



Oleksandr M. Savitskyi¹, Mychailo M. Savitskyi¹, Darko Bajić^{2, a}, V.N. Vashchenko¹

TERMIČKA BARIJERA U ZAVARENIM SPOJEVIMA UGLJENIČNIH ČELIKA

THERMAL BARRIER IN WELDED JOINTS OF CARBON STEELS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

August 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

February 2023.

Ključne reči: termička barijera, zavarljivost ugljeničnih čelika, pogonska energija zavarivanja, toplotna provodnost

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 Mechanical Engineering, Džordža Vašingtona bb., 81000 Podgorica, Montenegro

Email: ^adarko@ucg.ac.me

Keywords: thermal barrier, weldability of carbon steels, welding heat input, thermal conductivity

Rezime

Pri zavarivanju ugljeničnih čelika dio metala zone uticaja toplote neposredno uz kupku vara doživljava austenitnu transformaciju, koja se karakteriše kombinacijom minimalne toplotne provodnosti i visokog toplotnog kapaciteta. Ova zona predstavlja termičku barijeru i sprečava transfer toplote iz kupke vara u osnovi metal. Pored toga, ova zona je sposobna da akumulira i da određen vremenski period zadržava značajnu količinu toplote. U fazi zagrijavanja, ova barijera ima pozitivan uticaj na formiranje zavarenih spojeva, a u fazi hlađenja izaziva negativan efekat – formiranje toplih ili hladnih prslina, pregrijavanje i krtost metala. Negativan uticaj termičke barijere na metal zavarenih spojeva povećava se sa povećanjem sadržaja ugljenika i legirajućih elemenata u čeliku, a takođe i sa povećanjem unosa topline u zavareni spoj.

Trenutno, efikasno sredstvo za smanjenje negativnog utjecaja termičke barijere na metal zavarenih spojeva je smanjenje unosa toplote u zavarene spojeve i njihovo periodično hlađenje. Maksimalna efikasnost se postiže u slučaju kombinacije ove dvije tehnike.

Abstract

When welding carbon steels, a part of the metal of the heat affected zone directly next to the weld bath undergoes austenitic transformation, which is characterized by a combination of minimal thermal conductivity and high thermal capacity. This zone represents a thermal barrier and prevents heat transfer from the weld bath to the base metal. In addition, this zone is able to accumulate and retain a significant amount of heat for a certain period of time. In the heating phase, this barrier has a positive effect on the formation of welded joints, and in the cooling phase it causes a negative effect - the formation of hot or cold cracks, overheating and brittleness of the metal. The negative influence of the thermal barrier on the metal of welded joints increases with the increase of carbon content and alloying elements in steel, and also with the increase of heat input into the welded joint.

Currently, an effective means of reducing the negative impact of the thermal barrier on the metal of welded joints is to reduce the heat input to the welded joints and their periodic cooling. Maximum efficiency is achieved in the case of a combination of these two techniques.

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



1. Uvod

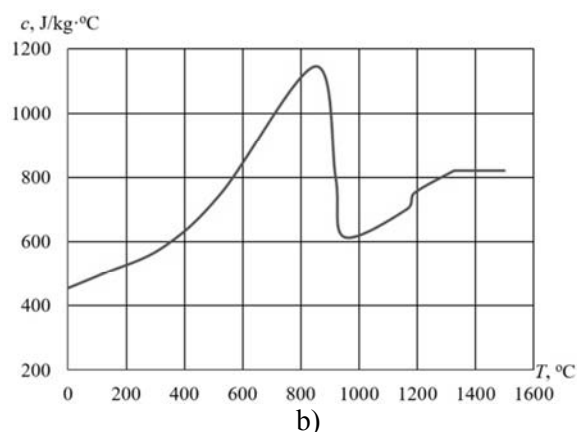
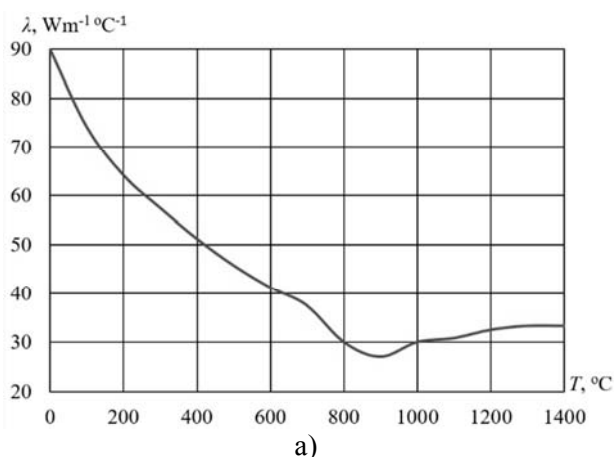
Osnovni konstrukcioni materijal našeg vremena je ugljenični čelik. To je uslovljeno nizom faktora, kao što su relativna niska cijena i tehnološki usavršena proizvodnja ugljeničnih čelika i konstrukcija na njihovoj osnovi. Osim toga, povećanjem sadržaja ugljenika i legirajućih elemenata u čelicima, povećavaju se njihove karakteristike čvrstoće i osjetljivost na termičko djelovanje [1, 2].

Sklonost ugljeničnih čelika da formiraju visokokvalitetne zavarene spojeve ocjenjuje se nizom pokazatelja koji karakterišu njihovu zavarljivost. Glavni pokazatelji zavarljivosti su sklonost stvaranju toplih i hladnih prslina, kao i povećanje krtosti (krtom lomu) [3 - 5].

Otpornost na formiranje toplih prslina ocjenjuje se pomoću indeksa HCS (hot cracking susceptibility), a otpornost na formiranje hladnih prslina ocjenjuje se prema ekvivalentu ugljenika CE [5]. Sklonost ka pregrijavanju i krtom lomu zavarenog spoja ocjenjuje se prema proračunskom

indeksu tvrdoće HVmax. Navedeni pokazatelji ukazuju da povećanje sadržaja ugljenika i brojnih legirajućih elemenata u čelicima pogoršava njihovu zavarljivost. Međutim, ovi parametri za procjenu pokazatelja zavarljivosti ugljeničnih čelika uzimaju u obzir samo njihov hemijski sastav. Rezultati istraživanja [6, 7] ukazuju da je zavarljivost ugljeničnih čelika neposredno povezana s njihovim termofizičkim stanjem (toplotna provodnost) i postepeno se pogoršava srazmjerno njenom smanjenju.

Na slici 1 prikazane su krive promjene koeficijenta toplotne provodnosti željeza i njegovog toplotnog kapaciteta u zavisnosti od temperature zagrijavanja. Krive pokazuju da kada se postigne temperatura austenitne transformacije (911°C), željezo karakteriše kombinacija minimalne toplotne provodnosti (sl. 1a) i maksimalnog toplotnog kapaciteta (sl. 1b). Dalje povećanje temperature zagrijavanja je praćeno blagim povećanjem toplotne provodnosti u kombinaciji s visokim toplotnim kapacitetom.

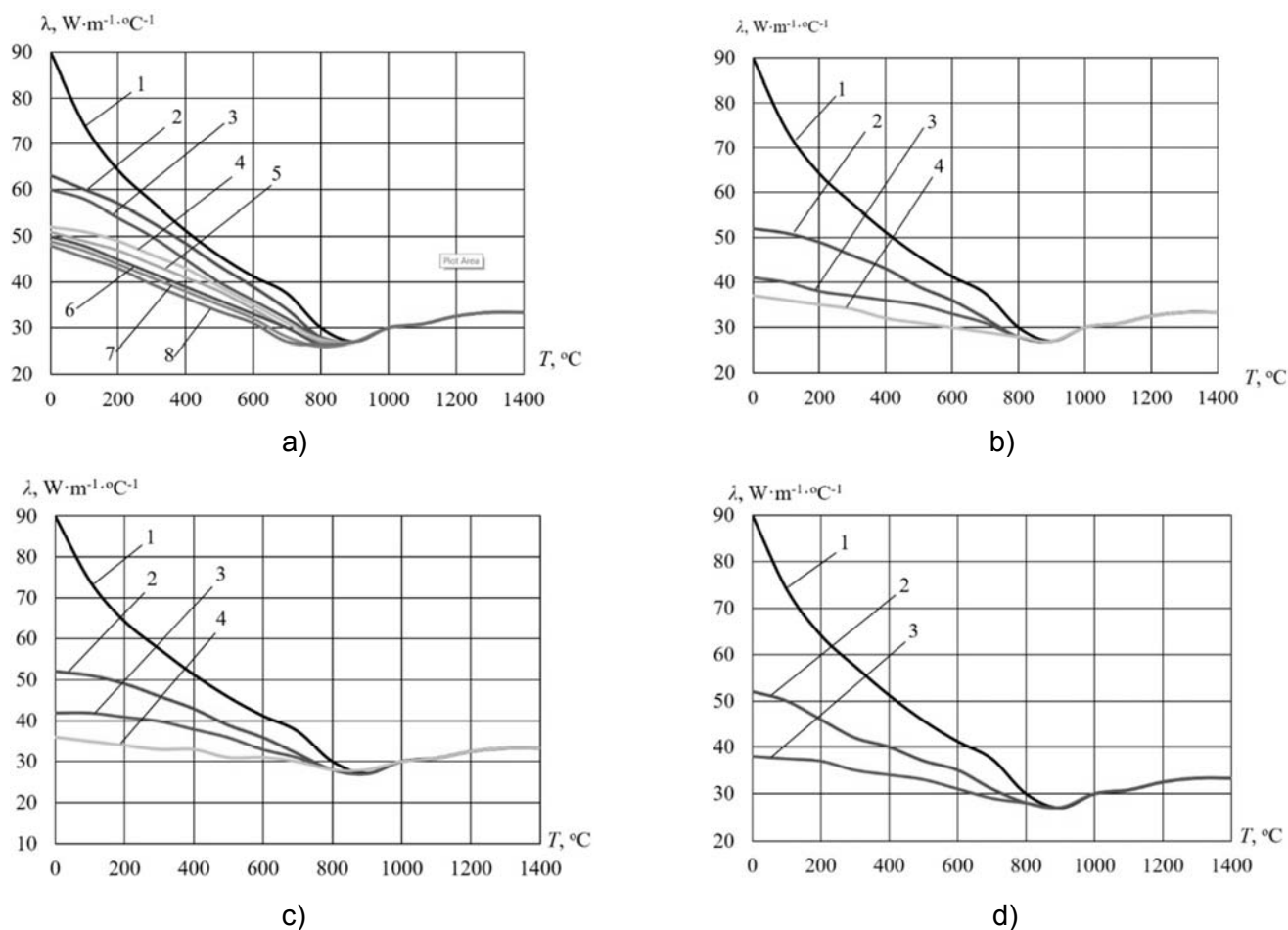


Slika 1. Zavisnost koeficijenta toplotne provodnosti (a) i toplotnog kapaciteta (b) željeza od temperature zagrijavanja [6]

Figure 1. Dependence of the thermal conductivity coefficient (a) and heat capacity (b) of iron on the heating temperature [6]

Na slici 2 date su krive zavisnosti toplotne provodnosti željeza i čelika s različitim sistemima legiranja od temperature zagrijavanja [7]. Ovi podaci pokazuju da sa povećanjem sadržaja ugljenika u čelicima, njihova toplotna provodnost opada (sl. 2a).

Legiranjem čelika sa Mn, Cr, Ni, Si dodatno se smanjuje toplotna provodnost čelika (sl. 2b,c,d). Nakon austenizacije uticaj ugljenika i legirajućih elemenata na toplotnu provodnost čelika se izjednačava, što se objašnjava rastvaranjem primjesa (nečistoća), ugljenika i legirajućih elemenata u austenitu [6, 7].



Slika 2. Uticaj temperature zagrijavanja i legirajućih elemenata na koeficijent toplotne provodnosti čelika [7]:

- a) Ugljenika: 1- čisto Fe; 2- 0,08% C; 3 - 0,1% C; 4 - 0,2% C; 5 - 0,3% C; 6 - 0,4% C; 7 - 0,5% C; 8 - 0,8% C;
 b) Mangana: 1- čisto Fe; 2 – čelik 35 (GOST); 3 – čelik 35Г2 (GOST); 4 – čelik 65Г (GOST);
 c) Hroma i Nikla: 1- čisto Fe; 2 – čelik 20 (GOST); 3 – čelik 20X (GOST); 4 – čelik 20XH3A (GOST);
 d) Silicijuma: 1- čisto Fe; 2 – čelik 28XA (GOST); 3 – čelik 38XC (GOST)

Figure 2. Influence of heating temperature and alloying elements on the coefficient of thermal conductivity of steel [7]:

- a) Carbon: 1- pure Fe; 2- 0.08% C; 3 - 0.1% C; 4 - 0.2% C; 5 - 0.3% C; 6 - 0.4% C; 7 - 0.5% C; 8 - 0.8% C;
 b) Manganese: 1- pure Fe; 2 – steel 35 (GOST); 3 – steel 35G2 (GOST); 4 – steel 65G (GOST);
 c) Chromium and Nickel: 1- pure Fe; 2 – steel 20 (GOST); 3 – steel 20X (GOST); 4 – steel 20HN3A (GOST);
 d) Silicon: 1- pure Fe; 2 – steel 28XA (GOST); 3 – steel 38XC (GOST)

Nakon završetka austenizacije, termofizičko stanje ugljeničnih nelegiranih i legiranih čelika karakteriše minimalna toplotna provodnost i maksimalni toplotni kapacitet. Metal zagrijan na naznačenu temperaturu stvara barijeru širenju toplote. U zavarenom spoju ulogu termičke barijere igra metalna struktura koja je podvrgnuta austenitizaciji. Takvo područje je područje zone pregrijavanja koja direktno okružuje tečnu kupku vara i sprečava odvođenje toplote do osnovnog materijala (OM). U fazi zagrijavanja, termička barijera ima pozitivnu ulogu u formiranju zavarenog spoja. U fazi hlađenja termička barijera sprečava

prenos toplote iz kupke vara na OM, što je praćeno povećanjem vremena zadržavanja tečnog metala u području temperature kristalizacije i povećava vjerojatnoću pojave toplih prslina u metalu šava (MŠ) [6, 7]. Zbog kombinacije minimalne toplotne provodnosti i visokog toplotnog kapaciteta, termička barijera može akumulirati značajnu količinu toplote i zadržati je dugo vremena. To dovodi do pregrijavanja metala, rasta austenitnog zrna i stabilizacije austenita. Posljedica je njegovo lokalno otvrdnjavanje i krtost, kao i stvaranje hladnih prslina i krtog loma. Do stvaranja termičke barijere u metalu zavarenih spojeva dolazi

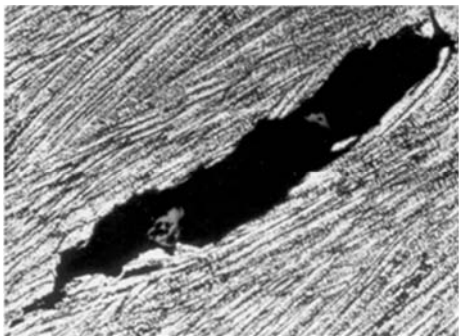


u fazi njihovog zagrijavanja nakon završetka $\alpha \rightarrow \gamma$ transformacije. Njeno postojanje je definisano do trenutka raspada austenita pri hlađenju, tj. do završetka $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije.

2. Eksperimentalni rezultati i diskusija

Proširenje temperaturnog intervala i postojanja termičke barijere, kao i povećanje njene geometrije,

sprečava odvođenje toplote iz kupke vara na OM. Posledica toga je povećanje trajanja postojanja kupke vara u tečnom i čvrsto-tečnom stanju, tj. u temperaturnom opsegu kristalizacije (temperaturni opseg krtosti) [2]. To dovodi do stvaranja toplih prslina u MŠ (sl. 3).

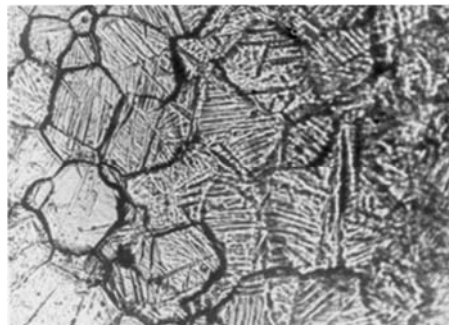
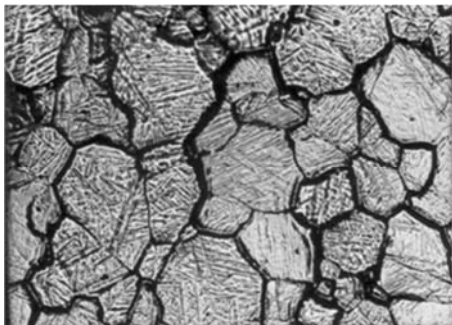


Slika 3. Tople prsline u MŠ zavarenih spojeva ugljeničnih čelika (uvećanje 400 puta)

Figure 3. Hot cracks in WM of welded joints of carbon steel (magnification 400 times)

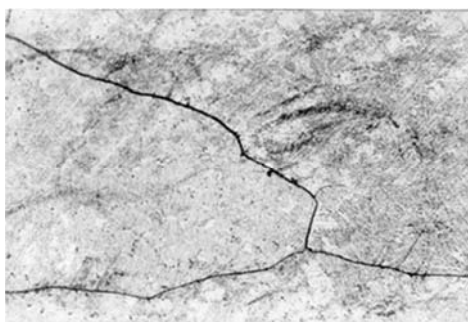
Niska toplotna provodnost i visok toplotni kapacitet toplotne barijere omogućavaju joj da akumulira i dugo zadržava značajnu količinu toplote. Ovo povećava vrijeme zadržavanja metala zone uticaja toplote (ZUT) u području visokih temperatura i doprinosi njegovom pregrijavanju, rastu austenitnog zrna i stabilizaciji austenita. Kao

rezultat javlja se formiranje krupnozrne strukture u naznačenom području (sl. 4) sa značajnim ili dominantnim sadržajem martenzita. Formiranje zakaljive strukture u zavarenim spojevima ili mješovitih struktura s dominantnim sadržajem martenzitne komponente, praćeno je stvaranjem hladnih prslina u metalu spojeva (sl. 5).



Slika 4. Zakaljiva krupnozrna struktura u okošavnim zonama zavarenih spojeva ugljeničnih čelika sa dominacijom martenzita (uvećanje 400 puta)

Figure 4. Quenchable coarse-grained structure in the surrounding zones of welded joints of carbon steels dominated by martensite (magnification 400 times)



Slika 5. Hladne prsline u ZUT-u zavarenog spoja ugljeničnog čelika (uvećanje 240 puta)

Figure 5. Cold cracks in the HAZ of a carbon steel welded joint (magnification 240 times)

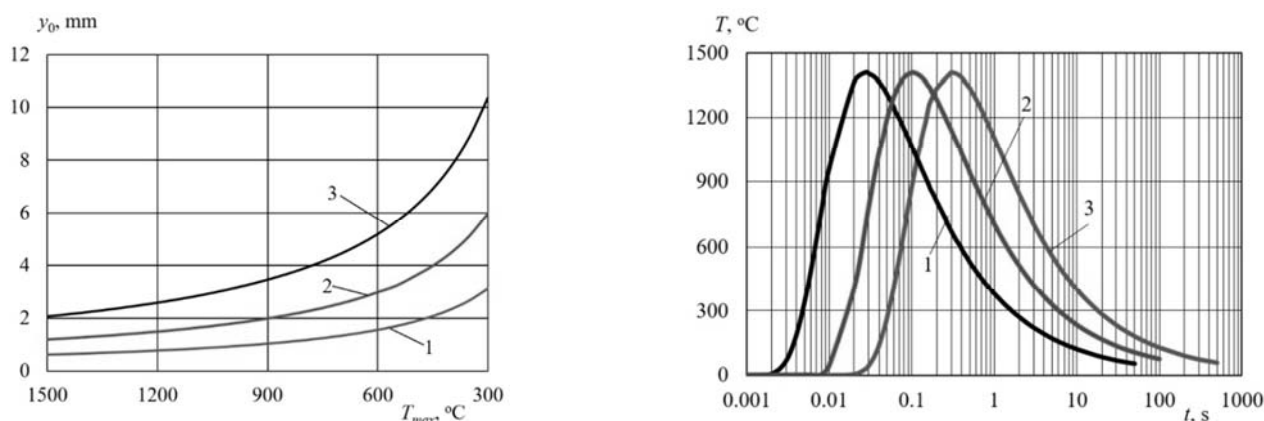


Kako nije moguće izbjeći stvaranje termičke barijere u zavarenim spojevima, potrebno je ograničiti temperaturni interval koji ona pokriva, smanjiti njenu geometriju i vrijeme postojanja. To će smanjiti stepen njenog negativnog uticaja na zavareni spoj. Temperaturni interval pokriven termičkom barijerom određen je temperaturama $\alpha \rightarrow \gamma$ i $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacija i maksimalnom temperaturom zagrijavanja (maksimalna temperatura termičkog ciklusa zavarivanja). Temperature $\alpha \rightarrow \gamma$ i $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacija zavise od hemijskog sastava zavarivanog čelika. Maksimalne temperature zagrijavanja u čvrstom metalu tokom zavarivanja topljenjem dostižu vrijednosti bliske temperaturama topljenja.

Dimenzije termičke barijere, tj. širina presjeka ZUT-a čiji metal doživljava austenitnu transformaciju i trajanje njegovog postojanja prije

raspada austenita zavisi od količini toplote unešene u zavareni spoj [3, 4, 7-9].

Kako je termička barijera dio zone ZUT-a, smanjenjem geometrije ZUT-a smanjuje se termička barijera. Uticaj unosa toplote na dimenzije ZUT-a može se ocijeniti na osnovu krivih koje odražavaju udaljenost izoterma s različitim fiksnim temperaturama od granice topljenja (sl. 6a) i podataka datih u tabeli 1. Donja temperaturna granica ZUT-a je izoterma s temperaturom od 300°C. Kako se unos toplote zavarivanja smanjuje sa 2162 J/cm na 648 J/cm (faktor 3,3), dimenzije ZUT-a se smanjuju za 3,3 puta - sa 8,31 mm na 2,49 mm. Vrijeme zadržavanja metala na temperaturi iznad 300°C, koje je određeno termičkim ciklusima zavarivanja (sl. 6b) smanjuje se za više od 10 puta (tabela 1). Shodno tome se smanjuju dimenzije termičke barijere i trajanje njenog postojanja.



Slika 6. Dimenzije zone ZUT (a) i termički ciklus (b) pri zavarivanju ugljeničnih čelika sa pogonskom energijom: 1- 648 J/cm, 2- 1140 J/cm, 3- 2162 J/cm

Figure 6. HAZ zone dimensions (a) and thermal cycle (b) when welding carbon steels with energy of: 1- 648 J/cm, 2- 1140 J/cm, 3- 2162 J/cm

Tabela 1. Parametri ZUT-a

Table 1. HAZ parameters

| Pogonske energije zavarivanja, [J/cm] | Dimenzija ZUT-a, [mm] | Vrijeme zadržavanja na temepraturi >300 °C, [s] |
|---------------------------------------|-----------------------|---|
| 2162 | 8,31 | 19,99 |
| 1140 | 4,78 | 6,97 |
| 648 | 2,49 | 1,79 |

Brzina promjene temperature metala tokom zavarivanja upotrebom snažnog izvora toplote pri njegovom kretanju velikom brzinom (zavarivanje tijela velike mase) određena je izrazom [9]:

$$w = 2\pi\lambda \frac{(T - T_H)^2}{q/v} \quad (1)$$

gdje je: w – brzina promjene temperature, T – temperatura pri kojoj se određuje brzina njene promjene, T_H – početna temperatura metala, q – efektivna topotna snaga električnog luka, v – brzina zavarivanja.

Brzina promjene temperature metala tokom zavarivanja upotrebom snažnog brzopokretnog



linearnog izvora toplote (zavarivanje ploče ograničene debljine) određena je izrazom [9]:

$$w = 2\pi\lambda c\rho \frac{(T - T_H)^3}{[q/(v\delta)]^2} \quad (2)$$

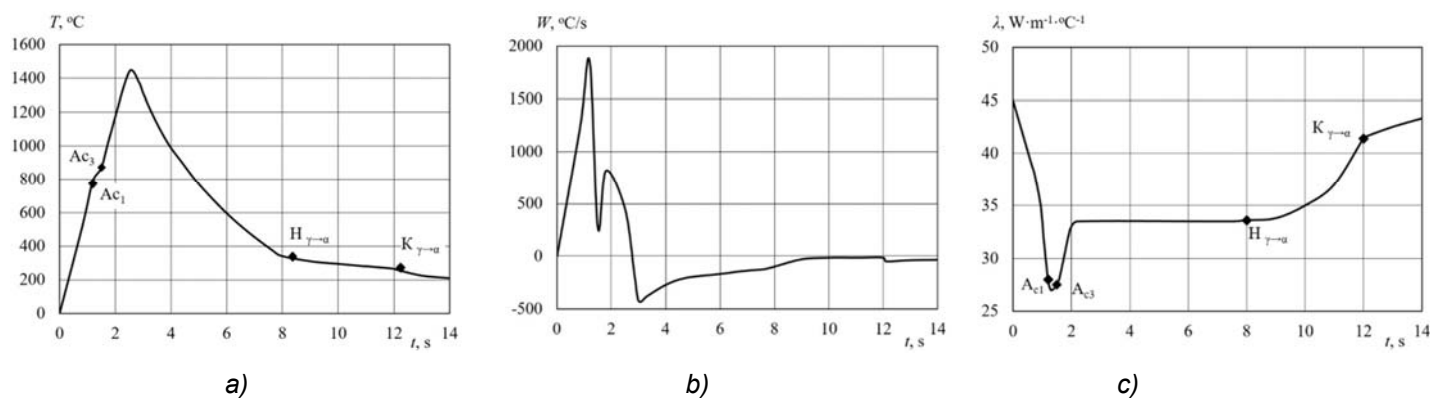
gdje je: w – brzina promjene temperature, T – temperatura pri kojoj se određuje brzina njene promjene, T_H – početna temperatura metala, q – efektivna toplotna snaga električnog luka, v – brzina zavarivanja, δ – debljina zavarivanog metala, λ – koeficijent toplotne provodnosti zavarivanog metala i $c\rho$ – zapreminski toplotni kapacitet zavarivanog metala.

Analiza izraza 1 i 2 omogućava da se utvrdi priroda uticaja pogonske energije zavarivanja (q/v) na brzinu zagrijavanja metala zavarenog spoja. Kako se unos pogonske energije zavarivanja smanjuje, brzina zagrijavanja se povećava. Povećanje brzine zagrijavanja metala neizbježno je praćeno povećanjem temperatura $\alpha \rightarrow \gamma$ i $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacija, koje se pomjeraju u područja viših temperatura [7, 11, 12]. Što je veća brzina zagrijavanja, to su više temperature $\alpha \rightarrow \gamma$ i $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacija. Iz ovoga proizilazi da je smanjenjem pogonske energije zavarivanja moguće ne samo smanjiti veličinu termičke barijere i trajanje njenog

postojanja, već i smanjiti temperaturni interval koji ona pokriva. Stoga se proces formiranja i eliminacije termičke barijere može kontrolisati.

Na slikama 7 i 8 prikazani su termički ciklusi koji odražavaju zagrijavanje uzoraka ugljeničnog čelika pri prosječnim brzinama od 650 °C/s (sl. 7a) i 2200 °C/s (sl. 8a). Pri tom, maksimalne trenutne brzine zagrijavanja u ovim uslovima dostižu 1854°C/s (sl. 7b) i 11500°C/s (sl. 8b). Oni premašuju trenutne brzine hlađenja.

Poređenje termičkih ciklusa i krivih promjena brzine zagrijavanja i hlađenja metala (sl. 7a,b i sl. 8a,b) pokazuje da povećanjem prosječne i trenutne brzine zagrijavanja, A_{c1} i A_{c3} temperature se povećavaju, kada početna struktura metalna prolazi kroz austenitnu transformaciju i formira se termička barijera. Kada se zagrijavaju prosječnom brzinom od 650°C/s, temperature dostižu vrijednosti 790°C (A_{c1}) i 870°C (A_{c3}) (sl. 7a). Za poređenje temperatura A_{c1} i A_{c3} koristimo čelik 40XH, čiji je hemijski sastav dat u tabeli 2. Povećanje prosječne brzine zagrijavanja metala na 2200°C/s (sl. 8a) praćeno je povećanjem temperatura A_{c1} i A_{c3} na 980°C i 1105°C, respektivno.



Slika 7. Termičko stanje ugljeničnog čelika tipa 40XH, (maksimalna srednja brzina zagrijavanja 650°C/s): a) termički ciklus sa tačkama faznih transformacija; b) kriva promjene trenutnih brzina zagrijavanja i hlađenja metala zavarenog spoja; c) kriva promjene toplotne provodnosti metala

Figure 7. Thermal condition of carbon steel type 40XH, (maximum mean heating rate 650 °C/s): a) thermal cycle with phase transformation points; b) the curve of changes in the instantaneous heating and cooling rates of the metal of the welded joint; c) curve of change in thermal conductivity of metals

Tabela 2. Hemijski sastav čelika 40XH [2]

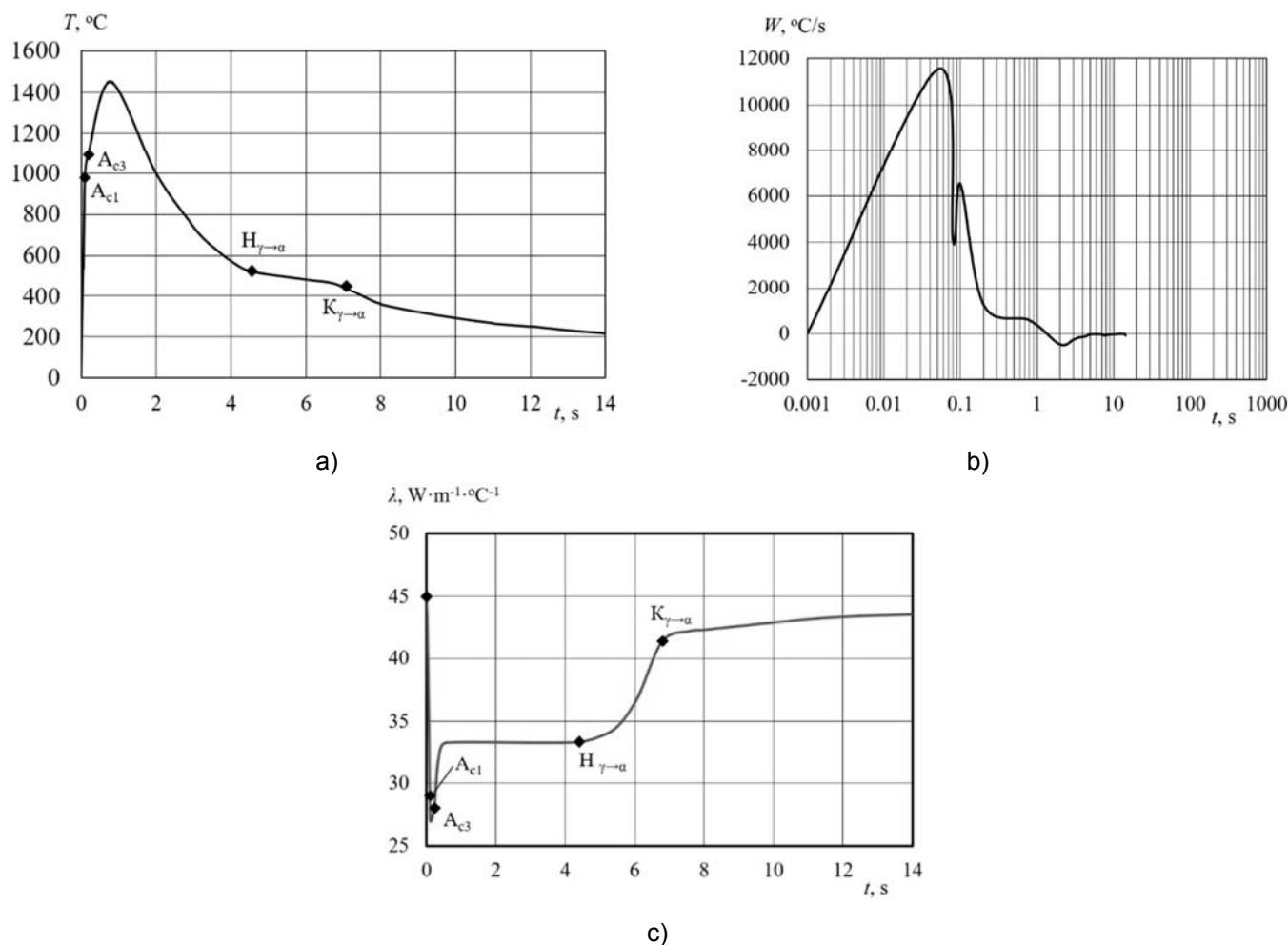
Table 2. Chemical composition of steel 40XH [2]

| Sadržaj elemenata, [maseni udio u %] | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|----|
| C | Si | Mn | Cr | Ni | S | P | Cu |
| 0,36-0,44 | 0,17-0,37 | 0,50-0,80 | 0,45-0,75 | 1,00-1,40 | ≤0,035 | ≤0,035 | ≤ |



U uslovima neprekidnog hlađenja, temperature tačka početka ($H_{\gamma \rightarrow \alpha}$) i kraja ($K_{\gamma \rightarrow \alpha}$) raspada austenita takođe rastu sa povećanjem brzine zagrijavanja. Pri srednjoj brzini zagrijavanja od 650°C/s , raspad austenita, a time i eliminacija termičke barijere, odvija se u temperaturnom intervalu od $340 - 265^\circ\text{C}$ (sl. 7a). Povećanje srednje brzine zagrijavanja na 2200°C/s praćeno je pomakom raspada austenita do temperature od $530 - 460^\circ\text{C/s}$ (sl. 8a).

Pri prosečnoj brzini zagrijavanja od 650°C/s , termička barijera pokriva temperaturni opseg $790^\circ\text{C} - 1440^\circ\text{C} - 265^\circ\text{C}$ (sl. 7a,c). Sa povećanjem srednje brzine zagrijavanja na 2200°C/s , ovaj interval se smanjuje na $980^\circ\text{C} - 1440^\circ\text{C} - 460^\circ\text{C}$ (sl. 8a,c). Smanjuje se i interval postojanja termičke barijere. U prvom slučaju iznosi 10,8 s (sl. 7a,c), a u drugom slučaju 6,7 s (sl. 8a,c), što je 1,6 puta manje.

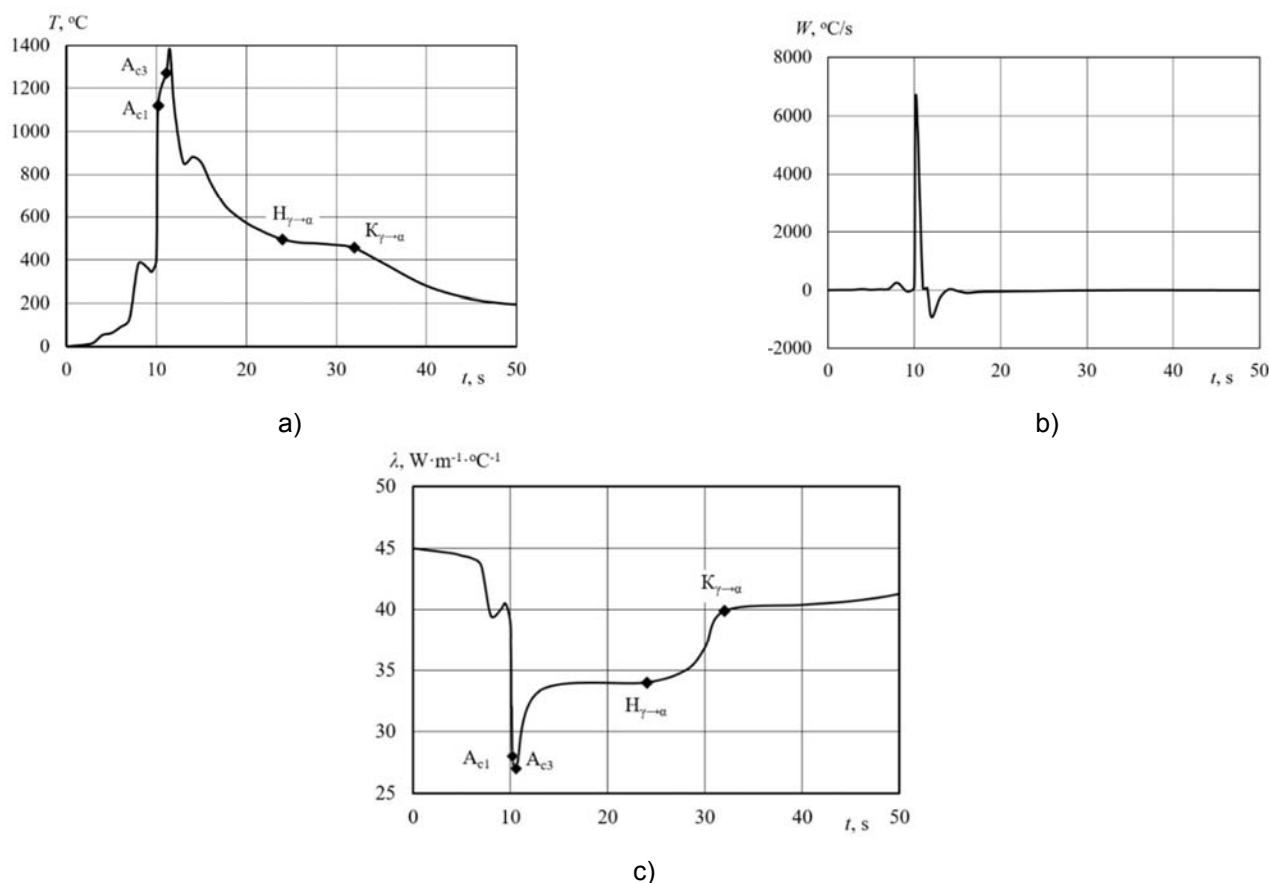


Slika 8. Termičko stanje ugljeničnog čelika tipa 40XH, (maksimalna srednja brzina zagrijavanja 2200°C/s): a) termički ciklus sa tačkama faznih transformacija; b) kriva promjene trenutnih brzina zagrijavanja i hlađenja metala zavarenog spoja; c) kriva promjene toplotne provodnosti metala

Figure 8. Thermal condition of carbon steel type 40XH, (maximum mean heating rate 2200°C/s): a) thermal cycle with phase transformation points; b) the curve of changes in the instantaneous heating and cooling rates of the metal of the welded joint; c) curve of change in thermal conductivity of metals

Brzine zagrijavanja utiču na procese u ZUT-u tokom zavarivanja (sl. 9). Kada se zagrijavaju brzinom od 7000°C/s , temperature A_{c1} i A_{c3} dostižu temperature od 1170°C i 1270°C , respektivno, a temperature raspada austenita (likvidacija termičke

barijere) se povećavaju na 495°C i 455°C , respektivno. U skladu sa termičkim ciklusom (sl. 9a), termička barijera pokriva temperaturni interval $1170^\circ\text{C} - 1400^\circ\text{C} - 455^\circ\text{C}$.



Slika 9. Termičko stanje ugljeničnog čelika tipa 40XH, (maksimalna srednja brzina zagrijavanja $7000^\circ C/s$): a) termički ciklus sa tačkama faznih transformacija; b) kriva promjene trenutnih brzina zagrijavanja i hlađenja metala zavarenog spoja; c) kriva promjene toplotne provodnosti metala

Figure 9. Thermal condition of carbon steel type 40XH, (maximum average heating rate $7000^\circ C/s$): a) thermal cycle with phase transformation points; b) the curve of changes in the instantaneous heating and cooling rates of the metal of the welded joint; c) curve of change in thermal conductivity of metals

Rezultati istraživanja na zavarenim spojevima i simulacijom zavarivačkih uslova zagrijavanja i hlađenja na uzorcima pokazali su da je povećanje brzine zagrijavanja uvijek praćeno pomakom temperature transformacije austenita (A_{c1} i A_{c3}) i temperaturama početka i kraja raspada austenita ($H_{\gamma \rightarrow \alpha}$ i $K_{\gamma \rightarrow \alpha}$) u područje viših temperatura, što dovodi do smanjenja temperaturnog intervala termičke barijere i smanjenja trajanja njegovog postojanja.

Jednačine 1 i 2 pokazuju da se kod zavarivanja povećanje stepena zagrijavanja metala može postići smanjenjem pogonske energije (q/v). Na ovaj način rješava se i problem smanjenja veličine termičke barijere. Međutim, pri konvencionalnim postupcima elektrolučnog zavarivanja postoji donji prag unosa pogonske energije, ispod koje postaje problematično ostvariti zavareni spoj. Smanjenje pogonske energije (unosa toplote) pri konvencionalnim postupcima elektrolučnog zavarivanja ima vrlo ograničenu perspektivu i

moguće je u vrlo uskom intervalu režima zavarivanja.

Ovaj problem se može riješiti korištenjem aktivirajućih topitelja pri zavarivanju sa netopljivom (ATIG) i topljivom (AMIG) elektrodama u zaštitnim gasovima. Ove metode omogućavaju smanjenje unosa pogonske energije (unosa toplote) zavarivanja za 1,8 – 6 puta na račun povećanja sposobnosti penetracije električnog luka za 1,5 – 4 puta u odnosu na konvencionalno elektrolučno zavarivanje u zaštitnim gasovima [13 - 15]. U ovom slučaju, srednja brzine zagrijavanja dostiže $5000 - 6000^\circ C/s$, a trenutni maksimum $25000 - 30000^\circ C/s$.

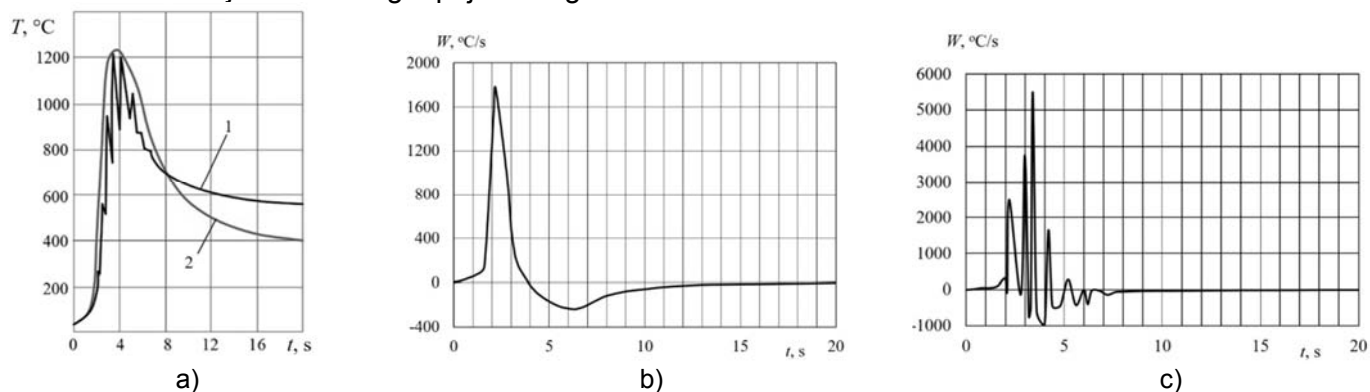
Drugi način za povećanje brzine zagrijavanja i smanjenje rezultirajućeg unosa toplote u zavarene spojeve je njihovo periodično hlađenje. Ova tehnološka metoda omogućava pokretanje pulsirajućih termičkih ciklusa velike brzine u zavarenim spojevima.



Na slici 10 prikazani su termički ciklusi zavarivanja pri istoj toplotnoj snazi električnog luka (q) sa periodičnim hlađenjem (sl. 10a, kriva 1) i bez periodičnog hlađenja (sl. 10a, kriva 2) [16].

Poređenje ovih termičkih ciklusa i postignutih trenutnih brzina zagrijavanja (sl. 10b,c) pokazuje da periodično hlađenje zavarenog spoja omogućava

povećanje trenutnih brzina zagrijavanja metala za nekoliko puta. Prilikom zavarivanja bez periodičnog hlađenja, maksimalna trenutna brzina zagrijavanja je 1760°C/s (sl. 10b), a periodično hlađenje omogućava da se poveća na 5500°C/s (sl. 10c) bez promjene toplotne snage električnog luka (q) (približno 3 puta).



Slika 10. Termičko stanje zavarenog spoja realizovanog bez periodičnog hlađenja i sa periodičnim hlađenjem: a) termički ciklus zavarivanja: 1- sa periodičnim hlađenjem, 2 – bez periodičnog hlađenja [16]; b) trenutne brzine zagrijavanja i hlađenja tokom zavarivanja bez periodičnog hlađenja; c) trenutne brzine zagrijavanja i hlađenja tokom zavarivanja sa periodičnim hlađenjem

Figure 10. Thermal conditions of the welded joint realized without periodic cooling and with periodic cooling: a) thermal welding cycle: 1- with periodic cooling, 2 – without periodic cooling [16]; b) instantaneous heating and cooling rates during welding without periodic cooling; c) instantaneous heating and cooling rates during welding with periodic cooling

Uticaj visokih brzina zagrijavanja tokom pulsirajućih termičkih ciklusa na temperature transformacije austenita (Ac1 i Ac3) i temperature početka i kraja raspada austenita ($\text{H}\gamma \rightarrow \alpha$ i $\text{K}\gamma \rightarrow \alpha$), dimenzije i vrijeme postojanja termičke barijere, kao i na temperaturni opseg koji pokriva slično je kao što se dešava kada se smanji pogonska energija zavarivanja. Periodično hlađenje zavarenog spoja omogućava smanjenje rezultirajućeg unosa toplote u njega zbog periodičnog odvođenja viška toplote.

3. Zaključak

Negativan uticaj termičke barijere na formiranje, strukturu i svojstva zavarenih spojeva manifestuje se u povećanju vjerovatnoće pojave toplih prslina u metalu šava, pregrijavanju i zakaljivosti (očvršćavanju) metala zone uticaja toplote, što je praćeno povećanjem njene krtosti i stvaranjem hladnih prslina.

Negativan uticaj termičke barijere na metal zavarenih spojeva povećava se s povećanjem sadržaja ugljenika i legirajućih elemenata u čelicima.

Dakle, smanjenje temperaturnog intervala koji pokriva termička barijera, smanjenje njene dimenzije i perioda postojanja može se izvršiti na dva načina - smanjenjem pogonske energije (toplotnog unosa) zavarivanja ili periodičnim hlađenjem kupke vara. Ove tehnološke metode umanjuju negativan učinak termičke barijere na metal zavarenog spoja do te mjere da sprečavaju nastanak toplih i hladnih prslina u njemu, kao i pojavu krtog loma. Kombinacijom ove dvije tehnološke metode postiže se maksimalna efikasnost.

Nemoguće je spriječiti stvaranje termičke barijere u zavarenim spojevima ugljeničnih čelika, već je jedino moguće oslabiti njegovo negativno djelovanje na metal smanjenjem temperaturnog intervala koji pokriva, smanjenjem njene dimenzije i vremena postojanja.

Efikasna sredstva za smanjenje negativnog uticaja toplotne barijere na metal zavarenih spojeva su smanjenje unosa pogonske energije zavarivanja (toplote zavarivanja) i periodično hlađenje zavarenih spojeva. Maksimalna efikasnost se postiže kombinacijom ove dvije tehnike.



3. Conclusion

The negative influence of the thermal barrier on the formation, structure and properties of welded joints is manifested in the increase of the probability of the appearance of hot cracks in the weld metal, overheating and quenching (hardening) of the heat-affected zone metal, which is accompanied by an increase in its brittleness and the formation of cold cracks.

The negative impact of the thermal barrier on the metal of welded joints increases with the increase in the content of carbon and alloying elements in steels.

Literatura / References

[1] Гуляев, А. П., *Металловедение*, М. (1966), *Металлургия*, Москва

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

[3] Патон, Б. Е. (1974), *Технология электрической сварки плавлением*, М.: *Машиностроение*, Москва

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

[5] Ромашкин, А. Н. *Свариваемость сталей*. <http://steelcast.ru/weldability>.

[6] Савицкий, О. М. (2015) *Теплофізичний стан вуглецевих сталей та його вплив на формування теплового бар'єру при локальній термічній дії*, *Металознавство та обробка матеріалів*, 3, 28–34.

[7] Савицкий, О. М., Савицкий, М. М., (2017), *Особенности влияния теплопроводности на схильність сталей до утворення зварних з'єднань*, *Металознавство та обробка матеріалів*, 3, 40–47.

[8] Рыкалин, Н. Н., Пугин, А. И., (1959), *Тепловые процессы при сварке плавлением*, *Профиздат*, Москва

It is impossible to prevent the creation of a thermal barrier in welded joints of carbon steel, but it is only possible to decrease its negative effect on the metal by reducing the temperature interval it covers, by reducing its size and time of existence.

Effective means to reduce the negative impact of the thermal barrier on the welded joints metal are the reduction of the input of welding energy (welding heat) and periodic cooling of the welded joints. Maximum efficiency is achieved by combining these two techniques.

[9] Фролов, В. В., (1988), *Теория сварочных процессов*, М.: *Высшая школа*, Москва

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

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

[12] Savytsky, O. M., Savytsky, M. M., Shkrabalyuk, Yu. M., Vuherer, T., Bajic, D. R., (2016), *The influence of electric arc activation on the speed of heating and the structure of metal in welds*, *Thermal Science*, 20 1. 239–246.

[13] Savytsky, O. M., Savytsky, M. M., Bajic, D., (2017) *Efficiency of the application fluxes in shielded arc welding*, *Tehnicki vjesnik*, 24, 4, 975–980.

[14] Savytsky A.M., Savytsky M.M., Bajic D., (2016), *MIG/MAG zavanje primjenom aktivirajućeg topitelja*, *Zbornik radova savetovanje zavarivanje 2016*, *Srebrno jezero*, Srbija, Septembar 14-17, 82–90.

[15] Savitskij, M. M., Savitskij, A. M., Bajic, D., Blečić, Z., *MIG welding technology using activating fluxes*, (2004), *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 1, pp. 10–14.

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