



Oleksandr M. Savytskyi ^{1,a}, Mykhailo M. Savytskyi ^{1,b}, Darko Bajić ^{2,c}

UTICAJ STEPENA ZAGREVANJA PRI ELEKTROLUČNOM ZAVARIVANJU NA FORMIRANJE STRUKTURE U ZONI UTICAJA TOPLOTE ZAVARENIH SPOJEVA UGLJENIČNIH ČELIKA

THE IMPACT OF HEATING DEGREE DURING ARC WELDING ON THE STRUCTURE FORMATION IN THE HEAT AFFECTED ZONE OF WELDED JOINTS IN CARBON STEELS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Avugst 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

April 2025.

Adresa autora / Author's address:

¹ E.O. Paton Electric Welding Institute, NAN Ukraina, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine

² University of Montenegro, University of Montenegro, Faculty of Mechanics Engineering, Džordža Vašingtona bb., 81000 Podgorica

Email / ORCID ID:

^a / 0000-0002-2605-9647

^b / 0000-0003-3175-4334

^c darko@ucg.ac.me / 0000-0001-7567-5959

Ključne reči: zona uticaja toplote (ZUT), termički ciklus, brzina zagrijavanja, struktura, krtošt

Keywords: heat affected zone (HAZ), thermal cycle, heating rate, structure, brittleness.

Rezime

U radu se pokazuje da stepen zagrijavanja termičkog ciklusa zavarivanja utiče na proces formiranja strukture metala u zoni uticaja toplote (ZUT) zavarenih spojeva ugljeničnih čelika. U fazi zagrijavanja formiraju se metalna zrna i određuju se njihove veličine. Ovdje, kako je $\alpha \rightarrow \gamma$ transformacija završena, određuju se: nivo homogenosti austenita, njegova otpornost pri hlađenju i period inercije raspada, od čega zavisi kinetika strukturnih transformacija u fazi hlađenja. Dakle, formiranje metalne strukture ZUT-a počinje u fazi zagrijavanja u međukritičnom intervalu Ac_1 – Ac_3 . Faza hlađenja završava ovaj proces raspadom austenita. Razmatran je uticaj brzina zagrijavanja na proces formiranja strukture u metalu ZUT-a. Pokazuje se da sa povećanjem brzine zagrijavanja zavarenog spoja, pozitivan učinak na kinetiku raspada prehladenog austenita postepeno raste, uprkos negativnom uticaju povećanja brzine hlađenja. Shodno tome, pokazuje se da faza zagrijavanja termičkog ciklusa zavarivanja ima dominantan uticaj na kinetiku formiranja metalne strukture u ZUT-u zavarenih spojeva.

Abstract

The study demonstrates that the degree of heating in the welding thermal cycle affects the process of metal structure formation in the heat affected zone (HAZ) of welded joints in carbon steels. During the heating phase, metal grains are formed, and their sizes are determined. Here, as the $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation is completed, the level of austenite homogeneity, its resistance during cooling, and the inertia period of decomposition are determined, which influence the kinetics of structural transformations in the cooling phase. Thus, the formation of the metal structure in the HAZ begins during the heating phase, within the intercritical interval Ac_1 – Ac_3 . The cooling phase completes this process with the decomposition of austenite. The impact of heating rates on the structure formation process in the metal is considered. It is shown that with the increase in the heating rate of the welded joint, the positive effect on the kinetics of the supercooled austenite decomposition gradually increases, despite the negative impact of the increased cooling rate. Accordingly, it is shown that the heating phase of the welding thermal cycle has a dominant influence on the kinetics of metal structure formation in the HAZ of welded joints.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine



1. Uvod

Glavni faktor koji određuje svojstva ugljeničnih čelika i njihovih zavarenih spojeva je struktura metala. Zona uticaja toplote (ZUT) je dio zavarenog spoja koji je tokom procesa zavarivanja podvrgnut lokalnom visokotemperaturnom uticaju. Pod uticajem termičkog ciklusa zavarivanja u ZUT-u se javljaju strukturne promjene koje određuju njegovu strukturu i svojstva na makro i mikro nivou [1–3]. Struktura određuje sklonost zavarenog spoja ka povećanju krtosti i formiranju hladnih prslina, koje se povećavaju proporcionalno sa povećanjem sadržaja ugljenika u čelicima. Otpornost na krtost raste proporcionalno sa smanjenjem veličine metalnog zrna [1, 2].

Minimalna žilavost, plastičnost i maksimalna sklonost nastajanju hladnih prslina manifestuju se u slučaju formiranja martenzitne mikrostrukture u ZUT-u, što je posledica zakaljivosti (ojačavanja) metala. Perlitna mikrostruktura obezbjeđuje maksimalnu žilavost, plastičnost i otpornost na pojavu prslina. Beinitna mikrostruktura je u pogledu žilavosti i plastičnosti intermedijatna, a istovremeno osigurava visok nivo otpornosti na pojavu prslina [1, 3].

Da bi se obezbijedila visoka otpornost metala ZUT-u na krtost, neophodno je da se u njemu formira sitnozrna mikrostruktura. Za povećanje njegove otpornosti protiv formiranja hladnih prslina, neophodno je stvoriti uslove za odvijanje beinitne i perlitne transformacije, ne dozvoljavajući formiranje martenzitne strukture.

U procesu zagrijavanja i hlađenja metal ZUT-a prolazi kroz nekoliko transformacija. U fazi zagrijavanja u temperaturnom intervalu Ac_1 – Ac_3 osnovna (polazna) struktura se transformiše u austenitnu [3]. Nakon prekoračenja ovog temperaturnog intervala, razvija se proces rasta zrna. Temperaturna oblast iznad Ac_1 – Ac_3 naziva se interval rasta austenitnog zrna i homogenizacije austenita [1–3]. Što je ovaj interval viši i što je duže vrijeme zadržavanja metala u njemu, to je krupnije austenitno zrno i veći je stepen homogenizacije austenita [1,3]. Brzina rasta austenitnog zrna se povećava srazmjerno povećanju ovog intervala prema zoni visokih temperatura.

U fazi hlađenja dolazi do transformacije austenita. Ova transformacija se može odvijati u tri temperaturne oblasti: difuzionoj (perlitna), intermedijatnoj (beinitna) i bezdifuzionoj (martenzitna) [3]. Rezultat ovih transformacija su adekvatne strukture. U prvom slučaju se formiraju ferit i perlit različitih disperznosti i u različitim

odnosima. U drugom slučaju se formira beinit, a u trećem martenzit. Ako $\alpha \rightarrow \gamma$ transformacija obuhvata nekoliko oblasti, kao rezultat imamo da se u metalu formiraju mješovite strukture i njegova svojstva su određena procentualnim odnosom faza.

Zbog toga je zadatak zavarivača da formira takve temperaturne uslove zagrijavanja i hlađenja u ZUT-u kako bi se ograničio rast austenitnog zrna i povećala vjerovatnoća razvoja difuzione i intermedijatne transformacije pothlađenog austenita pri djelimičnom ili potpunom potiskivanju bezdifuzione transformacije. U cilju rješavanja ovog zadatka, zavarivač teži da obezbijedi u ZUT-u termički ciklus blizak idealnom [1].

2. Analiza dosadašnjih istraživanja

Idealni termički ciklus treba da obezbijedi minimalno vrijeme zadržavanja metala u temperaturnoj oblasti rasta zrna i usporeno hlađenje u temperaturnoj oblasti perlitne i beinitne transformacije, tj. formirati uslove bliske izotermnom hlađenju.

U realnim uslovima, pri elektroolučnom zavarivanju, nije moguće obezbijediti idealan, ili njemu blizak, termički ciklus samo promjenom parametara režima zavarivanja. U smislu kontrole uslova zagrijavanja i hlađenja metala, elektrolučno zavarivanje je značajno inferiornije od procesa termičke obrade. Pri zavarivanju ne postoji mogućnost ograničavanja maksimalne temperature zagrijavanja metala. U okološavnoj zoni ona postiže vrijednost blisku temperaturi topljenja. Takođe, ne postoji mogućnost regulisanja uslova hlađenja metala i njegovog zadržavanja u potrebnim temperaturnim intervalima.

Dužina zadržavanja metala na temperaturama višim od Ac_3 , kao i brzina hlađenja, određuju pogonsku energiju zavarivanja [4]:

$$\frac{q}{v} = \frac{I \cdot U \cdot \eta}{v} \quad (1)$$

gdje je: q , (J) – efektivna toplotna snaga električnog luka; v , (cm/min) – brzina zavarivanja; I , (A) – struja zavarivanja; U , (V) – napon električnog luka; η – efektivni koeficijent korisnog dejstva električnog luka.

Da bi se skratilo vrijeme zadržavanja metala u temperaturnoj oblasti porasta zrna neophodno je smanjiti pogonsku energiju (q/v), a za usporenje hlađenja istu povećati. Ovu kontradiktornost je nemoguće riješiti bez dodatnih tehnoloških tehnika.



Stoga zavarivači primenjuju zavarivanje sa minimalnim unosom toplote [1, 2]. To osigurava minimalno vrijeme zadržavanja metala u temperaturnom intervalu rasta zrna i usporava hlađenje.

Poznato je nekoliko oblika zagrijavanja: preventivno (prije zavarivanja), prateće (u procesu zavarivanja) i naknadno (posle zavarivanja) [1, 2].

Uočava se intenzivan rast austenitnog zrna sve dok se toplotna energija unosi u metal [5]. Ovaj proces je povezan sa fazom zagrijavanja. Stoga je naknadno zagrijavanje svakako pozitivno jer ne utiče na fazu zagrijavanja, već samo usporava hlađenje.

Tradicionalno, formiranje mikrostrukture u ugljeničnim čelicima tokom procesa zavarivanja i termičke obrade povezano je sa fazom njegovog hlađenja. O tome svjedoči činjenica da svi izotermički i termokinetički dijagrami razgradnje pothlađenog austenita odražavaju samo procese u fazi hlađenja metala i ne uzimaju u obzir fazu njegovog zagrijavanja [6, 7]. Radovi posvećeni izučavanju fenomena formiranja strukture pri zavarivanju ugljeničnih čelika pokazuju da su procesi formiranja strukture povezani sa fazom zagrijavanja zavarenih spojeva [8–12].

U skladu sa ovim radovima, sve preporuke za kontrolu formiranja mikrostrukture metala tokom termičke obrade tiču se samo promjene intenziteta njegovog hlađenja u odnosu na kritičnu brzinu [3] i, po potrebi, dodatnog otpuštanja različitog stepena. Prilikom zavarivanja, radi poboljšanja strukture zavarenih spojeva čelika koji su podložni zakaljivosti, preporučuje se i usporavanje hlađenja njegovim zagrijavanjem i naknadnom toplotnom obradom.

Međutim, ako se proces formiranja strukture posmatra u kompleksu na makro- i mikro- nivoima, jasno je da on počinje u ZUT-u u fazi zagrijavanja, gdje se formira makrostruktura. To bi također trebalo uticati na kinetiku formiranja mikrostrukture.

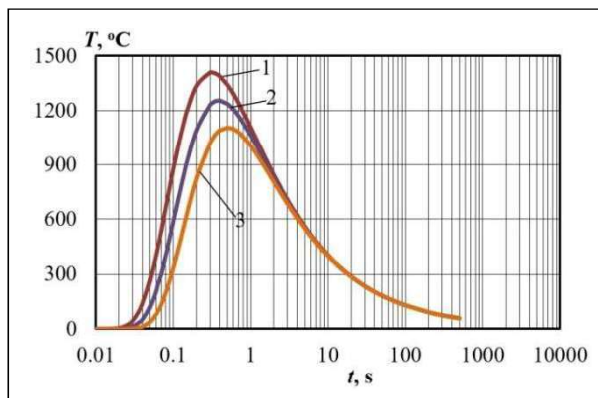
Poznato je da se kinetika razgradnje austenita određena periodom inertnosti transformacije (period inkubacije) i brzinom hlađenja [3]. Što je duži period inertnosti, to mora biti niža brzina hlađenja kako bi se spriječila martenzitna transformacija. Zauzvrat, period inertnosti zavisi od nivoa homogenosti austenita. Što je veći nivo homogenosti austenita, duži je period inertnosti razgradnje. Nivo homogenosti je određen veličinom temperaturnog opsega rasta austenitnog zrna i homogenizacije austenita, kao i vremenom zadržavanja metala u njemu, što zajedno predstavlja fazu zagrijavanja, čiji se uticaj na kinetiku formiranja mikrostrukture u ZUT-u ne uzima u obzir.

Pri zavarivanju ugljeničnih čelika krstost ZUT-a i pojava hladnih prslina u njemu se može izbjeći formiranjem fino-zrnastih struktura koje su rezultat razgradnje austenita u difuzionom i intermedijatnom području. Ovo se može postići kontrolisanjem kinetike strukturnih transformacija tokom zagrijavanja i hlađenja metala ZUT-a u procesu njegovog zavarivanja. Da bi se to postiglo, potrebno je znati kakav uticaj imaju faze zagrijavanja i hlađenja termičkog ciklusa zavarivanja na strukturne transformacije i čiji je uticaj dominantan.

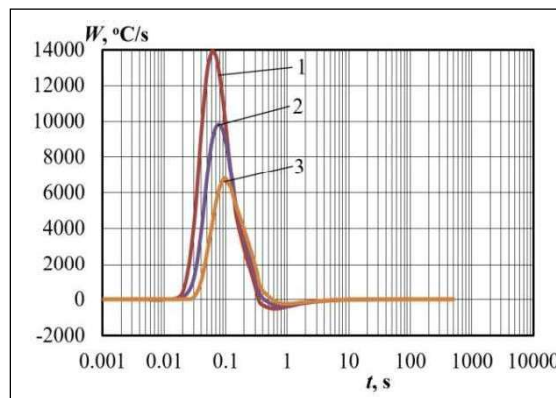
Uticaj stepena hlađenja na kinetiku formiranja mikrostrukture metala ZUT-a je prilično temeljito proučen i ogleda se u smanjenju temperatura $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije sa povećanjem brzina hlađenja. Stoga je cilj ovog rada identifikacija prirode i stepena uticaja faze zagrijavanja termičkog ciklusa zavarivanja na kinetiku strukturnih transformacija u ZUT-u.

3. Analiza rezultata

Na slici 1 su prikazani termički ciklusi u ZUT-u s maksimalnim temperaturama 1400 °C, 1250 °C i 1100 °C pri jednoprolaznom zavarivanju čelika 30XГCA (GOST) debljine 3.5 mm sa pogonskom energijom od 2162 J/cm. Krive odražavaju trenutne brzine zagrijavanja i hlađenja metala. Hemijski sastav konstrukcionog hrom-silicijum-mangan čelika 30XГCA dat je u tabeli 1.



a)



b)

Slika 1. Termičko stanje ZUT-a zavarenog spoja konstrukcionog čelika 30XГСА (GOST): 1 – $T_{max} = 1400\text{ °C}$, 2 – $T_{max} = 1250\text{ °C}$, 3 – $T_{max} = 1100\text{ °C}$; a) termički ciklus zavarivanja, b) trenutne brzine zagrijavanja i hlađenja.

Figure 1. Thermal conditions in the heat-affected zone (HAZ) of a welded joint made of structural steel 30KhGSA (GOST): 1 – $T_{max} = 1400\text{ °C}$, 2 – $T_{max} = 1250\text{ °C}$, 3 – $T_{max} = 1100\text{ °C}$; (a) welding thermal cycle, (b) instantaneous heating and cooling rates.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika 30XГСА (GOST) [13]

Table 1. Chemical composition of 30KhGSA steel (GOST) [13]

Maseni udio elemenata, %							
C	Cr	Mn	Si	Ni	Cu	P	S
0.28 – 0.34	0.80 – 1.10	0.80 – 1.10	0.90 – 1.20	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.025	≤ 0.025

Kada se uporede krive naznačenih termičkih ciklusa (slika 1a) i krive koje odražavaju trenutne brzine promjene temperature u njima (slika 1b), jasno je da su brzine zagrijavanja metala nešto veće od brzina hlađenja. Osim toga, pojavljuje se zakonitost na koju zavarivači nisu obratili pažnju. Kad se metal zagrije, razlika između temperatura susjednih termičkih ciklusa se postepeno povećava do maksimalnih 150 °C . Zatim, sa hlađenjem ova razlika opada, dok se na temperaturama ispod 900 °C spajaju sva tri termička ciklusa (slika 1a). Brzine hlađenja na temperaturama ispod 900 °C su skoro iste za sva tri termička ciklusa. Dakle, glavna razlika između termičkih ciklusa i brzina promjene njihovih temperatura se pojavljuje u fazi zagrijavanja. U fazi hlađenja ispod 900 °C se izjednačavaju temperature termičkih ciklusa i njihove brzine hlađenja.

Važnost ove zakonitosti leži u činjenici da se temperature ispod 900 °C odnose na oblast razgradnje pothlađenog austenita. Čak i za ugljenični čelik s minimalnim sadržajem ugljenika, temperaturni prag Ar_3 , ispod kojeg se može razviti $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacija, dostiže 835 °C u izotermičkim uslovima, a kako se sadržaj ugljenika i legirajućih

elemenata u čeliku povećava, tako se i ovaj temperaturni prag smanjuje [13]. U uslovima kontinualnog hlađenja, Ar_3 temperaturni prag se još više smanjuje. Na primjer, za čelik 30XГСА, temperatura Ar_3 u izotermičkim uslovima je 705 °C [13], a uz kontinualno hlađenje opada za $20\text{--}40\text{ °C}$, pa je njena vrijednost u intervalu $685\text{--}665\text{ °C}$ [7].

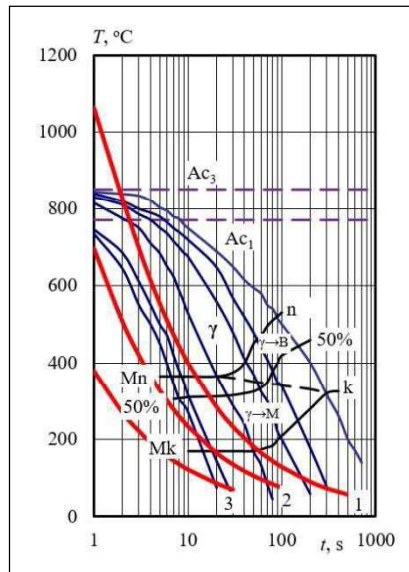
Pri zavarivanju kriterijum za procjenu uticaja faze hlađenja na kinetiku strukturnih transformacija u metalu ZUT-a su brzine hlađenja u temperaturnim intervalima $800\text{--}600\text{ °C}$ i $600\text{--}400\text{ °C}$. Intervali pokrivaju područja difuzione i intermedijalne $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije, respektivno, za veliku većinu ugljeničnih čelika [1, 10].

U skladu sa slikom 1, brzine hlađenja u naznačenim temperaturnim intervalima su gotovo jednake u područjima ZUT-a, koji je podvrgnut austenitizaciji i naknadnom razlaganju austenita. Shodno tome, struktura ZUT-a u ovim područjima bi trebalo da bude homogena, ako je formiranje strukture povezano samo sa fazom hlađenja zavarenog spoja. Ovaj zaključak se potvrđuje termokinetičkim dijagramom (slika 2) konstruisanim na osnovu poznatih dijagrama [6]. Kriva hlađenja br. 1, koja odgovara krivima hlađenja termičkih



ciklusa (slika 1), prolazi kroz martenzitno temperaturno područje (Mn – Mk). Dakle, u metalu ZUT-a koji je pri zagrijavanju podvrgnut

austenitizaciji treba da se formira homogena martenzitna struktura.



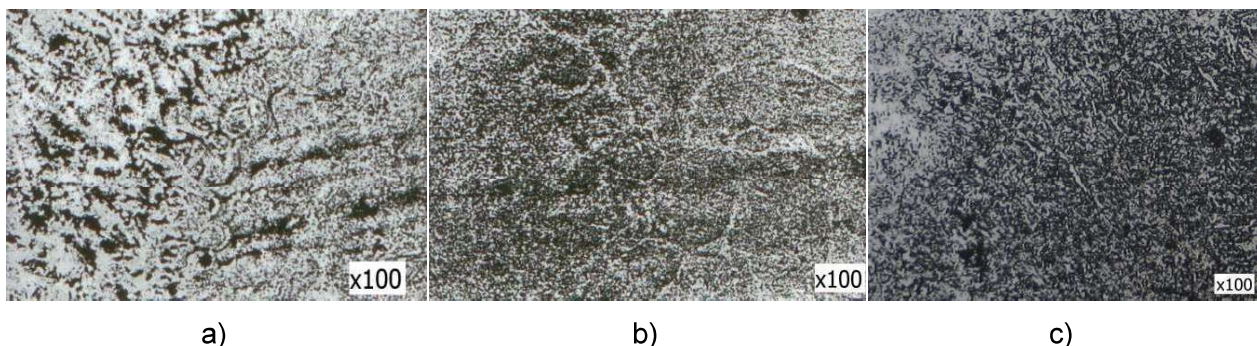
Slika 2. Termokinetički dijagram razlaganja pothlađenog austenite kod zavarenih spojeva čelika 30XhGSA debljine 3.5 mm: 1 – kriva hlađenja pri pogonskoj energiji zavarivanja 2162 J/cm; 2 – kriva hlađenja pri pogonskoj energiji zavarivanja od 1140 J/cm; 3 – kriva hlađenja pri pogonskoj energiji zavarivanja od 648 J/cm.

Figure 2. Thermokinetic diagram of undercooled austenite decomposition in welded joints of 30KhGSA steel with a thickness of 3.5 mm: curve 1 – cooling curve at a welding heat input of 2162 J/cm; curve 2 – cooling curve at a welding heat input of 1140 J/cm; curve 3 – cooling curve at a welding heat input of 648 J/cm.

Prema rezultatima metalografskih ispitivanja, u naznačenim područjima ZUT-a zavarenih spojeva dobijenih pri unosu energije od 2162 J/cm, formiraju se mješovite beinitno-martenzitne strukture (slika 3). To ukazuje na uticaj brzine zagrijavanja na razgradnju pothlađenog austenita, što termokinetički dijagram ne odražava.

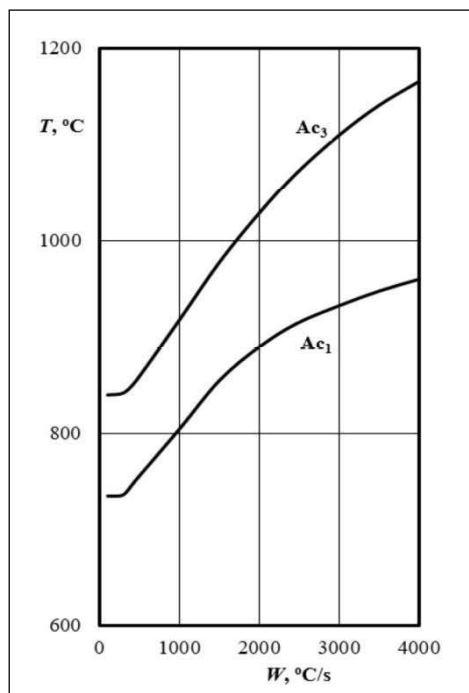
Poznato je da povećanje brzine zagrijavanja dovodi do porasta temperature kritičnih tačaka Ac_1 i Ac_3 (slika 4) [14, 15] i pomjeranja intervala

ograničenog njima u područje viših temperatura. Time se smanjuje interval rasta austenitnog zrna i homogenizacije austenita, kao i vrijeme zadržavanja metala u njemu, što pozitivno utiče na strukturu - zrno se usitnjava [1, 2]. Osim toga, smanjuje se i nivo homogenosti austenita, a njegovo razlaganje se pomjera ka višim temperaturama. U ZUT-a se formiraju strukture povećane žilavosti, plastičnosti i otpornosti na pojavu prslina.



Slika 3. Mikrostruktura metala ZUT-a zavarenog spoja čelika 30XhGSA: (a) s dominantnim sadržajem martenzita; (b) s sadržajem beinita i martenzita u odnosu 50 % – 50 %; (c) s dominantnim sadržajem beinita

Figure 3. Microstructure of the heat-affected zone (HAZ) in the welded joint of 30KhGSA steel: (a) predominantly martensitic structure; (b) mixture of bainite and martensite in a 50%–50% ratio; (c) predominantly bainitic structure



Slika 4. Oblast rasta temperatura kritičnih tačaka Ac_1 i Ac_3 u zavisnosti od brzine zagrijavanja čelika sa sadržajem ugljenika 0.2 – 0.6 mas. % [16]

Figure 4. Variation of critical transformation temperatures Ac_1 and Ac_3 as a function of heating rate for steels with a carbon content of 0.2–0.6 wt. % [16]

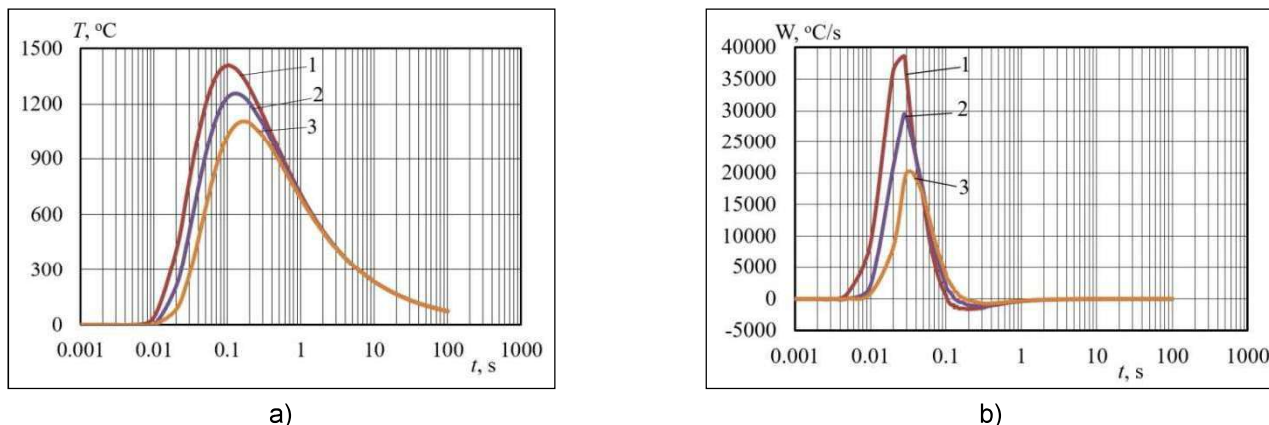
Dakle, prema slici 4 i rezultatima istraživanja [14,15], brzine zagrijavanja (sl. 1b) koje se dobijaju tokom zavarivanja pri unosu energije od 2162 J/cm, iniciraju pomjeranje kritičnih tačaka Ac_1 i Ac_3 u oblast povišenih temperatura. Ova pojava utiče na skraćenje temperaturnog opsega za rast austenitnog zrna i homogenizaciju austenita. Otuda se smanjuje nivo njegove homogenosti i otpornosti pri pothlađenju, a period inertnosti njegovog raspada se skraćuje.

Dominantni dio austenita koji je formiran u temperaturnom intervalu Ac_1 – Ac_3 ipak uspijeva postići prilično visok nivo homogenosti, što determiniše njegovu visoku stabilnost tokom pothlađenja. Stoga, pri brzinama hlađenja koje osigurava unos energije od 2162 J/cm (slika 1b), taj dio austenita se transformiše u bezdifuzionoj oblasti u martenzit. Drugi dio austenita se formira blizu gornje granice intervala Ac_1 – Ac_3 . Trajanje njegovog zadržavanja na temperaturama homogenizacije je minimalno, a shodno tome i nivoi njegove homogenosti i stabilnosti pri pothlađenju. Stoga, čak i pri brzinama hlađenja koje odgovaraju unosu energije od 2162 J/cm (slika 1b), razlaganje takvog austenita se dešava u beinitnoj oblasti.

Ipak, beinitna komponenta nije ravnomjerno raspoređena. Njen maksimalni sadržaj je blizu

fuzione granice i postepeno se smanjuje do minimuma s udaljavanjem od te granice. Ovo potvrđuje uticaj brzine zagrijavanja na kinetiku formiranja strukture metala. U blizini linije stapanja, maksimalne su brzine zagrijavanja (slika 1b; kriva 1). Zbog toga se u ovoj oblasti, prema slici 4, postižu maksimalne temperature Ac_1 i Ac_3 i koncentriše maksimalna količina austenita sa minimalnim nivoom homogenosti koji se razlaže u beinit. S udaljenjem od granice fuzije, brzine zagrijavanja se smanjuju (slika 1b; krive 2 i 3). Shodno tome, temperature Ac_1 i Ac_3 su smanjene, a takođe su smanjuje i količina austenita s minimalnim nivoom homogenosti. Dakle, kako se udaljavamo od linije stapanja, količina beinitne komponente se postepeno smanjuje.

Pri smanjenju unosa energije zavarivanja sa 2162 J/cm na 1140 J/cm, mijenja se toplotno stanje zavarenog spoja (slika 5). Trenutne brzine zagrijavanja i hlađenja se povećavaju (slike 1b i 5b). Ali čak i u ovom slučaju, u fazi hlađenja na temperaturama ispod 900 °C, termički ciklusi se spajaju, a trenutne brzine hlađenja se izjednačavaju. Razlike, i to značajne, termičkih ciklusa i krivih, koje odražavaju stope promjene njihovih temperatura, manifestuju se uglavnom u fazi zagrijavanja. Razlika između brzina zagrijavanja i hlađenja se povećava.



Slika 5. Termičko stanje ZUT-a zavarenog spoja čelika 30XГСА debljine 3.5 mm realizovanog pri unosu energije od 1140 J/cm: 1– $T_{max}=1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2– $T_{max}=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3– $T_{max}=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; a) termički ciklusi zavarivanja; b) srednje brzine zagrijavanja i hlađenja.

Figure 5. Thermal conditions in the heat-affected zone (HAZ) of a welded joint made of 30KhGSA steel with a thickness of 3.5 mm, produced at a heat input of 1140 J/cm: 1– $T_{max}=1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2– $T_{max}=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3– $T_{max}=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; (a) welding thermal cycles; (b) average heating and cooling rates.

Fazi hlađenja termičkih ciklusa pri unosu energije od 1140 J/cm (slika 5b) odgovara kriva br. 2 (slika 2). Pri takvim brzinama hlađenja, u ZUT-u treba da se formira struktura koja se sastoji od martenzita i zaostalog austenita. Saglasno pravilu proporcionalnosti odsječaka, odnos strukturnih komponenti je do 60% zaostalog austenita i do 40% martenzita. Za konačni raspad zaostalog austenita nije dovoljno hlađenje do sobne temperature, metal se mora pothladiti do temperatura ispod nule. Ovo ukazuje da se razlaganje austenita pomjera u područje nižih temperatura nego u prethodnom slučaju.

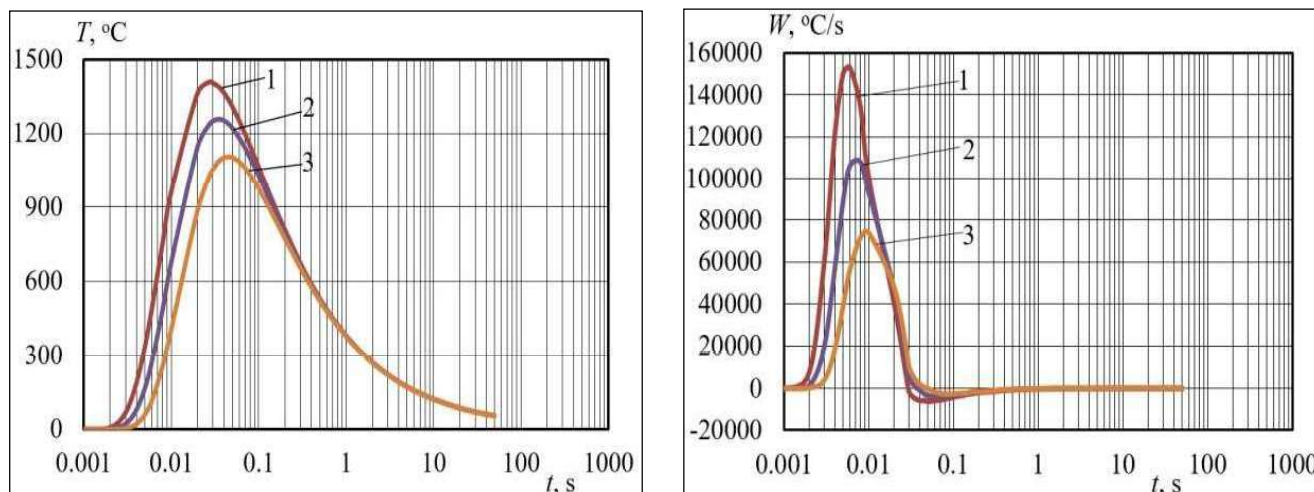
Metalografska ispitivanja daju nešto drugačiju sliku ovih transformacija. U metalu koji je podvrgnut austenitizaciji tokom zagrijavanja, formira se beinitno-martenzitna struktura (slika 3b) sa približno jednakim procentualnim udjelom strukturnih komponenti (50 % - 50 %). U poređenju sa prethodnim slučajem, raspad austenita postepeno prelazi u područje viših temperatura. Kao posledica, povećava se uticaj brzine zagrijavanja na razlaganje pothlađenog austenita, što termokinetički dijagram ne odražava.

Prema slici 4, povećanje brzine zagrijavanja inicira dalje povećanje temperatura A_{c1} i A_{c3} . Temperaturni interval homogenizacije austenita se smanjuje. Kao rezultat toga, do 50 % austenita uspijeva da se homogenizuje do nivoa pri kojem dolazi do njegovog raspada u martenzitnom području. Drugi dio austenita (do 50 %) ne uspijeva da se homogenizuje i raspada se u oblasti beinita

bez obzira na povećanje brzine hlađenja. Kao i u prethodnom slučaju, beinitna komponenta nije ravnomjerno raspoređena. Najveća količina beinita se nalazi blizu linije stapanja i postepeno se smanjuje udaljavanjem od nje. Ovo odgovara prirodi promjene brzine zagrijavanja, koja dostiže svoj maksimum blizu linije stapanja (slika 5b; kriva 1). Stoga se u ovom području, prema slici 4, dostižu maksimalne vrijednosti temperatura A_{c1} i A_{c3} , kao i maksimalne količine austenita sa minimalnim nivoom homogenosti. S udaljenjem od linije stapanja, brzine zagrijavanja (slika 5b; krive 2 i 3), kao i temperature A_{c1} i A_{c3} , opadaju. Takođe, smanjuje se i količina austenita sa niskim nivoom homogenosti, a samim tim i beinita.

Smanjenje unosa energije zavarivanja na 648 J/cm praćeno je daljim povećanjem brzine zagrijavanja i hlađenja (slika 6) i povećanjem njihove razlike. Međutim, i u ovom slučaju, kao i u prethodna dva, u fazi hlađenja na temperaturama ispod $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ dolazi do spajanja termičkih ciklusa i izjednačavanja trenutnih brzina hlađenja. Razlika između termičkih ciklusa i brzina promjene njihove temperature u potpunosti se ispoljava u fazi zagrijavanja zavarenog spoja.

Na termokinetičkom dijagramu faze hlađenja naznačenih termičkih ciklusa (slika 6a) odgovara kriva 3 (slika 2). Kriva prolazi ispod oblasti martenzitne transformacije. Stoga, u području ZUT-a, koje je zagrijavanjem podvrgnuto austenitskoj transformaciji, na temperaturama iznad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, očekuje se prisustvo zaostalog austenita. Za njegovo razlaganje neophodno je hlađenje ispod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 6. Termičko stanje ZUT-a zavarenog spoja čelika 30XГСА debljine 3.5 mm realizovanog pri unosu energije od 648 J/cm: 1– $T_{max}=1400$ °C, 2– $T_{max}=1250$ °C, 3– $T_{max}=1100$ °C; a) termički ciklusi zavarivanja; b) srednje brzine zagrijavanja i hlađenja

Figure 6. Thermal conditions in the heat-affected zone (HAZ) of a welded joint made of 30KhGSA steel with a thickness of 3.5 mm, produced at a heat input of 648 J/cm: 1– $T_{max}=1400$ °C, 2– $T_{max}=1250$ °C, 3– $T_{max}=1100$ °C; (a) welding thermal cycles; (b) average heating and cooling rates

Prema metalografskim istraživanjima, u naznačenom području ZUT-a formira se beinitno-martenzitna struktura u kojoj dominira beinit (slika 3c). Ovakva razlika u rezultatima dobijenim metalografijom i korištenjem termokinetičkog dijagrama u sva tri slučaja se može objasniti

4. Zaključak

Prethodno analizirani rezultati istraživanja pokazali su da smanjenje energije zavarivanja dovodi do istovremenog povećanja brzine zagrijavanja i hlađenja zavarenog spoja. Povećanje brzine zagrijavanja ZUT-a je praćeno povećanjem temperatura A_{c1} i A_{c3} . Ovo je praćeno smanjenjem temperaturnog intervala rasta austenitnog zrna i homogenizacije austenita, kao i vremena zadržavanja metala u njemu. Zrno se usitnjava, a smanjuju se nivo homogenosti austenita, njegova stabilnost pri hlađenju i period inercije njegovog razlaganja. Treba naglasiti da se razlaganje pomjera u područje viših temperatura [14, 15]. U ZUT-u, doprinosi formiranju fino zrnastih struktura veće žilavosti, duktilnosti i otpornosti na formiranje prslina.

isključivo uticajem stepena zagrijavanja na kinetiku razlaganja pothlađenog austenita, što nije moguće uočiti na osnovu analiza termokinetičkih dijagrama.

4. Conclusion

The previously analyzed research findings indicate that a reduction in welding heat input leads to a simultaneous increase in both the heating and cooling rates of the welded joint. The accelerated heating of the heat-affected zone (HAZ) results in an upward shift in the critical transformation temperatures A_{c1} and A_{c3} . This shift is accompanied by a narrowing of the temperature range for austenite grain growth and homogenization, as well as a reduction in the time the metal remains within this range. Consequently, grain refinement occurs, while the level of austenite homogeneity, its thermal stability during cooling, and the incubation period for its decomposition are all reduced. It is important to note that austenite decomposition shifts toward higher temperatures [14, 15]. In the HAZ, this behaviour promotes the formation of fine-grained microstructures, which exhibit improved toughness, ductility, and resistance to crack initiation.



Međutim, kako se povećava brzina zagrijavanja, tako se povećava i brzina hlađenja. Očekivano je da ovo bude praćeno obrnutim procesom – razlaganjem austenita u niskotemperaturnoj oblasti uz povećanje osjetljivosti ZUT-a na zakaljenje. Ipak, kao što potvrđuju prezentovani podaci, kako se povećava brzina zagrijavanja, njen pozitivan učinak na kinetiku razgradnje pothlađenog austenita u ZUT-u postepeno raste, bez obzira na negativan uticaj povećanja brzine hlađenja.

Dakle, uticaj stepena zagrijavanja na strukturu ZUT-a zavarenih spojeva ogleđa se u sledećem. U fazi zagrijavanja formiraju se metalna zrna i definiše se njihova veličina. Takođe, kako je $\alpha \rightarrow \gamma$ transformacija završena u temperaturnom intervalu $A_{c1}-A_{c3}$, određuju se nivo homogenosti austenita, njegova postojanost i period inercije raspadanja, na čemu se zasniva kinetika strukturnih transformacija u fazi hlađenja. Posljedično, formiranje strukture ZUT-a zavarenih spojeva ugljeničnih čelika počinje u fazi zagrijavanja u međukritičnom intervalu ($A_{c1}-A_{c3}$). Faza hlađenja završava ovaj proces razlaganjem austenita. Faza zagrijavanja termičkog ciklusa zavarivanja ima dominantan uticaj na kinetiku formiranja strukture metala u ZUT-u zavarenih spojeva.

Izmjena nivoa homogenosti austenita, njegova postojanost pri hlađenju, kao i period inertnosti razlaganja se mogu kontrolisati upravljanjem procesom formiranja strukture ZUT-a i njegovim svojstvima.

Literatura / References

[1] Патон, Б. Е., (1974), Технология электрической сварки плавлением, Машиностроение, Москва

[2] Акулов, А. И., Бельчук, Г. А., Демянцевич, В. П., (1977), Технология и оборудование сварки плавлением, Машиностроение, Москва

[3] Гуляев, А. П., Металловедение, (1966), Металлургия, Москва

[4] Фролов, В. В., Парахин, В. А., Ермолаева, В. И., Макаров, Э. Л., Григорьянц, А. Г., Гаврилюк, В. С., Шип, В. В., (1988) под ред. В. В. Фролова, Теория сварочных процессов: учебник, М.: Высшая школа

[5] Новикова Д. П., (1989), Высокотемпературная металлография сварных соединений, Киев: Наукова думка (Научная мысль)

However, as the heating rate increases, the cooling rate also rises. This is typically expected to cause the opposite effect—favouring low-temperature austenite decomposition and increasing the HAZ's susceptibility to hardening. Nevertheless, as confirmed by the presented data, the beneficial influence of higher heating rates on the decomposition kinetics of undercooled austenite in the HAZ becomes increasingly significant, despite the adverse effects of faster cooling.

Therefore, the influence of heating intensity on HAZ microstructure can be described as follows: during the heating phase, metallic grains are formed and their size is determined. Since the $\alpha \rightarrow \gamma$ transformation completes within the $A_{c1}-A_{c3}$ temperature interval, this stage also establishes the degree of austenite homogeneity, its stability, and the incubation time for its decomposition—parameters that directly govern the kinetics of structural transformations during cooling. As a result, the formation of HAZ microstructure in welded joints of carbon steels begins in the heating phase within the intercritical temperature range ($A_{c1}-A_{c3}$), and is completed during the cooling phase through austenite decomposition. The heating stage of the welding thermal cycle exerts the dominant influence on the kinetics of microstructural evolution in the HAZ.

Adjustments in austenite homogeneity, its stability during cooling, and the incubation time for its transformation can be controlled by managing the structure formation process in the HAZ and tailoring its resulting properties.

[6] Лебедев Ю. М., (1993), Регулирование структуры и свойств зоны термического влияния при сварке высокопрочных сталей, Николаевский кораблестроительный ин-т им. С.О.Макарова, Николаев, Украина

[7] Попов А. А., Попова А. Е., (1961), Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита, Москва: Машгиз

[8] Грабин В. Ф., Денисенко А. В., (1978), Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей, Киев: Наукова думка (Научная мысль)

[9] Грабин В. Ф., (1982), Металловедение сварки плавлением, Киев: Наукова думка (Научная мысль)



[10] Макара, А. М., Мосендз М.А., (1971), Сварка высокопрочных сталей, К: Техніка, Киев

[11] Багрянский, К. В., Добротина, З. А., Хренов, К. К., (1976), Теория сварочных процессов, К: Вища школа, Киев

[12] Позняков, В. Д., Костин, В. А., Гайворонский, А. А., Моссоковская, И. А., Жуков, В. В., Клапатюк, А. В., (2015), Влияние термического цикла сварки на структурно-фазовые превращения и свойства металла ЗТВ среднеуглеродистой легированной стали типа 30X2H2МФ, Автоматическая сварка, 2, 8-15.

[13] Сорокин, В. Г., Волосникова, А. В., Вяткин, С. А. и др., (1989), под ред. Сорокина, В. Г., Марочник сталей и сплавов, М.: Машиностроение, Москва

[14] Гриднев, В. Н., Мешков, Ю. Я., Ошкадеров, С. П., Трефилов, В. И., (1973), Физические основы электротермического упрочнения стали, К.: Наукова думка, Киев

[15] Савицкий А.М., (2001), Управление структурой и свойствами металла при дуговой сварке закаливаемых сталей. Автореф. диссертации дис. канд. техн. Наук, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

[16] Савицкий А. М., Савицкий М. ,(2017), Особенности влияния теплопроводности на склонность сталей к образованию сварных соединений, Металловедение и обработка металлов, 3, 40–47.

Vesti**News**

72. GODIŠNJA SKUPŠTINA DUZS

Redovna 72. godišnja skupština DUZS zakazana je za ponedjeljak, 30. jun 2025. godine u svečanoj sali Instituta IMS u Beogradu, Bulevar vojvode Mišića 43, sa sledećim dnevnim redom:

1. Otvaranje zasedanja Skupštine i izbor radnih tela
2. Verifikacija mandata članova Skupštine
3. Izveštaj o radu DUZS za period 2024 - 2025. godine.
Podnosilac izveštaja: predsednik DUZS
4. Izveštaj o radu DUZS-CertPers za period 2024 - 2025. godine.
Podnosilac izveštaja: izvršni rukovodilac DUZS-CertPers
5. Izveštaj o finansijskom poslovanju u 2024. godini.
Podnosilac izveštaja: predsednik Nadzornog odbora
6. Diskusija po podnetim izveštajima i usvajanje izveštaja
7. Predlog plana rada za 2025 - 2026. godinu; diskusija i usvajanje
8. Razno