

PREDVIĐANJE STRUKTURE METALA ZAVARA KOROZIJSKI POSTOJANOG ČELIKA TE PRIMJENA UMJETNIH NEURONSKIH MREŽA PRI ODREĐIVANJU DELTA FERITA

Branko MATEŠA, Ivan SAMARDŽIĆ, Marko DUNĐER
Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu Sveučilišta u Osijeku
Filozofski fakultet Studij Politehnike Sveučilišta u Rijeci

Ključne riječi: *struktura metala zavara, korozijski postojani čelik, delta ferit, umjetne neuronske mreže.*

Sažetak:

U radu je prikazan povijesni slijed razvoja dijagrama pri predviđanju strukture zavara korozijski postojanih čelika udruženih s uporabom austentnog dodatnog materijala te preporučuje neke nove analitičke izraze za buduće tehnike predviđanja. S porastom brojnih faznih transformacija u austenitnom metalu zavara uzrokovanih proširenjem legirajućih dodataka, buduće tehnike predviđanja će se više zasnivati na matematičkim izrazima nego na dijagramima u cilju opsežnog kvantitativnog predviđanja mikrostrukturnih faza metala zavara. S tih osnova učinjen je i osvrt na primjenu višeslojnih struktura umjetnih neuronskih mreža pri određivanju delta ferita.

PREDICTION OF CORROSION RESISTANT WELD STEEL STRUCTURE AND APPLICATION OFF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AT DELTA FERRITE DETERMINATION

Key words: *weld metal structure, corrosion resistant steel, delta ferrite, artificial neural networks.*

Abstract:

In the article an historical continuity of diagrams development at prediction corrosion resistant steel weld structure is presented associated with use austenitic filler consumable and suggests some new analytical forms for future predictive techniques. With increase in the numerous austenitic weld metal phases transformations caused by alloy additions expansion, future predictive techniques will rely on mathematical expressions rather than diagrams to make comprehensive quantitative phase prediction of weld metal structure.

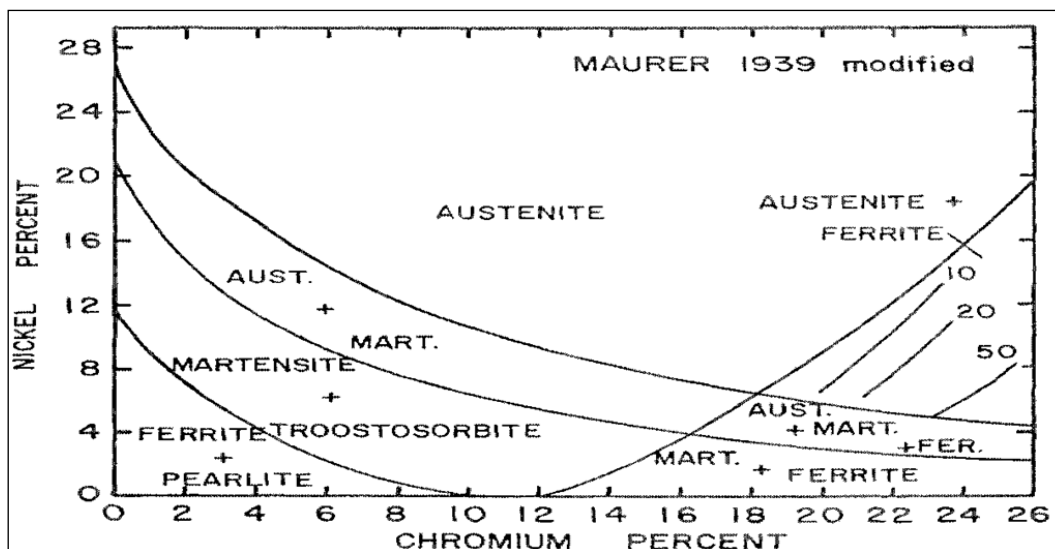
From this basis, the review on application of multiple-layer structure of artificial neural network at delta ferrite determination is done.

1. UVOD

Austenitni dodatni materijal je pretežito korišten s ciljem stvaranja prijelaznog metala zavara kod raznovrsnih spojeva željeznih legura pri spajanju s korozijski postojanim čelikom, pri popravcima zavara, tvrdom navarivanju i korozijski postojanom platiranju i zavarivanju. Osnovni zahtjev je da je ispravno legiran austenitni metal zavara čvrst, žilav, otporan vrućim pukotinama i postojan prema koroziji pri radu u agresivnim sredinama. Mikrostrukture metala zavara temeljene na uobičajenim sastavima metala zavara mogu biti predviđene iz empirijskog dijagrama kao što je Schaefflerov dijagram[38]. Unatoč tome, poteškoće se javljaju kada sastav metala zavara izlazi izvan opsega primjene originalnih empirijskih izraza. Zbog toga bi bila korisnija uporaba temeljnih znanosti o materijalima s namjerom razvijanja izraza koji bi bili više općenito primjenjivi pri predviđanju mikro-struktura metala zavara i njihovih svojstava[12,34,45].

2. RAZVOJ STRUKTURNIH DIJAGRAMA KOROZIJSKI POSTOJANIH ČELIKA

Guillet [16]. je prvi primijenio sustav legure Fe-Cr-Ni kao mogući korozijski postojani materijal koji ujedno posjeduje i zadovoljavajuća mehanička svojstva. Radovi Geisen-a [13], Monnartza-a[31], Maurer-a i Strauss-a[29] uvode 18 Cr-8Ni leguru, kao osnovu većine korozijskih postojanih čelika. Temeljeći se na izučavanju lijevanog materijala u tečnom stanju, Strauss i Maurer [41] razvijaju Ni-Cr dijagram. Preinačen kasnije od strane Scherer-a, Riedrich-a i Hoch-a[39] taj dijagram omogućuje predviđanje različitih faza mikrostrukture unutar područja 0-26 % Cr i 0-25 % Ni. Uporabom dijagrama sa zakrivljenim linijama (Slika1) moguće je odrediti područja raznih faza i njihovih kombinacija mikrostrukture legure.



Slika 1. Maurer-ov Ni-Cr dijagram [39,41]

Newell i Fleischmann[32] su bili prvi pri razvoju izraza koji određuje stabilnost austenita kao funkcije sadržaja legure. Njihov konstitucijski izraz za predviđanje granice austenit-austenit+ferrit je dan jednadžbom:

$$Ni = \frac{(Cr + 2Mo - 16)^2}{12} - \frac{Mn}{2} + 30(0,10 - C) + 8 \quad (1)$$

Za naznačiti je kako u Newell-Fleischmann-ovoj jednakosti mangan (Mn) posjeduje polovicu utjecaja u stabilizaciji austenita u odnosu na nikal (Ni). Također je prikazano kako je ugljik (C) 30 puta utjecajniiji nego nikal. Također, za Cr i Mo je utvrđena nelinearna ovisnost o Ni, koja se podudara s krivuljom granice austenita-austenit+ferit područja na Maurer-ovom dijagramu (Slika1). Utvrđeno je da Newell-Fleischmann-ova jednakost opisuje krivulju austenitne stabilnosti za područje 14-19 %Cr i 10-16 %Ni. Pred i za vrijeme II Svjetskog rata osim potrebe da se proizvede vrstan korozijski postojan dodatni materijal pri zavarivanju austenita bilo je značajno i zavarivanje visokočvrstih materijala u obrambene svrhe[11,43]. Uporaba austenitnog metala zavara pri zavarivanju teško zavarljivih željeznih konstrukcija zasnovana je na poznavanju da austenitni korozijski postojan čelik može zadržati visoku duktilnost i zadovoljavajuću čvrstoću kako u temperaturnom tako i u širokom području sastava legure. Pri ispravnoj uporabi Fe-Cr-Ni austenitnog dodatnog materijala zahtijeva se primjena kvantitativne metode za predviđanje maksimalnog stupnja protaljivanja osnovnog metala koji može biti ostvaren a da još uvijek sastav metala zavara zadrži duktilnu austenitnu a ne krhku martenzitnu strukturu metala zavara

Feild, Bloom i Linnert [11] su se posebice bavili predviđanjem mikrostrukture austenitnog metala zavara koji je korišten pri zavarivanju visokočvrstih čelika (npr. AISI 4340). Već tada su zamijetili kako zavar mora sadržavati nešto ferita kako bi se spriječile pukotine u korijenskom sloju. Feild, Bloom i Linnert [11] su također utvrdili da preinačenje Newell-Fleischmann-ove jednakosti(1), s promjenom konstanti 8 u 14, daje bolje predviđanje austenitne stabilnosti za područje sastava kroma (Cr) od 18-21 % a nikla (Ni) od 9-11%. Prebacivši austenitne promicatelje na lijevu stranu jednakosti dobiva se:

$$Ni + 0,5 Mn + 30 C = \frac{(Cr + 2Mo - 16)^2}{12} + 14 \quad (2)$$

Post i Eberly[35], baveći se transformacijom austenita u pseudo- martenzit tijekom hladnog oblikovanja, dali su slijedeću jednakost za stabilnost austenita:

$$Ni + 0,5 Mn + 35 C = \frac{(Cr + 1,5Mo - 20)^2}{12} + 15 \quad (3)$$

Post-Eberly-jeva jednakost je korištena da objasni stabilnost austenita u Cr području s14-25 % i Ni području s 7-21 %. Tako je potvrđeno da je Newell-Fleischmann-ova jednakost zadovoljavajuća u predviđanju stabilnosti austenita u odnosu na delta ferit i martenzit.

Campbell i Thomas[6] utvrdili su da 25Cr-20Ni mikrostruktura metala zavara i njegova mehanička svojstva s malim dodacima molibdena i niobija mogu se predvidjeti s uporabom Creq izraza:

$$Creq = Cr + 1,5Mo + 2Nb. \quad (4)$$

Binder, Brown i Franks [4] dali su izraz o stabilnosti austenita u odnosu na delta ferit u obliku:

$$Ni + 30C + 26N = 1,3Cr - 11,1 \quad (5)$$

Thomas[44] je predložio sljedeći izraz koji sadrži više linearnu jednakost za predviđanje stabilnosti granice austenita u odnosu na stvaranje delta ferita:

$$Ni + 0,5Mn + 30C = 1,1(Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb) - 8,2 \quad (6)$$

Ovo su bili prvi koraci u smjeru linearizacije konačnog Schaeffler-ovog i DeLong-ovog dijagrama.

Schaeffler[36] rabeći navedenu zamisao za mikrostrukturne odnose i opsežna ispitivanja, izradio je dijagram koji je imao varijable sastava na osima i opsege za posebne mikrostrukturne faze metala zavara ucrtane u dijagram. Koordinate dijagrama su dane kao Nieq i Creq, na okomitoj odnosno vodoravnoj osi. Ovaj izbor osi dozvoljava međusobni odnos utjecaja stvaratelja austenita-austenitizatora (Ni,Mn,C, itd.) i feritizatora (Cr,Mo, itd.) na konačnu mikrostrukturru. Jedan od izvornih Schaefflerovh dijagrama prikazan je na slici 2. Izvorna Schaeffler-ova Nieq jednakost , koja sadrži sastave dane u težinskim %, je opisana izrazom:

$$\text{Nieq}=\text{Ni}+0,5\text{Mn}+30\text{C} \quad (7)$$

Ova jednakost se slaže s ranijom Newell-Fleischmann-ovom jednakošću[32]. Taj empirijsko-iskustveni izraz upućuje da je u usporedbi s manganom, nikal dvaput utjecajniji kao stabilizator austenita. Također, je zabilježen snažan utjecaj ugljika kao stabilizatora austenita. Izvorni Schaeffler-ov Creq jednakost glasi:

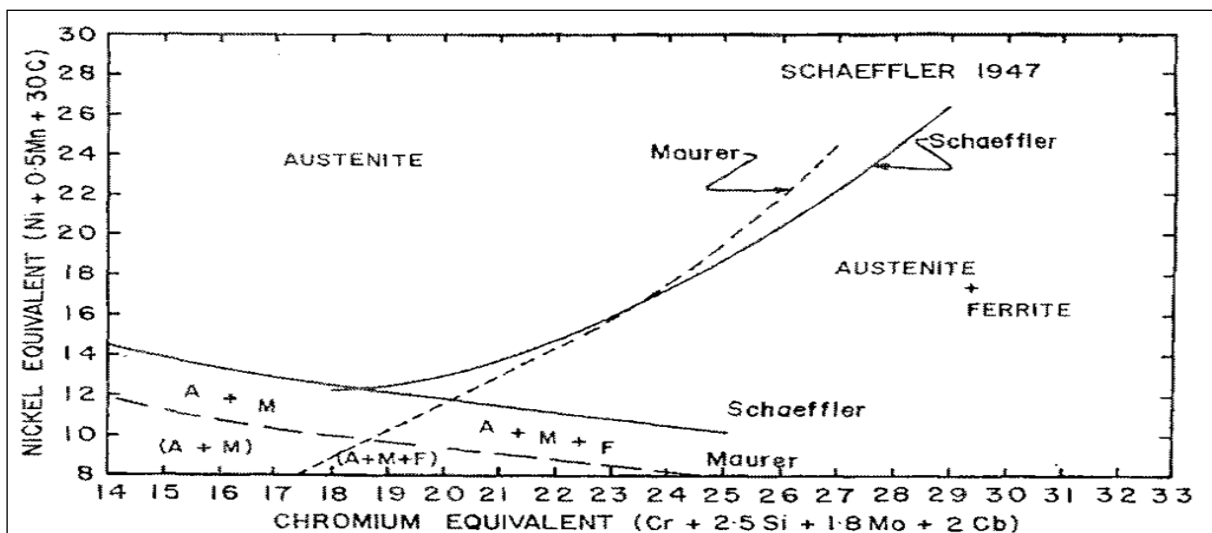
$$\text{Creq}=\text{Cr}+1,8\text{Mo}+2,5\text{Si}+2\text{Nb} \quad (8)$$

Na izvornom Schaeffler-ovom dijagramu se mogu uočiti da zakrivljene granične linije faza (Slika2)

Te zakrivljenosti , koje pretpostavljaju osnovni senergijski utjecaj, uključuju da ove ekvivalentne jednakosti trebaju imati presjecišta u linijama na dijagramu gdje su ravne linije. Eksperimentalno određene zakrivljene linije granice između potpuno austenitnog metala zavara i austenit+ferit područja su prikazane od strane Schaeffler-a[36] a što je izraženo jednakošću:

$$\text{Nieq}=\frac{(\text{Creq}-16)^2}{12}+12 \quad (9)$$

Seferian[40] je razvio jednadžbu za izračun količine delta-ferita, a glasi:



Slika 2. Schaeffler-ov dijagram iz 1947. [36]

$$\delta\text{-ferit}=3[\text{Creq}-0,93\text{Nieq}-6,7] \quad (10)$$

gdje se Nieq i Creq izračunaju pomoću Schaefflerove jednakosti.

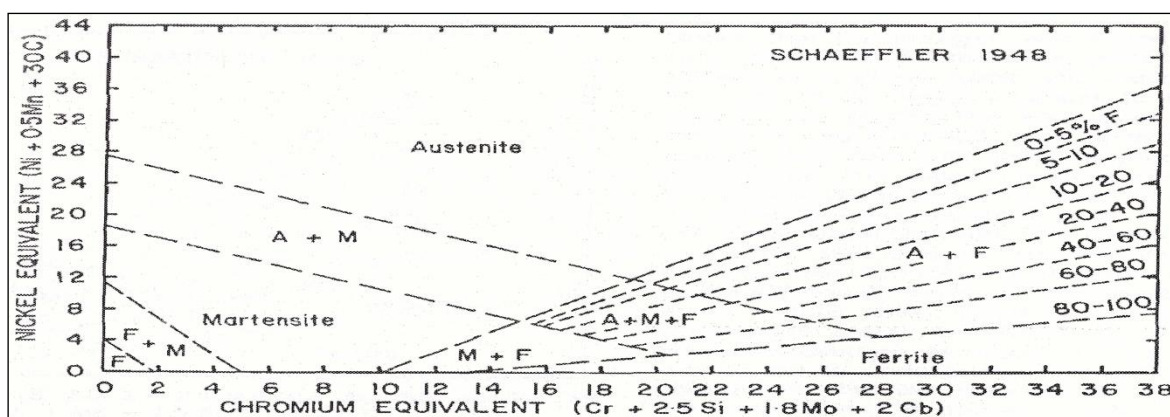
Zanimljivo je da kvadratna priroda stabilnosti austenita dana puno kasnije 1969. godine od strane Griffith-a i Wright-a[15] te glasi:

$$Ni+0,5Mn+Cu+35C+27N=\frac{(Cr+1,5Mo-20)^2}{12}+15 \quad (11)$$

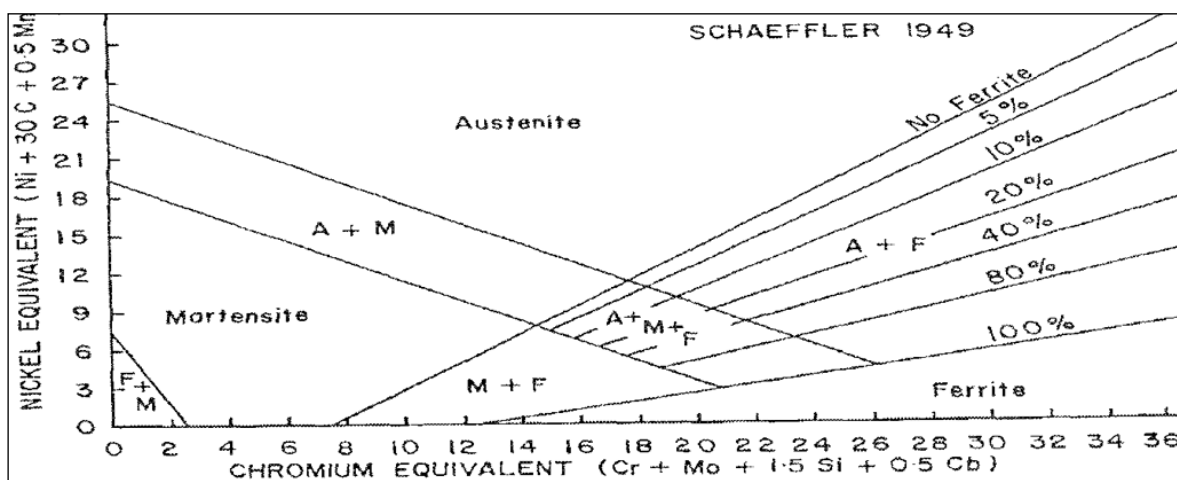
Zapaža se sličnost ove jednadžbe sa izrazima Newell-Fleischmanna[321], Feild, Bloom i Linert-a[11] kao i Post i Eberly-a [35] koji su prethodno prikazani. Potrebno je pri pregledu radova raznih istraživača istaknuti da unos topline (i na taj način brzina hlađenja) utječu na prirodu skrtnute mikrostrukture te će također uzrokovati promjene u tim krivuljama.

Schaeffler-ov dijagram , približno onakav kakvog poznajemo, prikazan je na slici 3. Taj dijagram je uveden 1948 godine [37]. Njime je povećana mogućnost kvantitativnog predviđanja mikrostrukture metala zavara posebice u dvofaznom području (austenit+delta ferit). Također je uočen sinergijski utjecaj kroma na austenitnu stabilnost nikla. Potrebno je približno 30 težinskih % nikla pri stabilizaciji austenita bez kroma, no samo 12 težinski % nikla uz 19 težinskih % kroma. Taj dijagram ima Creq ka što je predloženo izrazom (8). Schaeffler [36] je također na svom izvornom dijagramu, prikazao metodu grafičkog predviđanja mikrostrukture metala zavara kao funkciju stupnja protaljivanja osnovnog metala. Tim slijedom je 1949. godine prikazao izmijenjeni dijagram kakav je prikazan na slici 4. Najvažnije izmjene su kod Creq izraza, koji je promijenjen u:

$$Creq=Cr+Mo+1,5Si+0,5Nb \quad (12).$$



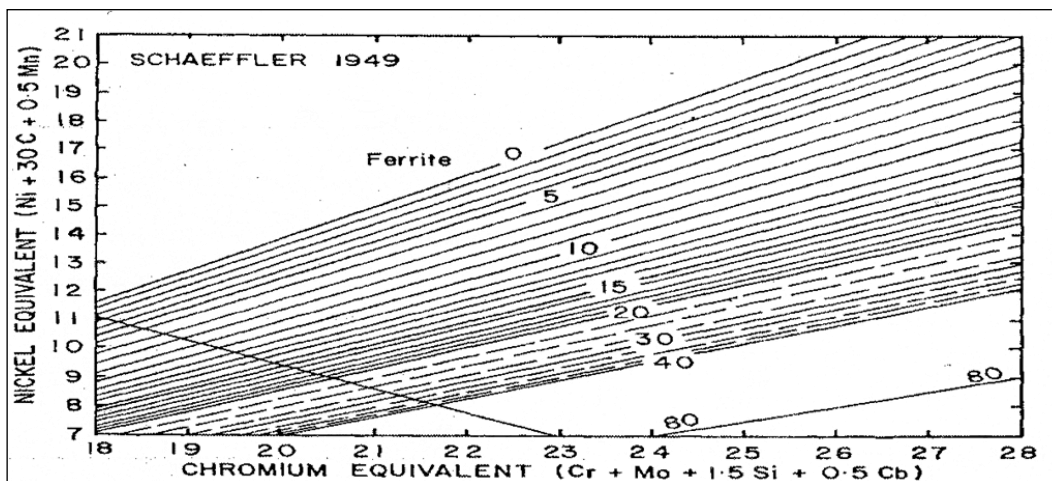
Slika 3. Schaeffler-ov dijagram – 1948., [37]



Slika 4. Schaeffler-ov dijagram- 1949., [38]

Schaeffler-ov dijagram (Slika 4) je podijeljen u područja temeljeno na pretvorbenom ponašanju austenita. Rastaljeno stanje (talina) \square austenit \square martenzit pretvorba su na lijevoj strani dijagrama dok talina (rastaljeno stanje) \square - ferit pretvorba je na desnoj strani dijagrama. Mehanizam martenzitne bez difuzijske transformacije je razumljivo različit od onog nukleacije i rasta ferita iz taline.

Utvrđeno je da Schaeffler-ov dijagram , kao što je prikazan na slici 5 ,podcijenjuje sadržaj ferita za dodatni materijal tipa AWS ER 316, 316L i 309 [8].



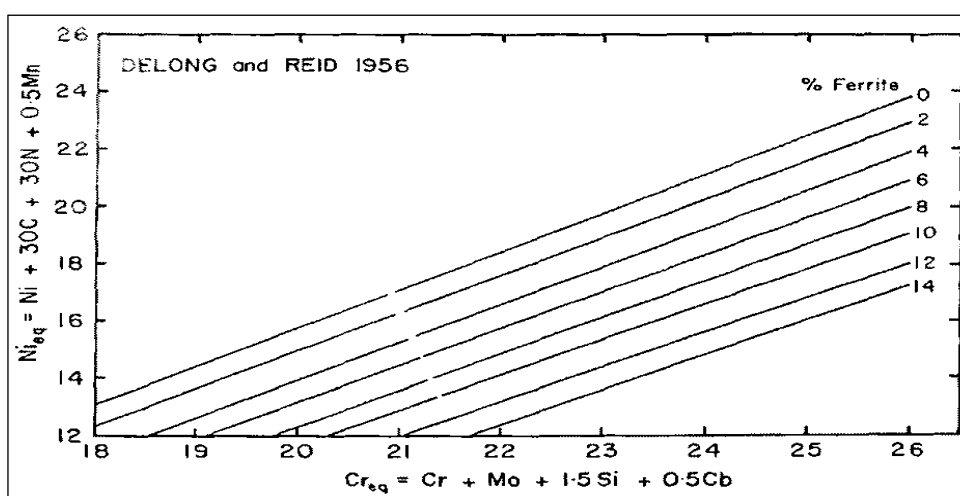
Slika 5. Područje ferita u Schaefflerovom dijagramu 1949., [38]

DeLong i Reid [9] istraživali su dio izvornog Schaeffler-ovog dijagrama koji je važan za područje sastava austenitnog korozijski postojanog čelika i izradbu dijagrama predviđanja iznosa delta ferita,. Taj dijagram, prikazan na slici 6, je vrlo djelatan kod unaprjeđenja uporabe korozijski postojanih čelika i ponovljivosti.

No kasnije oni uvode izmjenu u Nieq izraz dodajući utjecaj dušika (N). Jednakost Nieq je dana izrazom:

$$Nieq = Ni + 0,5Mn + 30C + 30N \quad (13)$$

Zapaženo je kako dušik ima jednak utjecaj na stabilnost austenita kao i ugljik.

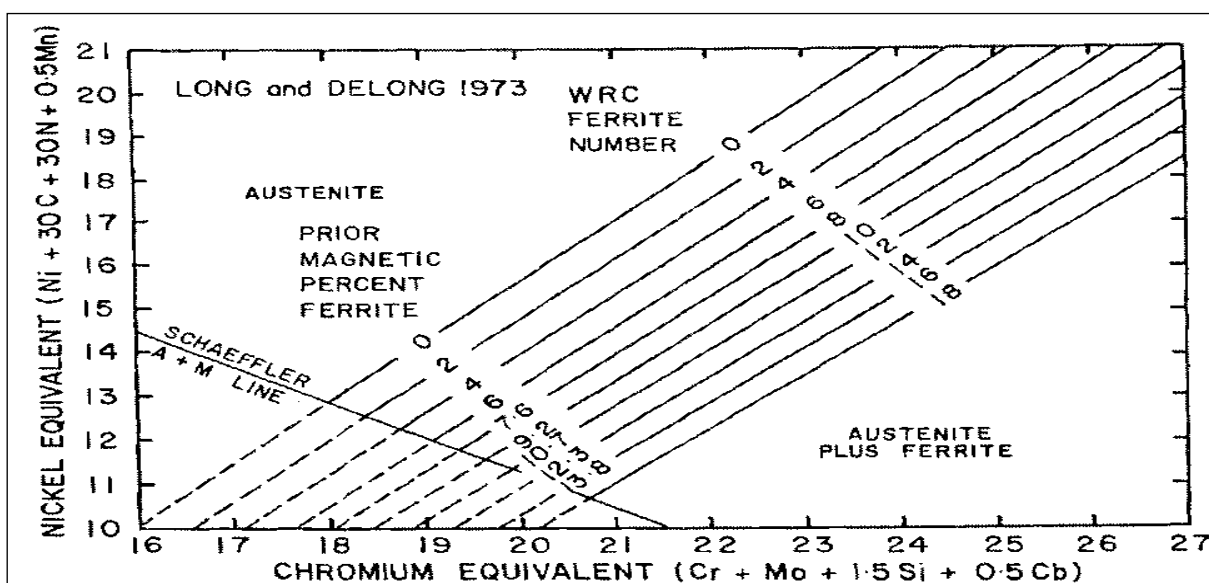


Slika 6. DeLong i Reidov dijagram-1956., za predviđanje sadržaja ferita u austenitnom metalu zavara [9]

Long i DeLong [24] su učinili daljnje promjene u dijagramu promijenom linija nakon sveobuhvatnog eksperimentiranja i analitičke analize u cilju unaprijeđenja njegovu sposobnost predviđanja delta ferita. Ovaj dijagram je prikazan je na slici 7. Oni su također učinili određenu procjenu eksperimentalne i statističke pogreške pri njegovoj uporabi.

Utvdili su da što se tiče sposobnosti predviđanja mikrostrukture korozijski postojanog metala zavara, posebice pri uporabi dodatnog materijala tipa AWS ER 308,308L i 347 oba dijagrama i Schaefflerov i DeLongov posjeduju gotovo jednake mogućnosti. Razlika u njihovim sposobnostima predviđanja nastaje pri visokim razinama dušika.

Ispravljeni DeLongov dijagram je određen kako bi bio jedno poboljšanje za te više legirane korozijski postojane čelike. Long i DeLong[24] su izvjestili kako njihov dijagram je prilično neosjetljiv na karakteristične promjene toplinskog unosa utvrđene kod elektrolučnog zavarivanja.



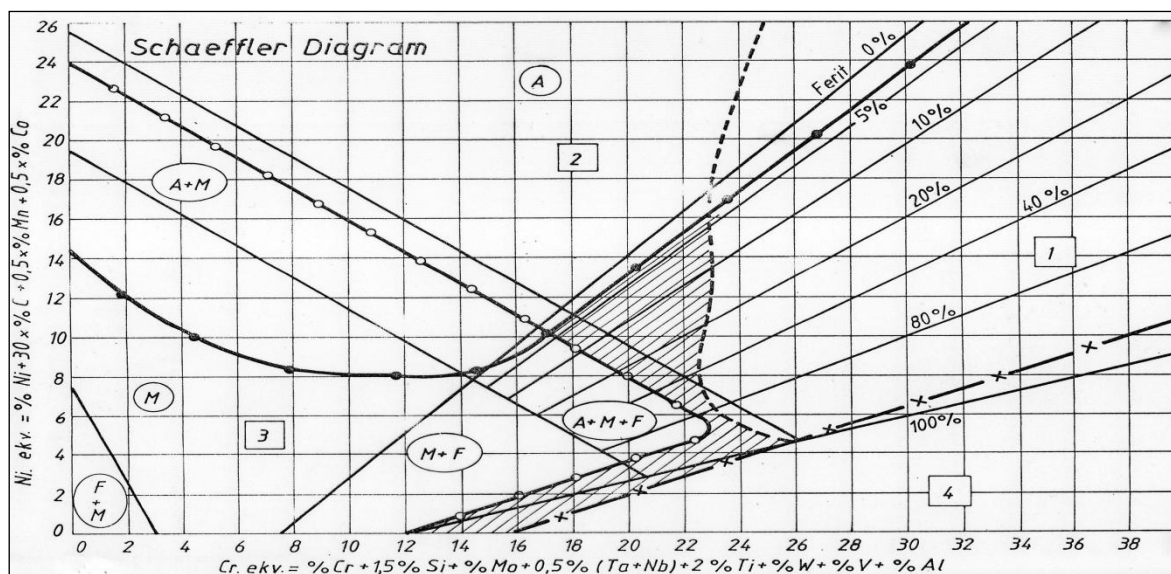
Slika 7. De Long-ov dijagram preciznije određuje udio ferita uvođenjem WRC FN [24]

Szumachowski and Kotecki [42], kasnije su našli bolje slaganje između izračunatog i mjenenog sadržaja delta ferita odnosno feritnog broja (FN) za šire područje mangana odnosno do 12,5 %. Tom prilikom su uporabili izmijenjenu Nieq jednakost. Utvrđeno je kako izvorna DeLong-ova Nieq jednakost koja je vrlo uporabljiva za sadržaje mangana uobičajene za korozijski postojane čelika značajno podcjenjuje FN metala zavara iznad 2,5% Mn. Oni su zamjenili utjecaj 0,5 Mn s malom konstantom , tako da je Nieq izražen jednakošću:

$$\text{Nieq} = \text{Ni} + 30(\text{C} + \text{N}) - 0,35 \quad (14)$$

Od pojave prvog Schaeffler-ovog dijagrama utjecaj mangana u Nieq jednakosti bio je upitan[36]. Temeljeno na zavarivanju visoko čvrstih čelika tipa AISI 4340 tijekom II. Svjetskog rata, utvrđeno je da pri koncentraciji mangana iznad 4% postaje upitan utjecajni koeficijent mangana od 0,5 u Nieq jednakosti[11]. Kotecki[23] je ponovno ispitao utjecaj molibdena na FN i Creq izraz. DeLong-ov izraz za Creq , kao što je vidljivo u jednadžbi (12) upućuje na jednak doprinos molibdena i kroma pri promicanju feritnog područja. Kotecki je utvrdio kako WRC-DeLong-ov dijagram (Slika 7) precijenjuje FN u metalu zavara i to precijenjivanje može biti ispravljeno uvođenjem koeficijenta za molibden od 0,7. Pri sličnim istraživanjima, Novozhilov i drugi [33] su našli kako bi ta vrijednost trebala biti 1,5.

Danas je u praktičnoj uporabi s manjim izmjenama Schaeffler-ov dijagram dopunjen DeLongom i M.C.T. Bystramom s prikazom područja strukturne osjetljivosti te šrafiranim područjem prihvatljive zavarljivosti (Slika 8).

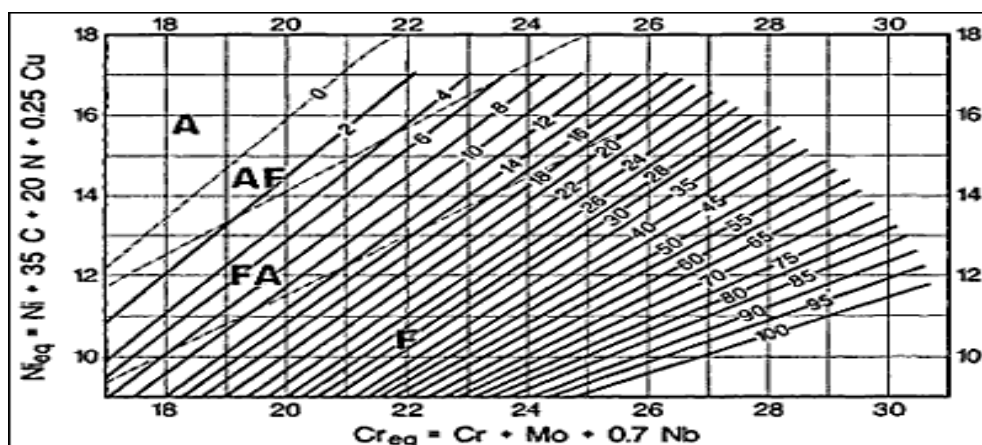


Slika 8. Schaeffler-ov dijagram dopunjen DeLongom i M.C.T. Bystramom [7-10,38]

Siewert/McCowan/Olsen objavljuju WRC-1988 dijagram koji predstavlja unaprjeđenje Schaeffler-ovog dijagrama. WRC dijagram preciznije određuje sadržaj alfa-faze (tzv.feritni broj FN) [20, 25--28].

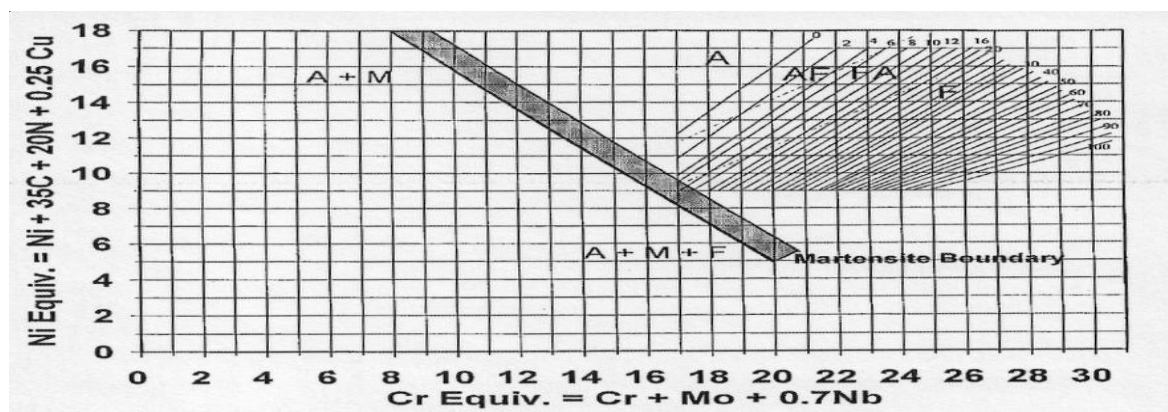
Da bi se povećao opseg i točnost predviđanja feritnog broja(FN) kod korozijski postojanog zavara kao i odgovarajućih raznovrsnih spojeva metala, Kotecki i Siewert su predložili WRC-1992 dijagram[20].. Uključivanjem koeficijenta za bakar (Cu) u Ni-ekvivalent, uklanja se sklonost WRC-1988 dijagrama ka precjenjivanju FN metala zavara pri visokom sadržaju Cu. Također koordinate WRC-1992 dijagrama mogu biti produžene (kao u Schaeffler-ovom dijagramu) s ciljem predviđanja utjecaja miješanja- razrjeđenja kod spojeva raznovrsnih metala. Kako bi bilo moguće provoditi analizu, budući da je izvorno WRC dijagram namijenjen za područje povećanog Creq i Nieq, potrebno ga je ugraditi u postojeći Schaeffler-ov strukturni dijagram[20, 26-28].

Ovaj dijagram prikazuje područje sastava za poželjni oblik primarnog skrućivanja. Crtkane linije na dijagramu označavaju različite prijelaze pri primarnom skrućivanju faze. Budući da sav ferit nije primaran ferit (tj. neki je fazna komponenta ferit-austenitnog eutektikuma), ovaj dijagram može biti korišten da osigura skrućivanje ferita kao primarne faze. Ova uvjet se javlja ako zavar ima sastav u području označenom s FA na slici 9. Zbog davanja prednosti primarnom feritu kao poželjnoj mikrostrukтури, uporabom ovog dijagrama moguće je smanjiti pojavu toplih pukotina za vrijeme zavarivanja. Također, ovo utječe i na korozijsku postojanost metala zavara s obzirom da li čelik ima mikrostrukтуру stvaranu s primarnim feritom ili primarnim austenitom [20,26].



Slika 9. WRC-1992 strukturalni dijagram za korozijski postojan metal zavara [20]

Mnogi sastavi metala navara nižeg Cr- i Ni- ekvivalenta nego oni uzduž Schaeffler-ove prenesene granice martenzita ne pokazuju martenzit u navaru te zadovoljavaju ASME 2T test savijanja s licem navara u vlačnoj zoni. Na osnovi magnetnih mjerenja i testova savijanja na oko 100 sastava metala zavara dobivenih pri jednoslojnom REL navarivanju na ASTM A36 čelik, nova granica martenzita je predložena kao dodatak WRC-1992 dijagramu (Slika 10).. Budući da mangan (Mn) nije dio kako Cr- tako ni Ni-ekvivalenta na WRC-1992 dijagramu, gornja linija martenzita je specifična za razinu oko 1%Mn u testom razmatranu sastavu, koja je prikladna za većinu spojeva raznovrsnih čelika[21,22].



Slika 10. WRC-1992 diagram s područjem granice stvaranja martenzita za razinu oko 1%Mn [21,22]

3. NEURONSKE MREŽE I NJIHOVA PRIMJENA

3.1 Općenito o neuronskim mrežama

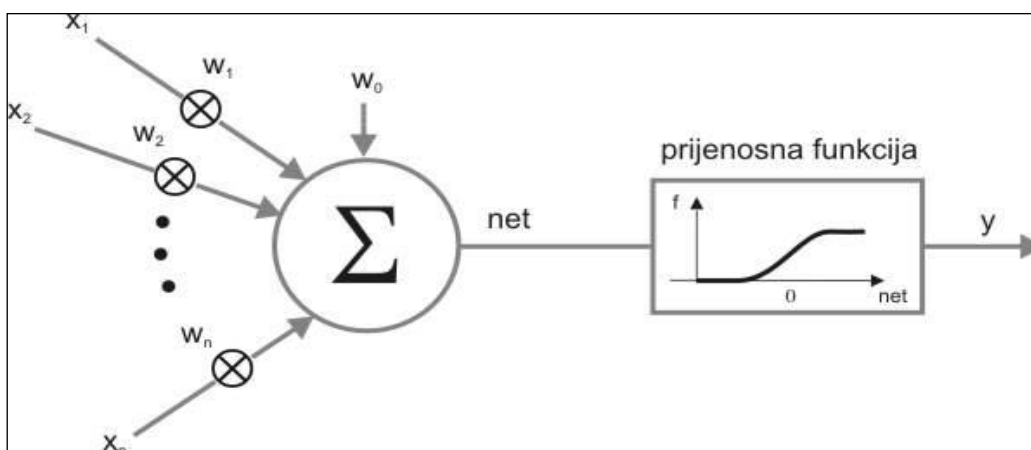
Neuronska mreža je skup međusobno povezanih jednostavnih procesnih elemenata (jedinica, čvorova) čija se funkcionalnost temelji na biološkom neuronu i koji služe distribuiranoj paralelnoj obradi podataka. Izlazi neurona iz n-tog sloja predstavljaju ulaze u neurone iz n+1-og sloja. Mreža je potpuno povezana kada je svaki neuron u svakom sloju povezan na sve neurone u sljedećem sloju. Pri tome je obradbeno moć mreže pohranjena u snazi veza između pojedinih neurona tj. težinama do kojih se dolazi postupkom prilagodbe odnosno učenjem iz skupa podataka za učenje. Neuronska mreža obrađuje podatke distribuiranim paralelnim radom svojih čvorova.

Višeslojne mreže imaju osim ulaznog i izlaznog sloja i jedan ili više skrivenih slojeva neurona [17,30].

Najčešći oblik prijenosne funkcije jest sigmoidalna funkcija. Za razliku od ostalih funkcija koje se primjenjuju, ova je funkcija derivabilna što je bitna prednost pri postupku učenja umjetne neuronske mreže. U slučaju da se od neuronske mreže zahtijeva rad s podacima čije vrijednosti bilo na njezinu ulazu ili izlazu nisu u uobičajenom intervalu $[-1,1]$, najjednostavnije je rješenje provesti pred-procesiranje odnosno post-procesiranje podataka (njihovo linearno preslikavanje u spomenuti interval). Kako bi neuronska mreža mogla predstaviti visoko nelinearne funkcije, potrebno je da prijenosna funkcija njezinih procesnih elemenata i sama bude nelinearna funkcija svojih ulaza. Nadalje, radi primjene gradijentne metode pri postupku učenja mreže, potrebno je da prijenosna funkcija bude derivabilna funkcija težinskih faktora. Funkcija koja ispunjava oba navedena uvjeta

je sigmoidalna: $f(\text{net}) = 1 / (1 + e^{-a \cdot \text{net}})$, gdje je $\text{net} = \sum_{i=0}^n \omega_i \cdot x_i$, a a parametar koji određuje

nagib funkcije, dok je ω_i - težina ulazne jedinice x_i . Stoga će višeslojna neuronska mreža sa sigmoidalnom funkcijom kao prijenosnom funkcijom procesnih elemenata biti u stanju predstaviti nelinearne odnose ulaznih i izlaznih podataka. Procesni element prikazan je na slici 11.



Slika 11. Sigmoidalna jedinica [3,17,30]

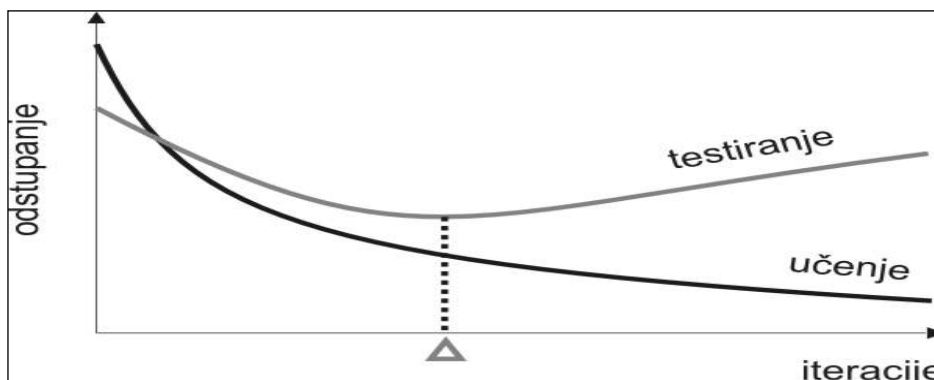
3.2 Postupak učenja mreže

U slučaju kada se koriste složenije prijenosne funkcije, poput sigmoidalne, ili dopušta rad s realnim brojevima, tipično se gubi zor nad načinom kako mreža obrađuje podatke. U tom slučaju uobičajeno se da se definira arhitektura mreže, i prije postupka obrade podatka obavi postupak učenja ili treniranja. Za razliku od konvencionalnih tehnika obrade podataka gdje je postupak obrade potrebno analitički razložiti na određeni broj algoritamskih koraka, kod ovog tipa neuronskih mreža takav algoritam ne postoji. Znanje o obradi podataka, tj. znanje o izlazu kao funkciji ulaza, pohranjeno je implicitno u težinama veza između neurona. Te se težine postupno prilagođavaju kroz postupak učenja neuronske mreže sve do trenutka kada je izlaz iz mreže, provjeren na skupu podataka za testiranje, zadovoljavajući. Pod postupkom učenja kod neuronskih mreža podrazumijeva se iterativan postupak predočavanja ulaznih primjera (uzoraka, iskustva) i eventualno očekivana izlaza. Ovisno o tome da li je u postupku učenja a priori znan izlaz iz mreže, pa ga pri učenju mreže koristimo uz svaki ulazni primjer, ili nam je točan izlaz nepoznat, razlikujemo dva načina učenja [3].

Skup primjera za učenje često se dijeli na tri odvojena skupa: skup za učenje, skup za testiranje i skup za provjeru (validaciju). Primjeri iz prvog skupa služe za učenje u užem smislu

(podešavanje težinskih faktora). Pomoću primjera iz drugog skupa vrši se tijekom učenja provjera rada mreže s trenutnim težinskim faktorima kako bi se postupak učenja zaustavio u trenutku degradacije performanse mreže. Stalnim praćenjem izlaza iz mreže dobivenog pomoću primjera iz skupa za

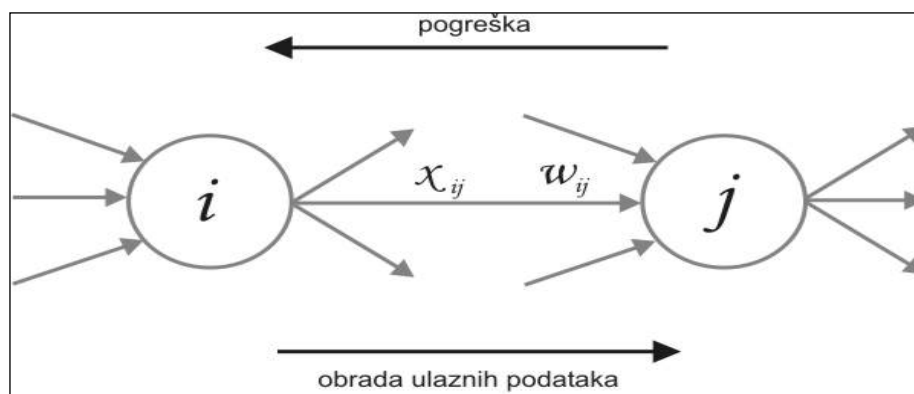
testiranje moguće je otkriti iteraciju u kojoj dobiveni izlaz najmanje odstupa od željenog (Slika 12).



Slika 12. Odstupanje stvarnog izlaza kroz iteracije [3]

Neuroni ulaznog sloja nemaju ulaznih signala tj. nemaju funkcionalnost neurona i obično pod ulaznim slojem podrazumijevaju se podaci organizirani u vektor konkretnih vrijednosti. Struktura mreže obično se zadaje kao n-torka u zapisu $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_n$ kojom se označava mreža od n slojeva kod koje n_1 neurona čini ulazni sloj, n_2 neurona prvi skriveni sloj itd.

Za pojedinačno (engl. on-line) učenje koristi se stohastička verzija algoritma. Slijedeće oznake su primijenjene: x_{ij} je ulaz s jedinice i u jedinicu j (izlaz jedinice i), w_{ij} je odgovarajuća težina, δ_n je pogreška izlaza jedinice n . Veličine su skicirane na slici 13.



Slika 13. Povezani neuroni [3]

Algoritam kao parametre uzima skup za učenje D , stopu učenja η , broj čvorova ulaznog sloja n_i , broj čvorova izlaznog sloja n_o i broj čvorova skrivenog sloja n_h . Mreži se predočavaju primjeri za učenje u obliku para (x,t) gdje je x vektor ulaznih vrijednosti a t vektor ciljnih izlaznih vrijednosti. Algoritam nakon inicijalnog postavljanja težina u glavnoj petlji ponavlja predstavljanje sviju primjera mreži sve dok nije ispunjen uvjet zaustavljanja. Kao uvjet može poslužiti maksimalni dozvoljeni iznos pogreške dobivene obradom primjera iz skupa za učenje ili skupa za testiranje, zatim postupak se može zaustaviti nakon fiksnog broja iteracija ili epoha i sl. Uvjet zaustavljanja ključan je parametar jer premalo iteracija rezultira lošom obradbenom sposobnosti mreže dok preveliki broj iteracija dovodi do njezina pre-treniranja. Za svaki predstavljeni primjer računa se

izlaz iz mreže na način da se signali prosljeđuju od ulaznih čvorova ka izlaznima te računa izlaz svakog pojedinog čvora. U ovoj fazi algoritma signali propagiraju unaprijed, od ulaznog sloja ka izlaznom. Na osnovi odstupanja stvarnog izlaza od ciljnog, računa se pogreška i ugađaju svi težinski faktori u cilju njezine minimizacije [3,17].

3.3 Primjena višeslojnih umjetnih neuronskih mreža pri predviđanju ferita (FN) u korozijski postojanom metalu zavara

Neuronske mreže odlično rješavaju probleme klasifikacije i predviđanja, odnosno općenito sve probleme kod kojih postoji odnos između prediktorskih (ulaznih) i zavisnih (izlaznih) varijabli, bez obzira na visoku složenost te veze (nelinearnost)[3,17,30].. Neuronske mreže se zasnivaju na jednostavnoj shemi gdje se inputi-ulazne veličine-varijable odnose prema izlazima sistemom međusobno povezanih slojeva. Struktura mreže sastoji se od slojeva od tri tipa čvorova: ulazni čvorovi, skriveni čvorovi i izlazni čvorovi [17,30].

Modeliranje neuronskim mrežom je djelotvorni postupak nelinearne regresijske analize. Ona je iznimno uporabljiva kod utvrđivanja tijeka ponašanja. Ova metodologiju je moguće koristiti pri predviđanju feritnog broja (FN) kod elektro-lučnog zavara kao funkcije kemijskog sadržaja elemenata) [1,45-47].

Jedan od najnovijih oblika konstitucijskih dijagrama je WRC-1992 [20]. Sljedeće su jednakosti primijenjene za C_{req} i N_{ieq} u WRC-1992 dijagramu:

$$C_{req} = Cr + Mo + 0,7Nb \quad (15a)$$

$$N_{ieq} = Ni + 35C + 20 N + 0,25 Cu \quad (15b)$$

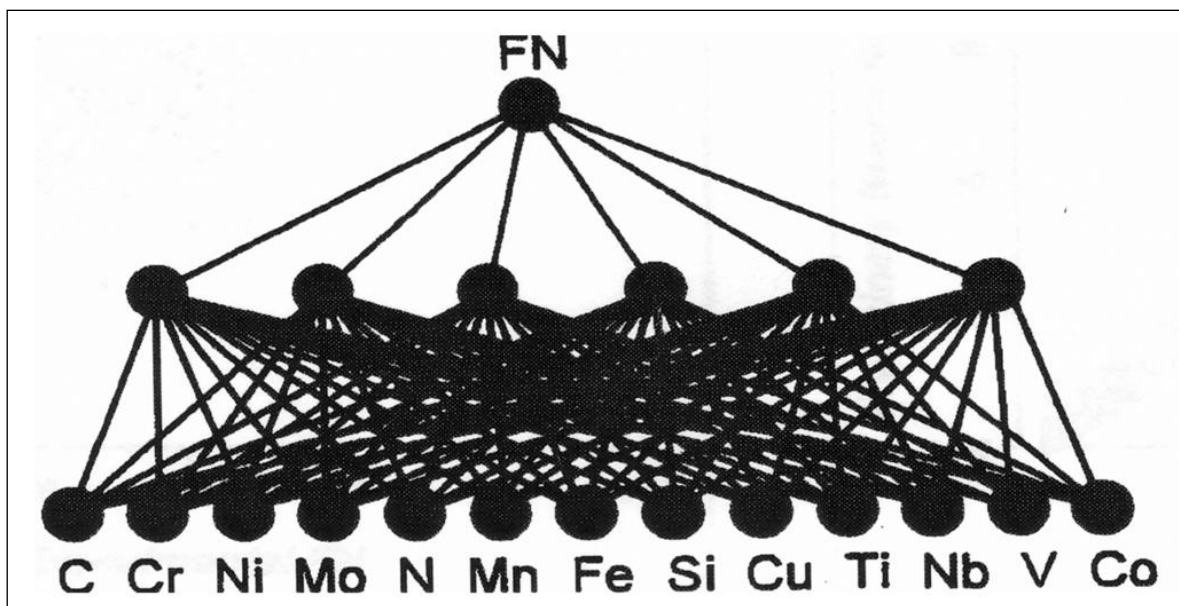
Gdje simboli elemenata predstavljaju težinski udio svakog elementa. Konačno, jedan drugi pristup predložen je za predviđanje FN korozijski postojanih čelika [1]. Kod ovog postupka, razlika u slobodnoj energiji između ferita i austenita je izračunata kao funkcija sastava i to se odnosi na FN. Regresijska analiza je uporabljena upri određivanju koeficijenata povezujući FN sa promjenom slobodne energije. Utvrđeno je da je ovaj pristup usporediv u preciznosti s WRC-1992 dijagramom. [1, 20, 45-47]. Prednost ovog novog pristupa je određeno olakšanje ograničenja u odnosu na legirajuće elemente i njihovo područje sastava [1]. Jednostavnim odnosom kao što je izraženo jednakošću (15a,b) nije moguće očekivati da bi uzeo u obzir sve utjecajne čimbenike[45-47]. Prvo, koeficijentima elemenata u C_{req} i N_{ieq} izrazima, relativni utjecaj svakog legirajućeg dodatka koji se vjerojatno mijenja unutar čitavog područja sastava. Nadalje, konstitucijski dijagrami koji se odnose na jednostavne linearne izraze za C_{req} i N_{ieq} čimbenike ne uzimaju u obzir međudjelovanje između elemenata. Na primjer, utjecaj razine mangana (Mn) na sadržaj δ -ferita može se mijenjati ovisno o sadržaju Cr, Ni ili C[42]. Budući da koeficijenti nisu ovisni o sastavu, ovo međudjelovanje je potpuno zapostavljeno. Neki pokušaji izvedenih parametara u ovisnosti o sastavu su predloženi [19], no oni ili vrijede za ograničeno područje sastava ili nisu točni jednako kao i predviđanje WRC-1992 dijagrama. Zbog toga je potrebno odgovarajuće opisati zaostali sadržaj ferita na fleksibilniji način i to tako da i međudjelovanje elemenata može biti čimbenik u odnosima, i predmnijevati točnijim predviđanjem. Nadalje, potrebno je uključiti uvjete procesa kao varijable budući da oni često utječu na konačnu razinu ferita.

Neuronske mreže su idealno prikladne za unaprjeđenje – poboljšanje fleksibilnosti, snagu i točnost predviđanja ferita jer one koriste nelinearne regresijske metode. Identifikacija složenosti odnosa između varijabli je izravna uporabom neuronskih mreža uzevši u obzir da je iznimno teško ili nemoguće identificirati standardnom regresijskom analizom. Preliminarnom studijom Vitek i ostali su razvili model neuronske mreže za predviđanje gdje je prikazano da je točnost modela neuronskih mreža bolja nego konvencionalni konstitucijski dijagrami[45].

Razvoj neuronskih mreža uključuje 4 osnovna koraka. Prvi korak zahtijeva identificiranje ulaznih i izlaznih varijabli čvora. U ovom slučaju, 13 ulaznih čvorova predstavlja uzete sadržaje elemenata (C,Cr,Ni,Mo,Mn,Fe,Si,Cu,Ti,Nb,V i Co).

Jedan izlazni čvor odgovara FN. Opseg pravovaljanosti neuronske mreže odgovara opsegu sastava i FN u seriji podataka za trening. Slijedeći korak je određivanje optimalne arhitekture neuronske mreže, i posebno, optimalnog broja skrivenih čvorova. Općenito, porastom broja skrivenih čvorova je usporedivo s porastom stupnja regresijske analize (2. stupnja, 3. stupnja itd.). Optimizacijom broja skrivenih čvorova se zahtijeva postizanje najboljeg podešavanja bez prekoračenja podataka. Da bi postigli taj cilj kompletan trening serije podataka je razdijeljen u parove trening/testiranje pod-serije, s 90% podataka za treninge i 10% podataka[46].

Za testiranje su priređena 4 para, bez preklapanja podataka u 4 ispitne pod-serije. Podjela podataka u trening/ispitne parove je učinjena slučajnim odabirom. Različite mrežne arhitekture su stvorene s različitim brojem skrivenih čvorova, mijenjajući ih od jednog do dvadeset. Za svaku od tih ispitnih arhitektura, 4 različite vrste neuronskih mreža su trenirane/ispitane, odgovarajući svakom od četiri trening/ispitivanje paru podataka „Učenje“ neuronskih mreža je mjereno izračunavanjem standardne devijacije odstupanja između izračunate i izmjerene vrijednosti FN pri ispitnoj pod-seriji (bolja „naučenost“, odgovara nižoj standardnoj devijaciji). Slično, predvidljivost neuronskim mrežama procjenjivana je standardnom devijacijom za predviđanje neuronske mreže na ispitnoj pod-seriji podataka. Potrebno je naglasiti da je vrijednost predvidljivosti zasnovana na FN predviđanju za podatke koji nisu korišteni pri učenju/treniranju mreže, i tako je to prava predodžba točnosti predviđanja. Prosjek vrijednosti standardnih devijacija (osim 4 trening/ispitivanje serije) je korišten pri procjeni sklonosti učenju i predviđanju neuronskih mreža kao funkcije broja skrivenih čvorova. Uporabom prosječnih vrijednosti standardnih devijacija, ovisnost rezultata o pojedinim dijelovima svih podataka je minimizirana[45-47]. Učenje mreža početno smanjuje odstupanja standardne devijacije s porastom broja skrivenih čvorova, no iznad tri čvora standardna devijacija učenja je relativno konstantna. Nasuprot tome, standardna devijacija predviđanja ima vrlo izražen minimum za šest skrivenih čvorova. Da bi potvrdili da je to ponašanje stvarno, a ne greška, više proširenih analiza je učinjeno za 5,6 i 7 skrivenih čvorova. Budući da najniža standardna devijacija se podudara s minimalnom pogreškom između predviđenog i mjerenog FN, odabrana je mreža sa 6 skrivenih čvorova kao optimalna mrežna arhitektura (Slika 14).



Slika 14. Optimalna arhitektura višeslojne neuronske mreže za predviđanje FN [46]

Slijed koraka od realnih ulaznih vrijednosti do realnih izlaznih vrijednosti koji su opisani u tekstu, mogu se izraziti odgovarajućim slijedom jednakosti. Prvotno, normalizirane ulazne vrijednosti su izračunate, zasnovane na minimalnim ($V_{i,\min}$) i maksimalnim ($V_{i,\max}$) vrijednostima za svaku ulaznu varijablu, te su

$$I_i = (V_i - V_{i,\min}) / (V_{i,\max} - V_{i,\min}) \quad (16)$$

Gdje su V_i ... stvarne ulazne vrijednosti. S normaliziranim ulaznim vrijednostima čvora I_i , za sve i ulazne čvorove. Suma S_j skrivenih čvorova j je dana s izrazom:

$$S_j = \sum I_i w_{ij} + I_0 \quad (17)$$

Gdje w_{ij} je težinski udio za spojeve-veze između ulaznih čvorova i i skrivenih čvorova j a I_0 je konstanta poznata kao konstanta nagiba. Suma je računata za svaki skriveni čvor j . Vrijednost skrivenog čvora je zatim izračunata iz sume uporabom prijenosne funkcije u ovom slučaju sigmoidalne prijenosne funkcije. Zbog toga, vrijednost svakog skrivenog čvora H_j , je dana izrazom.

$$H_j = 1 / (1 + e^{-S_j}) \quad (18)$$

Slijedeći korak je pribrajanje doprinosa od svakog skrivenog čvora svakom izlaznom čvoru, k . Suma svakog izlaznog čvora je izražena :

$$S_k = \sum H_j w_{jk} + H_0 \quad (19)$$

gdje je w_{jk} težinska veza između skrivenog čvora j i izlaznog čvora k . Istim slijedom, H_0 je konstanta nagiba. Kao što je to učinjeno za skrivene čvorove, zbroj izlaznog čvora je pretvoren u izlaznu vrijednost, O_k , uporabom još jedne sigmoidalne prijenosne funkcije :

$$O_k = 1 / (1 + e^{-S_k}) \quad (20)$$

Konačno izlazne mrežne vrijednosti, O_k , moraju biti pretvorene u realne izlazne vrijednosti. Pri učenju neuralne mreže, izlazne vrijednosti su se normalizirale unutar raspona od 0,2- 0,8 s namjerom da koriste linearno područje sigmoidalne funkcije. Ovo je postignuto eksperimentalnim normaliziranjem izlaza kako slijedi:

$$O_k = 0,2 + [(V_k - V_{k,\min}) / (V_{k,\max} - V_{k,\min})] 0,6 ; \quad (21)$$

gdje je V_k realna izlazna vrijednost a $V_{k,\min}$ i $V_{k,\max}$ su realne minimalne odnosno maksimalne vrijednosti. Iz ove jednakosti, provodi se izvjesna „denormalizacija“ izlaza mreže u n realne vrijednosti odnosno izvodi se u:

$$V_k = V_{k,\min} + (O_k - 0,2) (V_{k,\max} - V_{k,\min}) / 0,6 \quad (22)$$

Budući da je ovdje izračunati izlaz FN, koji ne može biti negativnog predznaka, ako bi izračunati FN odnosno V_k bio negativan, presloži se nanovo kao 0.

Slijedom operacija definiranih jednakostima 16-22, proizlazi da se FN mogu direktno izračunati iz ulaznih vrijednosti [45-47].

Utvrđeno je da je ovaj pristup procjeni FN u korozijski postojanom metalu zavara usporediv u točnosti predviđanja s onim predviđanjem uporabom WRC 1992 dijagrama [1,20,45-47].

4. ZAKLJUČAK

Ovaj članak prikazuje razvoj mnogih od danas prisutnih dijagrama za predviđanje mikrostrukture metala zavara zajedno s uporabom austenitnog dodatnog materijala i upućuje na neke nove analitičke oblike za buduće tehnike predviđanja. Predviđeno je da će se s porastom broja faznih transformacija uključenih u austenitni metal zavara, budući da broj legiranih dodataka raste, buduće tehnike predviđanja češće odnositi na matematičke izraze nego na dijagrame kako bi se načinilo obuhvatnije kvantitativno predviđanje faza mikrostrukture metala zavara.

Sposobnost predviđanja sadržaja ferita u elektrolučnim zavarima korozijski postojanih čelika je iznimno važna jer konačan sadržaj ferita određuje svojstva zavara. Sadržaj ferita je koristan pokazatelj oblika skrućivanja i sklonosti pukotinama austenitnih korozijski postojanih čelika koja je vrlo ovisna da li legura skrtnjava primarno u austenitnom ili feritnom obliku.

Godinama su činjeni mnogi naponi nastojeći preciznije predvidjeti sadržaj ferita kod elektrolučnog zavara korozijski postojanog čelika. Različiti oblici konstitucijskih dijagrama prvenstveno se razlikuju u koeficijentima koji su korišteni pri pretvorbi legirajućeg sadržaja u Creq i Nieq.

S pojavom umjetne inteligencije odnosno uspostave informatičkog računalnog sustava, važno je da naša kvantitativna sposobnost predviđanja mikro-strukture austenitnog metala zavara i njihovih svojstava bude analizirana. Važno je da sveobuhvatni kvantitativni izrazi za predviđanje mikro-strukture kao funkcije sastava i toplinskih utjecaja budu uporabljeni u računalnim programima za nova računala s ciljem unaprjeđenja projektiranja pristupa izboru dodatnog materijala.

Neuronske mreže su idealno prikladne za poboljšanje fleksibilnosti i točnost predviđanja ferita jer one koriste nelinearne regresijske metode. Identifikacija složenosti odnosa između varijabli je izravna uporabom neuronskih mreža uzevši u obzir da ih je iznimno teško ili nemoguće identificirati standardnom regresijskom analizom.

Pri uporabi umjetnih neuronskih mreža mogu se koristiti i konvencionalna računala, odbacujući pri tome formalizam rješavanja problema putem algoritama, odnosno manipulacije simbolima po definiranim pravilima. Na taj se način u stvari nalazimo u hibridnom području u kojem sekvencijalni stroj tek imitira neuronsku mrežu kao visoko-paralelnu arhitekturu.

5. LITERATURA

- [1] Babu, S. S., Vitek, J. M., Iskander, Y. S., David, S. A., „New model for prediction of ferrite number of stainless steel welds“, Science and Technology of Welding and Joining 2 (6), 1997., pp.279-285.
- [2] Balmforth, M. C., Lippold, J. C., „A New Ferritic-Martensitic Stainless Steel Constitution Diagram“, Welding Journal, December 2000, pp 339-345.
- [3] Bašić, B. D., „Bilješke s predavanja“. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001.
- [4] Binder, W.O., Brown, C.M., Franks, R., „Resistance to sensitization of austenitic chromium – nickel steels of 0,03% max. carbon content“, Trans. ASM, 40, 1949., pp.1301-1346.

- [5] Brooks, J.A., Thompson, A.W., Williams, J.C., „Fundamental Study of the Beneficial Effects of Delta Ferrite in Reducing Weld Cracking“, *Welding Journal*, March 1983., pp.71-83.
- [6] Campbell, H.C., Thomas, Jr.,R.D., „The effect of alloying elements on the tensile properties of 25-20 weld metal“, *Welding Journal*,25(11), 1946., pp.760-768-
- [7] David, B. S., „Ferrite Morphology and Variation in Ferrite Content in Austenitic Stainless Steel Welds“, *Welding Journal*, 4, 1981, 63-71.
- [8] DeLong, W.T., G. A. Osram, G.A.,Szumachowski, E.R., „Measurement and Calculation of Ferrite in Stainless Steel Weld Metal“, *Welding Journal*, Vol 35, Nov. 1956, pp. 521s-528s.
- [9] DeLong, W.T., Reid,Jr., H.F., „Properties of austenitic chromium in austenitic chromium-manganese stainless steel weld metal“, *Welding Journal*, 37(1), 1957.,pp.1-8.
- [10] DeLong, W.T., Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal, *Welding Research Supplement to Welding Journal*, July 1974, pp.273-286.
- [11] Feild, A.L.,Bloom, F.K., Linnert, G.E.,„Development of armor welding electrodes relationsof the compositionm of austenitic(20Cr-10 Ni) electrodes to the physical and ballistic properties of armor weldments“, OSRD Report No. 1636, July, 1943.
- [12] Folkhard, E.,Pertender,E.,Schabereiter,H.,Toesch,J.,“Metallurgie der Schweissung nichtrostender Staehle“, Springer Verlag ,Wien 1984
- [13] Geisen, W., „The special steels in theory and practice „, Iron and Steel Inst. Carnegie Scholarship Mem., 1.1., 1901.
- [14] Goodwin, G. M., Cole, N.C., Slaughter, G. M., „A Study of Ferrite Morphology in austenitic stainless steel weldments, *Welding Journal*, sept. 1972., 425-429.
- [15] Griffith, A.J., Wright,J.C., „Mechanical properties of austenitic and metastable stainless sheet and theirž relations with press forming behaviour“, Publication 117, Iron and Steel Institute, London, Uk, 1969., pp52.
- [16] Guillet, L., „Nickel-chrome steels“, *Rev. Metal.* 3 : part1, pp.332, Paris ,1906.
- [17] Gurney, K.,"Computers and Symbols versus Nets and Neurons". Dept. Human Sciences, Brunel University, Uxbridge, 2001.
- [18] Hammar, O.,Svensson,U.,“Influence of Steel Composition on Segregation and Microstructure during Solidification of Austenitic Stainless Steels“, *Solidification and Casting of Metals*, The Metals Society, London, pp. 401-410, 1979.
- [19] Hull, F.C., „Effect of Delta Ferrite on the Hot Cracking of Stainless Steel“, *Welding Journal*, 46, Sept. 1967.,pp. 399s-409s.
- [20] Kotecki, D. J., Siewert, T. A. „WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: A Modification of the WRC-1988 Diagram“, *Welding Research Supplement*, , May 1992., pp. 171s-177s.
- [21] Kotecki, D. J. „A Martenzite Boundary on the WRC-1992 Diagram“, *Welding Journal*, May 1999. pp.180-192.
- [22] Kotecki, D. J. „A Martenzite Boundary on the WRC-1992 Diagram Part 2- The Effect ofManganese“, *Welding Journal*, December 2000., pp. 346- 354.
- [23] Kotecki,D.J., „Molybdenum effect on stainless steel weld metal ferrite“, *IIW Document II-C-703-83*.
- [24] Long, C.J., DeLong, W.T., „The ferrite content of austenitic stainless steel weld metal“, *Welding Journal* 52(7) 1973., pp.281-297.
- [25] Lukačević, Z.“Zavarivanje“, SF, Slavonski Brod,1998.
- [26] Mateša,B ; Samardžić, I.; Dunder, M.; „The influence of the heat treatment on delta ferrite transformation in austenitic stainless steel welds“, *Metalurgija* 51 (2012)2, 229-232.
- [27] Mateša,B ; Samardžić, I.; Dunder, M.;“Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama“, *Zbornik radova 6. Međunar. znanstveno-stručnog savjetovanja*,Sl. Brod,2011., s. 233-243.
- [28] Mateša,B ; Samardžić, I.; Dunder, M.;“Uporabljivost WRC 1992 strukturnog dijagrama pri zavarivanju raznovrsnih čelika, *Zavarivanje*, Vol. 58, 1/2, 2015., str.5-13.
- [29] Maurer , E.; Strauss, B., „German patents 304,126 (10) and 304,159 (12), 1912.

- [30] Mišljenčević, D., Maršić, I., „Umjetna inteligencija“, Školska knjiga, Zagreb, 1991.
- [31] Monnartz, P. ; „The study of iron –chromium alloys with special consideration of their resistance to acids“, Metallurgie, (8),161, Paris, 1911.
- [32] Newell,H.D.,Fleischmann,M., „Hot rolled metal article and method of making same“, US patent No.2.118.683; 1938.
- [33] Norozholov, N.M. i drugi, „ On the austenitizing and ferritizing effect of elements in austenitic ferrite weld metals“, Welding Production (6), 1978, 12-13.
- [34] Novosel, M., Krumes,D.,„Posebni čelici“, SF, Slavonski Brod,1998.
- [35] Post, C.B., Eberly, W.S.,„ Stability of austenite in stainless steels, Trans. ASM, 39,1947.,pp.868-890.
- [36] Schaeffler, A. L., „Selection of austenitic electrodes for welding dissimilar metals“,Welding Journal,26(10),1947. pp.1-20.
- [37] Schaeffler, A. L.,„ Welding dissimilar metals with stainless electrodes“, Iron Age 162.72, July, 1,1948.,
- [38] Schaeffler, A. L., "Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metal", Metal Progress, 56 (11), 1949, pp. 680- 680B.
- [39] Scherer, R.; Riedrich,G. ; Hoch, G., „ „ Einfluss eines Gehaltes an Ferrit in austenitischen Chrom Nickel-Stahlen auf den Kornzerfall“ Archiv fuer das Eissenhüttenwesen Vol 13, (7), 1939, pp.52-57
- [40]. Seferian, D., „ Metallurgie de la Soudure“, Dunod, Paris, 1959.
- [41] Strauss, B.; Maurer, E., „Die Hochlegierten Chromnickelstahle als nichtrostende Stahle“, Kruppsche Monatshefte 1 (8) ,1920, pp. 129-146.
- [42] Szumachowski, E.R., Kotecki,D.J.,„Effect of manganese on stainless steel weld metal ferrite“, Welding Journal 64(5), 1984.,pp.156-161.
- [43] Thomas,Jr.,R.D., „ Austenitic welding in defense welding“, Arcos Corporation Report“, Philadelphia,Pa,Sept. 1941.
- [44] Thomas,Jr.,R.D., „A constitution diagram application to stainless weld metal“, Schweizer Archiv fuer Angewandte wissenschaft und Technik, No.1, 1949., pp. 3-24.
- [45] Vitek, J. M.; Iskander,Y.S., Obloew,E. M., Babu,S.S., David,S.A., „Neural network model for predicting ferrite number in stainless steel welds“, Trends i Welding Research, eds J.M. Vitek, S.A., David, J.A.Johnson,H.A.Smartt and T.DebRoy, ASM International, Materials Park, Ohio, 1999., pp.119-124.
- [46] Vitek, J. M.; Iskander,Y.S., Obloew,E. M , „ Improved ferrite number prediction in stainless steel arc welds using neural networks-part 1: neural network development“,Welding Journal79 (2), 2000.,pp.33-40.
- [47] Vitek, J. M.; Iskander,Y.S., Obloew,E. M , „ Improved ferrite number prediction in stainless steel arc welds using neural networks-part 2: neural network resul