

TENDINȚE ÎN TEHNOLOGIE ȘI INSTRUIRE
TRENDS IN TECHNOLOGY AND TRAINING**Posibilități de utilizare a noilor tehnologii: Realitate Virtuală (VR), Realitate Augmentată (AR) și Inteligență Artificială (AI) ca instrumente complementare de instruire pentru cursurile de Inginer Sudor Internațional****Possibilities for using new technologies: Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) and Artificial Intelligence (AI) as complementary training tools for International Welding Engineer courses**

Monica Bratu¹, Anamaria Feier^{1,2}, Mircea Vișescu^{1,2}, Andrei Becheru^{1,2}

¹ Asociația de Sudură din România

² Universitatea Politehnica Timișoara

Rezumat

Lucrarea analizează modul în care Realitatea Virtuală (VR), Realitatea Augmentată (AR) și Inteligența Artificială (AI) pot completa și moderniza formarea Inginerilor Sudori Internaționali în cadrul programelor IIW/EFW. Sunt prezentate principiile de funcționare, metodele de implementare și beneficiile pedagogice ale acestor tehnologii, precum și integrarea lor în modulele specifice curriculumului IWE: procese de sudare, metalurgie, examinări nedistructive (NDT), elaborarea și validarea documentației tehnologice (WPS/WPQR) și comportarea materialelor la sudare. Analiza literaturii recente și a ghidurilor IIW/EFW evidențiază faptul că tehnologiile VR și AR contribuie la dezvoltarea accelerată a abilităților psihomotorii, la reducerea consumului de materiale și la îmbunătățirea siguranței în procesul de instruire. Studiile analizate arată că studenții instruiți prin metode integrate VR/AR pot obține performanțe comparabile sau superioare celor formați prin metode tradiționale, în anumite situații fiind raportate reduceri de până la 50% ale timpului de instruire și economii semnificative ale costurilor asociate consumabilelor. În paralel, Inteligența Artificială oferă suport pentru analiza calității sudurii, identificarea defectelor, evaluarea performanței cursanților și generarea asistată a procedurilor de sudare (WPS). Cu toate acestea, utilizarea acestor tehnologii nu elimină necesitatea instruirii practice reale și a respectării standardelor aplicabile, precum SR EN ISO 14731, SR EN 1090 și SR EN ISO 3834.

Cuvinte cheie

Instruire profesională, sudare, realitate virtuală, realitate augmentată, inteligență artificială, IWE, IIW/EFW

Abstract

The study analyses how Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) and Artificial Intelligence (AI) can complement and modernize the training of International Welding Engineers within IIW/EFW programs. The operating principles, implementation methods and pedagogical benefits of these technologies are presented, as well as their integration into the specific modules of the IWE curriculum: welding processes, metallurgy, non-destructive examinations (NDT), development and validation of technological documentation (WPS/WPQR) and the behaviour of materials in welding. The analysis of recent literature and IIW/EFW guidelines highlights the fact that VR and AR technologies contribute to the accelerated development of psychomotor skills, to the reduction of material consumption and to the improvement of safety in the training process. The analysed studies show that students trained by integrated VR/AR methods can achieve comparable or superior performance to those trained by traditional methods, in certain situations with reductions of up to 50% in training time and significant cost savings associated with consumables being reported. In parallel, Artificial Intelligence provides support for weld quality analysis, defect identification, learner performance evaluation and assisted generation of welding procedures (WPS). However, the use of these technologies does not eliminate the need for actual practical training and compliance with applicable standards, such as SR EN ISO 14731, SR EN 1090, SR EN ISO 3834.

Keywords

Professional training, welding, virtual reality, augmented reality, artificial intelligence, IWE, IIW/EFW

1. Introducere

Realitatea Virtuală (VR), Realitatea Augmentată (AR) și Inteligența Artificială (AI) reprezintă tehnologii digi-

1. Introduction

Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) and Artificial Intelligence (AI) are digital technologies that

tale care influențează semnificativ modul de instruire și perfecționare în domeniul sudării [1,2]. În ultimii ani, dezvoltarea acestor soluții a condus la apariția unor metode moderne de pregătire profesională, capabile să completeze instruirea practică tradițională și să răspundă cerințelor industriei moderne.

Industria sudării se confruntă la nivel global cu o creștere constantă a cererii de personal calificat, în special pentru sudorii profesioniști și Ingineri Sudori Internaționali. În acest context, metodele convenționale de instruire prezintă o serie de limitări: costuri ridicate generate de consumabile și echipamente, riscuri de accidentare pentru cursanți, necesitatea supravegherii individuale intensive și dificultăți în extinderea programelor de formare pentru grupuri mari de participanți.

Tehnologiile VR și AR oferă posibilitatea dezvoltării competențelor psihomotorii într-un mediu sigur și controlat, reducând consumul de materiale și facilitând repetarea exercițiilor fără costuri suplimentare. În același timp, sistemele bazate pe AI permit analiza performanței cursanților, identificarea defectelor de sudare și furnizarea unui feedback obiectiv în timp real. Integrarea acestor tehnologii trebuie realizată în concordanță cu cerințele sistemului IIW/ESW și cu standardele aplicabile coordonării sudării, în special SR EN ISO 14731 privind coordonarea sudării, SR EN ISO 3834 referitor la cerințele de calitate în sudare. Conform documentului IAB-252, pregătirea Inginerului Sudor Internațional trebuie să asigure atât competențe teoretice solide, cât și capacitatea de aplicare practică în condiții industriale reale.

VR, AR și AI nu înlocuiesc instruirea practică tradițională, ci o completează prin metode moderne care contribuie la:

- creșterea siguranței în procesul de învățare;
- reducerea costurilor de instruire;
- dezvoltarea accelerată a competențelor tehnice;
- îmbunătățirea evaluării obiective;
- instruirea din industria sudării are cerințe la care trebuie să răspundă noile sisteme digitale.

2. Elemente generale privind utilizarea VR, AR și AI în instruirea pentru sudare

2.1 Realitatea Virtuală (VR) ca instrument complementar în formarea practică a sudorilor

Realitatea Virtuală reprezintă o tehnologie care creează medii tridimensionale complet sintetice, în care utilizatorul poate interacționa prin intermediul unor dispozitive specializate, precum căști VR și sisteme haptice.

significantly influence the way welding is trained and improved [1,2]. In recent years, the development of these solutions has led to the emergence of modern methods of professional training, capable of complementing traditional practical training and meeting the requirements of modern industry.

The welding industry globally is facing a steady increase in demand for skilled personnel, especially for professional welders and International Welding Engineers. In this context, conventional training methods have a number of limitations: high costs of consumables and equipment, accident risks for learners, the need for intensive individual supervision and difficulties in extending training programmes to large groups of participants.

VR and AR technologies offer the possibility of developing psychomotor skills in a safe and controlled environment, reducing the consumption of materials and facilitating the repetition of exercises at no additional cost. At the same time, AI-based systems allow for the analysis of learners' performance, the identification of welding defects, and the provision of objective feedback in real time.

The integration of these technologies must be carried out in accordance with the requirements of the IIW/ESW system and the standards applicable to welding coordination, in particular SR EN ISO 14731 on welding coordination, and SR EN ISO 3834 on welding quality requirements. According to the IAB-252 document, the training of the International Welding Engineer must ensure both solid theoretical skills and the ability to apply it in real industrial conditions.

VR, AR and AI do not replace traditional hands-on training, but complement it with modern methods that contribute to:

- increasing safety in the learning process;
- reduction of training costs;
- accelerated development of technical skills;
- improving objective evaluation;
- training in the welding industry has specific requirements that must be addressed by new digital systems.

2. General Elements on the Use of VR, AR, and AI in Welding Training

2.1 Virtual Reality (VR) as a complementary tool in the practical training of welders

Virtual Reality is a technology that creates fully synthetic three-dimensional environments, in which the user can interact through specialized devices, such as VR headsets and haptic systems.

În domeniul instruirii pentru sudare, VR permite simularea proceselor MIG/MAG, TIG/WIG și SMAW într-un mediu digital sigur și controlat (figura 1). Cursanții pot exersa mișcările specifice sudării fără expunere la radiațiile arcului electric, fum, temperaturi ridicate sau riscuri de accidentare.

In the field of welding training, VR enables the simulation of MIG/MAG, TIG/WIG, and SMAW processes in a secure and controlled digital environment (figure 1). Trainees can practice welding-specific movements without exposure to arc radiation, smoke, high temperatures, or injury hazards.



Figura 1. Simulator virtual de sudare Lincoln Electric [13]

Figure 1. Lincoln Electric virtual welding simulator [13]

Sistemele moderne de simulare VR reproduc vizual și auditiv mediul de lucru prin intermediul căștilor VR de tip Head Mounted Display, Casca de realitate virtuală, (figura 2) și permit evaluarea parametrilor esențiali ai procesului de sudare, precum:

- viteza de deplasare;
- unghiul electrodului/al pistolului
- lungimea arcului;
- optimizarea parametrilor.

Modern VR simulation systems visually and audibly reproduce the working environment through Head Mounted Display VR headsets (figure 2) and allow the evaluation of essential parameters of the welding process, such as:

- travel speed;
- electrode/torch angle
- arc length;
- parameter optimization.



Figura 2. Căști VR Head Mounted Display [3]

Figure 2. VR Head-Mounted Display headsets [3]

Un avantaj important al tehnologiei VR este posibilitatea de a repeta exercițiile de câte ori se dorește, fără a consuma materiale sau energie. În plus, simulatoarele pot recrea situații industriale complexe și defecte care sunt greu de reprodus în laborator.

Platforme educaționale precum VRTEX® (Lincoln Electric) permit evaluarea obiectivă a performanței, analiza prin reluare și simularea defectelor de sudare

An important advantage of VR technology is the possibility of unlimited repetition of exercises without consuming materials or energy. In addition, the simulators can recreate complex industrial situations and defects that are difficult to reproduce in the laboratory.

Educational platforms such as VRTEX® (Lincoln Electric) allow objective performance evaluation, replay

[4]. Cercetările recente arată că utilizarea VR în fazele inițiale ale instruirii poate conduce la reducerea timpului necesar formării și la scăderea costurilor asociate consumabilelor. Totuși, rezultatele din literatura de specialitate indică faptul că eficiența VR depinde de integrarea acesteia într-un program pedagogic echilibrat [4,5]. Utilizarea exclusivă a simulatorilor nu poate substitui complet experiența practică reală.

2.2 Realitatea Augmentată (AR) pentru ghidare și realism sporit

Realitatea Augmentată reprezintă o tehnologie care suprapune informații digitale peste mediul fizic real. În instruirea pentru sudare, AR permite combinarea echipamentelor reale cu ghidaj virtual și feedback în timp real.

Spre deosebire de VR, unde mediul este complet virtual, sistemele AR permit cursanților să utilizeze echipamente și piese reale, păstrând contactul direct cu mediul de lucru. Platforme precum Soldamatic folosesc o combinație între simulare și componente reale pentru a oferi:

- ghidarea traseului de sudare;
- afișarea parametrilor tehnologici;
- corectarea poziției și a mișcărilor;
- identificarea erorilor de execuție;
- evaluarea performanței în timp real.

AR facilitează dezvoltarea memoriei kinestezice și reduce diferența dintre etapa de instruire și activitatea industrială reală. De asemenea, această tehnologie permite integrarea cu platforme de tip Learning Management System (LMS), contribuind la monitorizarea progresului și standardizarea evaluării.

Studii recente demonstrează că utilizarea sistemelor AR poate îmbunătăți coordonarea motrică, concentrarea și înțelegerea proceselor tehnologice, în special atunci când sunt integrate cu senzori biometrici și acustici [6,7].

2.3 Inteligența Artificială pentru analiză și suport decizional

Inteligența Artificială adaugă funcții avansate de analiză și automatizare în instruirea pentru sudare. Algoritmii de Machine Learning și Deep Learning pot procesa date provenite de la senzori, camere video și sisteme de monitorizare pentru a evalua performanța cursanților și pentru a identifica defecte de sudare. Principalele aplicații AI în instruirea pentru sudare includ:

- detectarea automată a defectelor;
- analiza performanței cursanților;

analysis and simulation of welding defects [4]. Recent research shows that using VR in the initial phases of training can lead to reduced training time and lower costs associated with consumables. However, the results in the literature indicate that the effectiveness of VR depends on its integration into a balanced pedagogical curriculum [4,5]. The exclusive use of simulators cannot completely replace real practical experience.

2.2 Augmented Reality (AR) for guidance and enhanced realism

Augmented Reality is a technology that superimposes digital information on top of the real physical environment. In welding training, AR allows the combination of real equipment with virtual guidance and real-time feedback.

Unlike VR, where the environment is completely virtual, AR systems allow learners to use real equipment and parts while maintaining direct contact with the work environment. Platforms like Soldamatic use a combination of simulation and real-world components to provide:

- guiding the welding path;
- display of technological parameters;
- correction of position and movements;
- identification of execution errors;
- real-time performance evaluation.

AR facilitates the development of kinesthetic memory and reduces the difference between the training stage and the actual industrial activity. This technology also allows integration with Learning Management System (LMS) platforms, helping to monitor progress and standardize assessment.

Recent studies demonstrate that the use of AR systems can improve motor coordination, concentration and understanding of technological processes, especially when integrated with biometric and acoustic sensors [6,7].

2.3 Artificial Intelligence for analysis and decision support

Artificial Intelligence adds advanced analytics and automation features to welding training. Machine Learning and Deep Learning algorithms can process data from sensors, video cameras, and monitoring systems to evaluate learners' performance and identify welding defects.

The main applications of AI in welding training include:

- automatic defect detection;
- analysis of learners' performance;
- objective assessment of the execution parameters;

- evaluarea obiectivă a parametrilor de execuție;
- personalizarea procesului de învățare;
- generarea asistată a Specificațiilor Procedurilor de Sudare (WPS);
- verificarea conformității cu standardele tehnice.

Sistemele moderne pot analiza în timp real parametri precum stabilitatea arcului electric, viteza de sudare, unghiul torței și consistența mișcărilor. Pe baza acestor date, AI oferă recomandări personalizate și identifică abaterile de la procedura optimă.

În cercetare și industrie există aplicații care utilizează AI pentru generarea și verificarea procedurilor de sudare conform standardelor ASME IX, AWS D1.1 și SR EN ISO 15614 privind calificarea procedurilor de sudare [8]. De asemenea, platforme bazate pe baze de cunoștințe istorice permit optimizarea parametrilor tehnologici în funcție de material și condițiile de lucru.

3. Alinierea la curriculumul IIW/EWF

Curriculumul IIW/EWF pentru calificarea Inginerului Sudor Internațional stabilește competențele și cerințele necesare coordonării activităților de sudare conform documentului IAB-252 și în corelație cu SR EN ISO 14731 privind coordonarea sudării.

Integrarea tehnologiilor VR, AR și AI trebuie să susțină dezvoltarea competențelor specifice domeniilor:

- procese și echipamente de sudare;
- materiale și metalurgie;
- proiectare și calcul;
- controlul calității și NDT;
- elaborarea și validarea documentației tehnologice.

Posibile direcții de integrare:

a. Procese și echipamente de sudare

- simularea reglajelor și pozițiilor de sudare prin VR;
- ghidare vizuală prin AR;
- monitorizarea stabilității arcului de sudare prin AI.

b. Materiale și metalurgie

- vizualizarea tridimensională a zonelor afectate termic;
- simularea ciclurilor termice;
- predicția microstructurii și a defectelor prin AI.

c. Proiectare și concepție

- interpretarea simbolurilor de sudare prin AR;
- verificarea montajului;
- recomandări automate pentru parametrii preliminari ai WPS.

- personalization of the learning process;
- assisted generation of Welding Procedure Specifications (WPS);
- verification of compliance with technical standards.

Modern systems can analyse parameters such as arc stability, welding speed, torch angle and consistency of movements in real time. Based on this data, AI provides personalized recommendations and identifies deviations from the optimal procedure.

In research and industry, there are applications that use AI to generate and verify welding procedures according to the ASME IX, AWS D1.1 and SR EN ISO 15614 standards on the qualification of welding procedures [8]. Also, platforms based on historical knowledge bases allow optimisation of technological parameters according to the material and working conditions.

3. Alignment to the IIW/EWF curriculum

The IIW/EWF curriculum for the International Welding Engineer qualification establishes the competencies and requirements necessary for the coordination of welding activities according to the IAB-252 document and in correlation with SR EN ISO 14731 on welding coordination.

The integration of VR, AR and AI technologies must support the development of domain-specific skills:

- welding processes and equipment;
- materials and metallurgy;
- design and calculation;
- quality control and NDT;
- development and validation of technological documentation.

Possible integration directions:

a. Welding Processes & Equipment

- simulation of welding settings and positions via VR;
- visual guidance via AR;
- monitoring of the stability of the welding arc through AI.

b. Materials & Metallurgy

- three-dimensional visualization of thermally affected areas;
- simulation of thermal cycles;
- prediction of microstructure and defects through AI.

c. Design and conception

- interpretation of welding symbols by AR;
- verification of the installation;
- automatic recommendations for WPS preliminary parameters.

d. Elaborarea și validarea WPS/WPQR

- generarea asistată a parametrilor;
- verificarea conformității cu standardele;
- simularea testelor mecanice și macrostructurale.

e. Evaluarea NDT

- simulări VR pentru RT, UT, MT și PT;
- identificarea defectelor prin AI;
- analiză vizuală interactivă.

4. Eficacitate și analiză cost–beneficiu

Unul dintre cele mai importante avantaje ale tehnologiilor VR și AR îl reprezintă îmbunătățirea siguranței în procesul de instruire. În fazele inițiale ale formării, cursanții pot exersa fără expunere directă la:

- radiații UV și infraroșii;
- fum și vapori toxici;
- temperaturi ridicate;
- stropi de metal topit;
- riscuri de electrocutare sau incendiu.

Numeroase studii publicate în literatura de specialitate arată că integrarea sistematică a tehnologiilor VR/AR poate contribui la [10,12]:

- reducerea anxietății cursanților;
- creșterea nivelului de încredere;
- dezvoltarea accelerată a competențelor de bază;
- reducerea timpului necesar instruirii.

Reducerea timpului de instruire conduce la:

- utilizarea mai eficientă a facilităților;
- scăderea costurilor asociate instructorilor;
- creșterea capacității de formare;
- integrarea mai rapidă a absolvenților în industrie.

În plus, eliminarea consumului de materiale și gaze tehnice în etapele inițiale produce economii importante pe termen lung [10,12]. După implementarea infrastructurii digitale, sistemele VR/AR pot fi utilizate de un număr mare de cursanți fără creșteri semnificative ale costurilor operaționale.

Tehnologiile digitale permit și standardizarea procesului educațional. Toți cursanții pot parcurge aceleași exerciții și pot fi evaluați pe baza aceluiași criterii, ceea ce îmbunătățește obiectivitatea evaluării.

Un alt avantaj major îl reprezintă feedback-ul imediat. Sistemele digitale identifică erorile în timpul execuției și permit corectarea rapidă a tehnicii, prevenind consolidarea deprinderilor incorecte.

5. Limitări, riscuri și aspecte etice

În ciuda avantajelor importante, tehnologiile VR, AR și AI prezintă și anumite limitări tehnice și pedagogice.

d. Development and validation of WPS/WPQR

- assisted parameter generation;
- verification of compliance with standards;
- simulation of mechanical and macrostructural tests.

e. NDT Assessment

- VR simulations for RT, UT, MT and PT;
- identification of defects through AI;
- interactive visual analysis.

4. Effectiveness and cost-benefit analysis

One of the most important advantages of VR and AR technologies is the improvement of safety in the training process. In the initial phases of training, learners can practice without direct exposure to:

- UV and infrared radiation;
- toxic smoke and vapours;
- high temperatures;
- molten metal spatter;
- risks of electric shock or fire.

Numerous studies published in the literature show that the systematic integration of VR/AR technologies can contribute to [10,12]:

- reducing student anxiety;
- increasing the level of trust;
- accelerated development of basic skills;
- reduction of the time required for training.

Reducing training time leads to:

- more efficient use of facilities;
- decrease in costs associated with instructors;
- increasing training capacity;
- faster integration of graduates into the industry.

In addition, eliminating the consumption of materials and gases in the initial stages produces important savings in the long term [10,12]. After the implementation of the digital infrastructure, VR/AR systems can be used by a large number of learners without significant increases in operational costs. Digital technologies also allow the standardization of the educational process. All learners can complete the same exercises and be assessed on the basis of the same criteria, which improves the objectivity of the assessment.

Another major advantage is immediate feedback. Digital systems identify errors during execution and allow rapid correction of the technique, preventing the consolidation of incorrect skills.

5. Limitations, risks and ethical aspects

Despite the important advantages, VR, AR, and AI technologies also have some technical and pedagogical limitations.

5.1 Limitări tehnice

Una dintre cele mai importante limitări ale simulatoarelor VR este lipsa unui feedback haptic complet [11]. Deși sistemele moderne pot genera vibrații și rezistențe artificiale, acestea nu pot reproduce integral:

- senzația contactului real dintre electrod și piesă;
- greutatea echipamentului;
- căldura procesului de sudare;
- comportamentul materialului topit.

De asemenea, unele sisteme prezintă limitări privind realismul vizual și fidelitatea reprezentării arcului electric.

5.2 Probleme de acomodare și confort

Utilizarea îndelungată a căștilor VR poate produce:

- oboseală oculară;
- dificultăți de focalizare;
- disconfort vizual;
- amețea „digitală”.

Aceste efecte pot limita durata sesiunilor de instruire pentru anumite categorii de utilizatori.

5.3 Costuri de implementare

Implementarea infrastructurii VR/AR presupune costuri inițiale ridicate asociate:

- echipamentelor hardware;
- licențelor software;
- întreținerii;
- actualizărilor periodice;
- instruirii personalului.

Cu toate acestea, în multe situații, economiile generate pe termen lung pot justifica investiția.

5.4 Aspecte pedagogice și etice

Utilizarea excesivă a simulatoarelor poate crea o percepție incompletă asupra condițiilor reale de lucru. Din acest motiv, instruirea digitală trebuie integrată într-un model educațional mixt, care să includă atât simularea virtuală, cât și practica reală. Sistemele AI utilizate pentru evaluare trebuie să respecte principiile transparenței și obiectivității, iar deciziile finale privind calificarea profesională trebuie să rămână sub responsabilitatea instructorilor și a organismelor de certificare.

6. Platforme și aplicații reprezentative

VRTEX® – Lincoln Electric

Sistem de simulare VR utilizat pentru:

- evaluarea performanței;
- simularea defectelor;
- analiza parametrilor de sudare;

5.1 Technical limitations

One of the most important limitations of VR simulators is the lack of full haptic feedback [11]. Although modern systems can generate artificial vibrations and resistances, they cannot fully reproduce:

- the sensation of actual contact between the electrode and the workpiece;
- the weight of the equipment;
- heat of the welding process;
- the behaviour of the molten material.

Also, some virtual systems have limitations on visual realism and arc flash representation fidelity.

5.2 Issues of accommodation and comfort

Long-term use of VR headsets can produce:

- eye strain;
- difficulty focusing;
- visual discomfort;
- cybersickness.

These effects may limit the duration of training sessions for certain categories of users.

5.3 Implementation costs

Implementing VR/AR infrastructure involves high upfront costs associated with:

- hardware equipment;
- software licenses;
- maintenance;
- periodic updates;
- staff training.

However, in many situations, the savings generated in the long term can justify the investment.

5.4 Pedagogical and ethical aspects

Excessive use of simulators can create an incomplete perception of real working conditions. For this reason, digital training must be integrated into a blended educational model, which includes both virtual simulation and real practice. In addition, AI systems used for assessment must comply with the principles of transparency and objectivity, and final decisions on professional qualification must remain the responsibility of instructors and certification bodies.

6. Relevant platforms and applications

VRTEX® – Lincoln Electric

VR simulation system used for:

- performance evaluation;
- simulation of defects;
- analysis of welding parameters;

- testare virtuală.

AugmentedArc® – Miller

Platformă AR care combină:

- echipamente reale;
- senzori optici;
- ghidare vizuală;
- integrare LMS.

Inițiative XR + Machine Learning

Diverse proiecte academice dezvoltate în universități și centre de cercetare utilizează senzori biometrici și acustici pentru optimizarea procesului de învățare.

Sisteme AI pentru WPS

Aplicații bazate pe Machine Learning și baze de date istorice permit:

- recomandarea parametrilor GMAW;
- verificarea conformității procedurilor;
- analiza defectelor;
- optimizarea documentației tehnologice.

KBS Weld – ISIM Timișoara

Platformă bazată pe cunoștințe istorice și standarde ISO, utilizată pentru optimizarea procedurilor preliminare de sudare.

7. Metode de implementare și beneficii ale utilizării VR, AR și AI în formarea IWE

7.1 Metode de implementare

Realitatea Virtuală (VR) în formarea inginerului sudor (figura 3)

Realitatea Virtuală permite crearea unui mediu digital complet care reproduce fidel atelierul de sudare, oferind posibilitatea exersării procedeelor MIG/MAG, TIG/WIG și SMAW într-un cadru sigur, fără utilizarea materialelor reale și fără riscuri de accidentare.

Prin intermediul simulării, cursantul poate repeta manevrele de sudare de un număr nelimitat de ori, fără costuri suplimentare generate de consumabile. Un avantaj important al tehnologiei VR îl reprezintă posibilitatea simulării unor scenarii industriale complexe sau a unor defecte rar întâlnite în practica obișnuită de laborator.

Integrarea feedback-ului haptic și vizual în timp real contribuie la creșterea realismului experienței de instruire. Sistemele moderne permit evaluarea obiectivă a performanței prin analiza parametrilor de sudare și a calității cordonului realizat.

- virtual testing.

AugmentedArc® – Miller

AR platform that combines:

- real equipment;
- sensors optics;
- visual guidance;
- integrate LMS.

Initiatives XR + Machine Learning

Academic projects developed in universities and research centres use biometric and acoustic sensors to optimize the learning process.

AI Systems for WPS

Machine Learning-based applications and historical databases enable:

- recommending GMAW parameters;
- verifying the compliance of procedures;
- defect analysis;
- optimizing the technological documentation.

KBS Weld – ISIM Timișoara

Platform based on historical knowledge and ISO standards, used to optimize preliminary welding procedures.

7. Implementation methods and benefits of using VR, AR, and AI in IWE training

7.1 Implementation methods

Virtual Reality (VR) in welding engineer training (figure 3)

Virtual Reality allows the creation of a complete digital environment that faithfully reproduces the welding workshop, offering the possibility of practicing MIG/MAG, TIG/WIG and SMAW processes in a safe environment, without the use of real materials and without the risk of accidents.

Through the simulation, the learner can repeat the welding manoeuvres an unlimited number of times without additional costs generated by consumables. An important advantage of VR technology is the possibility of simulating complex industrial scenarios or defects rarely encountered in regular laboratory practice. The integration of haptic and visual feedback in real time helps to increase the realism of the training experience. Modern systems allow objective evaluation of performance by analysing welding parameters and the quality of the seam made.



Figura 3. Imagine cu echipament real care folosește realitate virtuală pentru instruirea în sudare [14]

Figure 3. Image of real equipment using virtual reality for welding training [14]

Realitatea Augmentată (AR) în formarea inginerului sudor (figura 4)

Realitatea Augmentată completează instruirea practică prin suprapunerea informațiilor digitale peste piesa reală aflată în procesul de sudare. Prin intermediul ochelarilor AR sunt proiectate trasee ideale ale cordonului, unghiurile corecte ale torței și parametrii tehnologici necesari.

Augmented Reality (AR) in welding engineer training (figure 4)

Augmented Reality complements hands-on training by superimposing digital information on top of the actual part in the welding process. Ideal cord routes, the correct torch angles and the necessary technological parameters are designed by means of AR glasses.



Figura 4. Imagine cu echipament real care folosește realitate augmentată pentru instruirea în sudură [15]

Figure 4. Image of real equipment using augmented reality for welding training [15]

Această tehnologie facilitează corectarea poziției corpului, a vitezei de deplasare și a mișcărilor de lucru fără intervenția permanentă a instructorului. Deoarece instruirea are loc pe echipamente și materiale reale, tranziția către mediul industrial este mai ușoară.

This technology facilitates the correction of body position, travel speed and work movements without the permanent intervention of the instructor. Because the training takes place on real equipment and materials, the transition to the industrial environment is easier.

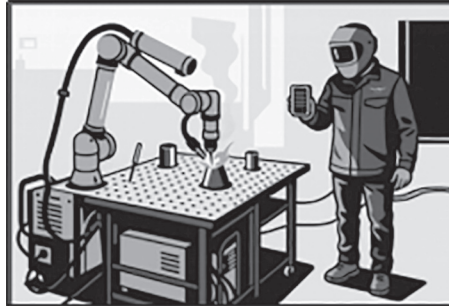
Inteligența Artificială în optimizarea formării inginerilor sudori (figura 5)

Inteligența Artificială contribuie la transformarea procesului de instruire într-un sistem bazat pe analiză obiectivă și adaptare continuă. Platformele moderne înregistrează parametri precum stabilitatea arcului electric, viteza de deplasare, unghiul de lucru și distanța față de piesă. Pe baza datelor

Artificial Intelligence in optimizing the training of welding engineers (figure 5)

Artificial Intelligence contributes to transforming the training process into a system based on objective analysis and continuous adaptation. Modern platforms record parameters such as arc stability, travel speed, working angle and distance from the workpiece. Based on the data collected, Machine Learn-

colectate, algoritmi de Machine Learning pot identifica modele de execuție și pot formula recomandări personalizate pentru îmbunătățirea performanței. În plus, AI poate sprijini elaborarea și verificarea procedurilor de sudare (WPS), precum și analiza automată a defectelor.



ing algorithms can identify execution patterns and formulate personalized recommendations to improve performance. In addition, AI can support the development and verification of welding procedures (WPS), as well as automatic defect analysis.

7.2. Beneficii

7.2.1 Beneficii pentru cursanți

- creșterea siguranței în procesul de instruire
- reducerea anxietății asociate proceselor de sudare reale
- dezvoltarea accelerată a competențelor psihomotorii
- posibilitatea repetării nelimitate a exercițiilor
- acces la scenarii industriale complexe
- pregătire pentru standarde și certificări internaționale precum AWS, ISO și NCCER.

7.2.2 Beneficii pentru organizații

- reducerea consumului de materiale;
- standardizarea procesului educațional;
- evaluare obiectivă și reproductibilă;
- monitorizarea detaliată a progresului;
- flexibilitate în organizarea instruirii;
- posibilitatea instruirii la distanță.

7.2.3 Beneficii pentru industrie

- reducerea rebuturilor și refacerilor
- îmbunătățirea calității sudurilor
- integrarea rapidă a noilor tehnologii digitale
- pregătirea personalului pentru Industry 4.0 și Industry 5.0.

8. Materiale și comportarea lor la sudare

Tehnologiile digitale pot aduce contribuții importante în înțelegerea fenomenelor metalurgice asociate sudării.

Efectul ciclului termic asupra structurii și proprietăților materialelor, în special în zona influențată termic (ZIT), determină comportamentul materialului la sudare. În ZIT, pot apărea transformări de fază, variații de duritate și riscuri de fisurare care sunt influențate de parametri tehnologici și compoziția materialu-

7.2. Benefits

7.2.1 Benefits for learners

- increasing safety in the training process
- reducing anxiety associated with real welding
- accelerated development of psychomotor skills
- the possibility of unlimited repetition of exercises
- access to complex industrial scenarios
- preparation for international standards and certifications such as AWS, ISO, and NCCER.

7.2.2 Benefits for organizations

- reduction of material consumption;
- standardization of the educational process;
- objective and reproducible evaluation;
- detailed monitoring of progress;
- flexibility in organizing training;
- the possibility of distance learning.

7.2.3 Benefits for industry

- reduction of scrap and restoration
- improving the quality of welds
- rapid integration of new digital technologies
- preparing staff for Industry 4.0 and Industry 5.0.

8. Materials and their welding behaviour

Digital technologies can provide important contributions to the understanding of the metallurgical phenomena specific to welding.

The effect of the thermal cycle on the structure and properties of materials, especially in the thermally influenced zone (HAZ), determines the behaviour of the material when welding. In HAZ, phase transformations, hardness variations and cracking risks can occur that are influenced by technological parameters and material composition. In this context, mod-

lui. În acest context, tehnologiile VR și AR moderne sunt esențiale pentru modelarea, analiza și instruirea proceselor de sudare; acestea permit simularea fenomenelor metalurgice, optimizarea parametrilor și reducerea costurilor și riscurilor experimentale. Aceste tehnologii ajută la o mai bună înțelegere și control a comportamentului materialelor și la tranziția către sisteme de sudare inteligente specifice industriei 4.0–5.0 [9].

Exemple de VR, AR și AI:

VR

- simularea microstructurii înainte și după sudare;
- vizualizarea zonelor afectate termic;
- simularea tensiunilor și deformațiilor remanente;
- comparații între diferite materiale.

AR

- suprapunerea hărților termice peste piesa reală;
- identificarea zonelor cu risc de fisurare;
- vizualizarea fenomenelor termice.

AI

- predicția comportării materialelor;
- recomandarea materialelor de adaos;
- analiză bazată pe date istorice;
- corelarea parametrilor cu defectele potențiale.

Aceste tehnologii contribuie la:

- înțelegerea aprofundată a fenomenelor metalurgice;
- corelarea teoriei cu practica;
- reducerea riscului de alegere incorectă a parametrilor.

9. Model modular de integrare a tehnologiilor digitale

Pentru a valorifica avantajele oferite de tehnologiile digitale în domeniul sudării, este necesară integrarea acestora într-un mod structurat și adaptat diferitelor activități de instruire și producție. Tabelul de mai jos prezintă un model modular de integrare a tehnologiilor VR, AR și AI, evidențiind rolul acestora în îmbunătățirea proceselor, dezvoltarea competențelor și creșterea eficienței operaționale.

ern VR and AR technologies are essential for modelling, analysing and training welding processes; They allow the simulation of metallurgical phenomena, the optimization of parameters and the reduction of costs and experimental risks. These technologies help to better understand and control the behaviour of materials and the transition to intelligent welding systems specific to Industry 4.0–5.0 [9].

Examples of VR, AR, and AI:

VR

- simulation of the microstructure before and after welding;
- visualization of thermally affected areas;
- simulation of the residual stresses and strains;
- comparisons between different materials.

AR

- overlapping of the heat maps over the actual part;
- identification of areas at risk of cracking;
- visualization of thermal phenomena.

AI

- behaviour prediction of materials;
- recommendation of adding materials;
- analysis based on historical data;
- correlation of parameters with potential defects.

These technologies contribute to:

- in-depth understanding of metallurgical phenomena;
- correlating theory with practice;
- reducing the risk of incorrect choice of parameters.

9. Modular model for integrating digital technologies

To capitalize on the benefits offered by digital technologies in the field of welding, they must be integrated in a structured manner that is tailored to various training and production activities. The table below presents a modular model for integrating VR, AR, and AI technologies, highlighting their role in improving processes, developing skills, and increasing operational efficiency.

Tabelul 1. Module de VR și domeniul de aplicare
Table 1. VR modules and domains to apply

Modul și domeniu / Module and domain	VR
Procese de sudare <i>Welding processes</i>	Simulare MIG/MAG, TIG/WIG, SMAW <i>Simulation MIG/MAG, TIG/WIG, SMAW</i>
Metalurgie <i>Metalurgy</i>	Simularea ciclurilor termice <i>Simulation of thermal cycles</i>
NDT	Simulare RT, UT, MT, PT <i>Simulation RT, UT, MT, PT</i>
WPS	Exersare digitală <i>Digital practice</i>
WPQR	Simulare teste mecanice <i>Mechanical Test Simulation</i>

10. Concluzii

Tehnologiile VR, AR și AI aduc beneficii importante procesului de formare al Inginerilor Sudori Internaționali și contribuie la modernizarea instruirii conform cerințelor industriei actuale. Integrarea acestor tehnologii în curriculumul IIW/EFW poate conduce la:

- creșterea siguranței și sănătății în procesul educațional
- reducerea costurilor și a consumului de materiale
- îmbunătățirea evaluării obiective
- dezvoltarea accelerată a competențelor profesionale
- adaptarea instruirii la digitalizarea industriei.

Cu toate acestea, tehnologiile digitale nu pot înlocui complet practica reală în laborator și experiența directă cu echipamentele industriale. Formarea eficientă a Inginerului Sudor Internațional necesită o abordare mixtă, în care simularea virtuală și practica tradițională se completează reciproc.

Direcțiile viitoare de dezvoltare vizează integrarea conceptelor specifice Industria 5.0, a modelului digital inteligent (Digital Twin), a instruirii în sudarea robotizată și a inteligenței artificiale generative, în scopul optimizării documentației tehnologice și al îmbunătățirii proceselor industriale [9,10].

Confirmaare

Această cercetare a fost, de asemenea, finanțată prin programul Erasmus+, în baza grantului cu numărul ID KA220-VET-882DD247, proiectul „Ar/Vr InternatiOnal weLding Engineer qualification”, acronim: VIOLET

Bibliografie/References

- [1] Cramariuc, G. & Dan, M.-A. – Integration of Virtual Reality in the Instructive Educational Process in Primary Education, Revista Românească pentru Educație Multidimensională, 2021
- [2] Savu, S. V., Savu, I. D., & Benga, G. C. – Simulation Welding using XR Technology – Education and Training in Welding, Editura Universitaria, Craiova, 2020
- [3] Virtual Reality Society – Head Mounted Displays
- [4] Tran, N.-H., Nguyen, V.-N., & Bui, V.-H. – Development of a Virtual Reality-Based System for Simulating Welding Processes, Applied Sciences, 13(10), 6082, 2023
- [5] User Experience in Augmented Reality Applied to Welding Education, Procedia Manufacturing, Vol. 3, 2015
- [6] Misiurek, B. & Müller, K. – Comparative Effectiveness of Virtual Reality vs. Augmented Reality in Welding Operator Training, Scientific Papers of Silesian University of Technology, 2025
- [7] Lee, H.-Y. et al. – A Multi-Sensor Interface to Improve the Learning Experience in Arc Welding Training Tasks, 2021
- [8] Wang, X., Chen, Q., & Yan, H. – GMAW Welding Procedure Expert System Based on Machine Learning, 2023
- [9] Alfaro Viquez, D. et al. – Integrating Virtual Reality into Welding Training: An Industry 5.0 Approach, Electronics, 14(10), 1964, 2025
- [10] Stone, Watts & Zhong – Research on Optimization of VR Welding Course Development
- [11] Farra, S. L. et al. – Cost Analysis VR vs. Live Exercises, 2019
- [12] OpenAI – ChatGPT (GPT-5.5), Large Language Model, 2026. Available online: <https://chat.openai.com/>
- [13] <https://www.constructionbusinessowner.com/sites/default/files/0114/00008364.jpg>
- [14] <http://www.simmersiv.com>
- [15] <https://sl.bing.net/fWG8MReZZsq>

Pentru citare:

Bratu, M., Feier, A., Visescu, M., Becheru, A. (2026). Possibilities for using new technologies: Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) and Artificial Intelligence (AI) as complementary training tools for International Welding Engineer courses, Sudura, nr. 2, year XXXVI, 40-51, <https://doi.org/10.70652/sud.2026.2.3>

10. Conclusions

VR, AR and AI technologies bring important benefits to the training process of International Welding Engineers and contribute to the modernization of training according to the requirements of the current industry. The integration of these technologies into the IIW/EFW curriculum can lead to:

- increasing safety in the educational process
- reduction of costs and consumption of materials
- improving the objective evaluation
- accelerated development of various professional skills
- adapting the training to the digitalisation of industry.

However, digital technologies cannot completely replace real laboratory practice and direct experience with industrial equipment. The effective training of the International Welding Engineer requires a blended approach, in which virtual simulation and traditional practice complement each other.

Future development directions include the integration of Industry 5.0, Digital Twin, robotic welding training and generative AI concepts for the optimization of technological documentation and industrial processes [9,10].

Acknowledgement

This research was also funded by the Erasmus+ funding program under grant number ID KA220-VET-882DD247, project “Ar/Vr InternatiOnal weLding Engineer qualification”, Acronim: VIOLET