

TENDINȚE ÎN TEHNOLOGIE ȘI INSTRUIRE TRENDS IN TECHNOLOGY AND TRAINING

Aplicații ale Inteligenței Artificiale în Ingineria Sudării

AI Applications in Welding Engineering

Marius Bodea

Universitatea Tehnică Cluj, Facultatea de Ingineria Materialelor și a Mediului

Rezumat

În lucrare sunt prezentate o serie de noutăți și aplicații bazate pe inteligență artificială (AI) utilizate în domeniul sudării. Istoric, ingineria sudării a fost caracterizată prin interacțiuni complexe, neliniare, între parametrii procesului de sudare, proprietățile materialelor și condițiile efective de lucru. Aceste interacțiuni fac dificilă predicția, controlul și optimizarea calității sudurilor folosind doar modele analitice clasice. Dezvoltarea recentă a tehnologiilor de inteligență artificială (AI), în special machine learning (ML) și deep learning (DL), oferă noi instrumente pentru a aborda aceste provocări prin modelare bazată pe date experimentale, prin monitorizarea proceselor de sudare în timp real și prin proceduri automate de luare a deciziilor. Metodele de AI facilitează recunoașterea tiparelor, optimizarea sistemelor multivariate și interpretarea automată a datelor senzoriale de înaltă dimensionalitate, permițând îmbunătățiri pe tot parcursul ciclului de viață al sudurilor, de la proiectare la asigurarea calității.

Cuvinte cheie

Aplicații de sudare, inteligență artificială, tendințe emergente, controlul calității, software de management

Abstract

Welding engineering has historically been characterized by complex, nonlinear interactions between process parameters, material properties, and environmental conditions. These interactions make prediction, control, and optimization of weld quality difficult using classical analytical models alone. The recent proliferation of artificial intelligence (AI) techniques, particularly machine learning (ML) and deep learning (DL) provides new tools to address these challenges through data-driven modelling, real-time process monitoring, and decision-making frameworks. AI methods support pattern recognition, optimization of multivariate systems, and automated interpretation of high-dimensional sensor data, enabling improvements across the welding lifecycle from design to quality assurance.

Keywords

Welding applications, artificial intelligence, emerging trends, quality control, management software

1. Introducere

Inteligența artificială (AI) contribuie tot mai mult la îmbunătățirea controlului proceselor de sudare și la asigurarea calității prin utilizarea de algoritmi de machine learning ce completează modelarea convențională bazată pe procese fizice. S-au dezvoltat astfel o serie de modele AI care sunt utilizate în activități de simulare și modelare, precum mașinile cu vectori suport și sistemele fuzzy adaptive, capabile să identifice modele între parametrii procesului de sudare și rezultate, cum ar fi geometria sudurii și proprietățile mecanice, permițând predicția precisă a condițiilor optime de sudare, reducând în același timp necesitatea unor teste experimentale extinse. În sistemele automate de su-

1. Introduction

Artificial intelligence significantly enhances welding engineering by complementing traditional physics-based modelling, improving process control, and advancing quality assurance.

In modelling and simulation, AI methods such as artificial neural networks, support vector machines, and adaptive fuzzy systems can learn complex relationships between process parameters and outputs like weld geometry and mechanical properties, enabling accurate prediction of optimal welding conditions while reducing the need for extensive experimental trials. In automated welding systems, AI supports adaptive process control by analysing real-time sen-

dare, AI susține controlul adaptiv al proceselor prin analizarea datelor senzorilor în timp real și reglarea dinamică a parametrilor de sudare (figura 1).

son data and dynamically adjusting welding parameters, which improves consistency and facilitates autonomous robotized welding (figure 1).

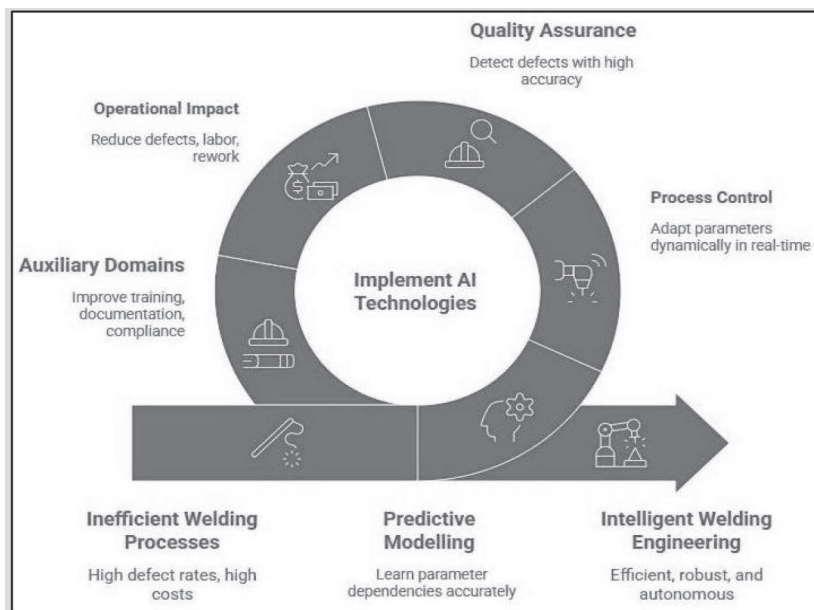


Figura 1 - Impactul transformator al AI în ingineria sudării

Figure 1 - AI transformative impact on welding processes

Sistemele robotizate de sudare bazate pe AI îmbunătățesc substanțial eficiența operațională și performanța economică în producție [1]. În industria auto, acestea au redus ratele de defecte cu aproximativ 30-40% și costurile cu forța de muncă cu cca. 30%, crescând în același timp productivitatea prin viteze de sudare mai mari și randamentul la sudare cu 20%. Utilizarea monitorizării și a întreținerii predictive bazate pe AI reduce durata avariilor echipamentelor cu aproximativ 30%, permițând o programare a producției mai fiabilă și poate reduce costurile deșeurilor și ale reparațiilor cu până la 50% [1].

Dincolo de controlul și inspecția proceselor, AI contribuie la instruirea sudorilor prin simulări virtuale și medii de realitate extinsă, asigură documentația și trasabilitatea prin intermediul tehnologiilor digital twin și consolidează conformitatea procedurală. Împreună, aceste capabilități evidențiază rolul transformator al AI în ingineria sudării și alinierea acestora cu obiectivele mai largi ale producției inteligente în Industria 5.0.

2. Tendințe actuale și emergente în implementarea AI în industrie

Adoptarea AI în industria prelucrătoare trece de la experimentare la o integrare industrială mai largă prin utilizarea tehnologiilor inovative [1-8].

Până în 2023, aproximativ 67% dintre companii au

AI-driven robotic welding systems substantially improve operational efficiency and economic performance in manufacturing [1]. In automotive plants, they have reduced defect rates by approximately 30–40 % and lowered labour costs by around 30 %, while also increasing productivity through faster welding speeds and roughly 20 % higher throughput. The use of AI-based monitoring and predictive maintenance further decreases equipment downtime by about 30 %, enabling more reliable production scheduling and reducing scrap and rework costs by up to 50 % [1].

Beyond process control and inspection, AI also supports welder training through virtual simulations and extended-reality environments, improves documentation and traceability via digital twin frameworks, and strengthens procedural compliance. Collectively, these capabilities highlight AI's transformative role in welding engineering and its alignment with the broader objectives of intelligent manufacturing in Industry 5.0.

2. Current State-of-the-Art and Emerging Trends in Industrial AI Deployment

Artificial intelligence adoption in manufacturing is transitioning from experimentation to broader industrial integration [1-8].

By 2023, about 67% of companies had implemented

implementat AI în industrie la nivel global, în principal în controlul calității și mentenanța predictivă, adesea fără o integrare completă în sistemele de producție, figura 2.

AI, mainly in quality control and predictive maintenance, although deployments often remain isolated rather than fully integrated across production systems, figure 2.

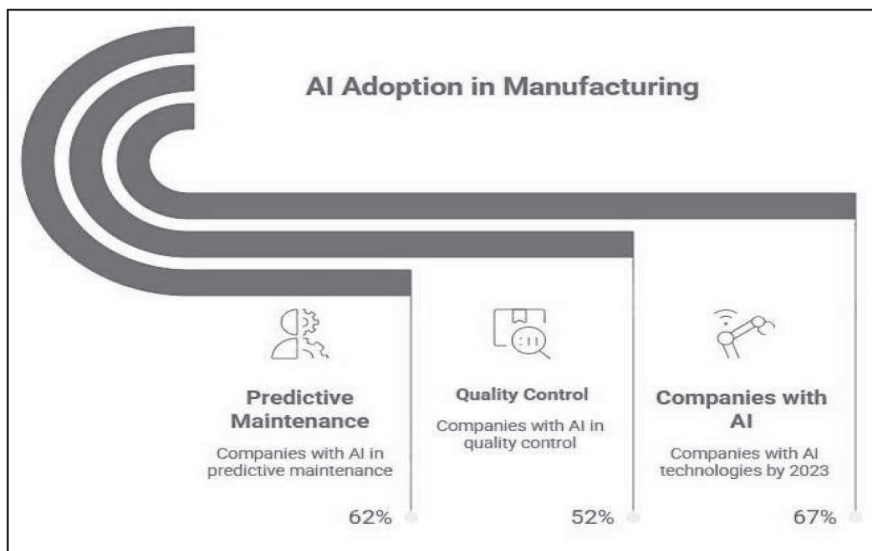


Figura 2 - Adoptarea AI în fabricația structurilor sudate, la nivelul anului 2023 [1]

Figure 2 - AI Adoption in welding manufacturing by 2023 [1]

Deși procesul de implementare a AI a fost neuniform pe domenii industriale, în special în rândul IMM-urilor, perspectivele sunt pozitive, piața de producție bazată pe AI fiind estimată să crească de la cca. 5,9 miliarde de dolari în 2023 la peste 270 de miliarde de dolari până în 2032, cu o creștere a productivității de 20-30% [1].

Sectorul sudării prezintă o integrare mai profundă al AI datorită alinierii sale puternice cu robotica și parametrii de proces măsurabili. Aproximativ 60-65% dintre companiile de profil utilizează deja AI pentru sudarea robotizată, inspecție și controlul calității, realizând reduceri de 30-40% ale defectelor și creșteri ale randamentului cu 20-25%. Se preconizează că piața sudării bazată pe AI va crește de la 150 de mil. dolari în 2022 la 600 de mil. dolari până în 2030, indicând o consolidare rapidă către sisteme de sudare adaptive, bazate pe AI [1].

Piața roboticii de sudare bazate pe sisteme AI a fost evaluată la aproximativ 10,4 miliarde USD în 2025 și se preconizează că va ajunge la aproximativ 26,9 miliarde USD până în 2035 ($\approx 9,9\%$ CAGR). La nivel global lucrează peste 71.000 de roboți de sudare în 2024, inclusiv 12.000 de unități compatibile cu AI, peste 55% din noile sisteme integrează tehnologii de AI asistate de senzori pentru a îmbunătăți calitatea și adaptabilitatea. Industriile auto și aerospațială constituie principalii utilizatori ai soluțiilor bazate pe inteligență artificială, în timp ce sectoare precum

Despite uneven adoption—especially among small and medium enterprises—the economic outlook is strong, with the AI manufacturing market projected to grow from roughly \$5.9 billion in 2023 to over \$270 billion by 2032, driven by productivity gains of 20–30% and major reductions in equipment downtime [1].

The welding sector shows deeper AI integration due to its strong alignment with robotics and measurable process parameters. Around 60–65% of welding companies already employ AI for robotic welding, inspection, and quality control, achieving defect reductions of 30–40% and throughput increases of about 20–25%. The AI-in-welding market is expected to expand from approximately \$150 million in 2022 to about \$600 million by 2030, indicating rapid consolidation toward adaptive, AI-driven welding systems [1].

The welding robotics market, increasingly incorporating AI-enabled systems, was valued at approximately USD 10.4 billion in 2025 and is projected to reach about USD 26.9 billion by 2035 ($\approx 9.9\%$ CAGR). Global installations exceeded 71 000 welding robots in 2024, including more than 12 000 AI-capable units, with over 55 % of new systems integrating AI or sensor-assisted technologies to enhance quality and adaptability. The automotive and aerospace industries are the primary users of artificial intelligence-based solutions, while sectors such as civil

construcțiile civile și navale, industria petrolieră și a gazelor naturale extind rapid aplicarea monitorizării sudurilor și a tehnicilor de examinare nedistructivă asistate de AI. [4-20].

Sondajele indică un potențial ridicat de aplicare AI în industrie, 85% dintre specialiști estimează o creștere a preciziei de detecție a imperfecțiunilor de material la sudare, iar 80% dintre ei consideră AI esențial pentru scalabilitatea viitoare. Regiunea Asia-Pacific domină piața AI cu 46-54% din instalările globale, determinată de implementarea extinsă a roboților în China, în timp ce Europa deține a doua cea mai mare cotă ($\approx 24\text{-}30\%$), condusă de Germania, Italia și Franța [1].

3. AI în modelare și simulare

Modelarea și simularea sunt esențiale pentru ingineria sudării, având la bază fenomene termice, mecanice și metalurgice strâns cuplate, figura 3. Abordările bazate pe fenomene fizice, cum ar fi modelarea cu elemente finite, dinamica fluidelor, oferă predicții de înaltă fidelitate ale distribuțiilor de temperatură sau tensiunilor și deformațiilor remanente, dar necesită resurse de calcul semnificative și sunt dificil de implementat în medii industriale care impun procesarea datelor în timp real [4-12].

and shipbuilding construction, as well as the oil and gas industry, are rapidly expanding the application of AI-assisted weld monitoring and non-destructive testing (NDT) techniques. [4-20].

Surveys indicate strong industry confidence, with roughly 85% of welding professionals expecting improved accuracy from AI and about 80% of manufacturers viewing it as essential for future scalability. Asia-Pacific region dominates the market, accounting for roughly 46–54 % of global installations, driven largely by China's extensive robot deployment, while Europe holds the second-largest share ($\approx 24\text{-}30\%$), led by Germany, Italy, and France [1].

3. AI in Modelling & Simulation

Modelling and simulation are central to welding engineering because the process involves tightly coupled thermal, mechanical, and metallurgical phenomena, figure 3. Traditional physics-based approaches such as finite element and computational fluid dynamics provide high-fidelity predictions of temperature distributions, residual stresses, and distortions, but they are computationally intensive and difficult to apply in industrial environments requiring real-time data processing [4-12].

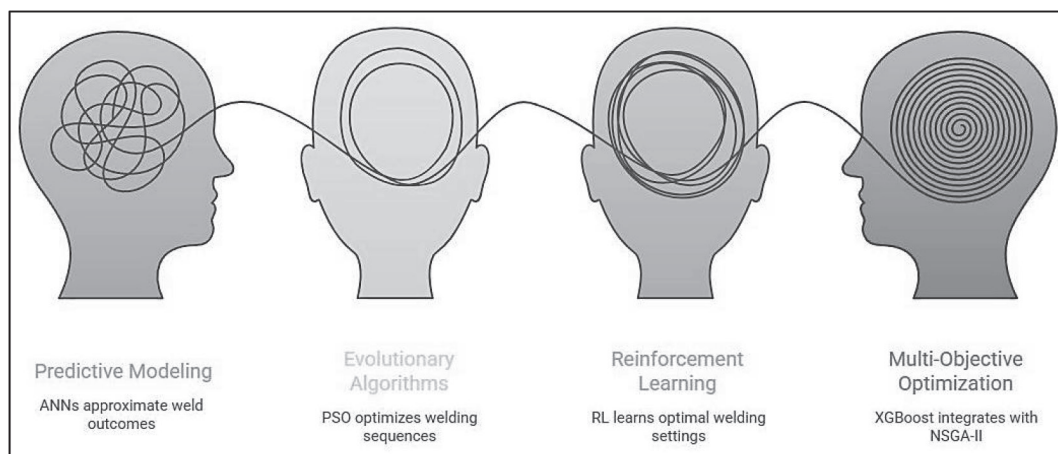


Figura 3 - Optimizarea sudării bazată pe AI

Figure 3 - AI Driven Welding Optimization

Metodele de inteligență artificială, în special învățarea automată, au apărut ca instrumente eficiente de modelare surogat care completează simulările bazate pe fenomene fizice, prin utilizarea unor rețele neuronale ce identifică modele între parametrii de sudare și rezultatele obținute [7-11]. Rețelele neuronale artificiale pot modela dependențele neliniare între parametrii de intrare precum curentul de sudare, tensiunea arcului, viteza de sudare, proprietățile materialelor și para-

Artificial intelligence methods, particularly machine learning, have therefore emerged as effective surrogate modelling tools that complement physics-based simulations by learning relationships between welding parameters and process outcomes [7-11]. Artificial neural networks can model nonlinear dependencies between inputs such as current, voltage, travel speed, and material properties and outputs. There are included here the weld bead geometry,

metrii de ieșire. Sunt incluse aici geometria sudurii, distribuția temperaturilor și proprietățile mecanice, oferind capacități predictive rapide pentru proiectarea și optimizarea proceselor. În aplicații mai avansate, cum ar fi sudarea cu laser și sudarea prin frecare cu element activ rotitor, modelele hibride combină AI cu simulări numerice și algoritmi de optimizare pentru a îmbunătăți predicția câmpurilor termice, a băii de sudare și formării defectelor, reducând în același timp semnificativ costul de calcul [7-12].

4. AI în optimizarea proiectării

Optimizarea proiectării se concentrează pe selectarea parametrilor de proces care maximizează indicatorii de performanță, cum ar fi rezistența mecanică și eficiența producției, respectând în același timp constrângerile fizice și de materiale, asigurând deformații minime.

Abordările tradiționale de optimizare cum ar fi experimentele ANOVA, metodele statistice RMS sau cele de tip iterativ *trial-and-error*, devin ineficiente pentru procese complexe.

Tehnicile de inteligență artificială, inclusiv *Machine Learning ML*, algoritmi evolutivi și învățarea automată *RL*, permit explorarea automată a spațiilor mari de parametri prin combinarea modelelor predictive cu algoritmi de căutare și luare a deciziilor [6-12].

Modelele surogat, cum ar fi rețelele neuronale artificiale, sunt utilizate pe scară largă pentru a aproxima relațiile dintre datele de intrare precum curentul de sudare, viteza de sudare, energia liniară și datele de ieșire ale proceselor, permițând o optimizare rapidă multi-obiectiv fără necesitatea efectuării simulărilor complexe bazate pe fenomene fizice, care implică un consum ridicat de resurse de calcul [6-12].

Proiectarea optimizată integrează aceste modele predictive cu tehnici de optimizare globală, cum ar fi optimizarea *SWARM*, algoritmi genetici și *reinforcement learning*, pentru a identifica parametrii optimi de sudare, secvențele de sudare și configurațiile procesului. Metodele multi-obiectiv- cum ar fi combinarea predictorilor de învățare automată cu algoritmi evolutivi precum *NSGA-II* - permit inginerilor să vizualizeze compromisurile dintre obiectivele concurente, inclusiv rezistența, deformațiile și energia liniară, prin seturi de soluții Pareto-optimale [6-19], figura 4.

Abordările emergente conectează în continuare algoritmi de optimizare cu *Digital Twins* și datele senzorilor în timp real, permițând sisteme de control

the temperatures distribution, and the mechanical properties, providing fast predictive capabilities suitable for process design and optimization. In more advanced applications such as laser beam welding and friction stir welding, hybrid frameworks combine AI models with numerical simulations and optimization algorithms to improve prediction of the specific thermal fields, of the molten pool behaviour, and of the defect formation while significantly reducing computational cost [7-12].

4. AI in Design Optimization

Design optimization in welding engineering focuses on selecting process parameters and design variables that maximize performance metrics such as mechanical strength, minimal distortion, and production efficiency while respecting physical and material constraints.

Traditional optimization approaches—such as design of experiments, response surface methods, and expert *trial-and-error*—become inefficient as process complexity increases.

Artificial intelligence techniques, including machine learning, evolutionary algorithms, and reinforcement learning, enable automated exploration of large parameter spaces by combining predictive models with search or decision-making algorithms [6-12].

Surrogate models such as artificial neural networks are widely used to approximate relationships between welding inputs (e.g., current, travel speed, heat input) and outputs like weld bead geometry, strength, or distortion, enabling rapid multi-objective optimization without the need to perform complex physics-based simulations, which require significant computational resources [6-12].

Advanced optimization frameworks integrate these predictive models with global optimization techniques such as particle *SWARM* optimization, genetic algorithms, and reinforcement learning to identify optimal welding parameters, bead sequences, and process configurations. Multi-objective methods—such as combining machine learning predictors with evolutionary algorithms like *NSGA-II*—allow engineers to visualize trade-offs between competing objectives, including strength, distortion, and energy input, through Pareto-optimal solution sets [6-19], figure 4.

Emerging approaches further connect optimization algorithms with digital twins and real-time sensor

adaptive care ajustează continuu parametrii de sudare în timpul funcționării.

Selecția materialelor în ingineria sudării implică alegerea materialelor de bază, de adaos și auxiliare care satisfac cerințele de performanță, menținând în același timp sudabilitatea, integritatea mecanică și fezabilitatea economică.

data, enabling adaptive control systems that continuously adjust welding parameters during operation. Materials selection in welding engineering involves choosing base materials, filler metals, and consumables that satisfy performance requirements while maintaining weldability, mechanical integrity, and economic feasibility.

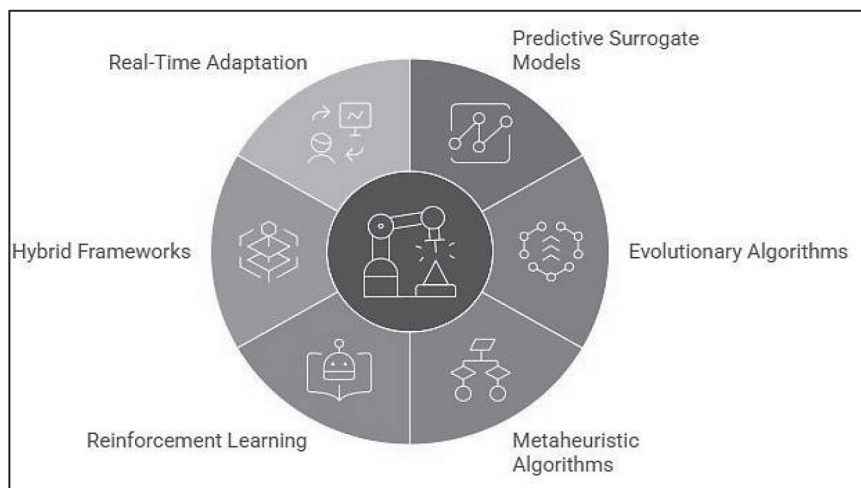


Figura 4 - Algoritmi AI aplicați în modelare și design în ingineria sudării
Figure 4 - AI Algorithms in welding engineering

Abordările convenționale se bazează pe date empirice, diagrame de sudare și experiență în inginerie, dar aceste metode adesea nu reușesc să surprindă interacțiunile complexe dintre compoziția aliajelor, evoluția microstructurii, ciclurile termice și condițiile de exploatare.

Tehnicile de inteligență artificială, în special modelele de regresie și clasificare bazate pe învățarea automată, permit extragerea relațiilor structură-proces-proprietate din seturi mari de date experimentale și computaționale.

Aceste modele pot estima sudabilitatea, compatibilitatea aliajelor și proprietățile post-sudare mai eficient decât indicii convenționali, de exemplu prin utilizarea de algoritmi AI avansați pentru a estima susceptibilitatea la apariția unor imperfecțiuni de material la sudare sau riscul de fisurare în aliajele avansate [6-19]. Dincolo de sarcinile de clasificare, AI sprijină proiectarea și optimizarea proceselor de sudare prin explorarea spațiilor compoziție-proces-proprietate pentru a identifica metale de adaos și combinații de aliaje adecvate pentru condiții specifice de sudare.

5. AI în controlul și inspecția calității

Controlul calității la sudare este esențial pentru a asigura fiabilitatea structurală, conformitatea cu standardele și prevenirea defecțiunilor sau a intervențiilor

Traditional approaches rely on empirical guidelines, welding charts, and engineering experience, but these methods often fail to capture the complex interactions among alloy composition, microstructure evolution, thermal cycles, and service conditions.

Artificial intelligence techniques, particularly machine learning regression and classification models, enable the extraction of structure–process–property relationships from large experimental and computational datasets.

These models can predict weldability, alloy compatibility, and post-weld properties more effectively than traditional indices, for example by using algorithms such as random forests, support vector machines, and gradient boosting to estimate defect susceptibility or cracking risk in advanced alloys [6-19].

Beyond classification tasks, AI also supports materials design and optimization by exploring composition–process–property spaces to identify suitable filler metals and alloy combinations for specific welding conditions.

5. AI in Quality control and inspection

Quality control and inspection are essential in welding engineering to ensure structural reliability, compliance with standards, and prevention

corective costisitoare. Tehnicile convenționale de examinări nedistructive NDE, cum ar fi inspecția vizuală VT, radițiile penetrante RT, controlul cu ultrasunete UT și metodele cu lichide penetrante PT, sunt adesea lente, subiective și cu randament limitat [13-19]. Inteligența artificială, în special tehnicile de învățare automată și învățare profundă, combinate cu vederea artificială și fuziunea datelor provenite de la senzori, transformă tot mai mult procesul de asigurare a calității la sudare, prin permiterea detectării automate a defectelor, îmbunătățirea preciziei inspecțiilor și susținerea procesului decizional în timp real pe parcursul producției, figurile 5 și 6.

of costly failures or rework. Traditional inspection techniques, such as manual visual inspection, radiography, ultrasonic testing, and dye penetrant methods are often slow, subjective, and limited in throughput [13-19]. Artificial intelligence, particularly machine learning and deep learning techniques combined with computer vision and sensor data fusion, is increasingly transforming welding quality assurance by enabling automated defect detection, improving inspection accuracy, and supporting real-time decision-making throughout the production process, figures 5 and 6.

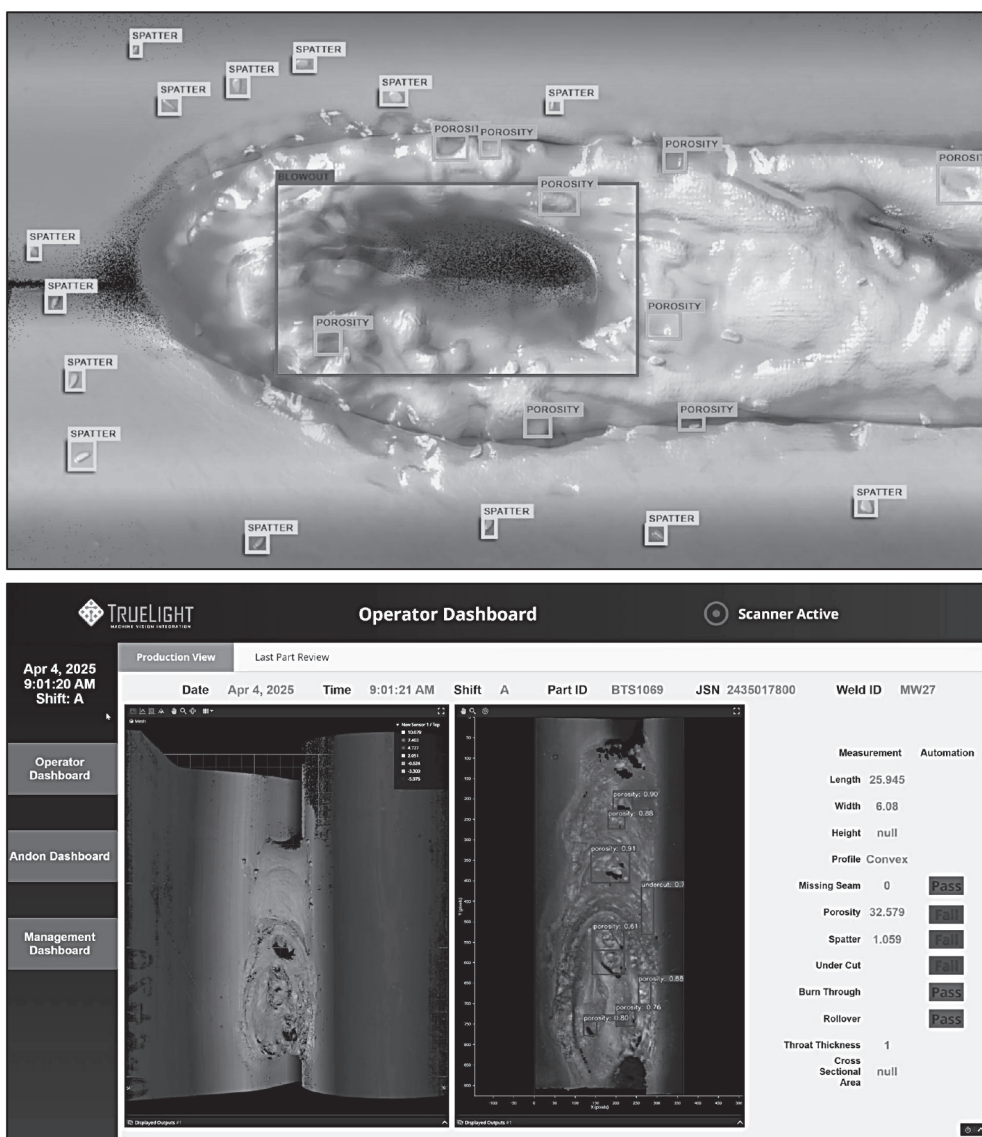


Figure 5 - TrueLight 3DAI Weld Inspection Platform software pentru control vizual utilizând AI [28]
 Figure 5 - TrueLight 3DAI Weld Inspection. Operator Dashbord [28]

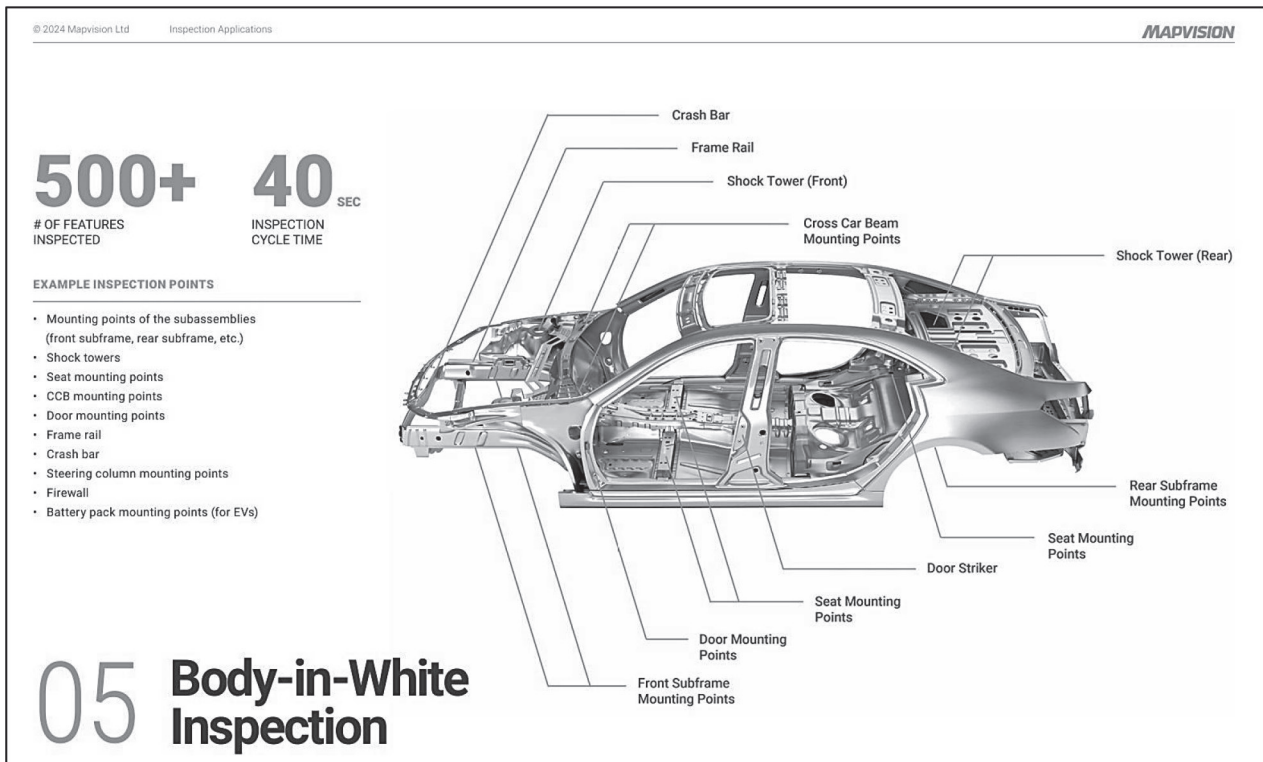


Figura 6. Mapvision. Ciclu de inspecție vizuală în industria auto pentru +500 îmbinări sudate în 40 secunde [29]
Figure 6. Mapvision. Automotive visual inspection of +500 welded joints in 40 seconds cycle [29]

O dezvoltare majoră este utilizarea rețelelor neuronale convoluționale pentru inspecția automată a sudurilor. Aceste modele analizează imagini radiografice sau optice pentru a detecta defecte precum fisuri, porozitate sau lipsă de topire, cu o rată de succes de peste 95%, depășind abordările convenționale (aplicații bazate pe AI sunt prezentate în tabelul 1).

A major development is the use of convolutional neural networks for automated weld inspection. These models analyze radiographic or optical images to detect defects such as cracks, porosity, or lack of fusion with high accuracies often exceeding 95%, outperforming traditional rule-based approaches (specific AI based applications are presented in table 1).

Tabelul 1. Aplicații de inspecție a sudării și de control al calității bazate pe tehnologii AI
Table 1. AI Enhanced Welding Inspection and Quality Control applications

#	Descrierea aplicației / Application description	URL
1	IUNA Weld Inspector Sistem industrial AI complet integrat pentru inspecția automată a cordoanelor de sudură, clasificarea defectelor și analiza dimensională, cu acces prin interfață web și posibilitate de integrare în celule robotizate de sudare. Turnkey industrial AI vision system for automated weld seam inspection, defect classification, and dimensional analysis, with browser-based access and integration with robotic cells.	IUNA Weld Inspector – Turnkey AI System for Optical Weld Inspection
2	TrueLight 3D- AI Weld Inspection Sistem automatizat de inspecție a sudurilor bazat pe imagistică 3D și inteligență artificială, utilizat pentru evaluarea defectelor și a abaterilor dimensionale. Prin captarea profilului tridimensional al suprafeței sudurii și a caracteristicilor geometrice relevante, sistemul identifică defectele și semnalează în timp real sudurile neconforme. 3D-AI Weld Inspection is an automated quality inspection method that uses 3D imaging and AI to evaluate welds for defects and dimensional inconsistencies. By capturing the weld’s surface profile and key geometric features, the system can detect issues then flag out-of-tolerance welds in real time.	AI-Powered 3D Weld Inspection with Machine Learning
4	Mapvision Weld Seam Inspection (WSI 2025) Sistem de inspecție a cordoanelor de sudură bazat pe inteligență artificială, integrat direct în liniile de producție. Utilizează modele generative pentru crearea de exemple sintetice de defecte și permite efectuarea inspecțiilor la viteze ridicate. AI-powered weld seam inspection integrated into production lines with generative models for defect sample generation and high-speed inspection capabilities.	Mapvision Weld Seam Inspection 2025: AI-powered Defect Detection

Tabelul 1 (continuare). Aplicații de inspecție a sudării și de control al calității bazate pe tehnologii AI
Table 1 (continued). AI Enhanced Welding Inspection and Quality Control applications

5	<p>BPT Clarity Pro WELDinspect Software pentru inspecția sudurilor, disponibil cu module opționale bazate pe inteligență artificială pentru clasificarea defectelor în timp real, efectuarea măsurătorilor și generarea rapoartelor de inspecție. Este proiectat pentru utilizarea împreună cu sisteme digitale de microscopie. Weld inspection software with optional AI modules for real-time defect classification, measurement, and reporting, designed to work with digital microscope systems.</p>	WELDinspect System – AI-Driven Weld Inspection Software
6	<p>Matroid Computer Vision Platform (generic) Platformă software de vedere artificială bazată pe inteligență artificială. Deși nu este dedicată exclusiv sudării, este utilizată din ce în ce mai frecvent în aplicații industriale pentru identificarea defectelor de sudare, precum porozități, perforări prin ardere (burn-through) și stropi de sudură, cu integrare în timp real. While not weld-specific only, Matroid provides AI vision software increasingly used for industrial inspection including welding defects (porosity, burn-through, spatter) with real-time integration.</p>	Matroid's AI-Powered Welding Inspection Platform
7	<p>AWS Industrial AI Welding Solutions Soluție industrială de inteligență artificială implementată la nivel edge, care combină analiza semnalelor acustice și vizuale pentru monitorizarea calității sudurilor aproape în timp real și pentru evaluarea unui procent foarte ridicat din totalul sudurilor realizate. Enterprise edge AI integration (e.g., IBM Smart Edge for Welding) combining acoustic and visual signals for near-real-time quality insights across virtually 100% of welds.</p>	AI in Industrial Welding with Edge AI (AWS)
8	<p>TRUMPF AI Quality Inspection Soluție comercială dezvoltată pentru controlul calității sudurilor laser. Analizează imaginile cordoanelor de sudură și furnizează feedback imediat privind defectele identificate, fiind utilizată în special în industria auto. TRUMPF's commercial AI offering for laser welding quality control that evaluates weld seam images and provides immediate defect feedback, especially in automotive manufacturing.</p>	TRUMPF AI Quality Inspection for Laser Welding
9	<p>AI.SEE™ Weld Seam Inspection Sistem automat de inspecție optică a cordoanelor de sudură bazat pe inteligență artificială, capabil să identifice o gamă largă de defecte, inclusiv pori, fisuri, defecte de legătură și microdefecte. Permite integrarea directă în fluxurile de producție. AI-driven automatic optical weld seam inspection system that identifies a wide spectrum of defects (pores, cracks, bonding defects, micro-defects) and supports in-line integration.</p>	AI.SEE™ Automatic Weld Seam Inspection Solution
10	<p>WeldAI (K Lens) Sistem de inspecție tridimensională destinat evaluării calității sudurilor de tip hairpin utilizate la motoarele electrice. Utilizează inteligența artificială pentru analiza imaginilor și clasificarea precisă a defectelor și permite arhivarea rezultatelor pentru trasabilitate. 3D inspection system targeting hairpin weld quality in electric motor manufacturing with AI-driven imagery and precise defect classification; archives inspection data for traceability.</p>	WeldAI – 3D AI Inspection for EV Motor Welds
11	<p>TrueWeld Sistem automatizat de control al calității sudurilor bazat pe algoritmi de învățare automată și vedere artificială. Permite detectarea anomaliilor și analiza defectelor în timp real pe liniile de producție. AI-powered automated weld quality control system using ML and vision for real-time anomaly detection and defect analysis on production lines.</p>	TrueWeld – AI-Powered Weld Quality Control
12	<p>RocketWelder Platform Platformă completă pentru automatizarea adaptivă a proceselor de sudare, care integrează controlul traiectoriei arzătorului prin vedere artificială, algoritmi AI și monitorizarea calității în timp real. Include componente hardware și instrumente pentru antrenarea modelelor de inteligență artificială. End-to-end AI environment for adaptive welding automation and vision-guided torch control with real-time quality feedback; includes hardware and AI model training workflows.</p>	RocketWelder – AI Adaptive Welding Automation
13	<p>Wiinspect Platformă inteligentă pentru managementul și inspecția proceselor de sudare, bazată pe algoritmi adaptivi de inteligență artificială. Sistemul învață continuu din datele procesului și permite inspecția în timp real, recunoașterea modelelor și adaptarea parametrilor de proces. Adaptive AI-based welding management and inspection software that learns over time and supports real-time inspection, pattern recognition, and process adaptation.</p>	Wiinspect Welding Management Software
14	<p>MoonVision WeldScanner Soluție software specializată în controlul și asigurarea calității produselor și suprafețelor asamblate. Utilizează inspecția vizuală automată și măsurarea dimensională bazate pe inteligență artificială și permite integrarea prin API în sistemele industriale existente. The Moonvision software specializes in quality control and assurance of assembly products and surfaces. AI-based automated visual inspection and measurement; API integration</p>	http://www-staging.moonvision.io/products/weldscanner/

Modelele AI optimizate pentru implementare industrială permit inspecția în timp real utilizând camere video digitale, realizând astfel monitorizarea continuă a sudurilor în sectoare precum industria auto și HVAC (aer condiționat).

Sistemele de vizualizare bazate pe AI integrate pe linii de sudare robotizate pot identifica imperfecțiuni de formă și pot oferi feedback imediat, îmbunătățind consecvența și reducând dependența de inspecția manuală [4-12].

Algoritmii AI îmbunătățesc examinarea NDE prin automatizarea analizei datelor radiografice și multi-senzori, combinând semnale vizuale, acustice și termice pentru a detecta cu precizie ridicată defectele la sudare. Noile generații de algoritmi DL aplicate seturilor mari de date în inspecția RT au atins performanțe foarte înalte, reducând ratele de non-detectie sub 1% [16].

Deși există în continuare provocări, în special legate de nevoia de seturi mari de date și etichetare, imagistică și integrare cu standardele de certificare, sistemele de control ale calității bazate pe AI demonstrează avantaje clare în ceea ce privește viteza, consecvența și precizia detecției, ceea ce le conferă o poziție cheie în inspecții și monitorizări ale producției [16,17].

6. Instruire, calificare și colaborare operator uman-AI

Instruirea și calificarea personalului de sudare rămân esențiale pentru obținerea unor rezultate constante și a unor îmbinări de înaltă calitate. Convențional, instruirea se bazează pe practică repetitivă, pe echipamente reale și evaluarea expertă a tehnicii și rezultatelor. Aceste metode necesită în mod inerent resurse mari, sunt lent de scalat și expun cursanții la riscuri de accidente asociate cu radiațiile de arc electric, emisii de noxe și temperaturi ridicate [20-24].

Inteligența artificială integrată cu medii de realitate extinsă (XR) oferă modele automate de evaluare ale abilităților, precum și medii de colaborare operator uman-AI. Aceste modele facilitează o instruire imersivă, bazată pe date și evaluare obiectivă a performanțelor obținute [20-24], tabelul 2.

Mediile imersive de realitate virtuală și mixtă (VR/MR), combinate cu AI, îmbunătățesc dobândirea de abilități prin simularea sarcinilor de sudare realiste, fără expunere la pericolele asociate proceselor de sudare. Simulatoarele VR oferă cursanților o replică digitală a scenariilor de sudare, permițând practica

Lightweight deep learning models optimized for industrial deployment allow real-time inspection on edge devices, enabling continuous monitoring of weld seams in sectors such as automotive and HVAC manufacturing.

AI based vision systems integrated with robotic welding lines can automatically identify irregular weld beads and provide immediate feedback, improving consistency and reducing dependence on manual inspection [4-12].

AI also enhances nondestructive testing by automating the analysis of radiographic and multi-sensor data, combining visual, acoustic, and thermal signals to detect defects with high reliability. Deep learning applied to large X-ray datasets has achieved state-of-the-art detection performance, reducing missed defect rates to below 1% while improving throughput [16].

Although challenges remain particularly the need for large, labeled datasets, robust imaging conditions, and integration with certification standards, AI-driven quality control systems already demonstrate clear advantages in speed, consistency, and detection accuracy, making them a key component of modern welding inspection and production monitoring [16,17].

6. Training, Qualification, and Human-AI Collaboration

Training and qualifications of welding personnel remain central to achieving consistent process performance and high-quality joints. Traditional training relies on hands-on instruction, repetitive practice on actual equipment, and expert evaluation of technique and outcomes. These methods are inherently resource-intensive, slow to scale, and expose trainees to safety risks associated with arcs, fumes, and high temperatures [20-24].

Artificial intelligence integrated with extended reality (XR) environments, automated skill assessment models, and human-AI collaborative frameworks address these limitations by enabling immersive, data-driven training and objective performance evaluation [20-24], table 2.

Immersive virtual and mixed reality (VR/MR) environments combined with AI enhance skill acquisition by simulating realistic welding tasks without the hazards of physical arcs or consumables. VR simulators provide trainees with a digital replica of welding scenarios, allowing repeated practice of joint

Tabelul 2. Formare, calificare și dezvoltare a competențelor asistate de AI
Table 2. AI Assisted Training, Qualification & Skill Development and Assessment

#	Descrierea aplicației / Application description	URL
1	<p>DimeVision AI Welding Training App Aplicație bazată pe inteligență artificială, disponibilă pe dispozitive mobile și platforme web, care analizează fotografiile ale sudurilor și oferă evaluarea defectelor, scoruri de performanță și feedback personalizat pentru cursanți, permițând monitorizarea progresului în timp.</p> <p>Mobile and web-based AI application that analyzes photographs of welds and provides defect scoring and feedback for welding trainees tracking progress over time.</p>	DimeVision AI Welding Training App (AI Feedback)
2	<p>Dig in Vision VR Welding Simulator Sistem de instruire pentru sudare bazat pe realitate virtuală, echipat cu modulul inteligent Weld Master AI, care furnizează feedback în timp real privind performanța, permite ajustarea parametrilor de proces și generează automat rapoarte pentru învățarea individuală.</p> <p>Virtual reality welding training system with Weld-Master AI, providing real-time performance feedback, parameter adjustment, and automated reporting for self-learning.</p>	Dig in Vision VR Welding Simulator
3	<p>Simulanis Welding Simulator Simulator industrial pentru instruirea în sudare, dotat cu module de analiză bazate pe inteligență artificială pentru monitorizarea performanței, simularea defectelor și furnizarea unui feedback bazat pe indicatori cantitativi privind tehnica și consistența execuției sudurilor.</p> <p>Industrial training simulator with AI analytic modules for performance tracking, defect simulation, and metric-based feedback on welding technique and consistency.</p>	Simulanis Welding Simulator AI-Driven XR Welding Training
4	<p>WeldVR Simulator Sistem de instruire în sudare bazat pe realitate virtuală, care oferă un nivel ridicat de realism și instrumente analitice pentru monitorizarea parametrilor de lucru, precum unghiul pistolului sau electrodului, viteza de deplasare și calitatea cordonului de sudură, în vederea evaluării obiective a competențelor.</p> <p>VR welding training system with realistic immersion and analytics that track parameters such as torch angle, travel speed, and bead quality for objective skill assessment.</p>	WeldVR – Virtual Reality Welding Training Simulator
5	<p>Simbott AR/VR Welding Simulator Platformă de instruire în sudare bazată pe realitate augmentată și virtuală, care oferă exerciții interactive într-un mediu imersiv, rapoarte cuantificabile privind performanța și vizualizarea erorilor specifice principalelor procedee de sudare.</p> <p>Mixed reality welding training platform that provides immersive practice, measurable performance reports, and visualization of welding errors across common welding processes.</p>	Simbott AR/VR Welding Simulator
6	<p>Weldingsimulator.net Solutions Gama de sisteme de instruire în sudare bazate pe realitate virtuală și augmentată, care combină echipamente hardware realiste cu aplicații software avansate pentru formare practică și analiză a performanței pe baza datelor colectate în timpul exercițiilor.</p> <p>VR/AR welding training systems combining realistic hardware and software for immersive training and data-driven performance analysis.</p>	VR Welding Simulator (WeldingSimulator.net)
7	<p>AutoVRse Welding Safety VR Modules Module de realitate virtuală asistate de inteligență artificială, dedicate instruirii în domeniul securității și sănătății în muncă la sudare. Acestea permit pregătirea operatorilor înaintea executării lucrărilor reale prin simulări avansate și scenarii interactive.</p> <p>AI-powered VR modules focused on welding safety training and preparation before actual welding tasks; integrates advanced simulation and interactive scenarios.</p>	AutoVRse VR Welding Safety Training

repetată a configurațiilor îmbinărilor, manipularea torței și ajustarea parametrilor într-un spațiu virtual controlat [20-24].

Modelele AI sunt tot mai mult integrate în platformele de instruire VR pentru a oferi evaluare și feedback automat. Clasificatorii DL, inclusiv Vision Transformers și algoritmi de detectare a obiectelor YOLO, au fost aplicați înregistrărilor vizuale ale sudurilor cursanților pentru a clasifica obiectiv nivelurile de calificare și modelele de defecte. Într-un studiu de validare, un model Vision Transformer a atins o precizie de cca 90% în clasificarea abilităților de sudare, iar un model YOLO a demonstrat o detectare

configurațiilor, torță manipulată, și ajustarea parametrilor într-un spațiu virtual controlat [20-24].

AI models are increasingly embedded within VR training platforms to provide automated assessment and feedback. Deep learning classifiers, including Vision Transformers and YOLO object detection networks, have been applied to visual records of trainees' welds to objectively classify skill levels and defect patterns. In one validation study, a Vision Transformer model achieved nearly 90 % accuracy in welding skill classification, and a YOLO-based detector demonstrated robust weld defect detection, showcasing AI's potential in automated performance

performantă a defectelor existente în suduri, demonstrând potențialul AI în evaluarea performanței și reducând subiectivitatea în evaluările instructorilor [20-24]. Colaborarea om-AI se extinde dincolo de instruirea individuală la sisteme integrate om-robot care susțin transferul de competențe și calificarea. Platformele Digital Twins permit analiza modelelor de mișcare ale sudorilor folosind algoritmi AI, cum ar fi clasificarea mașinilor vectoriale de suport ale caracteristicilor de mișcare extrase prin transformări Fourier.

Aceste sisteme pot distinge sudorii calificați de cei necalificați cu o precizie ridicată și pot utiliza informațiile obținute pentru managementul sistemelor de instruire virtuală și pentru a oferi feedback specific pentru începători. Platformele de proces precum RocketWelder combină viziunea adaptivă bazată pe AI cu feedback-ul controlului robotic pentru ajustări ale procesului în timp real. Instrumentele de management și documentare (WeldCard) susțin trasabilitatea, urmărirea calificărilor sudorilor și conformitatea, conectând datele operaționale cu monitorizarea proiectului. Simulatoarele de instruire (VR/AR) utilizează analize bazate pe AI pentru a oferi evaluări ale competențelor și pregătirea pentru certificare.

7. Documentație și trasabilitate în proiectele de sudare

Metodele convenționale de documentație și trasabilitate, precum introducerea manuală a formularelor și dosarele printate pe hârtie, sunt susceptibile la erori, inconsecvențe și căutare ineficientă, subminând asigurarea calității și conformitatea cu reglementările din domeniu.

Tehnologia AI transformă acest peisaj prin automatizarea și interconectarea înregistrărilor critice, cum ar fi Specificațiile Procedurilor de Sudare (WPS) și rapoartele de inspecție.

Folosind procesarea limbajului natural (NLP), modelele de AI antrenate pe baza standardelor industriale pot extrage automat parametri cheie din text pentru a completa formulare standardizate, reducând erorile și timpul de pregătire. AI îmbunătățește trasabilitatea prin grafuri de cunoștințe care leagă semantic entități precum sudorii, materialele și rezultatele inspecțiilor într-o structură de date, permițând căutări complexe care anterior erau dificil de efectuat în surse de date separate [24-30]. AI se integrează cu arhitecturile Digital Twins pentru a crea reprezentări sincronizate în timp real ale proceselor de sudare.

evaluation and reducing subjectivity in instructor assessments [20-24]. Human–AI collaboration extends beyond individual training to integrated human–robot systems that support skill transfer and qualification. Digital twin platforms coupling human demonstration with robot execution enable analysis of welder motion patterns using AI techniques such as support vector machine classification of motion features extracted via Fourier transforms and principal component analysis.

Such systems can distinguish skilled from unskilled welders with high classification accuracy and use this information to inform robot control strategies or provide targeted novice feedback.

Process platforms like RocketWelder combine adaptive AI vision with robotic control feedback for real time process adjustments. Management and documentation tools (e.g., WeldCard) support traceability, qualification tracking, and compliance, bridging operational data with project oversight. Training simulators (VR/AR) use AI analytics to provide objective skill assessment and performance tracking, applicable for vocational training and certification preparation.

7. Documentation & Traceability in Welding Engineering

In welding engineering, traditional documentation and traceability methods, such as manual form entry and paper binders are prone to errors, inconsistencies, and poor searchability, undermining quality assurance and regulatory compliance.

Artificial intelligence (AI) is transforming this landscape by automating and interconnecting critical records like Welding Procedure Specifications (WPS) and inspection reports.

Using natural language processing (NLP), AI models trained on industry standards can automatically extract key parameters from text to populate standardized forms, reducing errors and preparation time. AI enhances traceability through knowledge graphs that semantically link entities such as welders, materials, and inspection results into a queryable structure, enabling complex search that were previously difficult to perform across disparate data sources [24-30]. Beyond static records, AI integrates with digital twin architectures to create synchronized, real-time representations of the welding process.

These systems perform anomaly detection and pre-

Aceste sisteme pot detecta și eticheta anomalii în mod automat și le conectează de documentația relevantă fără o introducere manuală a datelor.

dictive logging, automatically timestamping deviations and linking them to relevant documentation without manual input.

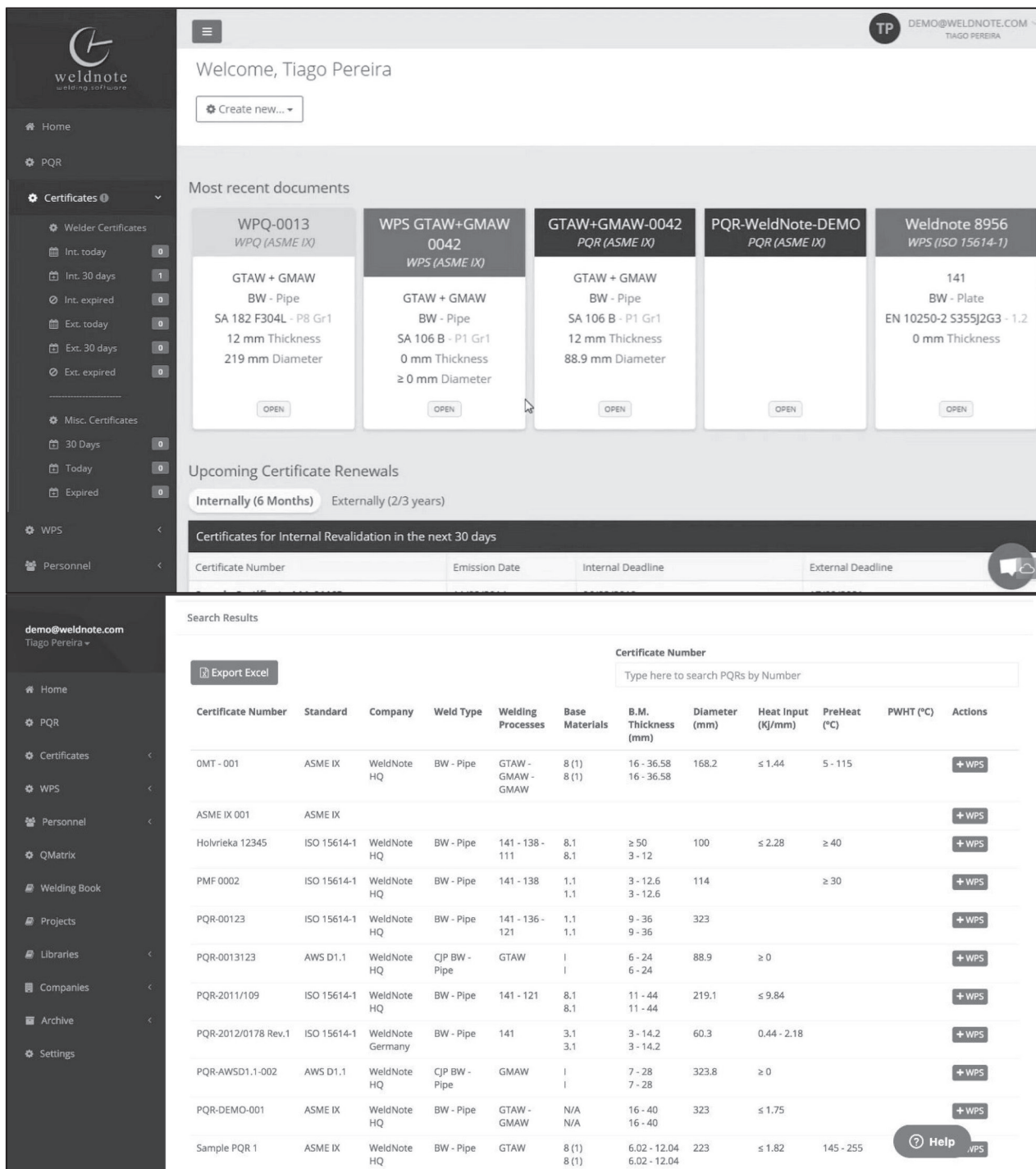


Figura 7. WeldNote – Platformă de Management Proiecte Sudare, capturi ecran [30]

Figure 7. WeldNote- Welding Management Software, screen snapshots [30]

În monitorizarea conformității, AI validează înregistrările în funcție de criteriile de reglementare prin identificarea cauzelor și recomandarea de acțiuni corective, reducând astfel sarcina asupra inginerilor de calitate. Atunci când este încorporată în platforme bazate pe cloud, AI permite căutarea

In compliance monitoring, AI validates records against regulatory criteria by identifying gaps and recommending corrective actions, thereby reducing the cognitive load on quality engineers. When embedded in cloud-based platforms, AI also enables semantic search using vector embeddings, allowing

semantică folosind încorporări vectoriale, permițând inginerilor să recupereze înregistrări tehnice conexe cu o eficiență mai mare decât căutările tradiționale de cuvinte cheie. Împreună, aceste capacități bazate pe AI simplifică documentația, asigură o trasabilitate robustă și susțin conformitatea scalabilă în medii de fabricație complexe, tabelul 3 [24-31].

engineers to retrieve related technical records with greater efficiency than traditional keyword searches. Collectively, these AI-driven capabilities streamline documentation, ensure robust traceability, and support scalable compliance in complex fabrication environments, table 3 [24-31].

Tabelul 3. Exemple de aplicații AI pentru management proiecte sudare și trasabilitate

Table 3. AI based app for Welding Management & Traceability

#	Application description	URL
1	<p>WeldChain</p> <p>Platformă digitală care utilizează interfețe IoT (Internet of Things) pentru conectarea echipamentelor de sudare, a sistemelor biometrice și a echipamentelor de inspecție, asigurând transferul securizat și eficient al informațiilor privind procesul de sudare către o infrastructură blockchain. Soluția permite creșterea nivelului de trasabilitate, integritate și securitate a datelor asociate producției și controlului calității.</p> <p>Platform that uses IOT APIs to connect with welding, biometric and inspection equipment for secure and efficient transfer of welding information to the blockchain [22].</p>	<p>https://www.weldchain.net/about-the-technology</p>
2	<p>WeldNote</p> <p>Soluție software pentru managementul activităților de sudare, destinată administrării documentației tehnice, trasabilității operațiilor, gestionării calificărilor personalului și monitorizării proceselor de fabricație [23]. Platforma facilitează centralizarea informațiilor și controlul conformității cu cerințele standardelor aplicabile.</p> <p>Welding Management Software solution for welding management, designed for the administration of technical documentation, operation traceability, personnel qualification management, and manufacturing process monitoring. The platform facilitates information centralization and supports compliance control with applicable standards and regulatory requirements.</p>	<p>WeldNote - Welding Management Software https://www.youtube.com/watch?v=PdPNKND0Vkw</p>
3	<p>WeldCard</p> <p>Platformă pentru managementul proiectelor de sudare și al documentației tehnice, extinsă cu funcționalități bazate pe inteligență artificială. Permite monitorizarea în timp real a progresului lucrărilor, gestionarea automată a documentelor WPS (Welding Procedure Specification) și PQR (Procedure Qualification Record), urmărirea calificărilor sudorilor și realizarea de analize predictive pentru optimizarea activităților de producție și control al calității.</p> <p>AI-augmented welding project and documentation management platform with real-time progress tracking, automated WPS/PQR handling, welder qualification tracking, and predictive analytics [31].</p>	<p>WeldCard – AI-Powered Welding Project Management Software</p>

8. Concluzii

AI determină schimbări majore în ingineria sudării, de la practici bazate pe experiență la sisteme adaptive, centrate pe date.

Pe tot ciclul de exploatare, inclusiv simularea, proiectarea, selecția materialelor, inspecția, instruirea și documentația, AI oferă îmbunătățiri măsurabile în ceea ce privește capacitatea predictivă, consecvența și eficiența. Accelerează modelarea intensivă din punct de vedere computațional, permite optimizarea designului multi-obiectiv și simplifică selecția materialelor prin intermediul algoritmilor ML, în special pentru aliaje avansate și procese aditive.

În controlul calității, viziunea computerizată bazată pe AI și fuziunea senzorilor oferă o detecție precisă a imperfecțiunilor de sudare în timp real, reducând subiectivitatea.

Tehnologiile AI transformă dezvoltarea forței de muncă prin instruire imersivă și evaluare obiectivă a competențelor, automatizând fluxurile de lucru pen-

8. Conclusions

AI is driving a fundamental shift in welding engineering from experience-based practices to data-centric, adaptive systems.

Across the welding lifecycle including simulation, project-design, material selection, inspection, training, and documentation, AI delivers measurable improvements in predictive capability, consistency, and efficiency. It accelerates computationally intensive modeling, enables multi-objective design optimization, and streamlines material selection through machine learning frameworks, particularly for advanced alloys and additive processes.

In quality control, AI-powered computer vision and sensor fusion provide highly accurate, real-time defect detection, reducing subjectivity and enabling near-complete inspection coverage.

AI also transforms workforce development through immersive training and objective skill assessment, while in documentation, it automates compliance

tru asigurarea conformității prin procesarea limbajului natural și graficele de cunoștințe. Totodată, AI acționează ca și un mediu unificator care îmbunătățește procesul decizional și integrează datele în domenii tradițional izolate. Dezvoltarea sa continuă se bazează pe seturi de date de înaltă calitate, reprezentări standardizate ale datelor și modele avansate ale fenomenelor metalurgice. Prin aceste caracteristici, AI se poziționează ca și o componentă fundamentală a sistemelor de sudare inteligente, fiabile și eficiente.

workflows via natural language processing and knowledge graphs.

Rather than replacing established engineering principles, AI serves as a unifying layer that enhances decision-making and integrates data across traditionally siloed domains. Its continued advancement relies on high-quality datasets, standardized data representations, and physics-informed models, positioning AI to become a foundational component of intelligent, reliable, and efficient welding systems.

Pentru citare:

Bodea, M. (2026). *AI Applications in Welding Engineering*, *Sudura*, nr. 2, year XXXVI, 24-39, <https://doi.org/10.70652/sud.2026.2.2>

Bibliografie/References

- [1] Hannah Prescott, AI In Manufacturing Statistics: Data Reports 2026, Published 24 Feb 2026
- [2] R. Soto-Diaz, M. Vásquez-Carbonell, J. Gutierrez, A review of artificial intelligence techniques for optimizing friction stir welding processes and predicting mechanical properties, *Eng. Science and Tech. an Int. Journal*, Vol.62, 2025, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.101949>
- [3] V. D. Maheswaran, K. R and P. V P, "Advancements of Artificial Intelligence in Welding Applications-A Case Study," 2025 IEEE 9th International Conference on Information and Communication Technology (CICT), Chennai, India, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/CICT67193.2025.11398962
- [4] Tran, N.-H.; Bui, V.-H.; Hoang, V.-T. Development of an Artificial Intelligence-Based System for Predicting Weld Bead Geometry. *Appl. Sci.* 2023, 13, 4232. <https://doi.org/10.3390/app13074232>
- [5] D. Shrivastava, V. Gurav, Machine Learning-Based Weldability Assessment and Optimization of Resistance Spot Welding Joints: A Data-Driven Framework, *Proc. of the 3rd Indian Int. Conf. on Ind. Eng. and Oper. Management*, New Delhi, India, <https://ieomsociety.org/proceedings/2023india/51.pdf>, 2023
- [6] Muhyaddin J.H. Rawa, et.all, Using the numerical simulation and artificial neural network (ANN) to evaluate temperature distribution in pulsed laser welding of different alloys, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 126, Part C, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107025>
- [7] Nazarlou, R.D., Pathak et al. Optimizing and development of friction stir welding using AI-supported prediction method and digital twin technology. *Weld World* 70, 935–948 (2026). <https://doi.org/10.1007/s40194-025-02245-6>
- [8] Shao, Q.; Tan, F.; Li, K.; Yoshino, T.; Guo, G. Multi-Objective Optimization of MIG Welding and Preheat Parameters for 6061-T6 Al Alloy T-Joints Using Artificial Neural Networks Based on FEM. *Coatings* 2021, 11, 998. <https://doi.org/10.3390/coatings11080998>
- [9] Chunbiao Wu, Chao Wang, Jae-Woong Kim, Welding sequence optimization to reduce welding distortion based on coupled artificial neural network and swarm intelligence algorithm, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 114, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105142>
- [10] Mattera, G., Caggiano, A. & Nele, L. Reinforcement learning as data-driven optimization technique for GMAW process. *Weld World* 68, 805–817 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01641-0>
- [11] Myśliwiec, P., Kubit, A. Integrated multiobjective optimization of RFSSW parameters for AA2024-T3 using ANOVA machine learning and NSGA II. *Sci Rep* 15, 38029 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-21941-3>
- [12] Fries, Suzana G., Boettger, Bernd, Eiken, Janin and Steinbach, Ingo. "Upgrading CALPHAD to microstructure simulation: the phase-field method" *International Journal of Materials Research*, vol. 100, no. 2, 2009, pp. 128-134. <https://doi.org/10.3139/146.110013>
- [13] ROSEPETAL, AI Vision System for Weld Defect Detection in Automotive Manufacturing, <https://rosepetal.ai/blog/weld-defect-detection-in-automotive/>, accesat martie 2026
- [14] MAPVISION, Mapvision Weld Seam Inspection 2025: AI-powered Defect Detection, <https://www.mapvision.fi/blog/weld-seam-inspection-2025>, accesat martie 2026
- [15] SOLOMON, HVAC Welding Quality Inspection Using AI, <https://www.solomon-3d.com/case-studies/solvision/hvac-welding-quality-inspection-ai/>, accesat martie 2026
- [16] Wang, X., Zhang, B., Cui, J. et al. Image Analysis of the Automatic Welding Defects Detection Based on Deep Learning. *J Nondestruct Eval* 42, 82 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10921-023-00992-4>
- [17] Dalila Say, Saeed Mian Qaisar, Moez Krichen, Salah Zidi, Artificial intelligence assisted non-destructive testing of welding joints: A review of techniques, X-ray image processing and applications, *Engineering App. of Artificial Intelligence*, Vol.160, Part C, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111792>

- [18]Yousef Amer, Amirhesam Soufali, Ashraf Zaghwan, A digital twin-based framework for predictive quality assurance and supply chain resilience in the automotive industry, *Advanced Engineering Informatics*, Vol.69, Part C, 2026, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103969>
- [19]Ayar, S. Serettaş, G. Çit, C. Öz, and F. Fındık, "Development of a 3D Virtual Welding Simulator Using Weld Bead Created by Voxelization Technique", *DUBİTED*, vol. 12, no. 4, pp. 1977–1992, Oct. 2024, doi: 10.29130/dubited.1323945
- [20]Koçak, N.F.; Saygın, A.; Türk, F. Utilizing VR Technology in Foundational Welding Skill Development. *Appl. Sci.* 2025, 15, 12331. <https://doi.org/10.3390/app152212331>
- [21]Heibel, B., Anderson, R., Swafford, M., & Borges, B. (2024). Integrating virtual reality technology into beginning welder training sequences. *Journal of Agricultural Education*, 65(1), 210–225. <https://doi.org/10.5032/jae.v65i1.2468>
- [22]Alfaro-Viquez, D.; Zamora Hernandez, M.; Fernandez-Vega, M.; Garcia-Rodriguez, J.; Azorin-Lopez, J. Integrating Virtual Reality into Welding Training: An Industry 5.0 Approach. *Electronics* 2025, 14, 1964. <https://doi.org/10.3390/electronics14101964>
- [23]QMS Copilot, <https://www.therness.com/products/therness-qms-copilot/>, accesat martie 2026
- [24]SIRFULL, An efficient system for automatically drafting WPS?, <https://www.sirfull.com/en/blog/edit-wps-automatically/>, accesat martie 2026
- [25]WeldEye, WeldEye Welding Procedures and Personnel Qualifications, <https://www.weldeye.com/solutions/welding-procedures-and-personnel-qualifications>, accesat martie 2026
- [26]WeldChain, Construction Credentialing and Certification Application, <https://www.weldchain.net/>, accesat martie 2026.
- [27]WeldNote, Welding Management Software, <https://weldnote.com/>, accesat martie 2026
- [28]TrueLight 3DAI Weld Inspection, AI Powered 3D Weld Inspection with Machine Learning, accesat martie 2026
- [29]Mapvision Weld Seam Inspection (WSI 2025), Mapvision Weld Seam Inspection 2025: AI powered Defect Detection
- [30]WeldNote, WeldNote- Welding Management Software, accesat martie 2026
- [31]WeldCard, Every Welding Supervisor Deserves An AI Co-Pilot That Speaks All Languages, WeldCard | #1 AI-Powered Welding Management & Team Collaboration Platform, accesat martie 2026
- Genever, J. (2025) The Ultimate Guide to Fronius Cobot Cells: CWC-Mobile, CWC-S, and CWC-D, <https://pwpind.com/the-ultimate-guide-to-fronius-cobot-cells-cwc-mobile-cwc-s-and-cwc-d/>
- [32] *** (2023) EWM XQbot COBOT welding cells, <https://www.ewm-group.com/de/produkte/xqbot-familie.html>
- [33] Régis Henrique Gonçalves e Silva, Mateus Barancelli Schwedersky, Álisson Fernandes da Rosa (2020) Evaluation of toptig technology applied to robotic orbital welding of 304L pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 188, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104229>
- [34] *** (2023) Kemppi's AX MIG robotic welding machine handles difficult tasks, challenging materials, <https://www.thefabricator.com/thewelder/product/arcwelding/kemppis-ax-mig-robotic-welding-machine-handles-difficult-tasks-challenging-materials>
- [35] *** (2026) Inverpulse 60.40 WAVE 230V/400V Aqua, https://site-862061.mozfiles.com/files/862061/Telwin_INVERPULSE_6040_WAVE_AQUA_Info.pdf
- [36] *** (2026) The torch system your robot would choose, <https://www.kemppi.com/en/family/gx-r-system>
- [37] Burcin Vargel (2024) Kemppi GXe-C Cobot Torch: Exploring Precision in Cobot Welding, <https://weldfeed.com/kemppi-gxe-c-cobot-torch-exploring-precision-in-cobot-welding/>
- [38] *** (2026) The ultimate guide to welding cobots in 2025, <https://switchweld.com/the-ultimate-guide-to-cobot-welding-in-2025/>
- [39] *** (2026) ROBBİ™ Mobile, https://esab.com/vi/nam_en/products-solutions/product/robotics/cobots/cobot-solutions-rtw/robby-mobile/
- [40] *** (2024) Autonomous: ESAB Adaptio SAW technology enables root-to-cap welding without operator intervention, https://esab.com/us/nam_en/about/news-folder/autonomous-esab-adaptio-saw-technology-enables-root-to-cap-welding-without-operator-intervention/



Conferința anuală ASR a coordonatorilor sudării

Ediția a 14-a a Conferinței anuale ASR a coordonatorilor sudării se va desfășura la Sibiu în perioada 22-23.10.2026, urmând a fi organizată în parteneriat cu societatea COMPA SA Sibiu și Sucursala ASR Sibiu.