

CERCETARE-DEZVOLTARE-INOVAR-PROIECTARE
RESEARCH-DEVELOPMENT-INNOVATION-DESIGN

Corelații privind evoluția microstructurii oțelurilor structurale sudate în raport cu condițiile de sudare

Correlations regarding the evolution of the welded structural steels microstructure in relation to welding conditions

Marius Bodea

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Rezumat

Oțelurile structurale sunt utilizate pe scară largă în construcții civile și industriale, în industria transporturilor și energetică, utilități, industria grea etc. Proprietățile lor mecanice și comportarea lor în exploatare depind direct de caracteristicile microstructurale ale îmbinărilor sudate în metalul depus și în zona influențată termic (ZIT). În lucrare sunt prezentate o serie de modele matematice care pot fi utilizate pentru simularea microstructurii îmbinării sudate pe baza diagramelor la răcire continuă CCT și a parametrilor de sudare. Aceste date pot servi pentru optimizarea procedurilor de sudare în vederea creșterii calității și a performanțelor de rezistență mecanică a îmbinărilor sudate realizate din oțeluri structurale. În aceste modele se pot integra corelații propuse de AI (inteligenta artificială) și validate pe baza unor date experimentale provenite din practica industrială.

Cuvinte cheie

Microstructura, parametrii de sudare, timpul $t_{8/5}$, câmpul termic la sudare, duritate maximă în ZIT

Abstract

Structural steels are widely used in civil and industrial construction, in the transport and energy industries, utilities, heavy industry, etc. Their mechanical properties and their performance in service depend directly on the microstructural characteristics of the welded joints in the deposited metal and in the heat-affected zone (HAZ). The paper presents a series of mathematical models that can be used to simulate the microstructure of the welded joint based on the CCT continuous cooling diagrams and welding parameters. These data can be used to optimize welding procedures in order to increase the quality, mechanical strength and performance of welded joints made of structural steels. These models can integrate correlations proposed by artificial intelligence (AI) and validated based on experimental data from industrial practice.

Keywords

Welding microstructure, welding parameters, $t_{8/5}$ time, welding thermal field, HAZ maximum hardness

1. Aspecte teoretice

Selectarea oțelurilor pentru construcțiile sudate se face în raport cu mai multe criterii, unul dintre acestea fiind caracteristicile de rezistență ale acestora. O clasificare a oțelurilor privind acest criteriu este prezentată în figura 1:

- oțeluri structurale cu limita de curgere $R_{p0.2}$ max. de 250 MPa (ex. S235)
- oțeluri structurale de înaltă rezistență (HSS) cu

1. Theoretical aspects

The selection of steels for welded structures is made in relation to several criteria, one of which is their strength characteristics. A classification of steels regarding this criterion is presented in figure 1:

- general purpose structural steels, yield strength $R_{p0.2}$ max. is 250 MPa (e.g. S235)
- high strength structural steels (HSS), with $R_{p0.2}$

- $R_{p0.2}$ cuprins între 250 și 700 MPa (ex. S355, S420)
- oțeluri ultra rezistente (UHSS) cu $R_{p0.2}$ cuprins între 700 și 1000 MPa (S690, DP Dual Phase)
 - oțeluri avansate de înaltă rezistență, (AHSS) cu $R_{p0.2}$ cuprins între 1000 și 1500 MPa (TRIP, TWIP).

- between 250 and 700 MPa (e.g. S355, S420)
- ultra-high strength steels (UHSS), with $R_{p0.2}$ between 700 and 1000 MPa (S690, DP Dual Phase)
 - advanced high strength steels, (AHSS) with $R_{p0.2}$ between 1000 and 1500 MPa (TRIP, TWIP).

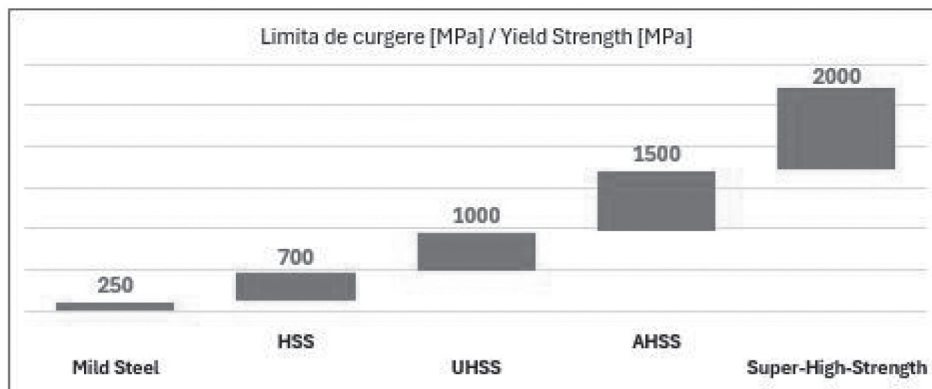


Figura 1. Clasificare oțeluri în raport cu limita de curgere [1]

Figure 1. Classification of steels according to yield strength [1]

Caracteristicile de rezistență mecanică și implicit cele legate de sudabilitatea acestor materiale sunt strâns corelate cu microstructura materialului de bază, cea din zona influențată termic (ZIT) și din metalul depus. Aspecte foarte importante sunt și cele legate de capacitatea de deformare a acestor oțeluri în special în aplicațiile unde sunt necesare îndoiri severe cu rază mică de curbura și unghiuri mari de îndoire, pentru prevenirea apariției microfisurilor pe muchiile de îndoire. Asigurarea caracteristicilor superioare de sudabilitate, cât și cele de deformabilitate se realizează prin controlul microstructurii oțelurilor respective. Reducerea indicatorului carbon echivalent și rafinarea microstructurii sunt două direcții esențiale pentru atingerea obiectivelor propuse.

Controlul microstructurii presupune un control avansat al compoziției chimice la elaborarea oțelurilor, precum și un regim de sudare adecvat.

În figura 2 sunt prezentate comparativ microstructura unui oțel convențional HSLA și cea unui oțel cu ductilitate înaltă a marginilor, care prezintă o granulație mai fină și o distribuție mai uniformă a formațiunilor de perlită [1].

În ultimii ani s-a înregistrat o creștere a interesului pentru asigurarea siguranței în exploatare a structurilor sudate concomitent cu reducerea greutății acestor structuri. Ca urmare au apărut pe piață oțeluri UHSS cu rezistență la tracțiune de peste 1 GPa, precum oțelurile TRIP, DP și cu structură complexă CP, destinate în special aplicațiilor din industria auto [1-3]. Pentru a asigura un echilibru între caracteristicile de rezistență mecanică și cele de deformabilitate, oțelurile UHSS au micro-

The mechanical strength and related weldability characteristics are closely correlated with the microstructure of the base material, that of the heat affected zone (HAZ) and of the deposited metal. Very important aspects are also those related to the deformation capability of these steels, especially in applications where severe bends with small radius of curvature and large bending angles are required, to prevent the appearance of microcracks on the bending edges. Ensuring superior weldability characteristics, as well as deformability, is achieved by controlling the microstructure of the respective steels. Reducing the equivalent carbon indicator and refining the microstructure are two essential directions for achieving the proposed objectives.

Microstructure control requires advanced control of steel's chemical composition, as well as an adequate welding regime.

Figure 2 shows a comparison of the microstructure of a conventional HSLA steel and that of a steel with high edge ductility, which has a finer grain size and a more uniform distribution of pearlite formations [1]. In recent years, there has been an increase in interest in ensuring the operational safety of welded structures while reducing the weight of these structures. As a result, UHSS steels with tensile strengths of over 1 GPa have appeared on the market, such as TRIP, DP and complex CP steels, intended especially for automotive applications [1-3].

In order to ensure a balance between mechanical strength and deformability characteristics, UHSS steels have an optimized microstructure in terms of

structura optimizată din punct de vedere al prezenței și raportului constituenților microstructurali. O problemă importantă este alegerea tehnologiei de sudare pentru a preveni fenomene de înmuiere și scădere a tenacității în zonele de sudare [2].

the presence and ratio of microstructural constituents. An important issue is the choice of welding technology to prevent softening phenomena and a decrease in toughness in the welding areas [2].

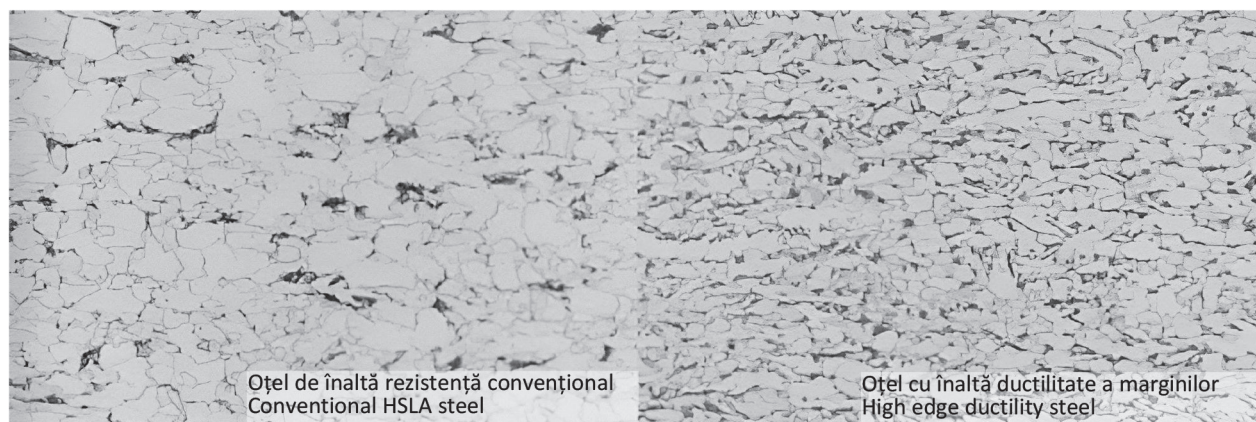


Figura 2. Microstructura oțeluri HSLA vs oțeluri cu înaltă ductilitate a marginilor [1]
Figure 2. HSLA steel microstructure vs. high edge ductility steel [1]

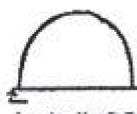
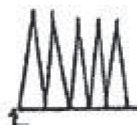
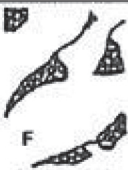
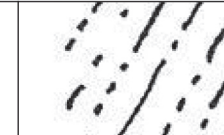
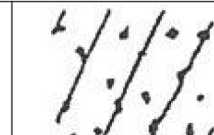
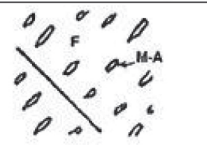
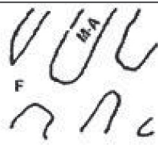
Microstructura în ZIT a oțelurilor sudate este puternic influențată de compoziția chimică și ciclul termic de sudare. Alți factori importanți sunt omogenitatea chimică și microstructurală, precum și mărimea grăunțului de austenită. Împiedicarea creșterii grăunțului de austenită în zona de supraîncălzire se poate face prin controlul energiei liniare de sudare sau prin metode metalurgice. Prezența în metalul de bază a unor carburi foarte fine, precum NbC, ce prezintă stabilitate termică ridicată (1200°C), asigură un efect de pinning pe limita grăunților de austenită, împiedicând creșterea granulației în zona de supraîncălzire. Sunt promovate astfel formarea unor structuri bainitice și feritice non-poligonale caracterizate prin tenacitate ridicată. Comitetul de Metalurgia Sudării din cadrul Societății de Sudare din Japonia a clasificat și descris morfologic constituenții microstructurali întâlniți la sudarea oțelurilor cu conținut redus de carbon [4].

Ferita alotromorfă (F-I) se dezvoltă în lungul limitelor grăunților de austenită. Ferita pro-eutectoidă (F-II) are forme poligonale și poate crește la dimensiuni mari. Ferita Widmanstatten (F-III) are aspect specific în dinți de fierăstrău, nuclează pe limita grăunților de austenită și crește în interiorul grăunților de ferită. Are tendința de a se transforma în structuri bainitice odată cu creșterea concentrației elementelor de aliere, tabelul 1. Structurile feritice tip IV și V nuclează intracristalin și asigură tenacitate ridicată, spre deosebire de morfologiile anterioare. Ferita aciculară s-a demonstrat că nuclează pe incluziuni nemetalice foarte fine [5,6].

The steels' welded microstructure in the HAZ is strongly influenced by the chemical composition and the welding thermal cycle. Other important factors are the chemical and microstructural homogeneity, as well as the austenite grain size. The prevention of austenite grain growth in the superheated zone can be done by controlling the input welding energy or by metallurgical methods. The presence in the parent metal of very fine carbides, such as NbC, which present very high thermal stability up to 1200°C, provides a strong pinning effect on the austenite grain boundary, preventing grain growth in the superheated zone. Thus, is promoted the formation of non-polygonal bainitic and ferritic structures characterized by high toughness. The Welding Metallurgy Committee of the Welding Society of Japan has classified and described the microstructural constituents encountered in the welding of low-carbon steels [4].

Allotriomorphic Ferrite (F-I) grows along the austenite grain boundaries. Pro-eutectoid ferrite (F-II) has polygonal shapes and can grow to large sizes. Widmanstatten ferrite (F-III) has a specific sawtooth appearance, nucleates on the austenite grain boundaries and grows inside the ferrite grains. It tends to transform into bainitic structures with increasing alloying element concentration, table 1. Ferritic structures Type IV and V nucleate intracristallinely and provide high toughness, unlike previous morphologies. Acicular ferrite has been shown to nucleate on very fine non-metallic inclusions [5,6].

Tabelul 1. Clasificare și descriere constituenți microstructurali în ZIT la sudarea oțelurilor cu conținut redus de carbon [4]**Table 1.** Classification and description of microstructural constituents in HAZ, welded low carbon steels [4]

	F-I Alotromorfă	F-II Poligonală	F-III Widmanstatten	F-IV Lamelară/Aciculară	F-V Granulară
Structuri Feritice	Allotriomorphic ferrite	Polygonal ferrite	Side plate ferrite	Nucleated intracrystalline ferrite	
Ferritic structures	 Austenite G.B.	 Austenite G.B.	 Austenite G.B.	 acicular	 granular
Structuri Perlitice	P-I Perlită lamelară P-I Lamellar perlite		P-II Perlită degenerată P-II Degenerate perlite		P-III Colonii fine perlitice P-III Fine perlite colonies
	 Optic	 SEM	 Optic	 SEM	 Optic
Structuri Bainitice	B-I Bainită superioară B-I Upper bainite			B-II Bainită inferioară B-II Lower bainite	
	 Optic	 SEM	 Optic	 SEM	
Structuri Martensitice	M-I Plachete Martensită M-I Lath Martensite			M-II Constituenți M/A M-II M/A Constituents	
					

Perlita lamelară de tip P-I rezultă în cazul unor răciri mai lente, respectiv pentru valori ridicate ale energiei liniare la sudare. Structurile perlitice P-II (degenerate) formațiunile cementitice sunt întrerupte și tind să devină granulare. Mărimea acestor formațiuni se reduce odată cu creșterea vitezelor de răcire, iar la viteze mai ridicate se obțin colonii fine perlitice (P-III).

În cazul structurilor bainitice superioare (B-I), formațiunile cementitice foarte fine precipită între lamelele de ferită, iar în cazul structurilor bainitice inferioare, acestea precipită pe limita lamelelor de ferită sau în interiorul acestora. În cazul B-II, aceste precipitate pot fi observate doar prin microscopie electronică.

Microstructurile bogate în ferită aciculară vor conferi o creștere a rezistenței mecanice simultan cu cea a tenacității. Eventuale microfisuri se vor propaga printre formațiunile feritice aciculare cu un consum mai ridicat de energie, îmbunătățind comportarea la solicitări dinamice a îmbinării [5-9].

Lamellar pearlite of type P-I results in the case of slower cooling, respectively for high values of linear energy during welding. Pearlitic structures P-II (degenerate) the cementite formations are interrupted and tend to become granular. The size of these formations decreases with increasing cooling rates, and at higher rates fine pearlitic colonies are obtained (P-III).

In the case of upper bainitic structures (B-I), very fine cementite formations precipitate between the ferrite lamellae, and in the case of lower bainitic structures, they precipitate on the boundary of the ferrite lamellae or inside them. In the case of B-II, these precipitates can only be observed by electron microscopy.

Microstructures rich in acicular ferrite will provide an increase in mechanical strength simultaneously with that of toughness. Any microcracks will propagate through the acicular ferritic formations with higher energy consumption, improving the dynamic stress behaviour of the joint [5-9].

2. Modele matematice pentru estimarea caracteristicilor microstructurale

Modelarea matematică a microstructurii după sudare în metalul depus și ZIT este o problemă complexă care ar trebui să considere parametrii de proces, elemente de design și tehnologie de sudare: tip îmbinare, formă rost, grosime material. O abordare care să cuprindă toate variabilele în modelul matematic este practic imposibil de formulat și de rezolvat printr-o abordare convențională. Din acest motiv, până în prezent s-au formulat o serie de modele matematice simplificate care iau în considerare un număr mai restrâns de variabile:

Metode bazate pe transformări de fază:

- Predicția fazelor microstructurale pe baza ciclului termic de la sudare (energia liniară la sudare, timpul $t_{8/5}$) prin utilizarea diagramelor CCT și TTT.
- Cinetica transformărilor de fază în condiții non-izoterme folosind modele matematice precum Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov și Koistinen-Marburger pentru estimarea transformării martensitice în funcție de viteza de răcire [10].

Metode bazate pe simulări termice și metalurgice, analize cu element finit:

- Analiza cu elemente finite. Simulare de câmpuri termice și transformări de fază
- Termodinamică computațională (CALPHAD), baze de date termodinamice
- Simularea evoluției microstructurii la scara grăunților cristalini (modele phase-field).

Metode bazate pe corelații empirice și baze de date:

- Modele de regresie matematică și analize statistice, atlase, diagrame, corelații [3]
- Rețele Neuronale Artificiale și Machine Learning, bazate pe volume mari de date experimentale organizate în baze de date [10,11,13,14].
- Metode de tip Cellular Automata, Monte Carlo bazate pe reguli statistice, sau alte metode de tip integrat care combină modele de transfer termic cu cele care fac simulări la nivelul creșterii grăunților cristalini sau la scară intermediară (mesoscale phase transformation models).

Dezvoltarea inteligenței artificiale (AI) a deschis calea studiului evoluțiilor microstructurale la sudare pe baza unor metode hibride, care integrează transformări termodinamice, cinetica transformărilor de fază, dar și algoritmi de machine learning. Aceștia din urmă folosesc baze de date experimentale sau sintetice pentru a ajusta anumiți parametri sau coeficienți utilizați în modelele matematice și pentru

2. Mathematical models for estimating microstructural characteristics

Mathematical modelling of the welding microstructure in the deposited metal and HAZ is a complex problem that should consider welding process parameters, design elements and welding technology: joint type, joint shape, material thickness. An approach that includes all variables in the mathematical model is practically impossible to formulate and solve by a conventional approach. For this reason, a series of simplified mathematical models have been formulated so far, that take into account a smaller number of variables:

Methods based on phase transformations:

- Prediction of microstructural phases based on the thermal cycle from welding (heat input, time $t_{8/5}$) by using CCT and TTT diagrams.
- Kinetics of phase transformations under non-isothermal conditions using models such as Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov and Koistinen-Marburger to estimate the martensitic transformation as a function of cooling rate [10].

Methods based on thermal and metallurgical simulations using finite element analysis:

- Finite element analysis. Thermal field and phase transformation simulation
- Computational thermodynamics (CALPHAD), thermodynamic databases
- Simulation of microstructure evolution using phase-field models.

Methods based on empirical correlations and databases:

- Mathematical regression models and statistical analyses, atlases, diagrams, correlations [3]
- Artificial Neural Networks and Machine Learning, based on large volumes of experimental data [10,11,13,14].
- Cellular Automata, Monte Carlo methods based on statistical rules, or other integrated methods that combine heat transfer models with those that simulate grain growth at the level of crystallites or at an intermediate scale, mesoscale phase transformation models.

The development of artificial intelligence (AI) has opened the way to the study of microstructural evolutions during welding based on hybrid methods based on integration thermodynamic transformations, phase transformation kinetics, and machine learning algorithms. The latter use experimental or synthetic databases to adjust certain parameters or coefficients used in mathematical models and for ex-

validare experimentală [13,14].

3. Rezultate și discuții

O simulare a microstructurilor obținute la sudarea prin topire a oțelurilor S355 este prezentată în figura 3. Se consideră diagrama la răcire continuă a acestor oțeluri prezentată în figura 4, precum și vitezele de răcire calculate în raport cu parametrii de sudare și timpul $t_{8/5}$. Din diagrama CCT se determină timpul $t_{8/5}$ pentru începutul/sfârșitul transformărilor martensitice, bainitice și ferito-perlitice [9-14].

perimental validation [13,14].

3. Results and discussions

A simulation of the microstructures obtained for S355 welded steels is presented in figure 3. The CCT diagram of these steels is presented in figure 4, as well as the cooling rates calculated in relation to the welding parameters and the $t_{8/5}$ time. Based on the CCT diagram, the time $t_{8/5}$ has been determined for the corresponding of beginning/end of the martensitic, bainitic and ferrite-pearlitic transformations [9-14].

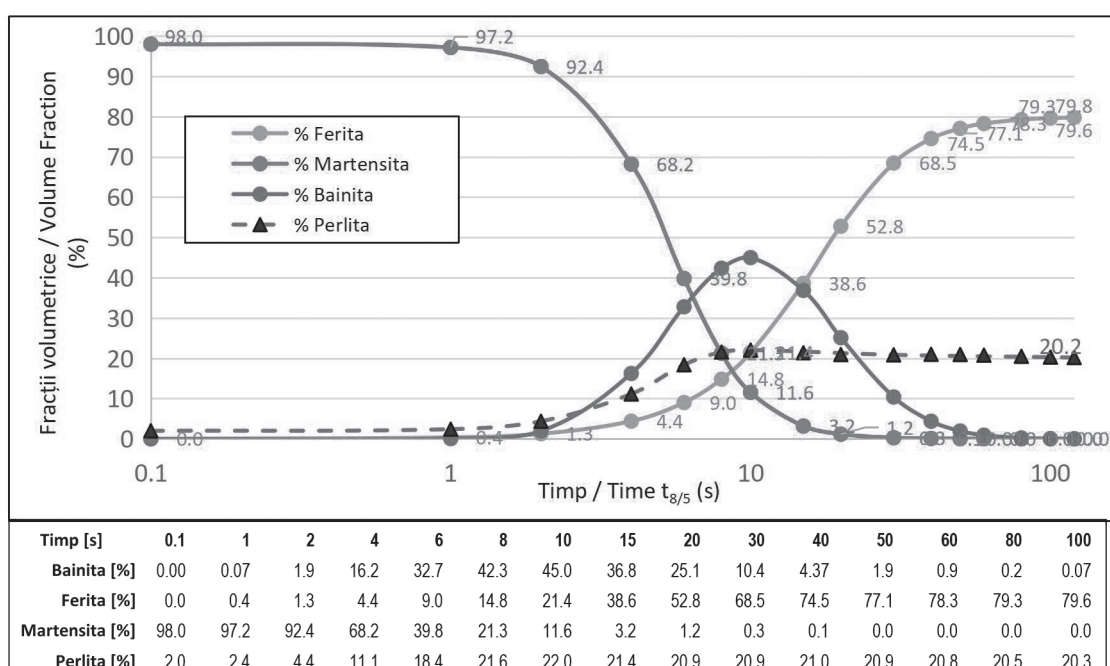


Figura 3. Simulare microstructuri la sudarea prin topire a oțelurilor structurale S355

Figure 3. Microstructure simulation during fusion welding of S355 structural steels

Pentru calculul fracțiilor volumetrice ale constituenților microstructurali rezultați la sudarea oțelurilor S355J2 s-au folosit două funcții logistice cu 5 parametri, ec. (1) și (2), respectiv pentru estimarea proporțiilor de ferită și martensită. Pentru fracția de bainită s-a folosit o funcție log-normală, ecuația (3). Cantitatea procentuală de perlită rezultă prin diferență, $P=100\% - F - M - B$, unde F, M și B reprezintă fracțiile procentuale de ferită, martensită și bainită din microstructură, figura 3.

Pentru calculul conținutului de constituenți s-au utilizat următoarele relații:

a. Proporție ferită (%)

$$F(t_{8/5}) = F_{min} + \frac{F_{max} - F_{min}}{\left[1 + \left(\frac{t_{8/5}}{c}\right)^b\right]^{\gamma}} \quad (1)$$

The volumetric fractions of the ferrite and martensite resulting after the welding of S355J2 steels have been calculated using two logistic functions with 5 parameters, equations (1) and (2). A log-normal function was used to estimate the bainite fraction, equation (3). The percentage amount of pearlite results from the difference, $P=100\% - F - M - B$, where F, M and B represent the percentage fractions of ferrite, martensite and bainite in the microstructure, figure 3.

The following relationships were used to calculate the constituent content:

a. Ferrite content (%)

$$F(t_{8/5}) = F_{min} + \frac{F_{max} - F_{min}}{\left[1 + \left(\frac{t_{8/5}}{c}\right)^b\right]^{\gamma}} \quad (1)$$

b. Proportie martensita (%)

$$M(t_{8/5}) = M_{min} + \frac{M_{max} - M_{min}}{\left[1 + \left(\frac{t_{8/5}}{c}\right)^b\right]^\gamma} \quad (2)$$

c. Proportie bainita (%)

$$B(t_{8/5}) = B_{max} \cdot e^{-\frac{[\ln(t_{8/5}) - \ln(c)]^2}{2 \cdot [\ln(b)]^2}} \quad (3)$$

unde: $c=10$ s, $b=1.9$ și $B_{max}=45\%$.

Valorile rezultate pentru funcțiile logistice sunt prezentate în tabelul 2.

b. Martensite content (%)

$$M(t_{8/5}) = M_{min} + \frac{M_{max} - M_{min}}{\left[1 + \left(\frac{t_{8/5}}{c}\right)^b\right]^\gamma} \quad (2)$$

c. Bainite content (%)

$$B(t_{8/5}) = B_{max} \cdot e^{-\frac{[\ln(t_{8/5}) - \ln(c)]^2}{2 \cdot [\ln(b)]^2}} \quad (3)$$

where: $c=10$ s, $b=1.9$, and $B_{max}=45\%$.

The resulting values for the logistic functions are presented in table 2.

Tabelul 2. Funcții logistice pentru modelarea microstructurii la sudarea oțelurilor S355**Table 2.** Logistic functions for microstructure modelling in welding of S355 steels

Funcții logistice Logistic functions	Simbolizare Symbol	Parametrii funcției logistice 5P pentru Ferită, ec. (1) 5P logistic function parameters for Ferrite, eq. (1)	Parametrii funcției logistice 5P pentru Martensită, ec. (2) 5P logistic function parameters for Martensite, eq. (2)
Ferita / Martensită Ferrite / Martensite minimum	F_{min} / M_{min}	0	0
Coefficient Hill Hill coefficient	b	-3	2.8
Punct Inflexiune Inflection point	c	20	6
Ferita / Martensită Ferrite / Martensite maximum	M_{max} / M_{max}	80	98
Factor asimetrie Asymmetry factor	γ	0.6	1.3

Pe baza fracțiilor volumetrice determinate în tabelul din figura 3 se pot estima proprietăți mecanice precum duritatea și rezistența la tracțiune a îmbinării sudate folosind un calcul ponderat și valorile specifice de duritate și rezistență ce pot fi preluate din literatura de specialitate pentru fiecare constituent microstructural.

Bazele de date care conțin date experimentale reprezintă o sursă extrem de valoroasă, în prezent fiind posibile modelări cu ajutorul AI. În acest caz, modelările microstructurii sunt mai precise, și sunt valabile pentru o paletă mai largă de materiale și condiții de sudare. Astfel de corelații și date pot fi accesate în diverse atlase open-source precum cele din [4].

4. Concluzii

Pe baza studiului realizat se pot concluziona următoarele aspecte:

- Caracteristicile microstructurale ale îmbinării sudate determină direct performanțele de rezistență mecanică ale îmbinărilor sudate, precum și modul de comportare a acestora în exploatare.

Based on the volume fractions determined in Table of Figure 3, mechanical properties such as hardness and tensile strength of the welded joint can be estimated using a weighted calculation and specific hardness and strength values that can be taken from the specialized literature for each microstructural constituent.

Databases containing experimental data represent an extremely valuable source, currently being possible AI microstructure modelling. In this case, the microstructure modelling is more accurate, and is valid for a wider range of materials and welding conditions. Such correlations and data can be accessed in various open-source atlases such as those in [4].

4. Conclusions

Based on the study conducted, the following aspects can be concluded:

- The microstructural characteristics of the welded joint directly determine the mechanical strength performances of the welded joints, as well as their behaviour in operation.

- În prezent, pot fi realizate modele avansate de predicție și modelare microstructurală cu ajutorul rețelelor neuronale și algoritmilor deep learning.
- Aceste analize pot considera toți parametrii esențiali la sudare, însă este necesar existența unor baze mari de date care să cuprindă un număr cât mai mare de cazuri, materiale, condiții de sudare, factori ambientali sau externi. Aceste baze de date servesc pentru antrenarea rețelelor neuronale existente.
- Realizarea unor astfel de baze de date devine mai facilă în condițiile în care se lucrează tot mai mult cu echipamente moderne de sudare, utilizarea IoT (Internet of Things), salvarea automată în cloud a parametrilor de lucru și folosirea tehnologiilor de comunicații 5G.
- Currently, advanced prediction and microstructural modelling models can be created using neural networks and AI deep learning algorithms.
- These analyses can consider all the essential parameters in welding, but it is necessary to have large databases that include as many cases as possible, materials, welding conditions, environmental or external factors. These databases serve to train existing neural networks.
- The creation of such databases is becoming easier in the conditions in which we are increasingly working with modern welding equipment, the use of IoT (Internet of Things), automatic saving of working parameters in the cloud and the use of 5G communication technologies.

Bibliografie / References

- [1] SSAB, High edge (HE) ductility HSLA steel, <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/docol/automotive-steel-grades/high-edge-ductility-steel>, accesed 20.02.2025
- [2] Moon, J., Bae, G., Jeong, B.Y. et al. Ultrastrong and ductile steel welds achieved by fine interlocking microstructures with film-like retained austenite. *Nat Commun* 15, 1301 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45470-1>
- [3] A. Florea, C. Rontescu, A. Bogatu, D.T. Cicic, Assessment of the hardness of S890QL material welded joints, *Journal of Research and Innovation for Sustainable Society (JRISS)*, Vol. 6, no. 2 (2024), DOI: 10.33727/JRISS.2024.2.13:119-125
- [4] KASUGAI, Takayoshi, FUJITA, Mitsutane. "NRIM-special report No.99-02 Atlas of CCT Diagrams for Welding" (1999), accesed 20.02.2025. https://mdr.nims.go.jp/download_all/1g05fb663.zip?locale=en
- [5] Tae-Kyu Lee, H. J. Kim, B. Y. Kang, S. K. Hwang, Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds, *ISIJ International*, Vol. 40 (2000), No. 12, pp. 1260–1268
- [6] Sudarsanam Suresh Babu, The mechanism of acicular ferrite in weld deposits, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, Elsevier 8(2004) 267-278, doi:10.1016/j.cossms.2004.10.001
- [7] Denys R. The effect of HAZ softening on the fracture characteristics of modern steel weldments and the practical integrity of marine structures made by TMCP steels' EVALMAT 89, Kobe, Japan, 20-23 November 1989, *ISIJ 1989 vol 2* pp 1013
- [8] S. Oktay, P.E. Di Nunzio, M.C. Cesile, K. Davut, M.K. Şeşen, Effect Of Cooling Temperature on the Structure and Properties of Thermo-Mechanically Rolled S700MC Steel, *J. Min. Metall. Sect. B-Metall.* 58 (3), 475 – 489, (2022).
- [9] Smokvina Hanza, S., Smoljan, B. Štic, L. Hajdek, K., Prediction of Microstructure Constituents' Hardness after the Isothermal Decomposition of Austenite. *Metals* 2021, 11, 180. <https://doi.org/10.3390/met11020180>.
- [10] J. M Nicholas and David J Abson, The Prediction of Maximum HAZ Hardness in C-Mn and Low Alloy Steel Arc Welds-TWI, 17th Int. Conf. 'Computer Technology in Welding and Engineering' Held at the University of Cranfield, (2008)
- [11] A. Hintze Cesaro, P.F. Mendez, Models to Predict Hardness in the HAZ, *Weld Magazine*, Vol.02 No.06, pp42-54., (2019).
- [12] Dillinger, Help welding calculation – WELDING, <https://www.dillinger.de/d/en/e-service/tools/welding/help/index.shtml>
- [13] V. Dogra, Application of Welding Process Parameters Using AI Algorithm, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, DOI: <https://doi.org/10.17762/turcomat.v9i2.13866>, Vol. 9 No.02 (2018)
- [14] Xuewu Wang, Qian Chen, Hao Sun, Xiuwei Wang, Huaicheng Yan, GMAW welding procedure expert system based on machine learning, <https://doi.org/10.20517/ir.2023.03>, *Intell Robot*, 3(1):56-75, (2023)

Pentru citare:

Bodea, M., (2025). *Steel structures elements under fatigue loading reinforcement using Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)*, *Sudura*, nr. 2, year XXXV, 5-12, <https://doi.org/10.70652/sud.2025.2.1>