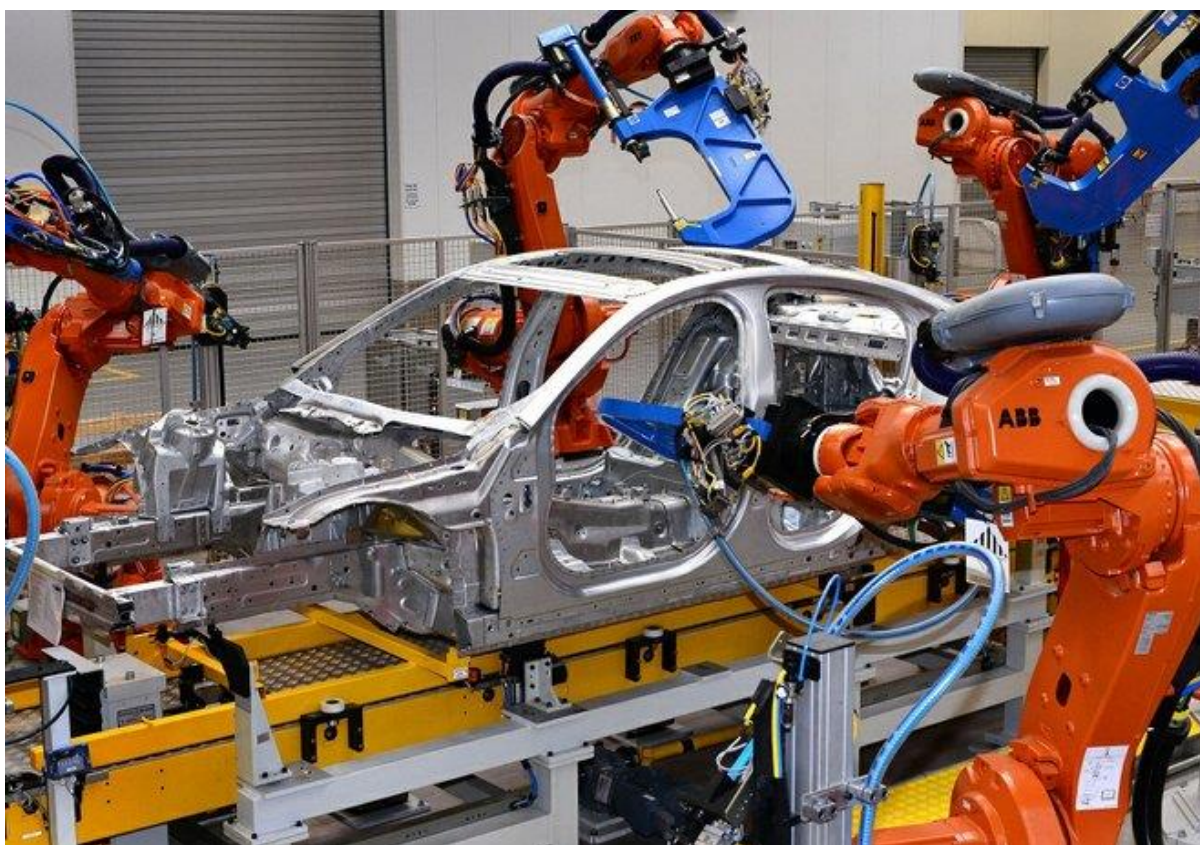
Slika 6.2. Zavarivanje dijelova trenjem na modelu automobila Mazda RX-8



Izvor: 5. 9. 2024., Matsuyama, K.: Trend of Automobile Vehicles and the Joining Technologies, 2007.

Različite automobilske marke, odnosno njihovi proizvodni pogoni, na različite se načine koriste robotizacijom te spajaju karoseriju na različite načine. Cilj je postizanje što boljih performansa kvalitete automobila te što bolja iskoristivost proizvodnoga vremena i materijala koji se primjenjuje u njihovoj proizvodnji. Napretkom tehnologije napredovala je i robotizacija u autoindustriji koja je zbog svoje iznimne preciznosti i učinkovitosti uvelike smanjila troškove i ubrzala proces proizvodnje. Ubrzani proces proizvodnje izravno je povezan s produktivnosti i brzinom rada robota koji imaju mogućnost neprekidnoga rada. Roboti se koriste za spajanje i zavarivanje različitih dijelova automobila, a ponajviše u procesima spajanja šasije i karoserije automobila. Na slici 6.3. prikazan je rad robota, ukupno četiri robota istodobno i neometano obavljaju svaki svoj dio zadatka.

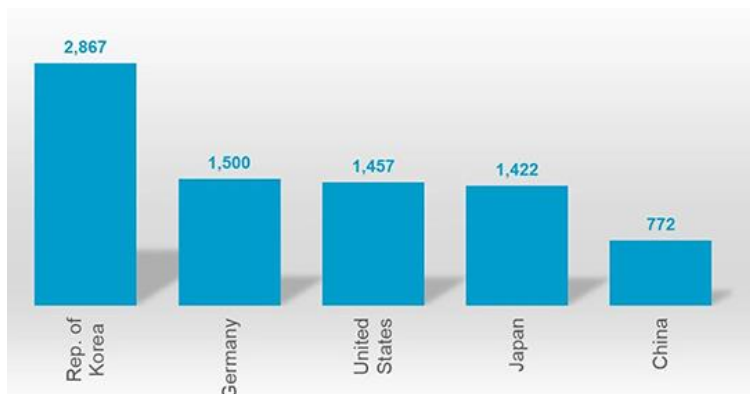
Slika 6.3. Rad robota na karoseriji automobila



Izvor: 3. 10. 2024., <https://www.therobotreport.com/abb-acquiring-ab-rotech-robotic-welding/>

Prema istraživanju što ga je provela Međunarodna federacije robotike (IFR International Federation of Robotics, 2021.) automobilska je industrija najveće svjetsko tržište robota. Na slici 6.4. prikazana je količina uporabe robota u automobilskoj industriji u odnosu na broj zaposlenih osoba. Na uzorku od 10 tisuća zaposlenih prednjači Južna Koreja s 2867 robota, slijede ju Njemačka, Sjedinjene Američke Države, Japan i Kina.

Slika 6.4. Broj robota na 10 tisuća zaposlenih



Izvor: 3. 10. 2024., [New Record: One Million Robots Work in Car Industry Worldwide \(automation.com\)](#)



Prikazana statistika na slici 6.4. jasno pokazuje kako robotizacija i roboti sve više preuzimaju ključnu ulogu u suvremenoj automobilskoj industriji. Roboti omogućuju veću produktivnost i smanjuju troškove rada. Gledajući prema budućnosti, uz napredak tehnologije može se očekivati daljnji porast broja robota u primjeni te dodatno unaprjeđenje njihove učinkovitosti.

## 7. ZAKLJUČCI I PREPORUKE ZA PRAKSU

Zavarivanje je najčešće korišten postupak spajanja konstrukcijskih dijelova bez kojega bi današnji svijet i velika većina opreme u njemu bio nezamisliv. Postupak je otkriven još u doba starih Sumerana, a njegov se napredak provodi sve do danas. Postupak zavarivanja danas je posve drukčiji od početnoga, prije svega napredniji i suvremeniji, međutim njegova je namjena gotovo uvijek ista. Na unaprjeđivanju postupka uvelike se radilo kako bi, unatoč smanjenom vremenu, kvaliteta i kvantiteta ostala na istoj razini. Iz takvih su se zahtjeva razvili raznovrsni postupci zavarivanja koji zadovoljavaju sve parametre kvalitete proizvoda.

Za svaku od tehnika zavarivanja potrebni su različiti resursi, a odabir tehnike kojom će se izvoditi zavarivanje određenoga spoja prvenstveno bi trebao ovisiti o namjeni zavarenoga proizvoda. Svaki od postupaka ima svoje pozitivne i negativne segmente koje također valja uključiti prilikom odabira. Ipak, najčešće su odabrani postupci u automobilskoj industriji elektrootporno i elektrolučno zavarivanje sa svim svojim podvrstama te postupak laserskoga zavarivanja.

Napretkom tehnologije težilo se i napretku odnosno automatizaciji postupka zavarivanja u automobilskoj industriji. Upravo je ova industrija među prvima robotizirala tehnološki postupak zavarivanja. Takav je iskorak donio veću produktivnost u autoindustriji, bržu proizvodnju, ali i smanjenu mogućnost za pogreške u proizvodnji. Negativnom stranom robotizacije smatra se smanjenje potrebe za ljudskom radnom snagom, jer ih zamjenjuje robot, međutim u situacijama opasnima za ljudsku sigurnost zamjena robotom ponovno se ističe kao prednost.

Svakako bi se u budućnosti trebalo težiti daljnjem napretku tehnologija zavarivanja, osobito na području učinkovitosti, osobito ekonomske. Premda robotizacija predstavlja veliki iskorak za autoindustriju, ne bi trebalo težiti potpunoj zamjeni ljudskih sposobnosti.

## **LITERATURA**

### **KNJIGE**

1. Jenney, C. L. i O'Brien, A. (2001.). Welding Handbook. American Welding Society.
2. Krstulović, A. (2003). Uvod u industrijsku robotiku. Hrvatska zajednica tehničke kulture.
3. Math, J. (2009). Automotive bodywork and rust repair. Workbench.
4. Milotić, M. (2014). BCD priručnik za zavarivanje. Saobraćajni fakulte Doboj.
5. Muncaster, P. W. (1991). A Practical Guide to TIG (GTA) Welding. Woodhead Publishing.
6. Rowe, J. (2012). Advanced materials in automotive engineering. Woodhead Publishing.
7. Vaamonde Couso, E. i Vázquez Gómez, J. (2011). Laser Beam Welding and Automotive Engineering. Springer Berlin Heidelberg.

### **ENCIKLOPEDIJE**

1. Encyclopedia of Materials: Science and Technologym (2001.)

### **STRUČNI I ZNANSTVENI ČLANCI**

1. Davies, G. (2012). Materials for Automobile Bodies: Materials for consideration and use in automotive body structures, 61-98
2. Fentahun, M. A., Savaş, M. A. (2018). International Journal of Materials Engineering: Materials Used in Automotive Manufacture and Material Selection , 8(3), 40-54
3. Gojić, M. (2008). Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, 13-17, 27-36
4. Hovorun T. P., Berladir K. V., Rudenko S. G., Pererva V. I., Martynov A. I. (2017.) Journal of Engineering Sciences: Materials for automotive industry, 4(2), 8-18
5. Janota, M., Neumann, H. (2008). Welding in the world: Share of Spot Welding and Other Joining Methods in Automotive Production, 52, 3-4
6. Matsuyama, K. (2007). Welding in the world: Trend of Automobile Vehicles and the Joining Technologies, 51, 3-4
7. Mohan P. (2014). Indian Welding Journal: Study the effects of welding parameters on TIG welding of Aluminum plate, 56(2), 53-62
8. Sherman, A. M., Krause, A., Friedman, P., & Huston, D. Q. (2006). Automotive Body Materials: Suspension Materials, 4(2), 25-33

9. Smojver, I. (2006./'07.) Mehanika kompozitnih materijala: Makromehanika kompozita, 4(1), 32-52
10. Suresh Babu, S. i Lienert, T. J. i Siewert, T. A. i Acoff, V. (2011.) ASM Metals HandBook: Welding Fundamentals and Processes, 6(1), 505-560
11. Vural, M. (2014). Comprehensive Materials Processing: Welding Processes and Technologies, 6, 3-48

### **MREŽNI IZVORI**

1. <https://servus.hr/proizvodi/zavarivanje/tv-10-30-pks/>
2. TWM, The Welding Master (2017.) <https://www.theweldingmaster.com/what-is-projection-welding-working-principle-advantages-disadvantages-and-application/>
3. TWI Global, <https://www.twi-global.com/>
4. [New Record: One Million Robots Work in Car Industry Worldwide \(automation.com\)](https://www.automation.com/news/new-record-one-million-robots-work-in-car-industry-worldwide)

### **OSTALO**

1. Atlija, N. (2016). MAG postupak zavarivanja [Diplomski rad]. Sveučilište u Rijeci
2. Bajs, M. (2013). Provjera i specifičnosti modificiranih MAG postupaka [Završni rad]. FSB, Zagreb
3. Bauer, B. (2006). Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje [Doktorski rad]. FSB, Zagreb
4. Božurić, A. (2018). Ergonomska analiza radnog mjesta za točkasto zavarivanje karoserije vozila [Završni rad]. FSB, Zagreb
5. Bušić, M. (2015). Zavarivanje trenjem aluminijskih sendvič-panela rotirajućim alatom [Doktorski rad]. FSB, Zagreb
6. CARBOREP (2019). European Harmonized Training for Personnel working with Car Body Repair Technology
7. Čorić, T. (2018). Završni rad, Certificiranje TIG postupka zavarivanja i izvršioca za REL postupak, Karlovac
8. Garašić, I. (2020). Tema Elektrootporno zavarivanje – Postupci zavarivanja. FSB, Zagreb
9. Hlevnjak, A. (2016). Točkasto elektrootporno zavarivanje raznorodnih čelika [Diplomski rad]. FSB, Zagreb
10. Jurišić, Š. (2020). Zavarivanje automobilskih karoserija [Diplomski rad]. Zagreb

11. Karaga, I. (2015). Analiza primjene tehnike njihanja pri robotiziranom MAG zavarivanju [Diplomski rad]. FSB Zagreb
12. Podgorski, L. (2015). Tehnologija izrade cijevnog jarbola MAG postupkom zavarivanja [Završni rad]. Varaždin
13. Žolo, I. (2008). Lijepljenje polimernih materijala [Diplomski rad]. FSB, Zagreb

# POPIS SLIKA I TABLICA

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Zavareni spoj elemenata i zavar.....	3
Slika 2. 2 Položaji postupka zavarivanja .....	4
Slika 3.2 Vrste aluminijskih matričnih kompozita.....	8
Slika 4.1 Usporedba postupaka zavarivanja .....	10
Slika 4.2 Presjek zavarivanja pištoljem .....	12
Slika 4.3 Pištolj za zavarivanje .....	13
Slika 4.4 Oprema za TIG zavarivanje.....	14
Slika 4.5 Uređaj za elektrootporno točkasto zavarivanje.....	17
Slika 4.6 Nastanak spoja postupkom bradavičastog zavarivanja.....	17
Slika 4.7 Vrste spojeva šavnog zavarivanja.....	19
Slika 4.8 Postupak zavarivanja trenjem rotirajućim alatom .....	21
Slika 4.9 Tehnike zavarivanja laserom .....	23
Slika 5.1 Shematski prikaz učinkovitosti postupaka zavarivanja .....	25
Slika 5.2 Sedmoosni robot .....	26
Slika 5.3 Šestoosni robot za zavarivanje.....	27
Slika 5.4 C-tip i X-tip kliješta .....	28
Slika 6.1 Različiti postupci spajanja na modelu automobila Audi R8.....	29
Slika 6.2 Zavarivanje dijelova trenjem na modelu automobila Mazda RX-8.....	30
Slika 6.3 Rad robota na karoseriji automobila.....	31
Slika 6.4 Broj robota na 10 tisuća zaposlenih.....	31

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Limovi koji se koriste u proizvodnji automobila.....	6
---	---