Muhadin Kozica [1,a]

WELD ME - PROGRAM ZA PROCJENU ZAVARLJIVOSTI I TERMIČKIH USLOVA ZAVARIVANJA ČELIKA

WELD ME - SOFTWARE FOR ASSESSING THE WELDABILITY AND THERMAL CONDITIONS OF STEEL WELDING

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Jun 2026.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Septembar 2026.

Adresa autora / Author's address:

[1] DENIKOO d.o.o., Podgorica, Crna Gora

Email / ORCID ID:

[a] mkozica@outlook.com /

Ključne reči: zavarljivost, temperatura predgrijavanja, vrijeme hlađenja t8/5, zona uticaja toplote, program za zavarivanje

Keywords: weldability, preheat temperature, cooling time t8/5, heat-affected zone, welding software

Rezime

Hladne i tople pukotine i povećana tvrdoća u zoni uticaja toplote (ZUT) predstavljaju kritične probleme pri zavarivanju čelika, uzrokovane zavarljivošću materijala, sadržajem vodonika i termičkim ciklusom zavarivanja. U ovom radu dat je prikaz i mogućnost softverskog alata Weld Me, namijenjenog analizi i procjeni zavarljivosti čelika prema EN 1011-2. Softver ima implementirane proračune ugljeničnih ekvivalenta (CE, CET, Pcm, CE(WES), CEN), Graville dijagram, indikatore osjetljivosti na tople pukotine HCS, UCS, proračun temperatura transformacija, proračun temperature predgrijavanja, vrijeme hlađenja t8/5, procjenu tvrdoće u ZUT-u kao i Schaeffler-ov i WRC-1992 dijagram za analizu mikrostrukture metala zavara.

Program povezuje preporuke standarda i empirijskih izraza iz naučne literature (ugljenični ekvivalenti, Yurioka model, Schaeffler i WRC-1992 dijagrami) sa industrijskom praksom, smanjujući na taj način subjektivnost pri izradi postupaka zavarivanja i povećavajući pouzdanost zavarenih spojeva.

Abstract

Cold and hot cracks and increased hardness in the heat-affected zone (HAZ) represent critical problems in steel welding, caused by the weldability of the material, hydrogen content and the thermal cycle of welding. This paper presents an overview and the capabilities of the software tool Weld Me, intended for the analysis and assessment of steel weldability according to EN 1011-2. The software has implemented calculations of carbon equivalents (CE, CET, Pcm, CE(WES), CEN), the Graville diagram, hot cracking susceptibility indicators HCS and UCS, calculation of transformation temperatures, calculation of preheat temperature, cooling time t8/5, estimation of hardness in the HAZ, as well as the Schaeffler and WRC-1992 diagrams for the analysis of weld metal microstructure.

The program links the recommendations of standards and empirical expressions from the scientific literature (carbon equivalents, the Yurioka model, the Schaeffler and WRC-1992 diagrams) with industrial practice, thereby reducing subjectivity in the development of welding procedures and increasing the reliability of welded joints.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 1. Konferencije sa međunarodnim učešćem „Tehnologije spajanja materijala“ održane u Bečićima, Crna Gora od 14. do 16. maja 2026. godine

1. Uvod

Weld Me je softver, razvijen u programskom jeziku Python, koji implementira niz analitičkih metoda kao što su: proračun ugljeničnih ekvivalenata, proračun indikatora osjetljivosti na tople pukotine, temperature transformacija, temperaturu predgrijavanja prema EN 1011-2, analitičke modele za vrijeme hlađenja $t_8/_5$, procjenu tvrdoće u ZUT-u i konstitucijske dijagrame za metal zavara.

Cilj razvoja ovog programa je pojednostavljenje standardizovanih postupaka u jedinstven proračunski pristup koji eliminiše potrebu za ručnim očitavanjem nomograma i konstitucijskih dijagrama (Schaeffler, Graville, WRC-1992) i pojednostavljuje proces izrade tehnologije zavarivanja a uz to i omogućava ponovljive rezultate sa višestrukim scenarijima.

2. Teorijske osnove

Zavarljivost čelika određuje se preko ugljeničnih ekvivalenata, koji sadržaj različitih legirajućih elemenata prevodi u ekvivalentni sadržaj ugljenika. Dominantan uticaj na kaljivost zone uticaja toplote (ZUT) ima ugljenik (C). Ostali legirajući elementi kao što su mangan (Mn), silicijum (Si), hrom (Cr), molibden (Mo), vanadijum (V), nikl (Ni), bakar (Cu) i niobijum (Nb), doprinose otvrdnjavanju u različitoj mjeri, što se izražava odgovarajućim težinskim koeficijentima u formulama ugljeničnog ekvivalenta. Veća vrijednost ugljeničnog ekvivalenta znači veću sklonost ka stvaranju tvrde martenzitne strukture u ZUT-u tokom hlađenja, čime raste rizik od hladnih pukotina indukovanih vodonikom.

Tokom više od osam decenija razvijene su brojne formule za ugljenični ekvivalent, od koncepta koji su Dearden i O'Neill uveli 1940. godine (kasnije standardizovan kao CE(IIW) od strane IIW-a 1967.), preko CET, Pcm i CE(WES), do savremene Yuriokine CEN formule iz 1987. godine koja premoščuje razlike između prethodnih pristupa. Sve ove formule služe kao osnovni indikator za potrebu predgrijavanja, izbor dodatnog materijala i kontrolu unosa toplote pri zavarivanju.

CE (IIW) ili CEV

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (1)$$

Formula (1) je definisana od strane Međunarodnog instituta za zavarivanje. Najčešće se koristi u praksi i implementirana je u raznim standardima, a koristi se kao Metod A u EN 1011-2.

Validan opseg primjene je CE ≈ 0.30 do 0.70. Okvirno, za debljine elemenata do približno 20 mm važi: CE ≤ 0.40 - dobra zavarljivost bez predgrijavanja; 0.40÷0.60 - zahtijeva predgrijavanje; iznad 0.60 - obavezno je pojačano predgrijavanje. Validan opseg hemijskog sastava čelika je: C = 0,05 do 0,25; Si = max. 0,8; Mn = max. 1,7; Cr = max.0,9; Cu = max. 1,0; Ni = max. 2,5; Mo = max. 0,75; V = max. 0,20 [2].

CET

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (2)$$

CET formula se koristi u okviru Metode B u standardu EN 1011-2. Razvijena je u istraživačkim laboratorima čeličane Thyssen Stahl AG.

Formula važi za hemijski sastav koji se kreće u sledećim granicama: 0.05 ≤ C ≤ 0.32; Si ≤ 0.8; 0.5 ≤ Mn ≤ 1.9; Cr ≤ 1.5; Cu ≤ 0.7; Mo ≤ 0.75; Nb ≤ 0.06; Ni ≤ 2.5; Ti ≤ 0.12; V ≤ 0.18; B ≤ 0.005 [2] .

Pcm

Parametar Pcm (engl. Crack Susceptibility Parameter), poznat i kao Ito-Bessyo formula, koristi se pri procjeni osjetljivosti čelika na pojavu hladnih pukotina u zoni uticaja toplote (ZUT) tokom hlađenja nakon zavarivanja. U odnosu na klasični CE(IIW), Pcm daje znatno veću težinu sadržaju ugljenika, čime bolje opisuje ponašanje modernih niskougljeničnih čelika povišene čvrstoće gdje ugljenik dominantno određuje zakaljivost ZUT-a.

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn + Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (3)$$

Ova formula je razvijena u Japanu, i specifično dizajnirana za niskougljenične čelike povećane čvrstoće sa sadržajem ugljenika C < 0,12%, kao i niskougljenične čelike za cjevovode (API 5L) i čelike koji se koriste u brodogradnji.

Validan opseg hemijskog sastava je: C = 0.07÷0.22%, Si ≤ 0.60%, Mn = 0.40÷1.40%, Cu ≤ 0.50%, Ni ≤ 1.20%, Cr ≤ 1.20%, Mo ≤ 0.70%, V ≤ 0.12%, Nb ≤ 0.04%, Ti ≤ 0.05% i B ≤ 0.005%.

Granice primjenjivosti Pcm parametra za procjenu zavarljivosti, koje su prikazane u Tabeli 1, često se koriste u industrijskoj praksi (AWS D1.1 Annex I) kao prvi indikator potrebe za

predgrijavanjem i izborom dodatnog materijala sa niskim sadržajem vodonika.

***Tabela 1**. Granice primjenjivosti Pcm formule*

***Table 1**. Applicability limits of the Pcm formula*

Vrijednost Pcm	Zavarljivost
Pcm ≤ 0,20	Dobra zavarljivost
0,20 < Pcm ≤ 0,30	Zahtijeva se predgrijavanje i elektrode sa niskim nivoom vodonika
Pcm > 0,30	Obavezne pojačane mjere

CE (WES)

Formulu (4) propisalo je Japansko društvo za zavarivanje (JWES/WES - Welding Engineering Standard). Ona uzima u obzir više legirajućih elemenata od CE(IIW), uključujući silicijum, sa različitim težinskim koeficijentima koji odražavaju mikrostrukturni odgovor poboljšanih (Q&T).

$$CE(WES) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (4)$$

Ovaj izraz za izračunavanje je primarno namijenjen poboljšanim (Q&T) niskolegiranim čelicima visoke čvrstoće sa zateznom čvrstoćom od 500÷1000 MPa.

CEN

Parametar CEN (engl. Carbon Equivalent Number), poznat i kao Yuriokin ugljenični ekvivalent, razvijen je 1987. godine sa ciljem da premosti razlike između CE(IIW) i Pcm formula. Pokriva znatno širi raspon kvaliteta čelika, od niskougljeničnih do konvencionalnih C-Mn čelika. CEN je usvojen u američkim standardima ASTM A1005 i ASME B16.49.

$$CEN = C + A(C) \cdot \left[\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{(Cr + Mo + Nb + V)}{5} + 5B\right] \quad (5)$$

gdje je:

$$A(C) = 0{,}75 + 0{,}25 \cdot tanh[20 \cdot (C - 0{,}12)] \quad (6)$$

Specifičnost ove formule je u koeficijentu $A(C)$ tako da se za C < 0.08% A(C) približava 0.5 i CEN konvergira ka Pcm, dok za C > 0.18% A(C) teži ka 1.0 i CEN konvergira ka CE(IIW). Svaki od ovih izraza (1-5) optimizovan je za određenu grupu čelika i debljinu materijala [1, 2, 4, 9].

Temperatura predgrijavanja prema EN 1011-2 računa se prema dvije metode iz Aneksa C.

Metoda A (Aneks C.2) koristi CEV ekvivalent i grafičke dijagrame, uz kombinovanu debljinu spoja kao parametar toplotnog odvoda. Namijenjena je primarno C-Mn i niskolegiranim konstrukcionim čelicima.

Metoda B (Aneks C.3) koristi CET ekvivalent i analitičku formulu, uz debljinu lima *d* kao parametar. Primjenjiva je primarno za sitnozrne i niskolegirane čelike povećane čvrstoće. Obje metode kombinuju doprinose hemijskog sastava, debljine spoja, sadržaja difundovanog vodonika i unosa toplote prema sljedećem izrazu [2]:

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\frac{d}{35} + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \quad (7)$$

gdje su: Tp - temperatura predgrijavanja [°C]; CET - ugljenični ekvivalent po EN 1011-2 u [%]; d - debljina lima [mm]; HD - sadržaj difuznog vodonika [ml/100g] i Q unos toplote [kJ/mm].

Granice primjenjivosti formule su: CET od 0,2–0,5 %; d od 10–90 mm; HD od 1–20 ml/100 g i Q od 0,5–4,0 kJ/mm [2].

Vrijeme hlađenja t8/5 predstavlja vrijeme tokom kojeg se metal zavara hladi sa 800°C na 500°C. To je interval u kojem se odvijaju najznačajnije fazne transformacije koji direktno utiče na mikrostrukturu i mehaničke osobine zone uticaja toplote (ZUT). Prema EN 1011-2 koriste se dva analitička modela u zavisnosti od debljine materijala. Za tanke limove primjenjuje se 2D model:

$$t_{8/5} = (4300 - 4{,}3 \cdot T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{k^2 \cdot Q^2}{d^2} \cdot \left[\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2}\right] \quad (8)$$

a za debele limove 3D model:

$$t_{8/5} = (6700 - 5 \cdot T_0) \cdot k \cdot Q \cdot \left[\frac{1}{(500 - T_0)} - \frac{1}{(800 - T_0)}\right] \quad (9)$$

Izbor modela određuje se prema tzv. prelaznoj debljini (d_{tr}). Prelazna debljina je debljina lima pri kojoj se odvođenje toplote mijenja iz

dvodimenzionog u trodimenziono stanje i računa se iz unosa toplote i početne temperature:

$$d_{tr} = \sqrt{\frac{(4300 - 4{,}3 \cdot T_0)}{(6700 - 5 \cdot T_0)} \cdot k \cdot Q \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{1}{(500 - T_0)} + \frac{1}{(800 - T_0)}\right)} \quad (10)$$

gdje su: T_0 - početna temperatura (predgrijavanje) [°C]; Q - unos toplote [kJ/mm]; d - debljina [mm] i k faktor oblika zavara. Za $d < d_{tr}$ koristi se 2D model, a u suprotnom koristi se 3D model [2].

Tvrdoća u zoni uticaja toplote procjenjuje se prema Yurioka modelu, koja povezuje hemijski sastav sa brzinom hlađenja [10]. Yurioka model iz 1987 godine opisuje tvrdoću u zoni uticaja toplote (ZUT) S-krivom u zavisnosti od logaritma vremena hlađenja $t_{8/5}$.

Tvrdoća se zatim interpolira između dvije granične vrijednosti - tvrdoće potpuno martenzitne strukture HM (kada je $t_8/_5$ vrlo kratko) i tvrdoće potpuno beinitne strukture HB (kada je $t_{8\ /5}$ vrlo dugo) - pomoću arctan funkcije koja opisuje prelaz između ta dva stanja:

$$HV = \frac{H_M + H_B}{2} - \frac{H_M - H_B}{2{,}2} \cdot arctan\, x \quad (11)$$

gdje je:

$$x = 4 \cdot \frac{log\frac{t_{8/5}}{t_M}}{log\frac{t_B}{t_M}} - 2 \quad (12)$$

Yurioka model je detaljno opisan u literaturi [10] i [14].

Za procjenu mikrostrukture metala zavara pri zavarivanju legiranih i različitih osnovnih i dodatnih materijala koriste se konstitucijski dijagrami.

Schaefflerov dijagram (1949) je grafička metoda za procjenu mikrostrukture metala zavara nerđajućih čelika na osnovu hemijskog sastava. Dijagram prikazuje regije postojanja austenitne (A), feritne (F) i martenzitne (M) faze i njihovih kombinacija (A+M, A+F, A+M+F), uz izoferitne linije za kvantitativno očitavanje udjela ferita. Položaj radne tačke određuje se preko ekvivalenata hroma i nikla:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1{,}5 \cdot Si + 0{,}5 \cdot Nb \quad (13)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30 \cdot C + 0{,}5 \cdot Mn \quad (14)$$

Radna tačka omogućava grafičku procjenu fazne strukture (austenit, ferit, martenzit i njihove kombinacije) u metalu zavara, uz očitavanje udjela ferita sa izo-feritnih linija.

WRC-1992 dijagram [6] koristi modifikovane ekvivalente hroma i nikla kalibrisane za tačnije predviđanje feritnog broja (FN) u metalu zavara. U odnosu na Schaeffler-ove formule uključuje i azot (N) u nikl ekvivalentu, kao i bakar (Cu) kao značajan austenitni stabilizator:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0{,}7 \cdot Nb \quad (15)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35 \cdot C + 20 \cdot N + 0{,}25 \cdot Cu \quad (16)$$

Dijagram je posebno pogodan za austenitne i duplex nerđajuće čelike jer omogućava direktno očitavanje feritnog broja (FN) u opsegu 0÷100 FN. Modovi solidifikacije (A - austenitni, AF - austenitno-feritni, FA - feritno-austenitni, F - feritni) se dodatno mogu procijeniti iz Cr_eq/Ni_eq omjera [3, 6, 7].

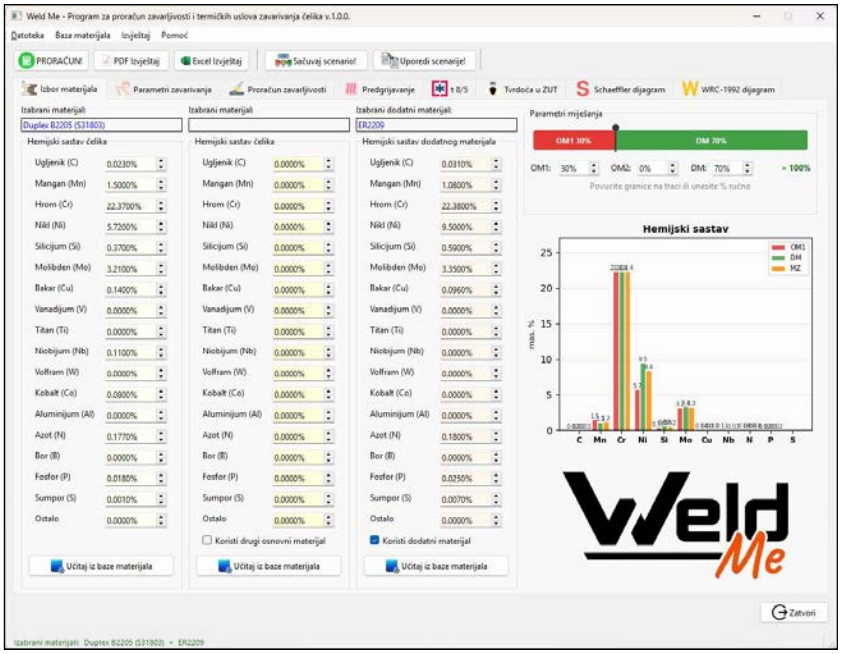
3. Razvoj softvera

3.1. Arhitektura i korisnički interfejs

Softver Weld Me razvijen je u programskom jeziku Python 3.11 sa grafičkim interfejsom (GUI) dizajniranim u QtDesigneru. Arhitektura softvera je modularna. Grafički korisnički interfejs (GUI) odvaja se od proračunskog modula, što omogućava nezavisno testiranje algoritama i jednostavno proširivanje funkcionalnosti.

Baza podataka materijala sadrži oko 120 čelika i dodatnih materijala, i potpuno je otvorena za korisnike a implementirana je u SQLite formatu. Ona sadrži hemijske sastave definisane standardima ali i iz atestnih listova proizvođača, čime se eliminiše potreba za ručnim unosom sastava za najčešće korišćene čelike.

Glavni prozor softvera Weld Me, koji prikazuje organizaciju korisničkog interfejsa sa karticom za izbor materijala, prikazan je na Slici 1.



Slika 1. *Glavni prozor softvera Weld Me*

Figure 1. *Weld Me main window*

Korisnik bira osnovni materijal iz baze podataka ili ručno unosi hemijski sastav, definiše parametre zavarivanja (napon, struja, brzina, postupak) i debljinu materijala. Softver nakon klika na dugme Proračun, automatski računa unos toplote, sve ugljenične ekvivalente, Schaeffler i WRC-1992 ekvivalente, indikatore osjetljivosti na tople pukotine, temperature transformacija, temperaturu predgrijavanja (po metodi B standarda EN 1011-2, metodi Ito-Bessyo i po Seferijanu), zatim prelaznu debljinu, vrijeme hlađenja $t_8/_5$ i maksimalnu tvrdoću u ZUT-u prema Yurioka i Terasaki formuli. Za analizu metala zavara, korisnik može definisati drugi osnovni materijal i/ili dodatni materijal sa odgovarajućim udjelima miješanja.

3.2. Algoritam i tok proračuna

Tok proračuna organizovan kroz jasno definisane faze. Softver ima logičan redoslijed kartica (tab-ova) od izbora materijala, pa do konstitucijskih dijagrama Schaeffler i WRC-1992.

Kao posebna mogućnost je predviđeno kreiranje PDF izvještaja sa tabelarnim prikazom i dijagramima, koji izuzetno može koristiti inženjerima i tehnolozima zavarivanja. Posebna pogodnost je što softver ima mogućnost da čuva unijete podatke kao sopstveni fajl.wme. Svi proračuni imaju jasno definisane granice primjene i to po hemijskom sastavu (prema standardima) i po opsegu validnosti samih izraza (prema literaturnim izvorima). Softver na neki način predstavlja mali ekspertni sistem koji na osnovu unijetih vrijednosti i granica primjenjivosti daje upozorenja i obavještava korisnika.

Proračun ugljeničnih ekvivalenata zasniva se na primjeni formula (1)-(5) a proračun Schaeffler i WRC-1992 ekvivalenata prema formulama (13)-(16), dok se za proračun indikatora osjetljivosti na tople pukotine koriste izrazi za HCS, ΔG, UCS i PSR. Proračun temperatura transformacije Ac1, Ac3, Ms, Mf, Bs je dat u [11].

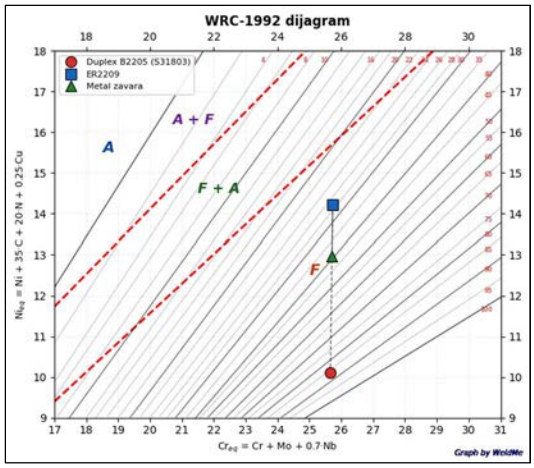
Proračun temperature predgrijavanja zasniva se na Metodi B iz standarda EN 1011-2 [2], kao i Ito-Bessyo metodi [13] a kao referencu koristi i stariju formulu prema Seferijanu.

Softver automatski računa prelaznu debljinu i na osnovu nje bira odgovarajući model za proračun $t_8/_5$. Za debljinu manju od prelazne koristi se 2D model (tanki limovi), a za veću ili jednaku debljinu 3D model (debeli limovi). Na osnovu izračunatog $t_8/_5$, softver procjenjuje maksimalnu tvrdoću u ZUT-u prema Yurioka i Terasaki formuli.

Posebno se može naglasiti mogućnost softvera za analizu zavarivanja različitih čelika. Hemijski sastav metala zavara izračunava se linearnom kombinacijom (pravilo smješe) hemijskih sastava na bazi težinskih udjela razblaženja dva osnovna materijala i jednog dodatnog, pri čemu udio razblaženja korisnik definiše interaktivno upotrebom klizača (slajdera). Iz dobijenog sastava se zatim računaju ekvivalenti hroma i nikla prema metodologijama Schaeffler-a i WRC-1992, nakon

čega se određuje položaj radne tačke na odgovarajućim dijagramima. Na osnovu položaja radne tačke softver procjenjuje mikrostrukturnu fazu i feritni broj, i računa parametar PREN kao mjeru otpornosti na tačkastu (rupičastu) koroziju.

Primjer prikaza WRC-1992 dijagrama u softveru Weld Me, sa položajem radne tačke za zavarivanje duplex čelika B2205 sa dodatnim materijalom ER2209, prikazan je na Slici 2.



Slika 2. *WRC-1992 dijagram u softveru Weld Me za primjer zavarivanja duplex čelika B2205 sa dodatnim materijalom ER2209*

Figure 2. *WRC-1992 diagram in Weld Me software for an example of welding duplex steel B2205 with filler material ER2209*

4. Verifikacioni primjer

Verifikacija primijenjenih analitičkih modela je urađena na brojnim primjerima, a najjednostavnija je na formulama ugljeničnih, Schaeffler i WRC-1992 ekvivalenata, jer tačnost isključivo zavisi od preciznosti unešenih vrijednosti legirajućih elemanata.

Primjer: Određivanje temperature predgrijavanja, vremena hlađenja t 8/5 i tvrdoće u ZUT [13]. Hemijski sastav čelika P 460 NL1 [13], prikazan je u Tabeli 2.

Tabela 2. *Hemijski sastav materijala, čelik P 460 NL1(u masenim %)*

Table 2. *Chemical composition of the material, steel P 460 NL1 (in mass %)*

Element	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni
%	0,153	0,380	1,40	0,015	0,0021	0,031	0,037	0,630
Element	Mo	Cu	V	Nb	Ti	B	N	Fe-
%	0,004	0,061	0,099	0,038	0,004	0,0003	0,0052	ostatak

Parametri zavarivanja

Postupak - MIG; Struja - 130A; Napon - 16 V; Brzina zavarivanja - 1,33 mm/s; efikasnost (η) - 0.80; debljina lima - 14 mm; zaštitni gas - argon + 5,9% CO_2 + 1,1% O_2; sadržaj difundovanog vodonika - 5 ml/100 gr MZ.

Parametar CET je izračunat na osnovu jednačine (2) i iznosi 0,314 i u softveru i u referentnom radu. Parametar Pcm je izračunat prema formuli (3) i u softveru iznosi 0,263 dok je u referentnom radu 0,261.

U svim slučajevima unos toplote je Q = 1,251 kJ/mm. Izabran je geometrijski faktor k = 0,90. S obzirom da je debljina lima d = 14 mm, manja od izračunate prelazne debljine dtr = 15,8 mm, prema EN 1011-2 se koristi 2D model i jednačina (8).

U Tabeli 3 dat je uporedni prikaz vrijednosti temperature predgrijavanja Tp i vremena hlađenja $t_{8/5}$ izračunatih u softveru Weld Me i u referentnom radu [13], za tri različita pristupa: Ito-Bessyo metoda za slabo i jače ukrućen spoj i metoda B prema EN 1011-2.

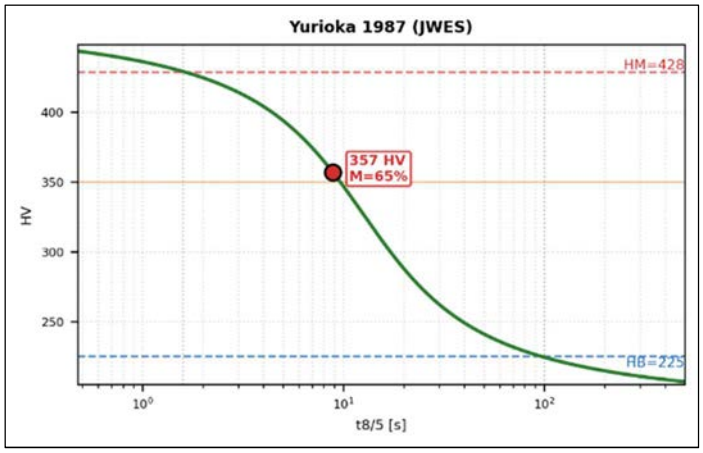
Tabela 3. *Uporedni prikaz proračuna temperatura predgrijavanja Tp i vremena hlađenja $t_{8/5}$*

Table 3. *Comparative presentation of calculations of preheating temperatures Tp and cooling time $t_{8/5}$*

Postupak	Literatura [13]		Weld Me	
	Tp [°C]	$t_{8/5}$ [s]	Tp [°C]	$t_{8/5}$ [s]
Tp prema Ito-Bessyo (slabo ukrućen spoj)	137	14,20	140	14,40
Tp prema Ito-Bessyo (jače ukrućen spoj)	161	16,20	164	16,49
Tp prema EN 1011-2 (Metoda B)	36	8,70	40	8,88

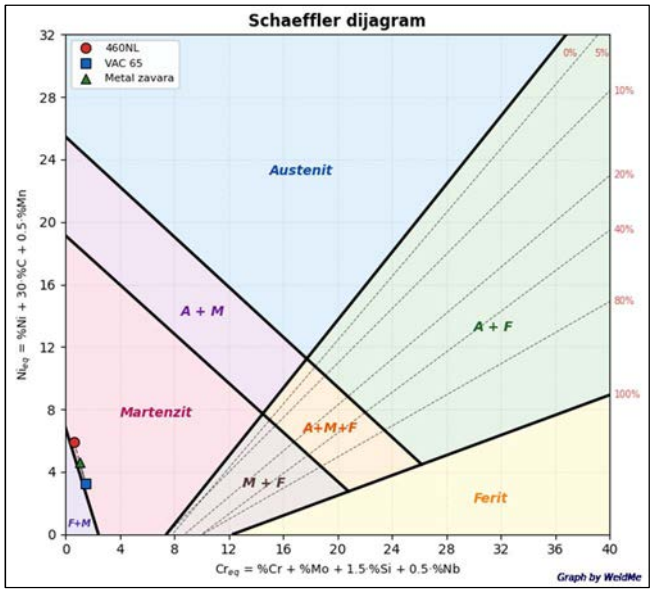
Na Slici 3 prikazan je dio grafičkog interfejsa softvera sa rezultatom proračuna tvrdoće u ZUT-u prema Yurioka modelu, dok je na Slici 4 prikazan Schaeffler dijagram za par materijala P 460 NL1 (osnovni materijal) i VAC 65 (dodatni materijal).

Tvrdoća u ZUT-u, dobijena pomoću Weld Me softvera po Yurioka formuli [10, 14] iznosi HV = 356,6, dok izračunata vrijednost za iste parametre, prema literaturnom izvoru [14] iznosi HV-5 = 360,4 što je relativno odstupanje od 1,05%.



Slika 3. *– Dio grafičkog interfejsa sa prikazom izračunate HV i dijagrama prema Yurioka metodi*

Figure 3. *- Part of the graphical interface showing the calculated HV and the diagram according to the Yurioka method*



Slika 4. *– Schaeffler dijagram za P 460 NL1 + VAC 65*

Figure 4. *– Schaeffler diagram for P 460 NL1 + VAC 65*

5. Zaključak

Weld Me je koristan softverski alat u kojem su implementirani analitički modeli za procjenu zavarljivosti čelika, sa odgovarajućim grafičkim prikazima. U ovom radu je dat jedan numerički primjer za čelik P 460 NL1 na osnovu čega se može zaključiti da su odstupanja od referentnih izvora izuzetno mala.

Primjena softvera donosi prednost u pogledu isključivanja subjektivnog pristupa pri tumačenju dijagrama, zatim, daje mogućnost automatskog izbora 2D/3D modela za $t_8/_5$, kao i mogućnost poređenja više scenarija zavarivanja. Značajna prednost je mogućnost proračuna hemijskog sastava metala zavara koji u kombinaciji sa Schaeffler-ovim i WRC-1992 dijagramom omogućava inženjeru i tehnologu da prije samog zavarivanja procijeni rizik vezan za mikrostrukturu zavarenog spoja.

Granice primjene softvera određene su važećim rasponom implementiranih formula. Program je pouzdan za nelegirane, niskolegirane i visokočvrste konstrukcione čelike (ISO/TR 15608 grupe 1–3), dok za nerđajuće, CrMo/CrMoV i druge specijalne čelike određene rezultate softver eksplicitno označava upozorenjem (vizuelnim indikatorom u korisničkom interfejsu) kao neprimjenjive. Verifikacija je izvršena sa određenim brojem referentnih primjera, dok će opširnija verifikacija sa eksperimentalnim radovima biti predmet daljeg istraživanja i testiranja.

Buduće verzije softvera mogu uključiti integraciju sa CCT dijagramima, proširenu bazu dodatnih materijala, automatske preporuke za izbor dodatnog materijala i eventualno jednostavniju verziju softvera za web i mobilne uređaje.

5. Conclusion

Weld Me is a useful software tool that implements analytical models for assessing the weldability of steel, with corresponding graphical representations. In this paper, one numerical example is given for steel P 460 NL1, on the basis of which it can be concluded that the deviations from the reference sources are extremely small.

The application of the software brings the advantage of excluding the subjective approach when interpreting diagrams, then, it gives the possibility of automatic selection of 2D/3D models for $t_8/_5$, as well as the possibility of comparing several welding scenarios. A significant advantage is the possibility of calculating the chemical composition of the weld metal, which, in combination with Schaeffler's and WRC-1992 diagrams, allows the engineer and technologist to assess the risk related to the microstructure of the welded joint before welding.

The limits of software application are determined by the valid range of implemented formulas. The program is reliable for non-alloyed, low-alloyed and high-strength structural steels (ISO/TR 15608 groups 1–3), while for stainless, CrMo/CrMoV and other special steels, the software explicitly indicates with a warning (visual indicator in the user interface) that certain results are not applicable. The verification was carried out with a certain number of reference examples, while a more extensive verification with experimental works will be the subject of further research and testing.

Future versions of the software may include integration with CCT diagrams, an expanded database of additional materials, automatic recommendations for selecting additional materials, and possibly a simpler version of the software for web and mobile devices.

Literatura / References

[1] MEST EN 1011-1:2010 - Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Dio 1: Opšte uputstvo za elektrolučno zavarivanje.

[2] MEST EN 1011-2:2010, Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Dio 2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika.

[3] MEST EN 1011-3:2020, Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Dio 3: Elektrolučno zavarivanje nerđajućih čelika.

[4] ISO 15608:2025, Welding — Grouping system for metallic materials.

[5] Prokić Cvetković, R., Popović, O., Metalurgija zavarivanja, Beograd, 2019.

[6] Kotecki, D.J., Siewert, T.A., "WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals", Welding Journal, Vol. 71, No. 5, 1992.

[7] Lippold, J.C., Kotecki, D.J., Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, Wiley-Interscience, 2005.

[8] Yurioka, N., Kasuya, T., "A Chart Method for Determination of Preheat Temperature", IIW Doc. IX-2074-04, 2004.

[9] Stout, R.D., Doty, W.D., Weldability of Steels, Welding Research Council, New York, 4th edition, 1978.

[10] Yurioka, N., "Prediction of HAZ Hardness of Transformable Steels", Metal Construction, Vol. 19, No. 4, 1987, pp. 217–223.

[11] K. W. Andrews, "Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures," JISI, July 1965, pp. 721-727.

[12] Lukas Quackatz, Elin Marianne Westin, Axel Griesche,Arne Kromm, Thomas Kannengiesser, Kai Treutler, Volker Wesling, Sten Wessman "Assessing ferrite content in duplex stainless weld metal: WRC '92 predictions vs. practical measurements", Welding in the World (2025), 69:31–45.

[13] Radomir Jovičić, Radica Prokić Cvetković, Olivera Popović, Nenad Milošević, "Metode za izračunavanje temperatura predgrevanja pri zavarivanju čelika povišene i visoke čvrstoće", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 61(3), 115-119., Zbornik radova sa savetovanja "ZAVARIVANJE 2016".

[14] https://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/Pristupljeno:april 2026