

TRANSFORMACIJA ZAVARIVAČKIH PROCESA U KONTEKSTU INDUSTRIJE 4.0

TRANSFORMATION OF WELDING PROCESSES IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

v. ass. mr. Emir Đulić
Mašinski fakultet
Univerzitet u Zenici

ass. Amer Neimarlija
Mašinski fakultet
Univerzitet u Zenici

v. ass. mr. Amel Karić
Mašinski fakultet
Univerzitet u Zenici

REZIME

Zavarivanje predstavlja jednu od najvažnijih tehnoloških operacija u savremenoj industrijskoj proizvodnji, naročito u oblastima gdje se zahtijevaju čvrsti i pouzdani spojevi metalnih komponenti. Tradicionalni procesi zavarivanja, iako još uvijek prisutni, sve više ustupaju mjesto automatizovanim i robotizovanim sistemima koji omogućavaju veću preciznost, ponovljivost i produktivnost. Pojavom četvrte industrijske revolucije, poznate kao Industrija 4.0, dolazi do potpune transformacije proizvodnih procesa, uključujući i zavarivanje. Savremeni zavarivački sistemi integrišu industrijske robote, senzore, digitalne platforme i napredne algoritme kako bi postali pametni, prilagodljivi i međusobno povezani. Ova transformacija omogućava ne samo efikasnije izvođenje zavarivačkih operacija, već i prikupljanje i analizu podataka u realnom vremenu, praćenje kvaliteta spojeva, te prediktivno održavanje opreme. U ovom radu biće analizirani osnovni koncepti automatizacije i robotizacije zavarivanja, tehničke karakteristike opreme i sistema, prednosti i izazovi uvođenja takvih tehnologija, kao i njihova uloga i značaj u okviru paradigme Industrije 4.0.

Ključne riječi: zavarivanje, automatizacija, industrija 4.0

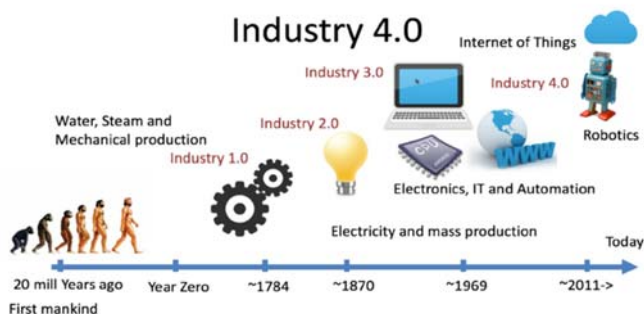
SUMMARY

Welding represents one of the most important technological operations in modern industrial production, especially in areas where solid and reliable joints of metal components are required. Traditional welding processes, although still present, are increasingly giving way to automated and robotic systems that enable greater precision, repeatability and productivity. With the emergence of the fourth industrial revolution, known as Industry 4.0, there is a complete transformation of production processes, including welding. Modern welding systems integrate industrial robots, sensors, digital platforms and advanced algorithms to become smart, adaptive and interconnected. This transformation enables not only more efficient execution of welding operations, but also real-time data collection and analysis, joint quality monitoring, and predictive equipment maintenance. This paper will analyze the basic concepts of welding automation and robotization, technical characteristics of equipment and systems, advantages and challenges of introducing such technologies, as well as their role and significance within the Industry 4.0 paradigm.

Keywords: welding, automation, industry 4.0

1. UVOD

U savremenom industrijskom okruženju, obilježenom globalnim tržištem, brzim tehnološkim razvojem i rastućim zahtjevima za proizvodnjom visoke kvalitete, automatizacija je odavno postala ključni faktor konkurentnosti. Cilj industrijskih preduzeća više nije samo proizvoditi, već proizvoditi brže, jeftinije, pouzdanije i sigurnije. Pojava automatizovanih sistema omogućila je transformaciju tradicionalne proizvodnje u pametne proizvodne pogone koji integrišu mehatroniku, senzorsku tehnologiju, umjetnu inteligenciju i naprednu robotiku. Najčešće korišteni tehnički pojmovi u nekoliko posljednjih godina poput „Internet of Things“ i „Industry 4.0“, definišu novu industrijsku revoluciju. Svima je poznato, da je prva industrijska revolucija započela nastankom mehanizacije, pare i vodene energije, druga industrijska revolucija uslijedila je s naglaskom na masovnu proizvodnju i montažne linije pokretane električnom energijom. Elektronika, IT sistemi i automatizacija uveli su treću industrijsku revoluciju, što je pak dovelo do četvrte industrijske revolucije koja je povezana s kibernetičko-fizičkim sistemima. IoT u svojoj osnovi se odnosi na koncept povezivanja svega što je pokrenuto s internetom, a obuhvata sve od pametnih telefona, kućanskih aparata i uredskih uređaja do turbomlaznih motora i proizvodne opreme. Korak prema širokom prihvaćanju IoT-a u industriji već je uveliko započeo, potaknut boljom internetskom vezom, nižim troškovima tehnologije i povezivanja, povećanom upotrebom pametnih telefona i činjenicom da su računari, uređaji i strojevi dizajnirani s Wi-Fi mogućnostima. Zajednička vizija oba termina (Internet of Things, Industry 4.0) u osnovi je korištenje lokalno generisanih podataka u mnogo širem kontekstu. Količina lokalno generisanih podataka neprestano se povećava upravo zbog kontinuirane digitalizacije u svim dijelovima našeg svakodnevnog života. Industrija 4.0 teži autonomnom radu pametnih tvornica, što se postiže opremanjem gotovo svih dijelova i postrojenja informacijskim i komunikacijskim tehnologijama modernih računara. Industrija 4.0 ističe rastući trend automatizacije i dijeljenja podataka u proizvodnim industrijama, uključujući: internet stvari (IoT), pametnu proizvodnju, kibernetičko-fizičke sisteme, pametne tvornice, kognitivno računarstvo, računarstvo u oblaku i umjetnu inteligenciju.



Slika 1. Prikaz industrijskih revolucija

2. DIZAJN KONCEPTA INDUSTRIJE 4.0

U industrijskoj aplikaciji s IoT-om se sve proizvodne informacije pohranjuju u oblaku. Inteligentni softverski alati upravljaju i kontrolišu proizvodne procese te organiziraju lanac opskrbe. Industrija 4.0 temelji se na devet tehnoloških stupova i ima za cilj stvaranje digitalizirane kompanije temeljene na tehnologijama bez ljudi i papira. Prema Boston Consulting Groupu, devet ključnih tehnoloških stubova ustvari i omogućava ovu transformaciju:

1. **Napredna proizvodna rješenja (Advanced Manufacturing Solutions)**
Obuhvataju fleksibilne i modularne proizvodne sisteme, uključujući naprednu robotiku i kolaborativne robote (cobote), koji omogućavaju efikasniju i prilagodljiviju proizvodnju.
2. **Aditivna proizvodnja (Additive Manufacturing)**
Poznata i kao 3D štampanje, omogućava proizvodnju složenih komponenti direktno iz digitalnih modela, smanjujući otpad i vrijeme proizvodnje.
3. **Proširena stvarnost (Augmented Reality - AR)**
Pruža radnicima informacije u stvarnom vremenu putem vizuelnih prikaza, poboljšavajući obuku, održavanje i montažu.
4. **Simulacije**
Omogućavaju virtualno modeliranje proizvodnih procesa, što pomaže u optimizaciji i testiranju prije implementacije u stvarnom okruženju.
5. **Horizontalna i vertikalna integracija sistema**
Podrazumijeva povezivanje svih nivoa proizvodnje, od senzora na mašinama do upravljačkih sistema, omogućavajući besprijekornu razmjenu podataka.
6. **Industrijski Internet stvari (Industrial Internet of Things - IIoT)**
Povezuje mašine, uređaje i senzore putem interneta, omogućavajući prikupljanje i analizu podataka u stvarnom vremenu za bolje donošenje odluka.
7. **Kibernetička sigurnost**
S obzirom na povećanu povezanost sistema, zaštita podataka i infrastrukture postaje ključna za spriječavanje neovlaštenog pristupa i cyber napada.
8. **Cloud Computing (računarstvo u oblaku)**
Omogućava pohranu i obradu velikih količina podataka na udaljenim serverima, pružajući skalabilnost i pristup informacijama s bilo kojeg mjesta.
9. **Veliki podaci i analitika (Big Data and Analytics)**
Analiza velikih skupova podataka omogućava prepoznavanje obrazaca i trendova, što pomaže u optimizaciji procesa i predviđanju potreba.



Slika 2. Devet stubova industrije 4.0

Nekoliko je ključnih karakteristika prilikom dizajniranja samog koncepta Industrije 4.0, a koje čine osnovu za razvoj pametnih tvornica koje su efikasnije, fleksibilnije i sposobne za brzu prilagodbu promjenama tržišta i tehnologije:

- **Interoperabilnost** – međusobna komunikacija ljudi, mašina i sistema kroz standardizirane digitalne mreže i Internet stvari (IoT).
- **Decentralizirano donošenje odluka** – sposobnost sistema da autonomno donose odluke i upravljaju procesima bez stalne ljudske intervencije.

- **Tehnička pomoć** – asistencija radnicima kroz realnovremene informacije i autonomne sisteme koji preuzimaju opasne ili zahtjevne zadatke.
- **Informacijska transparentnost** – omogućavanje uvida u sve aspekte proizvodnog procesa putem senzoričke i digitalnih podataka.
- **Virtualizacija** – stvaranje digitalnih blizanaca fizičkih procesa za potrebe simulacije, nadzora i optimizacije.
- **Realno-vremenska sposobnost** – trenutna obrada i analiza podataka radi brze reakcije na promjene u proizvodnji.
- **Modularnost** – fleksibilnost sistema da se prilagodi promjenama kroz dodavanje ili uklanjanje komponenti.

3. AUTOMATIZACIJA I ROBOTIZACIJA PROCESA ZAVARIVANJA

Automatizacija u zavarivanju podrazumijeva korištenje uređaja i sistema koji mogu samostalno obavljati operacije zavarivanja uz minimalnu intervenciju operatera. Postoje dvije glavne vrste automatizacije:

- Djelimična automatizacija – gdje operater još uvijek upravlja nekim aspektima procesa
- Potpuna automatizacija – gdje su svi aspekti zavarivanja automatizovani

U kontekstu Industrije 4.0, automatizacija uključuje i mogućnost daljinskog nadzora i upravljanja procesima putem mreže, kao i korištenje analitike podataka za optimizaciju performansi.

3.1. Roboti za zavarivanje

Industrijski roboti koji se koriste za zavarivanje najčešće su robotske ruke sa više stepeni slobode, opremljene odgovarajućim alatima (gorionici, manipulatori) i senzorima. Glavne karakteristike robota za zavarivanje su:

- Precizno pozicioniranje
- Ponavljanje identičnih radnji
- Visoka pouzdanost u serijskoj proizvodnji

Najpoznatiji proizvođači robota su KUKA, FANUC, ABB i YASKAWA. Roboti se programiraju ručno (učeći način rada), putem CAD/CAM sistema ili integracijom s digitalnim tvornicama. U okruženju Industrije 4.0, roboti su povezani u mrežu (Industrial Internet of Things - IIoT), omogućavajući koordinaciju s drugim pametnim uređajima i sistemima.

3.2. Senzori i sistemi upravljanja

Senzori su ključni dio automatizovanih sistema jer omogućavaju prilagođavanje u realnom vremenu. U zavarivanju se koriste:

- Senzori položaja i kretanja
- Senzori temperature
- Senzori luka (arc sensing)
- Kamere za vizuelno navođenje (vision systems)

Upravljanje se obavlja putem PLC (programmable logic controller) sistema, dok se u Industriji 4.0 primjenjuju i napredni sistemi zasnovani na cloud computing, big data analitici, edge computingu, te AI i mašinskom učenju za adaptivno upravljanje zavarivanjem i prediktivno održavanje opreme.

3.3. Primjena u industriji

Automatizovano zavarivanje se koristi u:

- Automobilskoj industriji – za spajanje karoserija (npr. VW, Toyota), gdje se koriste potpuno automatizovane i povezane proizvodne linije

- Brodogradnji – zavarivanje velikih metalnih konstrukcija uz pomoć mobilnih robotskih sistema
- Proizvodnji čeličnih konstrukcija i cjevovoda – gdje se koriste pametne zavarivačke stanice
- Avio-industriji – precizno TIG zavarivanje tankih metala uz analizu procesa putem digitalnih senzora i softvera

U Industriji 4.0, podaci sa zavarivačkih stanica se kontinuirano prate i analiziraju radi unapređenja kvaliteta i efikasnosti.

Prednosti:

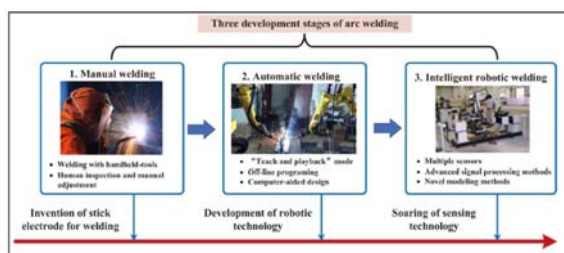
- Veća produktivnost i ušteda vremena
- Veća preciznost, ponovljivost i kvalitet
- Digitalna praćenja procesa i automatsko dokumentovanje
- Manja potreba za ručnim radom i veća sigurnost

Izazovi:

- Visoki početni troškovi i kompleksnost integracije
- Potreba za IT i softverskim znanjem kod operatera
- Sigurnosni izazovi vezani za kibernetičke napade
- Prilagođavanje standarda i zakonske regulative

4. POTREBA ZA APLIKACIJOM INDUSTRIJE 4.0 U ZAVARIVANJU

Nedostatak stručnosti jedan je od glavnih izazova s kojima se suočava industrija zavarivanja kako u razvijenim zemljama tako i u zemljama u razvoju. Američko društvo za zavarivanje (AWS) procijenilo je manjak od 400 000 operatera zavarivanja u SAD-u do 2030. godine, s deficitom ponude do te mjere da je nedostatak kapaciteta visokokvalificiranih zavarivača alarmantan, budući da je dobná demografija osoblja u industriji zavarivanja već sada iskrivljena (prosječna dob zavarivača je 57 godina). Ovaj problem dobro mogu ublažiti automatizovani sistemi, IoT i umjetna inteligencija na mnogo načina. Sistem zavarivanja potpomognut IoT-om ne ovisi toliko o profesionalnom zavarivaču koliko o metodi. Ako se radi na računaru opremljenom umjetnom inteligencijom potpomognutom IoT-om, relativno neobučeni i nekvalificirani radnik može završiti isti posao kao i visokoobrazovani, profesionalni zavarivač.



Slika 3. Različite faze razvoja procesa zavarivanja

Prednosti ovakvih sistema su višestruke: kontinuiran rad bez pauza, sposobnost rada u opasnim okruženjima, izostanak umora, povećana brzina i preciznost, kao i mogućnost daljinskog nadzora i optimizacije parametara u stvarnom vremenu. Koncept Industrije zavarivanja 4.0, usko povezan s IoT-om, „predstavlja ideju međusobno povezane tvornice s online strojevima koji su inteligentni i vješti u donošenju vlastitih prosudbi.“ Automatizirani postupci zavarivanja postaju složeni i učinkoviti u reagiranju na parametre. Zavarivanje u konačnici na taj način postaje misaoni objekt, učinkovit u reagiranju na promjene na način na koji to čini ljudski zavarivač. Taj pristup rješava nedostatak hronične stručnosti i omogućuje visoko aktivno radno

mjesto. IoT i umjetna inteligencija su industrijska budućnost, a to je u mnogim aspektima budućnost svijeta. Sve će stvari biti međusobno povezane, pa je neuspjeh u ulaganju i učenju kako izgraditi povezano radno mjesto neuspjeh u održavanju kontakta s putanjom industrije i bazom kupaca koju radionice opslužuju. Industrija 4.0 omogućava zavarivačkim kompanijama da brže reaguju na promjene, proizvode s većom preciznošću i manjim gubicima te da dugoročno povećaju konkurentnost.

5. OPĆI PRINCIPI I SPECIFIČNOSTI PRIMJENE TEHNOLOGIJA INDUSTRIJE 4.0 U ZAVARIVANJU

Već duži niz godina, rješavanje složenih inženjerskih problema i modeliranje nezamislivo je bez primjene numeričkih postupaka, informacijsko-komunikacijske tehnologije, računara i računarskih alata, pa s tim u vezi, jasno je da je značaj zavarivanja porastao s primjenom naprednih tehnologija. Četvrta industrijska revolucija svakako da utiče i na oblast zavarivanja, gdje je posljednjih godina sama tehnologija značajno napredovala, uglavnom potaknuta automatizacijom koja je poboljšala i učinkovitost i kvalitetu samog procesa. Informacijsko komunikacijske tehnologije u industriji zavarivanja i dizajniranju proizvoda kontinuirano poboljšavaju kvalitetu, tačnost, fleksibilnost i isplativost proizvoda. Gotovo svaki dio pogona / radionice za zavarivanje može se promijeniti pomoću IoT-a i umjetne inteligencije. Na ovaj način pogon može pohraniti važeće zakone o postupcima zavarivanja, održavati i ažurirati kvalifikacije zavarivača, osigurati bolju kontrolu kvalitete, provjeriti kvalitetu komponente, otkriti i pozicionirati narudžbe za plin i potrošni materijal, preporučiti obuku i pomoć u upravljanju projektima.

Digitalna transformacija zavarivanja predstavlja prijelaz od tradicionalnog (zavarivanje kao “umjetnost”), ručnog ili samo djelomično automatizovanog zavarivanja ka pametnom, digitalno upravljanim i umreženom procesu (podatkom vođen i potpuno integrisan tehnološki proces), gdje se koristi niz tehnologija Industrije 4.0, uključujući:

- Senzore i Internet stvari (IoT)
- Umjetnu inteligenciju (AI) i mašinsko učenje
- Velike podatke (Big Data)
- Digitalne blizance (Digital Twins)
- Cloud računarstvo
- Cyber-fizičke sisteme
- Pametne robote i kobote (kolaborativne robote)

Tabela 1. Ključni elementi digitalne transformacije zavarivanja

Element	Funkcija u zavarivanju
IoT senzori	Praćenje temperature, vibracija, zakrivljenja, protoka gasa itd.
Prikupljanje i obrada podataka	Svaki zavar ima “digitalni otisak” (data log).
Robotizacija	Autonomno izvođenje zavara s adaptivnim podešavanjima.
Cloud platforme	Centralizovano skladištenje i analiza podataka.
AI & prediktivna analitika	Otkrivanje odstupanja, preporuke u realnom vremenu, prevencija kvarova.
Digitalni blizanc	Virtuelna simulacija zavarivanja i procesa održavanja.
Povezani ERP/MES sistemi	Upravljanje narudžbama i tokovima rada u realnom vremenu

Tabela 2. Benefiti ostvareni za kompanije kroz aplikaciju Industrije 4.0

Korist	Objašnjenje
Veća produktivnost	Brže i ponovljivo zavarivanje.
Viši kvalitet zavara	Manje grešaka, bolja kontrola parametara.
Transparentnost procesa	Mogućnost traga svakog spoja (“traceability”).
Smanjenje troškova	Manje otpada, manje zastoja, optimizacija energije.
Manje ljudskih grešaka	Automatizacija i asistencija operaterima.

Napredni senzori i tehnologije za poboljšanje kvaliteta zavarivanja igraju ključnu ulogu u savremenim pametnim (SMART) proizvodnim sistemima. Njihova svrha je praćenje, kontrola i optimizacija zavarivačkog procesa u realnom vremenu, kako bi se postigao što viši kvalitet zavarivanja, veća produktivnost i manji broj grešaka.

1. Napredni senzori u zavarivanju

Senzori luka (Arc sensors)

- Prate promjene u naponu i struji zavarivanja.
- Omogućavaju automatsku korekciju položaja gorionika (npr. u zavarivanju sa punjenjem međuprocepa).
- Koriste se u adaptivnom TIG i MIG/MAG zavarivanju.

Senzori temperature

- Mjere temperaturu baznog i dodatnog materijala.
- Ključni za toplotnu kontrolu i sprječavanje grešaka poput pukotina i deformacija.

Senzori pomjeranja (Laser & LIDAR senzori)

- Detektuju geometriju šava i komponenti.
- Koriste se za automatsko navođenje robota i pozicioniranje gorionika.

Optički i kamerni sistemi (Machine vision)

- Prate tok zavarivanja i formiranje šava.
- Mogu detektovati pore, prskanje i greške u zavarivanju.
- Često se koriste za vizuelnu inspekciju kvaliteta.

Akustični senzori

- Detektuju zvučne talase tokom zavarivanja.
- Omogućavaju ranu detekciju nepravilnosti i nestabilnog luka.

2. Napredne tehnologije za poboljšanje kvaliteta

Adaptivna kontrola procesa

- Kombinuje senzorske podatke i vještačku inteligenciju za automatsko podešavanje parametara (struja, brzina, gas, itd.).
- Održava konzistentan kvalitet šava čak i pri promjenama u materijalu ili debljini.

AI i mašinsko učenje

- Modeli trenirani na velikom broju zavarivačkih procesa predviđaju optimalne parametre.
- Prepoznaju obrasce grešaka i sugerišu korekcije prije nego se greške dogode.

Digitalni blizanci (Digital Twins)

- Simulacija procesa u realnom vremenu.
- Moguće testiranje i optimizacija parametara bez fizičkog zavarivanja.
- Podaci se stalno upoređuju s realnim sistemom.

Praćenje i sljedivost kvaliteta (Traceability Systems)

- Svaki šav ima digitalni zapis: ko je zavarivao, kojim parametrima, kada, na kojem dijelu.
- Ključno za industrije sa visokim zahtjevima za sigurnost (npr. automobilska, naftna, avio-industrija).

6. PAMETNO ZAVARIVANJE SA PRIMJERIMA SISTEMA S PRAĆENJEM PROCESA U REALNOM VREMENU

Za pokretanje „Pametne tvornice“ ("Smart Factory") potrebno je prije svega znanje inženjera za zavarivanje o zavarivanju digitalizirati na način kako bi računar mogao donositi uspješne odluke usporedive s inženjerskim odlukama. Oprema za zavarivanje treba biti opremljena mikroprocesorima i različitim sensorima za pretvaranje bilo koje vrste informacija u digitalne podatke. Zahtjev za obradom podataka u stvarnom vremenu zahtijeva poseban naglasak na prijenos podataka. Strojevi opremljeni mikroprocesorom trebaju izvršavati mnogo različitih zadataka uz brzu sinergijsku liniju poput algoritama upravljanja parametrima zavarivanja, mjerenja podataka o zavarivanju te minimalno kratkoročno skladištenje istih, ograničavanje snage zavarivanja u odnosu na "najslabiju" instaliranu komponentu, pružanje mrežnih funkcija kao i samootkrivanje i samotestiranje instaliranih komponenti (poput gorionika za zavarivanje, rashladnog uređaja i zaslona) Sve to zahtijeva mnogo različitih elektroničkih komponenti i integrisanih krugova uz zahtjev da elektronika mora raditi u vrlo prljavom i prašnjavom industrijskom okruženju. Npr. integracijom tehnologija vizualnog očitavanja, sistemi za zavarivanje sada mogu otkriti i ispraviti nedostatke zavara u stvarnom vremenu, poboljšavajući tačnost i kvalitetu procesa zavarivanja. Tehnologije vizualnog očitavanja poput strojnog vida, optičkih senzora i 3D kamera mogu se koristiti za praćenje procesa zavarivanja, otkrivanje nedostataka zavara i pružanje povratnih informacija u stvarnom vremenu sistema zavarivanja. Integracija ovih tehnologija može poboljšati učinkovitost i tačnost procesa zavarivanja, smanjiti potrebu za inspekcijama i ponovnim radovima nakon zavarivanja te poboljšati sigurnost smanjenjem rizika od nedostataka u zavarivanju. Velike kompanije imaju mogućnost centraliziranja baze znanja i razvoja standardnih postupka zavarivanja. Inženjeri za osiguranje kvalitete mogu pratiti izvedbu zavarivanja i odrediti potrebne promjene radi sprječavanja budućih problema. Inženjeri za zavarivanje mogu računarske sisteme koristiti za podešavanje i optimizaciju procesa zavarivanja, testiranje i preuzimanje ažuriranih parametara za jedan ili više strojeva.

Da bi »pametna tvornica« radila manje-više autonomno bez ljudske interakcije, moraju se ispuniti neki kriteriji za primjenu u zavarivanju:

- Znanje o zavarivanju mora biti digitalizirano i pripremljeno na način da računar može donositi slično ispravne odluke kao i iskusni tehnolog zavarivanja.
- Oprema za zavarivanje mora biti opremljena visokoučinkovitim informacijskom i komunikacijskom tehnologijom i prilagođenim sensorima kako bi se sve informacije relevantne za proizvodnju mogle digitalizirati i kako bi im se sistem ponašao u stvarnom vremenu.
- Potreba za prijenosom i pohranom velikih količina podataka zahtijeva snažnu mrežnu infrastrukturu i dovoljan kapacitet pohrane.

Međutim, sve dok proces digitalizacije u tehnologiji zavarivanja ne bude u potpunosti završen, ljudi će i dalje igrati središnju ulogu u određivanju rješenja za zavarivanje. Sukladno tome, komunikacijski kanal između čovjeka i stroja za zavarivanje i dalje će biti jedan od najvažnijih čimbenika uspjeha.

Fronius i KUKA su razvili integrisani sistem koji koristi CMT (Cold Metal Transfer) tehnologiju u kombinaciji s vizijskim navođenjem i analizom podataka u oblaku. Ovaj sistem omogućava precizno zavarivanje tankih materijala uz minimalno prskanje i potpunu kontrolu procesa. #CMT – Cold Metal Transfer je specijalizovana varijanta MIG/MAG zavarivanja koju je razvila kompanija Fronius. Ključna prednost ove tehnologije je minimalno toplinsko ulaganje u materijal vrlo stabilan prijenos metala, što omogućava visok kvalitet zavara čak i kod tankih materijala ili heterogenih spojeva (npr. aluminij-čelik). Prijenos metala pri CMT postupku odvija se kratkim spojevima sa novom metodom odvajanja kapljica rastaljene žice na radni komad. Sistem za CMT zavarivanje je potpuno digitalno kontrolisan, što uključuje mogućnost jako brze komunikacije između komponenti sistema. To je vrlo bitno za CMT jer izvor struje mora brzo znati što se događa u talini da bi mogao odmah reagovati. Digitalna tehnologija omogućava precizno upravljanje gibanjem žice, a specifična je i vrlo precizna regulacija dužine električnog luka pomoću mehaničkog gibanja. Frekvencija povratnog gibanja žice najčešće je između 60 i 80 Hz što zahtijeva vrlo sofisticiranu kontrolu gibanja žice i primjenu određenih rješenja poput ugradnje dodatnog servomotora u pištolj za zavarivanje i ugradnju međuspremnika žice tzv. „wire-buffer“ koji kompenzira povrat žice elastičnom deformacijom.



Slika 4. Robotski sistem za CMT zavarivanje, Fronius

CMT se razlikuje od klasičnog MIG/MAG procesa po:

1. Kombinaciji toplinskog i mehaničkog upravljanja
 - Dodatna žica se ne samo električno napaja, već se njeno kretanje mehanički kontrolira pomoću motora.
 - Tokom zavarivanja, žica se povlači unazad u momentu kada dolazi do kratkog spoja, čime se sprječava klasično prskanje i neželjeni kapljični prijenos.
2. Naizmjenični rad: topljenje i povlačenje žice
 - Proces ide u vrlo brzim ciklusima: struja otopi kap zavarne žice, zatim se žica brzo povlači nazad, pa se proces ponavlja.
 - Ovo omogućava hladniji prijenos materijala i bolju kontrolu topline.

Tabela 3. Prednosti CMT tehnologije

Prednost	Objašnjenje
Niska toplinska energija	Smanjuje deformacije i omogućava spajanje tankih materijala bez probijanja.
Bez prskanja	Gotovo u potpunosti uklanja prskanje, što smanjuje potrebu za čišćenjem.

Prednost	Objašnjenje
Mogućnost spajanja različitih materijala	Omogućava spajanje čelika i aluminija, što je teško klasičnim MIG postupkom.
Visoka ponovljivost i preciznost	Odlično za automatizaciju i robotizaciju u serijskoj proizvodnji.



Slika 5. Čelija za zavarivanje aluminijskih barijera pomoću CMT konfiguracije i robotske ruke Fanuc model 120id/12L.

Industrijska primjena CMT-a

1. Auto-industrija
 - Spajanje karoserijskih dijelova od različitih metala (npr. aluminij na čelik).
 - Povećanje energetske efikasnosti vozila (manja težina, tanji materijali).
2. Zrakoplovna industrija i željeznička vozila
 - Zavarivanje aluminijskih komponenti bez deformacija.
3. Bijela tehnika (kućanski aparati)
 - Estetski zavari tankih limova bez potrebe za dodatnom obradom.
4. Robotizovani sistemi zavarivanja
 - Fronius-ov CMT često se koristi s KUKA, ABB i FANUC robotima za precizne zavare.

CMT je savršeno prilagođen za digitalno upravljane proizvodne procese:

- Integracija sa sensorima za nadzor procesa.
- Mogućnost prikupljanja i obrade podataka u realnom vremenu (IoT).
- Kompatibilnost s digitalnim blizancima i automatizovanim kontrolnim sistemima.
- Prediktivna analiza za održavanje i kontrolu kvaliteta.

Konkretna primjena: Volkswagen (VW) je u svojim proizvodnim linijama za model VW Golf i druge serije uveo CMT robotizovane zavarivačke stanice kako bi efikasno spajao aluminijske limove s minimalnim termičkim utjecajem.

Tehnički detalji primjene:

- Materijali: Aluminijum (limovi debljine 0.8 – 1.2 mm).
- Metoda: Robotizovano MIG zavarivanje uz CMT proces.
- Oprema: Fronius TPS/i CMT zavarivački izvori + KUKA roboti.
- Zadatak: Spajanje aluminijskih nosača i ojačanja karoserije s vanjskim panelima.

Tabela 4. Zašto je korišten CMT?

Izazov	Rješenje pomoću CMT-a
Tanki materijali (0.8 mm)	Niska toplina CMT-a sprječava deformacije.
Različiti metali	CMT omogućava kvalitetan spoj (Al-Fe).
Potreba za brzinom	Robotizacija + CMT omogućili visoku brzinu.
Estetika zavora	CMT daje precizan, gladak zavar bez prskanja.

Rezultati:

- Smanjenje grešaka i potrebe za popravkama za više od 60% u odnosu na klasični MIG.
- Ušteda energije zahvaljujući smanjenom toplinskom unosu.
- Povećana automatizacija – roboti izvođe zavare bez potrebe za dodatnom kontrolom.
- Usklađenost sa zahtjevima e-mobilnosti – lakše, preciznije i kvalitetnije komponente.

Kao poseban segment FRONIUS-a navodimo i njihovu AR tehnologiju (proširena stvarnost) koja kombinuje stvarni svijet s kompjuterski generisanim slikama, pružajući zavarivačima i polaznicima obuke za zavarivanje dodatne informacije i upute direktno u njihovom vidnom polju, obično putem posebnih naočala ili kaciga. Primjene AR u zavarivanju uključuju:

- Obuka i edukacija: AR simulacije zavarivanja omogućuju polaznicima da vježbaju različite tehnike zavarivanja (GMAW, FCAW, SMAW, GTAW) u sigurnom i kontroliranom virtualnom okruženju. Pruža se real-time povratna informacija o tehnici zavarivanja, uključujući brzinu kretanja, ugao elektrode i udaljenost od radnog komada. To ubrzava proces učenja, smanjuje troškove materijala i povećava sigurnost.
- Pomoć pri radu: AR može pružiti zavarivačima hands-free pristup važnim informacijama tijekom stvarnog procesa zavarivanja. To može uključivati upute za zavarivanje (prikazivanje korak-po-korak vodiča, tehničkih crteža i specifikacija zavarivanja direktno na radnom komadu), praćenje parametara (vizualizacija trenutnih parametara zavarivanja, struja, napon, brzina žice) u stvarnom vremenu.
- Detekcija grešaka: Potencijalno prepoznavanje i označavanje potencijalnih defekata zavora u stvarnom vremenu na temelju analize vizualnih podataka.
- Daljinska pomoć i ekspertiza: Iskusni stručnjaci za zavarivanje mogu koristiti AR kako bi daljinski vodili manje iskusne zavarivače, videći njihovo radno okruženje i pružajući im vizualne upute i savjete u stvarnom vremenu.
- Kontrola kvalitete i inspekcija: AR može pomoći inspektorima kvalitete prikazujući 3D modele očekivanog zavora preko stvarnog zavora, olakšavajući identifikaciju odstupanja i potencijalnih problema.

7. ZAKLJUČAK

Automatizacija i robotizacija zavarivanja predstavljaju ključne korake ka modernizaciji proizvodnih procesa, posebno u vremenu sve intenzivnijih zahtjeva za kvalitetom, brzinom i efikasnošću. Integracijom savremenih tehnologija – industrijskih robota, senzora, sistema upravljanja i digitalnih platformi – zavarivanje postaje pametan i digitalno upravljani proces, sposoban za samostalno prilagođavanje i optimizaciju. Industrija 4.0 omogućava povezivanje zavarivačkih sistema s ostalim elementima proizvodnje u jedinstvenu mrežu, gdje se podaci neprestano razmjenjuju i koriste za unapređenje procesa. Takav pristup ne samo da povećava preciznost i pouzdanost zavarivanja, već i omogućava prediktivno održavanje, smanjenje troškova, povećanje sigurnosti na radu i bržu reakciju na promjene u proizvodnji. Iako prelazak na automatizovane i robotizovane sisteme zahtijeva značajna ulaganja, obuku kadrova i prilagođavanje infrastrukture, koristi koje oni donose čine ih neizbježnim za sve proizvodne

organizacije koje žele ostati konkurentne u eri digitalne industrije. Budućnost zavarivanja nesumnjivo leži u njegovoj potpunoj integraciji u pametne fabrike nove generacije.

8. REFERENCE

- [1] Shahrukh Aamir et al. (2019) – "Industry 4.0 implications in welding manufacturing processes: A state-of-the-art review", *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 49, 2020, Pages 271-288.
- [2] Dilip Kumar et al. (2021) – "Integration of Cyber-Physical Systems in Welding – Towards Smart Welding Technologies", Volume 97, 2021, Pages 448–453.
- [3] Wim J.M. Keijser (2018) – "Welding Robots: Technology, System Issues, and Applications"
- [4] John Hinchcliffe et al. (2020) – "Welding 4.0: Opportunities and Challenges"
- [5] AWS D16.4M/D16.4 (American Welding Society) – Specification for the Qualification of Robotic Arc Welding Personnel
- [6] ISO 23280-1:2020 – Welding - Application of Industry 4.0 concepts - Part 1: Overview IIW (International Institute of Welding)
- [7] Đukić, M., Radovanović, M. (2021) – "Industrija 4.0 i savremene tehnologije zavarivanja"
- [8] Đorđević, M. et al. (2020) – "Pametne fabrike i uloga zavarivanja u kontekstu Industrije 4.0"
- [9] Mihajlović, D. (2019) – "Uloga robota u automatizaciji zavarivanja – izazovi i perspektive u Srbiji"