

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

Studiu Comparativ al Principalelor Tehnologii de Sudare a Materialelor Termoplastice

A Comparative Study of the Main Welding Technologies for Thermoplastics

Adinda Hairil¹, Margareta Coteață^{1*}, Oana Dodun¹, Mihai Boca¹, Elisaveta Crăciun¹, Laurențiu Slătineanu¹

¹ Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, România

Rezumat

Sudarea reprezintă un procedeu tehnologic de asamblare nedemontabilă utilizat pe scară largă în industria prelucrătoare, inclusiv pentru materialele termoplastice. Evoluția continuă a echipamentelor și a materialelor a generat metode optime de îmbinare a polimerilor termoplastici, pretabile pentru diferite tipuri de solicitări și gabarite. Prezenta lucrare expune un studiu comparativ între sudarea cu ultrasunete, sudarea prin iradiere cu fascicul laser și sudarea cu element încălzitor, analizând mecanismele de adeziune la interfață și factorii de sudabilitate asociați structurii polimerice. Evaluarea datelor experimentale din literatura de specialitate consultată a permis stabilirea unor corelații între parametrii de regim ai procesului de sudare și performanțele îmbinării. Se propune o metodologie decizională pentru alegerea procedeeului optim, luând în considerare mai multe aspecte, cum ar fi compatibilitatea fizico-chimică a materialelor polimerice, constrângerile termice, rezistența mecanică a asamblării și considerentele legate de costurile de fabricație.

Cuvinte cheie

Sudare termoplastică, comparație analitică, sudare cu laser, sudare cu ultrasunete, sudarea cu element încălzitor

Abstract

Welding is a technological process for permanent joining that is widely used in the manufacturing industry, including for thermoplastic materials. The continuous evolution of equipment and materials has led to the development of optimal methods for joining thermoplastic polymers, suitable for various load types and dimensions. This paper presents a comparative study of ultrasonic welding, laser beam welding, and hot-melt welding, analysing interfacial adhesion mechanisms and weldability factors associated with the polymer structure. An evaluation of experimental data from the reviewed literature established correlations between the operating parameters of the welding process and joint performance. A decision-making methodology is proposed for selecting the optimal process, taking into account several aspects, including the physicochemical compatibility of polymeric materials, thermal constraints, the mechanical strength of the assembly, and manufacturing costs.

Keywords

Thermoplastic welding, analytical comparison, laser welding, ultrasonic welding, heating element welding

1. Introducere

Orice produs tehnic care reprezintă un ansamblu funcțional este rezultatul operațiilor de montaj și asamblare, acestea având un rol important în întregul flux de fabricație a produsului, respectiv în calitatea finală a acestuia. Peste 80% dintre produsele tehnice fabricate includ cel puțin un reper din material polimeric. Materialele termoplastice și compozitele pe baza acestora au înlocuit adesea metalele tradiționale și compozitele termorigide în

1. Introduction

Any technical product that constitutes a functional assembly results from mounting and assembly operations, which play a crucial role in the manufacturing process and, consequently, in the product's final quality. Over 80% of manufactured technical products incorporate at least one component made of polymeric material. Thermoplastic materials and composites based on them have often replaced traditional metals and thermoset composites in appli-

rezistență, constatând că se obțin valori apropiate în cazul sudării cu ultrasunete de cele obținute prin inducție. T. Zhao et al. [8] au realizat un studiu comparativ experimental privind rezistența la tracțiune a îmbinărilor asamblate mecanic și a îmbinărilor sudate prin suprapunere cu ultrasunete, pentru compozit cu matrice PEEK armată cu fibre de carbon (CF/PEEK). Atunci când alegerea procedurii de sudare nu permite realizarea unui plan experimental, se poate face apel la informațiile din literatura de specialitate și la rapoarte tehnice, pentru a alege opțiunea cea mai adecvată pentru o situație concretă și, respectiv, la o metodă consacrată de analiză comparativă. Un astfel de demers, bazat pe metodologia hibridă Fuzzy AHP-TOPSIS, a fost realizat de Jafarian și Vahdat [9] pentru a sprijini inginerii în selectarea unui proces de sudare prin topire destinat fabricării recipientelor sub presiune. Autorii demonstrează cum această abordare transformă o problemă decizională nestructurată într-un sistem bazat pe cunoaștere, care compară și evaluează matematic procesele de sudare, acordându-le scoruri între 0 și 1. Obiectivul prezentei lucrări este realizarea unui studiu comparativ al principalelor tehnologii de sudare a materialelor termoplastice, analizând aspecte precum rezistența mecanică, eficiența energetică, viteza de procesare și costurile, pentru a oferi un cadru decizional fundamentat în alegerea metodei adecvate.

2. Materiale termoplastice și metode de îmbinare nedemontabilă aferente

Sudabilitatea ansamblurilor polimerice este determinată de arhitectura moleculară a materialelor de bază. Orice analiză a tehnologiilor de îmbinare a materialelor termoplastice trebuie să coreleze structura internă a reperelor cu parametrii de sudare. În continuare, sunt prezentate clasificarea termoplasticele, criteriile de selecție și studiul comparativ al procedurilor de sudare fascicul laser, cu ultrasunete și cu element încălzitor.

2.1. Termoplaste - clasificare, comportare termică și criterii de sudabilitate

Din punct de vedere al ordonării moleculare, termoplastele se împart în două clase distincte: polimerii amorfi, la care lanțurile macromoleculare au o dispunere aleatorie (PC, ABS, PS, PMMA) și polimerii semicristalini, la care apar domenii cu organizare ordonată a lanțurilor (PE, PP, PA, POM). Această deosebire de arhitectură internă nu este un sim-

[8] conducted a comparative experimental study of the tensile strength of mechanically assembled joints versus ultrasonic lap-welded joints for Carbon Fiber Reinforced Polyether Ether Ketone (CF/PEEK) thermoplastic composites. When the choice of welding process does not allow for the design of an experimental plan, one can refer to information in the technical literature and technical reports to identify the most appropriate option for a specific situation, as well as to an established method of comparative analysis. Such an approach, based on the Fuzzy AHP-TOPSIS hybrid methodology, was developed by Jafarian & Vahdat [9] to assist engineers in selecting a fusion welding process for manufacturing pressure vessels. The authors demonstrate how this approach transforms an unstructured decision-making problem into a knowledge-based system that mathematically compares and evaluates welding processes, assigning them scores between 0 and 1.

The aim of this paper is to conduct a comparative study of the main thermoplastic welding technologies, analysing aspects such as mechanical strength, energy efficiency, processing speed, and costs, to provide an evidence-based decision-making framework for selecting the appropriate method.

2. Thermoplastic materials and related permanent joining methods

The molecular architecture of the base materials determines the weldability of polymer assemblies. Any analysis of thermoplastic joining technologies must correlate the components' internal structure with the welding parameters. The following sections present the classification of thermoplastic materials, selection criteria, and a study of laser-beam, ultrasonic, and heating-element welding processes.

2.1. Thermoplastics classification, thermal behaviour, and weldability criteria

In terms of molecular order, thermoplastics are classified into two distinct classes: amorphous polymers, in which the macromolecular chains are arranged randomly (PC, ABS, PS, PMMA), and semi-crystalline polymers, in which regions with an ordered arrangement of chains occur (PE, PP, PA, POM). This difference in internal architecture is not merely a structural detail. Still, it has direct consequences on macroscopic properties: melting

plu detaliu de structură, ci are consecințe directe asupra proprietăților macroscopice: comportamentul la topire, intervalul de înmuiere larg la amorfii, punctul de topire bine definit la semicristalini, rezistența la impact, capacitatea de amortizare a vibrațiilor și, într-o măsură decisivă, modul în care materialul răspunde la energia introdusă de fiecare procedeu de sudare. Dintre metodele de asamblare nedemontabilă a termoplastelor, sudarea s-a impus ca soluție dominantă, întrucât realizează o legătură permanentă la nivel molecular, fără aport de material străin și cu rezistență mecanică comparabilă cu cea a polimerului de bază; celelalte două procedee rămân utile în situații particulare- adezivii pentru asamblarea unor perechi de materiale incompatibile la topire, iar nituirea pentru cazurile în care ansamblul trebuie să permită o demontare parțială. Cu toate acestea, compatibilitatea dintre un anumit material termoplastic și un anumit procedeu de sudare nu este universală. Alegerea procedurii este condiționată de proprietățile fizico-chimice ale materialului și, mai precis, de capacitatea acestuia de a prelua sau de a transmite forma de energie specifică metodei-vibrații mecanice de înaltă frecvență, radiație laser într-un interval spectral bine definit, conducție termică dinspre o suprafață încălzită sau disipare dielectrică în câmp electromagnetic de înaltă frecvență. Această dependență explică de ce un material excelent sudabil printr-un procedeu poate fi complet refractar la altul. Matricea de compatibilitate prezentată în tabelul 1 sintetizează, pe baza datelor din literatura de specialitate, corespondențele consacrate dintre principalele termoplaste de interes industrial și procedeele moderne de sudare.

Compatibilitățile ilustrate în tabelul 1 evidențiază câteva tipare care ghidează selecția procedurii încă din faza de proiectare a piesei. PVC-ul se comportă ca cel mai permisiv polimer din perspectiva sudabilității, fiind compatibil cu toate cele șase tehnologii analizate, iar în cazul sudării cu curenți de înaltă frecvență oferă chiar performanța maximă, motiv pentru care este utilizat cu precădere în producția de panouri gonflabile, folii tehnice sudate CIF și articole medicale sterile. Poliamidele și polycarbonații prezintă și ele un spectru larg de compatibilitate, fiind astfel plasate printre termoplastele cu cea mai mare flexibilitate tehnică.

La polul opus, politetrafluoroetilena (PTFE) se confirmă ca material greu de sudat prin procedeele uzuale, singura soluție practică rămânând sudarea cu gaz cald, datorită temperaturii sale foarte ridicate de topire și inerției chimice remarcabile. Între aceste

behaviour, a wide softening range in amorphous materials, a well-defined melting point in semi-crystalline materials, impact resistance, vibration damping capacity, and, to a significant extent, the way the material responds to the energy introduced by each welding process. Among the methods for permanent joining of thermoplastics, welding has established itself as a modern solution, as it creates a permanent bond at the molecular level, without the addition of filler material, and with mechanical strength comparable to that of the base polymer; the other two processes remain useful in specific situations adhesives for assembling pairs of materials that are incompatible when melted, and riveting for cases where the assembly must allow for partial disassembly. However, the compatibility between a specific material and a specific welding process is not guaranteed. The choice of process depends on the material's physical and chemical properties and, more specifically, on its ability to absorb or transmit the form of energy used by the method: high-frequency mechanical vibrations, laser radiation within a well-defined spectral range, thermal conduction from a heated surface, or dielectric dissipation in high-frequency electromagnetic waves. This dependence explains why a material that is weldable by one process may be completely unweldable by another. The compatibility matrix presented in table 1 summarises, based on data from specialised literature, the known correspondences between the main thermoplastics of industrial interest and the welding processes.

The compatibility data shown in table 1 highlight several patterns that guide the selection of the welding process as early as the part design phase. PVC is the most versatile polymer in terms of weldability, being compatible with all six analysed technologies and, in the case of high-frequency welding, offering maximum performance. As a result, it is primarily used in the production of inflatable panels, CIF-welded technical films, and sterile medical devices. Polyamides and polycarbonates, in turn, exhibit a broad spectrum of compatibility, placing them among the most technologically flexible thermoplastics.

At the opposite end of the spectrum, polytetrafluoroethylene (PTFE) is notoriously difficult to weld using conventional methods; the only practical solution is hot-air welding, due to its very high melting point and remarkable chemical inertness. Between these extremes, polyolefins (PE, PP) and

extreme, poliolefinele (PE, PP) și poliesterii (PET, PBT) acoperă un domeniu intermediar, cu particularități care merită discutate separat.

polyesters (PET, PBT) cover an intermediate range, with characteristics that warrant separate discussion.

Tabelul 1. Matricea de sudabilitate a materialelor termoplastice
Table 1. Weldability matrix for thermoplastics

Metode Sudare/ Welding methods	Ultrasunete USW	Element încălzitor Hot plate	Frecare / Vibrații Friction	Laser	Gaz cald Hot gas	CIF
Material termoplasic						
Poliетенă (PE)	▲*	▲	▲	▲	▲	◻
Polipropilenă (PP)	▲*	▲	▲	▲	▲	◦
Policlorură de vinil (PVC)	▲	▲	▲	▲	▲	▲+++
Polistiren (PS)	▲+++	◦	▲	▲	◦	◻
Acrilonitril Butadien Stiren (ABS)	▲	◦	▲	▲	▲	◦
Poliamidă (PA / Nylon)	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Policarbonat (PC)	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Polimetacrilat de metil (PMMA)	▲	◦	▲	▲	▲	-
Poliesteri (PET / PBT)	▲	▲	▲	▲	▲	NA
Poliacetal (POM)	▲	◦	▲	▲	◦	◦
Politetrafluoretilenă (PTFE)	NA	◦	◦	◦	▲	◦

Notă: ▲ - proces de sudare realizat; ▲+++ - sudabilitate excelentă; ▲* - polimeri semicristalini, pretabili la sudarea cu ultrasunete doar cu amplitudini mecanice ridicate; „◦” indică lipsa unei compatibilități uzuale sau a unor mențiuni explicite în standardele curente de fabricație.
Note: ▲ - welding achievable; ▲+++ - excellent weldability; ▲* for ultrasonic welding indicates semi-crystalline polymers, which are suitable for this process only at high mechanical amplitudes; Cells marked with “◦” indicate the absence of standard compatibility or explicit references in current manufacturing standards.

În continuare, sunt analizate cele trei procedee cu cel mai larg impact industrial, sudarea cu fascicul laser, sudarea cu ultrasunete și sudarea cu element încălzitor, alese pentru comparația care constituie obiectul prezentei lucrări.

2.2. Sudarea cu fascicul laser a materialelor termoplastice

Sudarea cu fascicul laser este un procedeu noncontact în care aportul termic este introdus în piesă pe o cale optică, nu mecanică. Această particularitate i-a determinat ascensiunea rapidă în sectoarele cu cerințe ridicate de precizie și curățenie - industria medicală, microelectronica, asamblarea componentelor auto cu electronică integrată, întrucât permite concentrarea energiei într-un volum strict limitat, fără vibrații, fără solicitări mecanice și fără reziduuri. Varianta dominantă pentru polimeri este sudarea prin transmisie laser (Laser Transmission Welding), bazată pe decuplarea optică dintre cele două componente. Fasciculul traversează componenta superioară, transparentă la lungimea de undă utilizată, și este absorbit la suprafața piesei inferioare, unde energia luminoasă se transformă local în căldură. Prin conducție, topitura se extinde și către

The following sections analyse in detail the three processes with the widest industrial impact: laser beam welding, ultrasonic welding, and hot-element welding, which are selected for comparison in this paper.

2.2. Laser beam welding of thermoplastic materials

Laser beam welding is a non-contact process in which heat is introduced into the workpiece via an optical path rather than a mechanical one. This feature has led to its rapid rise in sectors with high demands for precision and cleanliness, such as the medical industry, microelectronics, and the assembly of automotive components with integrated electronics, as it allows energy to be concentrated within a strictly limited volume, without vibrations, mechanical stress, or residues.

The dominant method for polymers is Laser Transmission Welding (LTW), which relies on optical decoupling between the two components. The beam passes through the upper component, which is transparent to the wavelength used, and is absorbed at the surface of the lower part, where the light energy is locally converted into heat. Through conduction, the melt extends to the transparent component as

componenta transparentă, iar sub acțiunea presiunii de strângere, lanțurile polimerice ale celor două piese interdifuzează, formând îmbinarea. Pentru ca transferul termic să fie eficient, spațiul rezidual dintre piese trebuie menținut sub 150 μm ; depășirea acestei valori compromite contactul la interfață și conduce la suduri incomplete.

Calitatea îmbinării rezultă din interacțiunea a patru parametri principali de regim: puterea laserului, viteza de sudare, durata de iradiere și presiunea de strângere.

Pe lângă absența reziduurilor și a aglomerărilor de particule, avantajul major al procedurii îl constituie localizarea strictă a aportului termic, care protejează componentele electronice sau senzitive din interiorul ansamblului, motiv pentru care sudarea laser a devenit metoda de referință pentru asamblarea dispozitivelor microfluidice, a senzorilor integrați și a carcaselor pentru electronica auto. Principiul de funcționare al procedurii și componentele esențiale ale cuplajului optic transmisiv-absorbant sunt reprezentate schematic în figura 1, în care fasciculul traversează componenta transmisivă, este absorbit la suprafața componentei inferioare, iar căldura generată formează interfața de topire sub acțiunea presiunii de strângere.

La sudarea cu fascicul laser, compatibilitatea nu depinde de structura moleculară a polimerului ca atare, ci de proprietățile optice ale celor două repere la lungimea de undă a sursei. Procedura standard - sudarea prin transmisie - impune ca una dintre componente să fie transparentă la radiație, iar cealaltă să conțină un aditiv absorbant (tipic, negru de fum), astfel încât căldura să fie generată exclusiv la interfața de contact. Această cerință de cuplaj optic asimetric explică de ce, în tabelul 1, sudarea cu laser apare ca metodă aproape universal aplicabilă, ea putând fi aplicată aproape oricărui polimer, printr-o alegere corespunzătoare a componentei absorbante.

2.3. Sudarea cu ultrasunete a materialelor termoplastice

Sudarea cu ultrasunete a materialelor plastice se realizează prin topirea la interfață, prin conversia directă a energiei mecanice vibratorii în căldură de frecare, fără a utiliza o sursă termică externă. Procesul pornește de la un curent alternativ de rețea (50/60 Hz), care este transformat într-un semnal de înaltă frecvență, tipic de 15–40 kHz, de către un generator electronic, apoi convertit în vibrații mecanice printr-un traductor piezoelectric. Ampli-

well, and under the action of clamping pressure, the polymer chains of the two parts interdiffuse, forming the joint. For efficient heat transfer, the residual gap between the parts must be kept below 150 μm ; exceeding this value compromises interfacial contact and leads to incomplete welds.

The quality of the joint depends on the interaction among four main process parameters: laser power, welding speed, irradiation time, and clamping pressure.

In addition to the absence of residues and particle agglomerations, the major advantage of the process is the strict localisation of the heat input, which protects the electronic or sensitive components inside the assembly; for this reason, laser welding has become the standard method for assembling microfluidic devices, integrated sensors, and housings for automotive electronics. The operating principle of the process and the essential components of the transmissive-absorbent optical coupling are schematically represented in figure 1, in which the beam passes through the transmissive component, is absorbed at the surface of the lower component, and the generated heat forms a melting interface under the action of clamping pressure.

In laser beam welding, compatibility does not depend on the molecular structure of the polymer itself, but on the optical properties of the two parts at the source's wavelength. The standard process, transmission welding, requires that one of the components be transparent to radiation. At the same time, the other contains an absorbent additive (typically carbon black), so that heat is generated exclusively at the contact interface. This requirement for asymmetric optical coupling explains why, in table 1, laser welding appears as a nearly universally applicable method, as it can be used with almost any polymer by choosing an appropriate absorbing component.

2.3. Ultrasonic welding of thermoplastic materials

Ultrasonic welding of plastics is achieved by melting at the interface through the direct conversion of vibrational mechanical energy into frictional heat, without an external heat source. The process starts with a main alternating current (50/60 Hz), which is transformed into a high-frequency signal, typically 15–40 kHz, by an electronic generator, and then converted into mechanical vibrations by a piezoelectric transducer. The amplitude of these vibrations is adjusted by a booster and transmitted to the parts

tudinea acestor vibrații este ajustată de un booster și transmisă pieselor de asamblat prin intermediul unei sonotrode profilate după geometria îmbinării. Pe durata procesului, sonotroda presează axial ansamblul cu o forță statică bine definită (figura 1, b), iar vibrațiile longitudinale generează frecare la interfața dintre piese și, simultan, solicitări viscoelastice în volumul polimerului. Ambele efecte contribuie la încălzirea locală până la temperatura de tranziție vâscoasă. Pentru ca energia să fie focalizată exact la interfață și nu dispersată pe întreaga suprafață de contact, reperele sunt proiectate cu concentratori de energie cu secțiuni triunghiulară sau semicirculară, dispuși pe linia de sudare. Aceste structuri se topesc mai întâi, garantând inițierea controlată a sudurii și reducând semnificativ durata ciclului. După întreruperea vibrațiilor, forța de strângere este menținută pe parcursul menținerii, în timpul căruia materialul se răcește sub presiune, consolidând îmbinarea. Comportamentul la sudare al polimerilor termoplastici este puternic influențat de structura lor moleculară, distincție semnalată în tabel prin notația „Da*” aplicată polimerilor semicristalini. Termoplastele amorse, rigide și dense (PS, PC, PMMA, ABS) se comportă ca medii elastice, transmițând eficient vibrațiile acustice pe distanțe mari și focalizând energia la suprafața de contact, determinând o topire rapidă și reproductibilă la amplitudini moderate. În contrast, termoplastele semicristaline (PE, PP, PA) sunt considerate dificile pentru sudarea ultrasonică, deoarece domeniile lor structurale ordonate acționează ca un resort intern, absorbind și disipând o parte semnificativă a energiei în volumul materialului. Pentru a compensa această disipare internă, obținerea unei suduri necesită amplitudini mecanice net superioare.

2.4. Sudarea cu element încălzitor

Sudarea cu element încălzitor - cunoscută și sub denumirile de sudare cu placă caldă sau polifuziune - este procedeul cel mai vechi dintre tehnologiile analizate, bazat pe o sursă de căldură directă. Această metodă este indispensabilă în realizarea îmbinărilor masive, etanșe și rezistente (conducte pentru transportul fluidelor gaz/apă sub presiune, rezervoare, componente auto mari).

Din punct de vedere tehnologic, procesul cuprinde patru faze succesive și distincte. În prima fază, suprafețele de îmbinat sunt presate pe o plită metalică încălzită la 200–400 °C, în funcție de polimerul de sudat, sub o presiune de aliniere suficient de mare

to be assembled via a sonotrode shaped to match the joint geometry.

During the process, the sonotrode applies axial pressure to the assembly with a well-defined static force (figure 1, b), and the longitudinal vibrations generate friction at the interface between the parts and, simultaneously, viscoelastic stresses within the polymer volume. Both effects contribute to local heating up to the viscous transition temperature. To ensure that the energy is focused precisely at the interface, rather than dispersed across the entire contact surface, the parts are designed with energy concentrators: small protrusions of material with a triangular or semi-circular cross-section arranged along the weld line. These structures melt first, ensuring controlled weld initiation and a significant reduction in cycle time. After the vibrations stop, the clamping force is maintained for a holding time, during which the material cools under pressure, consolidating the joint.

The welding behaviour of thermoplastic polymers is highly dependent on their molecular structure, a distinction indicated in the table by the notation “Da*” applied to semi-crystalline polymers. Rigid and dense amorphous thermoplastics (PS, PC, PMMA, ABS) behave as elastic media, efficiently transmitting acoustic vibrations over long distances and focusing energy onto the contact surface, thereby producing rapid and reproducible melting at moderate amplitudes. In contrast, semi-crystalline thermoplastics (PE, PP, PA) are considered difficult materials for ultrasonic welding, as their ordered structural domains act as an internal spring, absorbing and dissipating a significant portion of the energy within the material's volume. To compensate for this internal dissipation, achieving a weld requires significantly higher mechanical amplitudes.

2.4. Hot-plate welding

Hot-plate welding, also known as polyfusion, is the oldest and most robust of the technologies analysed, based on a direct, contact heat source. Although it may seem rudimentary compared to laser or ultrasonic welding, it remains irreplaceable in applications requiring large, leak-tight joints that can withstand long-term stresses: gas and water transport pipelines, tanks for technical fluids, and large-volume automotive components. From a technological standpoint, the process is structured in four successive phases, each with its own parameters. In the first phase, the two surfaces to be welded are pressed onto a metal plate heated to a temperature

pentru a asigura contactul pe toată suprafața. În faza următoare, odată realizat contactul complet, presiunea este redusă la o valoare minimă, iar căldura penetrează materialul prin conducție pură, formând o peliculă vâscoasă de grosime controlată (faza de încălzire propriu-zisă). Urmează retragerea rapidă a plitei, într-un interval care nu trebuie să depășească 10 secunde, pentru ca suprafețele plastificate să nu se răcească; în continuare, cele două repere sunt aduse imediat în contact și presate unul împotriva celuilalt (faza de sudare).

between 200 and 400 °C, a value selected based on the polymer being processed, under an alignment pressure high enough to ensure intimate contact across the entire surface. In the next phase, once complete contact has been achieved, the pressure is reduced to a minimum, and heat penetrates the material by pure conduction, forming a viscous film of controlled thickness (the actual heating phase). This is followed by rapid withdrawal of the hot plate within 10 seconds, so that the plasticised surfaces do not have time to cool; next, the two parts are brought into immediate contact and pressed together (the welding phase).

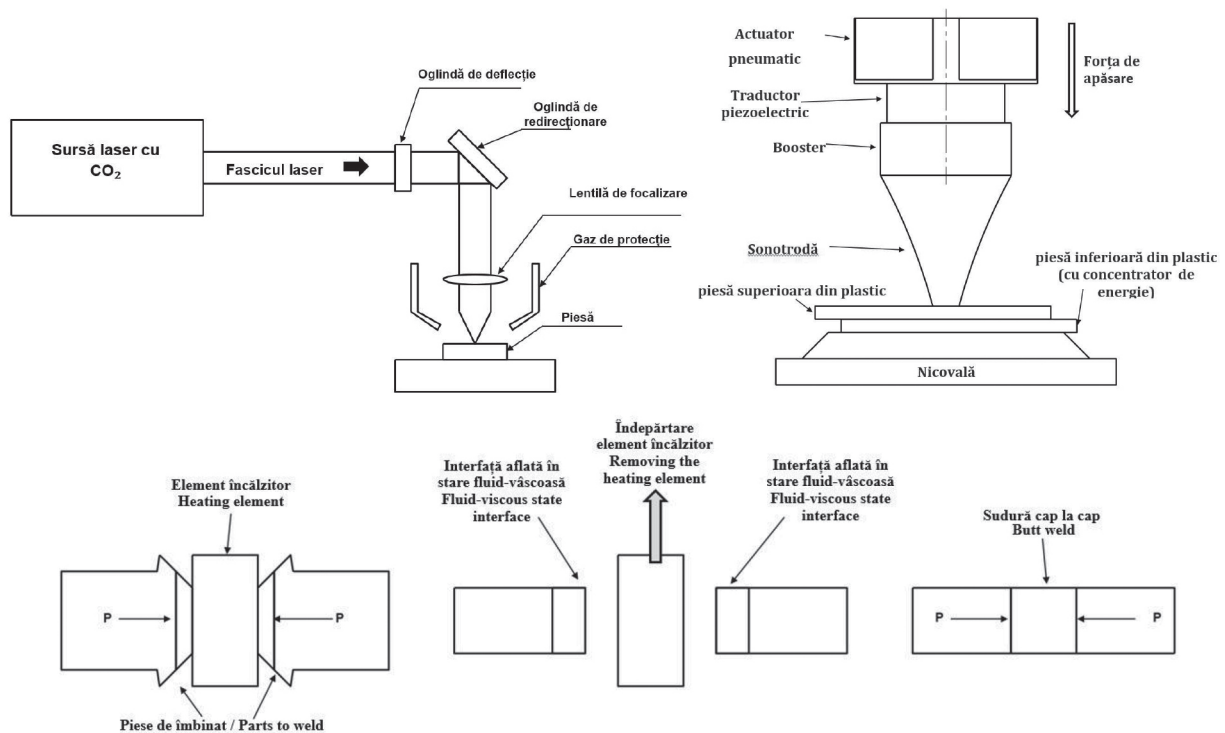


Figura 1. Reprezentări schematice ale unor metode de sudare: a – sudarea cu laser; b – sudarea cu ultrasunete; c – sudarea cu element încălzitor

Figure 1. Schematic representations of some welding methods: a – laser welding; b – ultrasonic welding; c – resistance welding

În ultima fază, presiunea este menținută într-un interval de timp calibrat, pe parcursul căruia lanțurile macromoleculare interdifuzează, iar ansamblul se răcește, solidificându-se cu coeziune moleculară maximă. Rezistența mecanică a îmbinării rezultă din corelația dintre cinci variabile de proces: temperatura elementului încălzitor, durata de încălzire, durata de topire, presiunea de aliniere și presiunea de sudare. Sub acțiunea presiunii de sudare, o parte a materialului topit este expulzată din zona de contact către exterior, formând o bavură inelară caracteristică (flash) – element inevitabil al procedurii, care este îndepărtat printr-o operație ulterioară de debavurare atunci când geometria ansamblului o impune.

In the final phase, pressure is maintained for a calibrated period, during which the macromolecular chains interdiffuse and the assembly cools, solidifying with maximum molecular cohesion. The mechanical strength of the joint results from the interaction among five process variables: the heating element temperature, heating time, melting time, alignment pressure, and welding pressure. Under the action of welding pressure, part of the molten material is expelled from the contact zone outward, forming a characteristic annular flash—an inevitable element of the process, which is removed through a subsequent deburring operation when the assembly's geometry requires it. The presence of the flash

Prezența bavurii nu reprezintă un defect, ci un indicator al faptului că materialul a atins efectiv starea de topitură și că presiunea de sudare a fost aplicată corect; absența ei indică o sudare incompletă.

3. Cadru metodologic de analiză comparativă

Fiecare metodă de sudare are un mecanism fundamental diferit. Aceasta se referă, desigur, la diverșii factori-cheie care stau la baza modului în care funcționează metoda, a modului său de operare și care îi determină valoarea finală [2]. Unele metode se bazează pe încălzirea prin frecare de înaltă frecvență pentru a declanșa difuzia moleculară, în timp ce altele utilizează energia fonică de înaltă densitate pentru un control precis al limitelor de granulație [10].

is not a defect, but an indicator that the material has effectively reached the molten state and that the welding pressure was correctly applied; its absence, on the contrary, indicates an incomplete weld.

3. Methodological Framework for Comparative Analysis

Each welding method has a fundamentally different mechanism. This of course refers to the various key factors that underlie how the method works, how it operates, and what its final value is [2]. Some methods rely on high-frequency frictional heating to trigger molecular diffusion, while others use high-density photonic energy for precise control of grain boundaries [10].

In addition, there are also methods based on the

Table 2. Compararea metodelor de sudare pe baza indicatorilor de performanță
Table 2. Comparison of welding methods based on performance indicators

Criteriu de evaluare <i>Evaluation criterion</i>	Sudarea cu ultrasunete <i>Ultrasonic welding (UW)</i>	Sudarea cu fascicul laser <i>Laser welding (LW)</i>	Sudarea cu element încălzitor <i>Hot plate welding (HPW)</i>
Specificații și compatibilitate ale materialelor <i>Material specifications and compatibility</i>	Excelentă pentru compozite și termoplaste amorphe, dar sensibilă la structurile semicristaline <i>Excellent for composites and amorphous thermoplastics, but sensitive to semi-crystalline structures</i>	Necesită o piesă transparentă (transmisivă) și una absorbantă la lungimea de undă a laserului <i>Requires one transparent (transmissive) part and one absorbent to the laser wavelength</i>	Permite îmbinarea materialelor diferite prin utilizarea unor amestecuri polimerice de compatibilizare <i>Allows joining dissimilar materials using compatibilizing polymer blends</i>
Constrângeri termice <i>Thermal constraints</i>	Procesul devine critic la valori peste temperatura de tranziție vitrosă (T _g); performanța este dictată de proprietățile matricei pe lungimea cordonului de sudură. <i>Critical above the glass transition temperature (T_g); performance is dictated by the matrix properties along the weld seam.</i>	Aportul termic excesiv poate provoca degradarea materialului, reducând rezistența la tracțiune. <i>Excessive heat input can cause material degradation, reducing tensile strength.</i>	Diferențele majore între punctele de topire pot fi depășite prin utilizarea unor amestecuri de materiale. <i>Major differences in melting points can be overcome by using blended materials.</i>
Rezistența mecanică a îmbinării <i>Mechanical strength of the joint</i>	Îmbinările din materiale semicristaline prezintă o rezistență la forfecare prin suprapunere (LSS) cu 22% mai mare decât cea a celor amorphe, la temperatura camerei. <i>Semi-crystalline joints exhibit a 22% higher lap shear strength (LSS) than amorphous ones at room temperature.</i>	Rezistența este atât de ridicată, încât ruperea se produce în materialul de bază, nu la interfața de sudare. <i>The strength is so high that failure occurs in the base material rather than at the interface.</i>	Rezistența mecanică crește semnificativ prin aderența la interfață și modificarea chimică a materialelor. <i>Significant increase in mechanical strength through chemical modification and interfacial adhesion</i>
Considerențe de fabricație & eficiență economică <i>Manufacturing considerations & cost-effectiveness</i>	Foarte eficientă și ușor de automatizat, generând economii de forță de muncă de peste 61% comparativ cu metodele de asamblare mecanică. <i>Highly efficient and easily automatable, generating labour savings of over 61% compared to mechanical assembly methods.</i>	Economică prin eliminarea componentelor suplimentare de fixare și ideală pentru micro sisteme datorită preciziei ridicate. <i>Cost-effective by eliminating the need for additional fastening components, and ideal for microsystems due to its high precision.</i>	Eficientă pentru producția la scară largă, permițând integrarea ca strat intermediar a componentelor obținute prin injecție bicomponentă. <i>Efficient for large-scale production, allowing the integration of two-component injection-moulded parts as an intermediate layer.</i>

În plus, există și metode bazate pe teoria reptăției macromoleculor în rețelele polimerice și pe interdifuzia lanțurilor polimerice prin conducție termică directă. Aceste diverse abordări pot fi implementate într-o varietate de condiții, însă există anumite situații în care o tehnică poate produce performanțe mai bune decât alta. Prin urmare, este foarte important pentru noi să înțelegem în profunzime fiecare tehnică de sudare, și anume sudarea cu ultrasunete, cu laser și cu element încălzitor.

4. Analiza sistemică a procedeelelor de sudare a materialelor plastice

Analiza sistemică reprezintă o abordare structurată pentru analizarea și optimizarea uneia sau mai multor probleme complexe, tratându-le ca pe un sistem format din componente care interacționează între ele, în loc să se examineze variabilele una câte una [11]. Acest studiu se va concentra pe implementarea unui model matematic destinat procesului decizional, capabil să țină cont simultan de mai multe criterii. Compatibilitatea materialelor, restricțiile termice, performanța îmbinării și considerentele de fabricație sunt criteriile care vor fi utilizate. Aceste criterii au niveluri diferite de importanță, iar datele utilizate în această lucrare sunt extrase din literatura de specialitate, cuprinzând articole și teze publicate anterior. Factorii de intrare care vor fi utilizați în acest studiu sunt caracteristicile materialelor, cum ar fi tipul de termoplast, structura (amorfă sau semicristalină), proprietățile termice, inclusiv temperatura de topire, precum și compatibilitatea materialelor. În plus, sunt determinați și parametrii de proces specifici fiecărei metode (ultrasonică, laser, element încălzitor), cum ar fi energia sau puterea de intrare, presiunea, durata de sudare și temperatura. Factorii de fabricație trebuie, de asemenea, incluși ca intrări, cum ar fi costurile de producție, consumul de energie, nivelurile de automatizare și durata ciclului. Toate aceste intrări sunt apoi corelate cu criteriile principale de compatibilitate a materialelor, constrângeri termice, performanța îmbinării și eficiența de fabricație, care vor fi ponderate folosind Fuzzy AHP. Parametrii de ieșire din acest studiu sunt rezistențele mecanice ale îmbinării (rezistența la tracțiune și rezistența la forfecare). Factorii perturbatori care pot provoca variații ale ieșirilor și care explică incertitudinea din sistem includ variațiile materialelor (diferențe între loturi, degradare sau conținut de umiditate), fluctuațiile condițiilor de mediu (temperatura și umiditatea

teoria de macromoleculor' reptation in polymer networks and on the interdiffusion of polymer chains by direct thermal conduction. These various approaches can be implemented under a variety of conditions, but there are certain situations where one technique can produce better performance than another. Therefore, it is very important for us to understand each welding technique in depth, namely ultrasonic, laser, and heater welding.

4. Systematic analysis of welding processes dedicated to plastics

Systematic analysis is a structured approach to analysing and optimising one or more complex problems by treating them as a system composed of interacting components, rather than examining the variables one by one [11].

This study will be focus on implementing a mathematical model for the decision-making process that simultaneously accounts for multiple criteria. Material compatibility, thermal constraints, joint performance, and manufacturing considerations will be the criteria used. These criteria have varying levels of importance, and the data used in this paper are drawn from the literature, including previously published articles and theses.

The input factors for this study are material characteristics, including the type of thermoplastic, structure (amorphous or semi-crystalline), thermal properties (such as melting temperature), and material compatibility. In addition, process parameters specific to each method (ultrasonic, laser, heating element) are determined, such as input energy or power, pressure, welding time, and temperature. Manufacturing factors must also be included as inputs, such as production costs, energy consumption, automation levels, and cycle time. All these inputs are then correlated with the main criteria of material compatibility, thermal constraints, joint performance, and manufacturing efficiency, which will be weighted using Fuzzy AHP. The output parameters of this study are the mechanical properties of the joint (tensile strength, shear strength). Disturbing factors that can cause variations in the outputs and that account for the uncertainty in the system include material variations (batch-to-batch differences, degradation, or moisture content), fluctuations in environmental conditions (ambient temperature and humidity), and variability in machinery and operations, such as power instability, misalignment, or

ambiantă) și variabilitatea mașinilor și a operațiunilor, cum ar fi instabilitatea energetică, nealinierea sau diferențele în ceea ce privește abilitățile operatorului. Factorii perturbatori sunt aspecte care întăresc justificarea utilizării abordării fuzzy, deoarece permit modelului să gestioneze ambiguitatea și incertitudinea într-un mod mai realist. Aceste date tind să fie subiective și incerte. Având în vedere această situație, Fuzzy AHP este cea mai potrivită metodă de aplicat. Acest lucru se datorează faptului că ambiguitatea din evaluări poate fi acomodată, asigurându-se că ponderile rezultate sunt mai reprezentative. AHP fuzzy în sine este o combinație între metoda AHP (Analytic Hierarchy Process) și numerele fuzzy; în termeni simpli, o comparație pereche este exprimată ca un număr fuzzy, se construiește o matrice de comparație fuzzy, iar metoda este utilizată pentru a obține ponderi de prioritate definite pe baza acestor informații fuzzy [11].

Sudarea cu laser, sudarea cu ultrasunete și sudarea cu element încălzitor funcționează fiecare pe baza unor principii teoretice diferite, ceea ce influențează în mod natural adecvarea lor pentru îmbinare, în special în cazul materialelor termoplastice. Sudarea cu ultrasunete utilizează vibrații mecanice de înaltă frecvență care generează căldură prin frecare la interfață, provocând topirea localizată fără încălzire externă. Acest lucru are ca rezultat o calitate optimă a sudurii prin agitarea băii de topire și îmbunătățirea microstructurii [12].

Sudarea cu laser utilizează lumina focalizată pentru a topi materialul la îmbinare. Acest lucru face ca procesul de sudare să fie mai rapid, mai precis și mai exact. Această metodă se bazează pe conducția termică și, uneori, pe penetrarea profundă, energia fiind furnizată sub formă de impulsuri sau de unde continue pentru a controla topirea și a minimiza deformarea [13].

Sudarea cu element încălzitor încălzește suprafața prin contactul cu acesta, topind materialul uniform înainte de a-l presa. Această metodă este simplă, dar durează mai mult și necesită un control precis al temperaturii și al presiunii pentru a evita defectele de sudură [14].

5. Alegerea unei metode de sudare

Pe baza aspectelor generale prezentate în diverse surse, se poate concluziona că, în ansamblu, sudarea cu ultrasunete tinde să fie superioară din punct de vedere al vitezei și al rezistenței. Sudarea cu laser prezintă avantaje în aplicațiile care necesită un nivel ridicat de precizie, în timp ce sudarea cu element încălzitor este încă considerată o metodă mai

diferențe în operator skill. Disturbing factors reinforce the justification for using the fuzzy approach, as they allow the model to handle ambiguity and uncertainty more realistically. This data tends to be subjective and uncertain. Given this situation, Fuzzy AHP is the most suitable method to apply. This is because the ambiguity in the evaluations can be accommodated, ensuring that the resulting weights are more representative. Fuzzy AHP itself is a combination of the AHP (Analytic Hierarchy Process) method and fuzzy numbers; in simple terms, a pairwise comparison is expressed as a fuzzy number, a fuzzy comparison matrix is constructed, and the method is used to obtain defined priority weights from this fuzzy information [11].

Laser welding, ultrasonic welding, and hot-melt welding are three distinct processes based on their underlying principles, and this influences their applicability to bonding, especially for thermoplastic materials. Ultrasonic welding is a welding process that generates heat at the contact point via friction, utilising high-frequency mechanical vibrations to cause local melting without external heat. This agitation of the molten pool and the improvement of the microstructure ensure optimal weld quality [12].

Laser welding is a welding process that uses a concentrated beam of light to melt the materials being connected. The process of welding becomes faster, more accurate, and more precise.

This process is highly dependent on heat conditions and occasionally on deep penetration. The energy is provided in pulses or continuous waves to control melting and reduce deformation [13].

Heating element welding is carried out by direct contact between the material surface and the heating element, ensuring uniform heating before the material is pressed to form a joint. Although the working principle is relatively simple, this method requires a longer process time and precise temperature and pressure control to avoid defects in the weld [14].

5. Choosing a welding method

Based on the general aspects presented in various sources, it can be concluded that, overall, ultrasonic welding tends to be superior in terms of speed and strength. Laser welding has advantages in applications requiring a high level of precision, while heating element welding is still considered a more manual method, thus requiring careful control of parameters and highly skilled operators. In addition,

Tabelul 3. Compararea proceselor de sudare și a parametrilor de funcționare
Table 3. Comparison of welding processes and operating parameters

Metodă Method	Putere Power, kW (C1)	Energie Energy, kJ (C2)	Durată proces Duration, s (C3)	Temperatură Temperature, ° C (C4)	Referințe References
Sudarea cu ultrasunete Ultrasonic Welding	Scăzută (1-4) Low	Joasă (2-20) Low	Proces Rapid (0.5-6s) Fast	Medie 180-260 Average	Singh Rana et al., 2023 [15] Zhi et al., 2022 [16] Sadeghi, Golzar, Akbari, & Karafi, 2024 [17] Yue et al., 2025 [18] Tao et al., 2019 [19] Zamani, Abedini, & Ghorbani, 2025 [20]
Sudarea cu fascicul laser Laser welding	Foarte mare (50-200) Very High	Joasă (1-10) Low	Foarte rapid (0.1-5s) Very fast	Medie 150-300 Average	Wu et al., 2021 [13] Jankus & Bendikienė, 2021 [21] Bastos et al., 2023 [22] Lakemeyer & Schöppner, 2019 [23] Gonçalves et al., 2021 [24]
Sudarea cu element încălzitor Hot plate welding	Medie (2-10) Average	Mare (10-100) High	lent (10-60s) Low	Foarte înaltă (200-400) Very high	Mosse et al., 2006[25] Steiner et al., 2024 [14] Yu et al., 2024 [26]

manuală, necesitând astfel un control atent al parametrilor și operatori cu înaltă calificare. În plus, sudarea cu element încălzitor este considerată mai puțin eficientă din punct de vedere al duratei de sudare.

Procesul decizional se bazează pe mai mulți factori, aspecte și abordări, cum ar fi cele cantitative și cele calitative. În acest studiu, luarea deciziilor multicriteriale (MCDM – Multi-Criteria Decision Making) va fi utilizată ca abordare decizională, prin combinarea mai multor metode, și anume Fuzzy AHP și Fuzzy TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), cu criterii stabilite pentru fiecare metodă de sudare [27].

Datele caracteristice pentru fiecare metodă de sudare au fost colectate din mai multe surse publicate anterior. Pe baza datelor tehnice extrase din aceste publicații, urmează o analiză comparativă a caracteristicilor celor trei metode de sudare a materialelor termoplastice. Selectarea metodelor de sudare s-a bazat pe patru criterii: putere (C1), energie (C2), durată de sudare (C3) și temperatură de sudare (C4). Utilizarea numerelor fuzzy triunghiulare (TFN) în etapele inițiale ale procesului decizional reprezintă, într-adevăr, un pas crucial. Din punct de vedere tehnic, această scală ajută la transformarea percepțiilor umane, care sunt de natură lingvistică (vagă), într-o reprezentare matematică mai măsurabilă [27].

În studiu, scala numerelor fuzzy triunghiulare variază de la 1 la 9. Fiecare valoare lingvistică este reprezentată de trei parametri (l, m, u), care denotă limita inferioară, punctul mediu și limita superioară a apartenenței fuzzy (tabelul 4).

heating element welding is considered less efficient in terms of welding time.

The decision-making process is based on several factors and approaches, including quantitative and qualitative methods. In this study, multi-criteria decision making MCDM (Multi-Criteria Decision Making) will be used as the decision-making approach by combining several methods, namely Fuzzy AHP și Fuzzy TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), with criteria established for each welding method [27].

Characteristic data for each welding method were collected from several previously published sources. Based on the technical data extracted from these publications, a comparative analysis of the characteristics of the three thermoplastic welding methods is presented below.

The selection of welding methods was based on four criteria: power (C1), energy (C2), welding time (C3), and welding temperature (C4). The use of triangular fuzzy numbers (TFNs) in the initial stages of the decision-making process is crucial.

From a technical perspective, this scale is used to transform human perception, which is linguistic (fuzzy), into a more measurable mathematical representation [27].

In this study, the triangular fuzzy number scale is 1 to 9. Each linguistic value is represented by three parameters (l, m, u), which are the lower limit, midpoint, and upper limit of fuzzy membership (table 4).

Tabelul 4. Scala lingvistică și numerele fuzzy triunghiulare (TFN) corespunzătoare
Table 4. The linguistic scale and the corresponding triangular fuzzy numbers (TFN)

Scala / Scale	TFN	Nivelul de importanță / Importance level
1	(1,1,2)	La fel de important / Equally important
3	(2,3,4)	Puțin mai important / Slightly more important
5	(4,5,6)	Mai important / More important
7	(6,7,8)	Mult mai important / Much more important

Pentru a menține coerența matricei de comparații perechi, reciprocele se calculează folosind formula [28]:

$$(l, m, n)^{-1} = (\frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l}) \tag{1}$$

Această etapă asigură că relațiile reciproce dintre criterii se încadrează în domeniul de aplicare al logicii fuzzy valide. Selectarea metodei optime de sudare se bazează pe patru criterii principale: puterea, energia, durata și temperatura de sudare. Următorul pas constă în întocmirea unei matrice de comparații pe perechi între criterii. Fiecare valoare de comparație este exprimată printr-un număr fuzzy triunghiular definit de trei parametri: limita inferioară (l), valoarea medie (m) și limita superioară (u). Pentru a compara metodele de sudare considerate au fost utilizate următoarele criterii: C1=Putere (beneficiu), C2=Energie (cost), C3=Durata (cost) și C4=Temperatură (cost).

To maintain the consistency of the pairwise comparison matrix, the reciprocity is calculated using the following equation [28]:

$$(l, m, n)^{-1} = (\frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l}) \tag{1}$$

This step ensures that the mutual relationships between the criteria fall within the scope of valid fuzzy logic. The selection of the optimal welding method is based on four main criteria: power, energy, duration and welding temperature. The next step is to create a pairwise comparison matrix between criteria. Each comparison value is expressed by a triangular fuzzy number defined by three parameters: the lower value (l), the middle value (m), and the upper value (u). The following criteria were used to compare the welding methods under consideration: C1 =Power (benefit), C2=Energy (cost), C3=Time (cost), and C4=Temperature (cost).

Tabelul 5. Scala lingvistică și numerele fuzzy triunghiulare (TFN) corespunzătoare
Table 5. The linguistic scale and the corresponding triangular fuzzy numbers (TFN)

Criterii / Criteria	C1 _L	C1 _M	C1 _U	C2 _L	C2 _M	C2 _U	C3 _L	C3 _M	C3 _U	C4 _L	C4 _M	C4 _U
C1	1	1	1	2	3	4	4	5	6	6	7	8
C2	0.250	0.33	0.5	1	1	1	2	3	4	4	5	6
C3	0.167	0.200	0.250	0.250	0.333	0.500	1	1	1	2	3	4
C4	0.125	0.143	0.167	0.167	0.200	0.250	0.250	0.333	0.500	1	1	1

Pe baza matricei de comparație din tabelul 5, următorul pas constă în calcularea mediei geometrice fuzzy (r_i) pentru fiecare criteriu [29]:

$$r_i = \sqrt[4]{(C1_L \cdot C2_L \cdot C3_L \cdot C4_L)} \tag{2}$$

Calculul se realizează separat pentru limitele inferioare, medii și superioare ale fiecărui rând. Valorile r_i se utilizează pentru derivarea ponderilor fuzzy (w_i), conform formulei standard Fuzzy AHP:

$$wL = \frac{rL}{SumrU'} ; wM = \frac{rM}{SumrM} ; wU = \frac{rU}{SumrL} \tag{3}$$

Defuzificarea se realizează prin metoda centrului ariei:

$$w_{crisp} = \frac{rL(wL + wM + wU)}{3} \tag{4}$$

Ponderile exacte (tranșante) se normalizează prin împărțirea la suma lor, obținându-se importanța relativă finală a fiecărui criteriu.

Based on the comparison matrix in table 5, the next step is to calculate the fuzzy geometric mean (r_i) for each criterion [29]:

$$r_i = \sqrt[4]{(C1_L \cdot C2_L \cdot C3_L \cdot C4_L)} \tag{2}$$

The calculation is performed separately for the lower, middle, and upper limits of each row. The r_i values are used to derive the fuzzy weights (w_i), according to the standard Fuzzy AHP formula:

$$wL = \frac{rL}{SumrU'} ; wM = \frac{rM}{SumrM} ; wU = \frac{rU}{SumrL} \tag{3}$$

Defuzzification is performed using the centre-of-area method:

$$w_{crisp} = \frac{rL(wL + wM + wU)}{3} \tag{4}$$

The crisp weights are normalised by dividing them by their sum, yielding the final relative importance of each criterion.

Acest proces se desfășoară pentru a se asigura că toate aspectele legate de incertitudine în evaluarea criteriilor au fost luate în considerare înainte de a se trece la etapa de clasificare folosind topologii fuzzy; aceste valori r_i servesc la reducerea ambiguității rezultatelor comparației dintre criterii. În plus, valorile r_i sunt utilizate ca bază principală pentru calcularea ponderilor fuzzy (w_i) înainte de procesul de defuzificare. Procesul de defuzificare este rezumat în tabelul 6. Procesul de defuzificare utilizează metoda centrului ariei pentru a converti valorile fuzzy în valori clare care pot fi interpretate direct. Acest pas este important pentru determinarea clasamentului importanței relative a fiecărui criteriu înainte de evaluarea metodelor alternative de sudare [29].

This process is carried out to ensure that all aspects of uncertainty in evaluating the criteria are taken into account before proceeding to the classification stage using fuzzy topologies; these r_i values help reduce the ambiguity of comparisons between criteria. In addition, the r_i values serve as the primary basis for calculating the fuzzy weights (w_i) before the defuzzification process. The defuzzification process is summarised in table 6. The defuzzification process uses the centre-of-area method to convert fuzzy values into clear values that can be interpreted directly. This step is important for determining the relative importance ranking of each criterion before evaluating alternative welding methods [29].

Tabelul 6. Ponderi fuzzy calculate și ponderi exacte- tranșante normalizate
Table 6. Calculated fuzzy weights and normalised crisp weights

Criterii Criteria	Media geometrică fuzzy (r_i) Fuzzy geometric mean			Pondere fuzzy (w_i) Fuzzy weight			Defuzzificare Defuzzification	Defuzzificare % Defuzzification %
	Inferior Lower	Mediu Medium	Superior Upper	wL	wM	wU		
C2	1.19	1.49	1.86	0.175	0.263	0.257	0.231	26.7%
C3	0.54	0.67	0.84	0.079	0.118	0.116	0.104	12.0%
C4	0.27	0.31	0.38	0.040	0.055	0.053	0.049	5.6%
Total	4.63	5.68	6.80					100%

Pe baza rezultatelor simulării de mai sus, s-a constatat că prioritatea principală este puterea, cu o valoare de 55,7%. Această cifră confirmă faptul că, în alegerea unei metode de sudare a materialelor termoplastice, puterea este un factor esențial care determină succesul procesului.

Combinăția dintre eficiența energetică și durata procesului are, de asemenea, o pondere semnificativă. Acest lucru indică faptul că aspectele economice și de productivitate joacă un rol important în alegerea unei metode de sudare. În același timp, variabila de control (temperatura) are cea mai mică pondere, întărind afirmația că temperatura este o variabilă dependentă, care se va adapta la parametrii optimizați ai puterii și ai duratei procesului.

Următorul pas este evaluarea alternativelor folosind metoda fuzzy TOPSIS [31,32], prin construirea unei matrice de decizie bazate pe parametrii tehnici ai celor trei metode de sudare pe care le comparăm: sudarea cu ultrasunete, sudarea cu laser și sudarea cu element încălzitor. Datele utilizate includ puterea (kW), energia (kJ), durata (s) și temperatura (°C), așa cum sunt prezentate în tabelul 7.

Based on the simulation results above, power is the top priority, at 55.7%. This figure confirms that, when choosing a method for welding thermoplastic materials, power capacity is a key factor determining the success of the process.

The combination of energy efficiency and time also carries significant weight. This indicates that economic and productivity considerations play an important role in selecting a welding method. At the same time, the control variable (temperature) has the lowest weight. This serves as justification, reinforcing the assertion that temperature is a dependent variable that will adapt to the appropriately optimised power and time parameters.

The next step is to evaluate the alternatives using the fuzzy TOPSIS method [31,32] by constructing a decision matrix based on the technical parameters of the three welding methods being compared: ultrasonic welding, laser welding, and hot-element welding.

The data used include power (kW), energy (kJ), time (s), and temperature (°C), as shown in table 7.

Tabelul 7. Date cantitative privind metodele alternative de sudare
Table 7. Quantitative data on alternative welding methods

Metodă Method	Putere (C1), Power kW	Energie (C2), Energy, kJ	Durată (C3), Duration, s	Temperatură (C4), Temperature, °C
Ultrasunete USW	2.5	11	3.25	220
Fascicul laser LBW	125	5.5	2.55	225
Element încălzitor HEW	6	55	35	300

Normalizare (rij)

Toți parametrii au unități de măsură diferite, astfel încât este necesar să se efectueze un proces de normalizare pentru a-i converti în valori fără dimensiuni, cuprinse între 0 și 1 [29]. Procesul de normalizare se realizează prin distingerea dintre criteriile de beneficiu și cele de cost. În lucrare, puterea (C1) și temperatura (C4) sunt definite ca criterii de beneficiu, iar valorile acestora sunt calculate pe baza raportului dintre valoarea respectivă și cea maximă (valoare/max).

Energia (C2) și durata (C3) sunt definite ca criterii de cost, unde eficiența este calculată pe baza raportului dintre valoarea minimă și valoarea reală (min/valoare). Avantajele criteriilor (putere și temperatură):

$$rij = \frac{Valoare}{valoarea\ max}, \quad (5)$$

Costul criteriilor (energie și durata procesului):

$$rij = \frac{Valoare\ Min}{Valoare}, \quad (6)$$

Normalizează puterea = (max = 125 kW)

Normalizează energia = (min = 5,5 kJ)

Normalizează durata = (min = 2,55 s)

Normalizează temperatura = (max = 300 °C).

Normalisation (rij)

All parameters have different units of measurement, so it is necessary to normalise them to dimensionless values between 0 and 1 [29]. The normalisation process is carried out by distinguishing between benefit and cost criteria. In this paper, power (C1) and temperature (C4) are defined as benefit criteria, with their values calculated as the ratio of each value to the maximum (value/max).

Energy (C2) and time (C3) are defined as cost criteria, where efficiency is calculated based on the ratio of the minimum value to the actual value (min/value).

Advantages of the criteria (power and temperature):

$$rij = \frac{Valoare}{valoarea\ max}, \quad (5)$$

Cost of the criteria (energy and time):

$$rij = \frac{Valoare\ Min}{Valoare}, \quad (6)$$

Normalize power = (max = 125 kW)

Normalize energy = (min = 5.5 kJ)

Normalize time = (min = 2.55 s)

Normalize temperature = (max = 300 °C).

Tabelul 8. Matrice de decizie fuzzy normalizată ponderată
Table 8. Weighted normalised fuzzy decision matrix

Alternativă Alternative	Putere Power (C1)	Energie Energy (C2)	Durată Duration (C3)	Temperatură Temperature (C4)
Pondere Weight	0.5571	0.2665	0.1203	0.0560
Ultrasunete USW	0.0111	0.1333	0.0944	0.0411
Fascicul laser LBW	0.5571	0.2665	0.1203	0.0420
Element încălzitor HEW	0.0267	0.0267	0.0089	0.0560

Tehnica de ierarhizare a preferințelor pe baza similitudinii cu soluția ideală (TOPSIS) începe cu normalizarea datelor inițiale, cu o singură variabilă, și anume kW, kJ, secunde și °C, pe o scară fără dimensiuni, cuprinsă între 0 și 1. Scopul acestei normalizări este de a compara criteriile, astfel încât fiecare parametru să poată fi analizat corespunzător. Puterea (C1), energia (C2), durata (C3) și temperatura (C4) sunt cele patru criterii principale utilizate în acest studiu. Valorile ponderale corespunzătoare sunt 0,5571; 0,2665; 0,1203; 0,0560, ceea ce indică importanța relativă a fiecărui criteriu în procesul de luare a deciziilor. În continuare, criteriile

The Technique for Ordering Preferences by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS) begins by normalising the initial data, including variables such as kW, kJ, seconds, and °C, to a dimensionless scale from 0 to 1. The purpose of this normalisation is to compare the criteria so that each parameter can be properly analysed. Power (C1), energy (C2), time (C3), and temperature (C4) are the four main criteria used in this study. The corresponding weight values are 0.5571; 0.2665; 0.1203; 0.0560 indicating the relative importance of each criterion in the decision-making process. Next, the criteria are di-

sunt împărțite în două categorii: cost și beneficiu. Criteriile putere (C1) și temperatură (C4) se încadrează în categoria beneficiilor, unde valorile mai mari indică o performanță mai bună. În schimb, energia (C2) și durata (C3) se încadrează în categoria costurilor, astfel încât valori mai mici indică o eficiență mai mare.

Următorul pas este calcularea distanței față de soluția ideală. În această etapă, se va determina cât de mult se abate fiecare metodă de la condiția ideală către condiția neideală. Pentru a determina această distanță, se va defini mai întâi soluția ideală pozitivă (A*) și soluția ideală negativă (A-). Soluția ideală pozitivă constă în valorile de ponderare 0,5571; 0,2665; 0,1203; 0,0560, în timp ce soluția ideală negativă (A-) constă în 0, 0, 0 și 0.

Următorul pas este calcularea distanței euclidiene (metoda vârfurilor), unde distanța față de soluția pozitivă se calculează folosind formula [30].

Distanța pozitivă este:

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - Weight_j)^2}. \quad (7)$$

Tabelul 9. Distanța față de soluția ideală pozitivă fuzzy (FPIS)

Table 9. Distance from the fuzzy positive ideal solution (FPIS)

Sudarea cu ultrasunete USW	0.29807	0.01776	0.00067	0.00022
Sudarea cu fascicul laser LBW	0	0	0	0.000196
Sudarea cu element încălzitor HEW	0.28128	0.05753	0.01244	0

Distanța negativă este:

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - 0)^2}. \quad (8)$$

Tabelul 10. Distanța față de soluția ideală negativă fuzzy (FNIS)

Table 10. Distance from the fuzzy negative ideal solution (FNIS)

Sudarea cu ultrasunete USW	0.000124	0.01776	0.00891	0.001686
Sudarea cu fascicul laser LBW	0.31036	0.077102	0.01447	0.001764
Sudarea cu element încălzitor HEW	0.000715	0.000710	0.0000768	0.003136

După ce se obține totalul pentru d_i^* și d_i^- pentru fiecare metodă, se calculează coeficienții de apropiere CC_i :

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-}. \quad (9)$$

Tabelul 11. Coeficienți de apropiere și clasamentul final al metodelor de sudare

Table 11. Proximity coefficients and final ranking of welding methods

	Distanță pozitivă d_i^*	Distanță negativă d_i^-	CC_i	Clasament
Sudarea cu ultrasunete USW	0.5628	0.1687	0.2307	2
Sudarea cu fascicul laser LBW	0.0140	0.6306	0.9783	1
Sudarea cu element încălzitor HEW	0.5927	0.0681	0.01031	3

Folosind abordarea care s-a aplicat fiecărei metode de sudare, s-a obținut o evaluare obiectivă bazată pe contribuția mai multor criterii prestabilite

vided into two categories: cost and benefit. The criteria of power (C1) and temperature (C4) fall into the benefit category, where higher values indicate better performance. In contrast, energy (C2) and time (C3) fall into the cost category, so lower values indicate greater efficiency.

The next step is to calculate the distance from the ideal solution. In this step, it will determine how much each method deviates from the ideal condition toward the non-ideal condition. To determine this distance, first it was defined the positive ideal solution (A*) and the negative ideal solution (A-). The positive ideal solution consists of weight values of 0.5571; 0.2665; 0.1203; 0.0560, while the negative ideal solution (A-) consists of 0, 0, 0, and 0.

The next step is to calculate the Euclidean distance (vertex method), where the distance from the positive solution is calculated using formula [30].

The positive distance is:

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - Weight_j)^2}. \quad (7)$$

The negative distance is:

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - 0)^2}. \quad (8)$$

Once it was obtained the sum for d_i^* and d_i^- for each method, the CC_i approximation coefficients are calculated:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-}. \quad (9)$$

Using the approach applied to each welding method, it was obtained an objective evaluation based on the contribution of several predefined criteria to

la performanța generală. Rezultatele normalizării și ponderării generează o matrice de decizie normalizată și ponderată care ilustrează performanța relativă a fiecărei alternative.

Rezultatele, bazate pe date, indică faptul că sudarea cu laser este metoda care îndeplinește cel mai bine criteriile, în special atunci când se acordă prioritate puterii și eficienței energetice. În ceea ce privește indicele de proximitate CCI, sudarea cu element încălzitor a primit cel mai mic scor din cauza abaterii sale semnificative de la soluția ideală; acest lucru se datorează faptului că durata procesării este mult mai lungă decât în cazul celorlalte două metode de sudare.

6. Rezultate și discuții

Rezultatele integrării metodelor AHP fuzzy și TOPSIS indică faptul că puterea are cea mai mare influență asupra alegerii metodei de sudare termoplastică, cu o pondere de aproximativ 55,7%, urmată de energie (26,7%), durata procesului (12,0%) și temperatură (5,6%). Această distribuție a ponderilor confirmă faptul că, la scara de producție, capacitatea de putere a mașinii și eficiența energetică sunt factori-cheie pentru succesul tehnic și economic.

Consistența rezultatelor din matricea de comparație AHP fuzzy confirmă faptul că nevoile operaționale industriale acordă prioritate densității energetice ridicate pentru a obține o pătrundere optimă a sudurii.

Pe baza rezultatelor analizei TOPSIS realizate s-a constatat că sudarea cu fascicul laser (SFL) este cea mai eficientă metodă, cu un indice de proximitate relativă (CCI) de 0,9783. În plus, performanța acestui proces de sudare, în ceea ce privește puterea de 125 kW și durata de doar 2,55 secunde, demonstrează că sudarea cu laser este cea mai potrivită metodă pentru termoplastice. Pe locul al doilea se află sudarea cu ultrasunete, cu un indice de proximitate CCI de 0,2307; deși durata ciclului de sudare este foarte mică, densitatea sa de putere este mai mică decât la sudarea cu laser, dar oferă totuși o eficiență energetică mai bună decât metodele convenționale. Pe ultimul loc în ierarhie se află metoda de sudare cu element încălzitor, cu un indice de proximitate CCI de 0,1031. Acest lucru se datorează duratei foarte lungi a ciclului, de 35 de secunde, și consumului ridicat de energie, de 55 kJ. Deși metoda cu element încălzitor obține un scor ridicat la criteriul temperaturii, aceasta nu poate fi încă considerată o metodă de sudare ideală în comparație cu alte metode.

Discuția din această lucrare servește drept dovadă și

overall performance. The results of normalisation and weighting generate a normalised and weighted decision matrix that illustrates the relative performance of each alternative.

The data-driven results indicate that laser welding is the method that best meets the criteria, particularly when prioritising power and energy efficiency.

Regarding the CCI proximity index, resistance welding received the lowest score due to a significant deviation from the ideal solution, as its processing time is much longer than that of the other two welding methods.

6. Results and Discussion

The results of integrating the fuzzy AHP and TOPSIS methods indicate that power has the greatest influence on the choice of thermoplastic welding method, with a weight of approximately (55.7%), followed by energy (26.7%), time (12.0%), and temperature (5.6%). This distribution of weights confirms that, at the production scale, the machine's power capacity and energy efficiency are key factors for technical and economic success.

The consistency of the results from the fuzzy AHP comparison matrix confirms that industrial operational needs prioritise high energy density to achieve optimal weld penetration.

Based on the results of the TOPSIS analysis that was conducted, laser beam welding (LBW) was found to be the most efficient method, with a relative proximity index (CCI) of 0.9783.

Furthermore, its performance at 125 kW, with a welding time of just 2.55 seconds, supports the conclusion that laser welding is the best welding method. In second place is ultrasonic welding, with a CCI proximity index of 0.2307; although the cycle time for ultrasonic welding is very fast, its power density is lower compared to laser welding, but it still offers better energy efficiency than conventional methods. In last place in the ranking is the heating element welding method, with a CCI proximity index of 0.1031.

This is due to the very long cycle time of 35 seconds and the high energy consumption of 55 kJ. Although the heating element method scores highly on the temperature criterion, it cannot yet be classified as an ideal welding method compared with other methods.

The discussion in this paper provides evidence and reinforces the assertion that the choice of a welding

întărește afirmația că alegerea unei metode de sudare nu se poate baza exclusiv pe un singur aspect tehnic, ci trebuie să se bazeze pe o abordare structurată și clară, bazată pe mai multe criterii. În plus, utilizarea metodei fuzzy în această lucrare oferă cercetătorilor flexibilitatea de a ajusta intervalul datelor experimentale; se speră că această lucrare poate oferi o prezență cât mai exactă a condițiilor din lumea reală.

7. Concluzii

Acest studiu a integrat cu succes procesul ierarhic analitic fuzzy (F-AHP) și metoda TOPSIS pentru a evalua și a alege cea mai bună metodă de prelucrare a materialelor termoplastice, pe baza unor criterii experimentale. Pe baza rezultatelor analizei noastre, se pot trage concluziile:

1. Criterii de prioritate - conform metodei AHP fuzzy, puterea este cel mai important criteriu de evaluare, cu o pondere de aproximativ 55,7%, urmată de energie (26,7%), durata de sudare (12,0%) și temperatura (5,6%). Aceste date indică faptul că la selectarea tehnologiei de sudare celei mai potrivite pentru nevoile specifice, capacitățile aparatului de sudat și eficiența energetică sunt factorii cei mai importanți, în comparație cu temperatura de funcționare.

2. Clasificarea metodelor de sudare – pe baza proximității relative a scorurilor (CCi), sudarea cu fascicul laser (SFL) este identificată ca fiind cea mai bună metodă de sudare, cu cel mai mare scor de 0,978. Acest lucru se datorează eficienței ridicate a duratei ciclului de sudare și densității de putere ridicate; sudarea cu laser depășește alte metode, în timp ce sudarea cu element încălzitor (SEÎ) este dezavantajată din cauza procesului îndelungat și a consumului ridicat de energie; sudarea cu ultrasunete (SU) oferă o îmbunătățire dublă ca alternativă eficientă din punct de vedere energetic.

3. Aplicarea logicii fuzzy în acest model servește la ajustarea intervalului de date experimentale și a incertitudinii (cum ar fi variațiile în kW și în secunde), frecvent întâlnite în practicile de fabricație. Integrarea F-AHP și F-TOPSIS oferă o metodă obiectivă, măsurabilă și aplicabilă pentru optimizarea parametrilor procesului de sudare pe alte materiale termoplastice.

Analiza se va relua, considerându-se criteriile calitative importante, cum sunt compatibilitatea cu materialele, generarea de particule (critică în domeniul medical), costul de investiție în echipamente și aplicabilitatea geometrică.

method cannot be based solely on a single technical aspect but must be grounded in a structured, clear approach informed by multiple criteria.

Furthermore, the use of the fuzzy method in this paper provides researchers with the flexibility to adjust the range of experimental data; it is hoped that this paper can offer an accurate representation of real-world conditions.

7. Conclusions

This study successfully integrated the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (F-AHP) and TOPSIS to evaluate and select the best method for processing thermoplastic materials using experimental criteria. Based on the results of our analysis, the following conclusions can be drawn:

1. Priority Criteria - According to the fuzzy AHP method, power is the most important evaluation criterion, with a weight of approximately (55.7%), followed by energy (26.7%), welding time (12.0%), and temperature (5.6%). These data indicate that when selecting the welding technology best suited to specific needs, the welding machine's capabilities and energy efficiency are the most important factors, compared with operating temperature.

2. Classification of welding methods based on the relative proximity of the scores (CCi): laser beam welding (LBW) is identified as the best welding method, with the highest score of 0,978. This is due to its high cycle-time efficiency and high power density; laser welding outperforms other methods, while resistance welding (RW) is at a disadvantage due to the lengthy process and high energy consumption; ultrasonic welding (UW) offers a dual improvement as an energy-efficient alternative.

3. Application of fuzzy logic in this model serves to account for the range of experimental data and uncertainty (such as variations in kW and seconds) that are commonly encountered in manufacturing practices. The integration of F-AHP and F-TOPSIS provides an objective, measurable, and applicable method for optimising welding process parameters on other thermoplastic materials.

The analysis will be revisited, taking into account important qualitative criteria such as material compatibility, particle generation (critical in the medical field), equipment investment cost, and geometric applicability.

Bibliografie/References

- [1] Bhudolia, S. K., Gohel, G., Leong, K. F., & Islam, A. 2020. Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: A review. *Materials*, 13(6), 1284
- [2] Troughton, M. J. 2008. *Handbook of plastics joining: A practical guide*. William Andrew Publishing
- [3] Reis, J. P., de Moura, M., & Samborski, S. 2020. Thermoplastic composites and their promising applications in joining and repair of composite structures: A review. *Materials*, 13(24), 5832
- [4] McGrath, G., Jones, I. A., Hilton, P. A., Kellar, E. J. C., Taylor, A., & Sallavanti, P. 2001. New advances in plastics joining for high speed production (SAE Technical Paper 2001-01-3398). SAE International
- [5] Plastic Pipe Institute. 2008. *Handbook of polyethylene pipe*. PPI, Irving, TX
- [6] Wu, C. Y., Benatar, A., & Mokhtarzadeh, A. 2012. Comparison of ultrasonic welding and vibration welding of thermoplastic polyolefin. *Welding in the World*, 56, 69–75
- [7] Villegas, I. F., Moser, L., Yousefpour, A., Mitschang, P., & Bersee, H. E. N. 2013. Process and performance evaluation of ultrasonic, induction and resistance welding of advanced thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26(8), 1007–1024
- [8] Zhao, T., Palardy, G., Villegas, I. F., Rans, C. D., Martinez, M., & Benedictus, R. 2017. Mechanical behaviour of thermoplastic composites spot-welded and mechanically fastened joints: A preliminary comparison. *Composites Part B: Engineering*, 112, 224–234
- [9] Jafarian, M., & Vahdat, S. E. 2012. A fuzzy multi-attribute approach to select the welding process at high-pressure vessel manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 14(3), 250–256
- [10] Politecnico di Torino. 2026. Webthesis: Laser welding doctoral dissertations database
- [11] Liu, Y., Eckert, C. M., & Earl, C. 2020. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*, 161, 113738
- [12] Koutras, N., Benedictus, R., & Villegas, I. F. 2021. Thermal effects on the performance of ultrasonically welded CF/PPS joints and their correlation to the degree of crystallinity at the weldline. *Composites Part C: Open Access*, 4, 100093
- [13] Wu, J., Lu, S., Wang, H. J., Wang, Y., Xia, F. B., & Jin-Wang, B. 2021. A review on laser transmission welding of thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 2093–2109
- [14] Mathiyazhagan, K., Singh, K. K., & Sivabharathi, V. 2020. Modeling the interrelationship between the parameters for improving weld strength in plastic hot plate welding: A DEMATEL approach. *Journal of Elastomers and Plastics*, 52, 117–141.
- [15] Singh Rana, R., Singh, I., & Sharma, A. K. 2023. Ultrasonic welding of printed/molded sustainable polymer specimens with energy directors. *Ultrasonics*, 134, 107078
- [16] Zhi, Q., Li, Y., Shu, P., Tan, X., Tan, C., & Liu, Z. 2022. Double-Pulse Ultrasonic Welding of Carbon-Fiber-Reinforced Polyamide 66 Composite. *Polymers*, 14(4), 714
- [17] Sadeghi, M., Golzar, M., Akbari, D., & Karafi, M. R. 2024. Ultrasonic welding of composite laminate GF/PA6: Weldability and weld quality by current and strength. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 44(15-16), 951-965
- [18] Yue, D. S., Liu, J. M., Quan, D., Wang, X. M., Pan, J. Y., & Zhao, G. Q. 2025. Ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, 297, 112314
- [19] Tao, W., Su, X., Wang, H., Zhang, Z., Li, H., & Chen, J. 2019. Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 196–202
- [20] Zamani, M. A., Abedini, R., & Ghorbani, H. 2025. Ultrasonic welding mapping. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 39(3), 1072
- [21] Jankus, S. M., & Bendikienė, R. 2021. The effect of laser beam transmission on the thermoplastic composite joint formation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1140, 012057
- [22] Bastos, L., Alves, M., Sousa, B., Vilela, A., Rietter, L., Duarte, F., Carneiro, F., & Żmijewska-Rocha, A. (2023). Transmission laser welding of thermoplastics: influence of welding parameters and rib dimensions on the strength of welded joints. *Journal of Advanced Joining Processes*, 8, 100173
- [23] Lakemeyer, P., & Schöppner, V. 2019. Simulation-based investigation on the temperature influence in laser transmission welding of thermoplastics. *Welding in the World*, 63, 221–228
- [24] Gonçalves, L. F. F., Duarte, F. M., Martins, C. I., & Paiva, M. C. 2021. Laser welding of thermoplastics: an overview on lasers, materials, processes and quality. *Infrared Physics & Technology*, 119, 103931
- [25] Mosse, L., Compston, P., Cantwell, W. J., Cardew-Hall, M., & Kalyanasundaram, S. 2006. Stamp forming of polypropylene based fibre-metal laminates: The effect of process variables on formability. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(2), 163-168
- [26] Steiner, G., Kuttner, D., Lochner, H., et al. (2024). Optimization of hot gas welding of hybrid thermoplastic-thermoset composites using Taguchi method. *Applied Composite Materials*, 31(3), 775–797
- [27] Yu, D.-W., Qing, X.-T., Lin, H.-Y., Yang, J., Yang, J.-C., & Wang, X.-J. (2024). Response Surface Methodology Optimization of Resistance Welding Process for Unidirectional Carbon Fiber/PPS Composites. *Materials*, 17, 2176
- [28] Chen, C. T. 2000. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1–9
- [29] Mahad, N. F., Yusof, N. M., & Ismail, N. F. 2019. The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to

- solve multi-criteria decision making (MCDM) problems. Journal of Physics: Conference Series, 1358, 012081
- [30] Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. Fuzzy Sets and Systems, 17(3), 233–247
- [31] Fei, L., & Deng, Y. 2020. Multi-criteria decision making in Pythagorean fuzzy environment. Applied Intelligence, 50, 537–561.
- [32] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications. Springer, Berlin, Heidelberg

Pentru citare:

Hairil, A., Coteață, M., Dodun, O., Boca, M., Crăciun, E., Slătineanu, L. (2026). AI Applications in Welding Engineering, Sudura, nr. 2, year XXXVI, 4-23, <https://doi.org/10.70652/sud.2026.2.1>



Manifestări științifice și tehnice 2026

Conferințe

Conferința	Data	Locația	
A 79-a Adunare Anuală și Conferința Internațională a IIW	12-17.07.2026	Salzburg, Austria	www.iiw2026.com
DVS Congress 2026	15-17.09.2026	Erlangen, Germania	https://www.dvs-events.com/de/events/DVS26
34 th International Conference WELDING 2026	15-17.10.2026	Srebrno Jezero, Serbia	www.duzs.org.rs
Conferința anuală ASR a coordonatorilor sudării	22-23.10.2026	Sibiu, România	https://www.dvs-events.com/de/events/DVS26

Târguri și expoziții

Acțiunea	Data	Locația	
International Trade Fair for the Welding Industry	01-03.09.2026	Varșovia, Polonia	https://weldexpopoland.com/en/
WELDING BRNO 2026	06-09.10.2026	Brno, Republica Cehă	https://www.bvv.cz/en/welding
EuroBLECH 2026	20-23.10.2026	Hanovra, Germania	https://www.euroblech.com/



Adunarea Anuală a Institutului Internațional de Sudură, 12-17.07.2026

Cea de-a 79-a Adunare Anuală a Institutului Internațional de Sudură (IIW) se va desfășura la Salzburg (Austria) în perioada 12-17.07.2026.

Evenimentul, la care se așteaptă participarea unor specialiști din 52 țări, va cuprinde Adunarea generală a IIW, ședințele celor 19 comitete tehnice ale IIW și ale grupelor IAB, Conferința internațională IIW „Metal Additive Manufacturing – Materials, Processes and Component Performance”, simpozionul IIW despre fabricație inteligentă „Scalable and Applicable AI Empowered Advancements”, expoziția digitală de artă sudată, precum și o serie de mese rotunde cu caracter industrial și vizite tehnice.

Persoanele interesate pot obține informații la adresa <https://iiw2026.com/>.