

UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE

“VICTOR BABEȘ” DIN TIMISOARA

FACULTATEA DE MEDICINĂ DENTARĂ

Departamentul I

STOIAN CAIUS



TEZĂ DE DOCTORAT

**ASPECTE ALE INTERACȚIUNII METALO-METALICE ȘI METALO-
CERAMICE ÎN URMA APLICĂRII UNOR PROCEDEE
TEHNOLOGICE MODERNE**

R E Z U M A T

Conducător de doctorat:

PROF. Dr. Habil. ROMÎNU MIHAI

Timișoara

2024

INTRODUCERE

Domeniul stomatologiei proteze a văzut o evoluție remarcabilă în materiale, echipamente și tehnici în ultimele decenii, atât metodele tradiționale, cât și cele moderne găsind sinergie. În timp ce tehnicile depășite au reapărut în asociere cu cele contemporane, îmbunătățirea continuă rămâne norma. Biocompatibilitatea este o preocupare cheie pentru practicieni, iar combinarea diferitelor materiale oferă atât rezistență mecanică, cât și estetică naturală în restaurările protetice.

Metale, inclusiv aliaje de metale nobile și nenobile, au suferit o evoluție semnificativă, nu numai în compoziție, ci și datorită progreselor tehnologice. Aurul și aliajele sale au fost odată predominante în protetica fixă, dar au fost înlocuite treptat de aliaje cu conținut redus de aur și legături de metale neprețioase, în mare parte din considerente economice. Titaniul, introdus în stomatologie în 1968, se mândrește cu proprietăți excepționale, cum ar fi biocompatibilitatea, rezistența la coroziune, densitate scăzută și rezistență mecanică excelentă. Este utilizat pe scară largă în proteze fixe și mobilizabile, proteze implantologice, stomatologie, ortodontică și chirurgie orală.

Procesul tradițional de a crea proteze cu infrastructură metalică implică topire și turnare, consumatoare de timp, care este predispusă la erori. Cu toate acestea, noi tehnologii, cum ar fi procesele de galvanizare, electroerozie, sinterizare, CAD/CAM/CAE și SLS-SLM au apărut ca alternative, reducând etapele de lucru și minimizând erorile tehnologice.

Provocările în adaptarea protezelor de titan, în special în ceea ce privește modificarea axei pe bonturi, pot fi abordate folosind tehnici de corecție cu laser, reducând în mod semnificativ timpul de adaptare. Fabricarea restaurărilor protetice fixe din mai multe piese necesită obținerea elementelor de agregare separat prin procese de topire și turnare și consolidare ulterioară. Procesele de solidaritate au evoluat de la sudarea în lot la tehnici moderne, cum ar fi sudarea cu laser, sudarea microplasmatică și sudarea prin presiune electrică cu sistemul de cristalizare.

Aceste proceduri moderne de sudare necesită echipamente și expertiză suplimentară. Experimentarea se concentrează pe optimizarea parametrilor de sudură pentru aliaje și modele specifice. Evaluarea calității sudării prin metode experimentale, atât distructive cât și nedistructive, este esențială pentru a înțelege comportamentul pieselor îmbinate in vitro și in vivo.

În concluzie, evoluția materialelor, echipamentelor și tehnicilor în stomatologia protetică a fost remarcabilă. În timp ce tehnologiile moderne au simplificat procesele, unele metode tradiționale au găsit o relevanță reînnoită. Biocompatibilitatea rămâne o prioritate, iar combinația de materiale oferă atât rezistență mecanică, cât și estetică naturală în restaurările protetice. Experimentarea în curs de desfășurare vizează optimizarea parametrilor de sudură și evaluarea calității sudurilor pentru îmbunătățirea performanței și longevității dispozitivelor de proteze.

PARTEA GENERALĂ

1. Generalități SLS/SLM

De peste un secol, aliajele de turnare au jucat un rol vital în tratamente protetice, facilitat de invenția lui Taggart a mașinii centrifugale de turnat în 1907, alături de tehnica de ceară pierdută. Inițial, aliajele de aur au fost favorizate pentru biocompatibilitatea și ușurința de utilizare, dar pe măsură ce prețurile aurului au crescut, atenția s-a mutat către alternative mai accesibile, cum ar fi Au-Ag-Pd și aliaje Pd-Ag. Apariția ulterioară a aliajelor dentare non-

prețioase, inclusiv aliajele Fe-Cr-Ni, Ni-Cr, Co-Cr și Ti, a abordat preocupările legate de costuri. În prezent, aliajele Co-Cr, datorită biocompatibilității lor, rezistenței ridicate la uzură, și rezistența la coroziune, sunt utilizate pe scară largă în diverse aplicații dentare.

Cu toate acestea, duritatea ridicată a aliajelor Co-Cr prezintă provocări în tehnicile tradiționale de turnare, ceea ce duce la explorarea metodelor alternative de fabricație. Cererea de tratamente mai rapide și mai predictibile a determinat adoptarea tehnicilor de proiectare asistată de calculator și de fabricație asistată cu calculator (CAD/CAM), atât subtractive, cât și aditive. Aceste tehnici permit fabricarea de aparate de proteze cu o mai mare eficiență și precizie.

CAD/CAM substractiv implică frezarea mecanică a blocurilor de material pentru a obține geometria dorită, în timp ce CAD/CAM aditiv, sau printarea 3D, construiește dispozitive protetice strat cu strat. Printre tehnicile aditive, metodele de fuziune a pulberii de pulbere (PBF) precum sinterizarea selectivă cu laser (SLS), topirea selectivă cu laser (SLM) și topirea cu fascicul de electroni (EBM) sunt utilizate frecvent în aplicațiile dentare.

SLS utilizează un laser de mare putere pentru a fuziona particulele mici de material sub formă de pulbere, permițând crearea de obiecte cu o densitate de aproximativ 70%. Pe de altă parte, SLM implică topirea completă a materialului de pulbere brută pentru a obține piese complet dense (densitate >99%). EBM, similar cu SLM, folosește un fascicul de electroni concentrat pentru a topi pulberea metalică într-un mediu de vid.

Deși SLM este cea mai utilizată tehnică de printare 3D pentru prelucrarea metalelor în stomatologie, are dezavantaje precum calitatea slabă a suprafeței și porozitatea. Tratamentele post-procesare, cum ar fi lustruirea și tratamentul termic, sunt adesea necesare pentru a depăși aceste probleme. În ciuda acestor dezavantaje, SLM oferă avantaje față de metodele tradiționale, inclusiv timpi de producție mai rapizi, costuri mai mici și proprietăți mecanice superioare.

Studiile care compară infrastructurile produse prin SLM cu cele obținute prin metode tradiționale de turnare au arătat că probele SLM prezintă granule fine și compuși intermetalici dispersați omogen, ceea ce duce la proprietăți mecanice mai bune și o rezistență la legătură comparabilă cu straturile ceramice. Cu toate acestea, sunt necesare cercetări suplimentare pentru a înțelege pe deplin efectele tehnicii SLM asupra diferitelor proprietăți ale aliajelor dentare.

În plus, efectele arderilor repetate în timpul aplicării ceramicii pe substructurile metalice produse prin SLM nu sunt studiate extensiv. În timp ce unele studii sugerează un impact negativ asupra adaptării pasive, altele raportează o acuratețe marginală și internă comparabilă cu procedurile de producție convenționale.

Scopul acestui studiu este de a evalua modificarea structurii cristaline a substructurii metalice a unui aliaj dentar SLM Co-Cr-W placat cu ceramică, în urma arderilor repetate ale straturilor ceramice, efectuate la temperaturi ce depășesc 900°C, prin tehnica difracției de raze X (XRD). Au fost utilizate două tipuri diferite de ceramică de placare, cu parametri de ardere similari, pentru a determina dacă există vreo influență asupra comportamentului aliajului.

1.1 Tehnologia SLS în medicina dentară

Sinterizarea Selectivă cu Laser (SLS) este o tehnică de fabricație aditivă care utilizează lasere de mare putere pentru a fuziona selectiv materiale pulverizate, strat cu strat, pentru a crea obiecte tridimensionale (3D). Dezvoltată inițial pentru prototipare rapidă și aplicații de fabricație industrială, tehnologia SLS a câștigat o tracțiune semnificativă în medicina dentară datorită capacității sale de a produce proteze și aparate dentare personalizate, de înaltă precizie. Această prezentare cuprinzătoare își propune să exploreze principiile, aplicațiile,

avantajele, limitările și progresele tehnologiei SLS în medicina dentară, subliniind impactul său transformator asupra practicii dentare moderne.

Tehnologia SLS funcționează pe principiile fabricației aditive, unde datele de design digital sunt convertite în obiecte fizice strat cu strat. Procesul implică câțiva pași esențiali:

- Pregătirea Patului de Pulbere: Un strat subțire de pulbere, în mod obișnuit un polimer biocompatibil sau o aliaj de metal, este distribuit uniform pe o platformă de construcție în interiorul mașinii SLS.

- Sinterizarea cu Laser: Un laser de mare putere fuzionează selectiv pulberea în zonele dorite, pe baza datelor de proiectare digitale furnizate de software-ul de proiectare asistată de calculator (CAD).

- Construcție Strat cu Strat: După sinterizarea unui singur strat, platforma de construcție este coborâtă, iar un nou strat de pulbere este distribuit peste stratul sinterizat anterior. Procesul se repetă până când întregul obiect este fabricat.

- Post-procesare: Odată ce procesul de printare este complet, obiectul fabricat trece prin etape de post-procesare cum ar fi răcirea, curățarea și finisarea suprafeței pentru a obține proprietățile finale dorite.

Precizia, viteza și versatilitatea tehnologiei SLS o fac potrivită pentru producerea de proteze dentare și aparate dentare complexe, specifice fiecărui pacient, cu o precizie și reproducibilitate ridicate.

2. Tehnica metalo-ceramică

Restaurările metalo-ceramice, cunoscută și sub denumirile de restaurări ceramometal sau ceramometallice, este larg utilizată în stomatologie pentru a restaura dinți deteriorați de carie, traume sau alți factori. Aceste restaurări oferă o combinație între rezistență și estetică, ceea ce le face o opțiune populară atât din punct de vedere funcțional, cât și cosmetic.

Compuse din două componente principale, restaurările metalo-ceramice constau într-o infrastructură metalică și un strat de material ceramic. Infrastructura metalică, de obicei fabricată din aliaje metalice cu nobilitate ridicată care conțin aur, platină sau paladiu, furnizează rezistență și suport pentru restaurare. Stratul ceramic, adesea compus din porțelan sau material ceramic de sticlă, este aplicat peste metal pentru a imita aspectul natural al dinților.

Rezistența și durabilitatea restaurărilor metalo-ceramice le face potrivite pentru restaurarea dinților în zonele supuse unor forțe mari de masticație. Această durabilitate le permite să reziste forțelor masticatorii pe o perioadă îndelungată, asigurând funcționalitate pe termen lung.

În ceea ce privește estetica, stratul ceramic al ceramicii metalice este personalizat pentru a se potrivi cu culoarea, transluciditatea și textura dinților naturali. Tehnicienii dentari pricepuți plasează și modelează cu grijă materialul ceramic pentru a obține un aspect realist, integrându-se perfect cu dantura înconjurătoare.

Metaloceramica este versatilă și poate fi folosită pentru restaurarea diverselor defecte dentare, inclusiv carii mari, fracturi și deteriorări extinse ale dinților. Ele sunt frecvent utilizate pentru fabricarea coroanelor, punților dentare, inlay-urilor, onlay-urilor și restaurărilor de implanturi dentare.

Metalele folosite în această tehnică sunt biocompatibile, ceea ce înseamnă că sunt bine tolerate de organism și în mod obișnuit nu provoacă reacții adverse în majoritatea pacienților. Cu toate acestea, pot apărea reacții alergice la anumite metale la anumiți indivizi, ceea ce necesită o considerație atentă din partea dentiștilor în timpul selecției materialelor.

Eficiența în raport cu costurile este un alt avantaj al restaurărilor metalo-ceramice în comparație cu restaurările complet ceramice precum coroanele de zirconiu sau de disilicat de litiu. În timp ce acestea nu oferă același nivel de transluciditate sau perfecțiune estetică, metalo-ceramica găsește un echilibru între rezistență, estetică și accesibilitate financiară.

În ciuda avantajelor lor, restaurările metalo-ceramice prezintă limitări. Acestea pot necesita o pregătire mai extinsă a dinților în comparație cu restaurările complet ceramice, iar infrastructura metalică poate deveni vizibilă la nivelul liniei gingivale, în special în cazul retracției gingivale. În plus, stratul ceramic poate fi predispus la ciobire sau fracturare sub forțe extreme de masticăție.

În concluzie, tehnica metalo-ceramică rămâne o opțiune populară pentru restaurările dentare, în special atunci când rezistența, durabilitatea și accesibilitatea financiară sunt considerații importante. Cu toate acestea, progresele în materialele și tehnologia dentară continuă să extindă opțiunile de tratament, oferind pacienților și medicilor stomatologi rezultate mai personalizate și estetice.

3. Tehnologii de sudare în medicina dentară

3.1 Sudura prin arc electric

Sudarea prin arc electric este o tehnică fundamentală în protezele dentare, permițând fuzionarea componentelor metalice pentru a crea aparate dentare durabile și estetice. Metalele nobile precum aurul, argintul și platinul, apreciate pentru biocompatibilitatea și rezistența la coroziune, sunt utilizate frecvent în aceste aplicații. În plus, metalele ne-nobile precum aliajele de cobalt-crom și nichel-crom oferă proprietăți mecanice favorabile și eficiență în raport cu costurile.

Electrozii de sudură specializați, adesea fabricați din tungsten, și gazele de protecție precum argonul sau heliul, sunt cruciale pentru controlul precis și protecția procesului de sudură, prevenind oxidarea și contaminarea. Biocompatibilitatea este o preocupare fundamentală, necesitând teste riguroase și respectarea standardelor reglementare pentru a asigura siguranța pacientului.

Progresele recente în știința materialelor și tehnologiile de sudură au îmbunătățit în continuare domeniul protezei dentare. Inovațiile în designul aliajelor și echipamentele de sudură, împreună cu fluxurile digitale de lucru și tehnologiile de imprimare 3D, au îmbunătățit eficiența, consistența și calitatea în laboratoarele dentare. Aceste progrese continuă să stimuleze inovația, oferind noi posibilități pentru îmbunătățirea îngrijirii și rezultatelor tratamentului în medicina dentară.

3.2 Sudura cu laser în medicina dentară

Sudura cu laser în medicina dentară utilizează fascicule de laser focalizate pentru a fuziona precis materialele dentare, oferind avantaje precum aport minim de căldură și capacitate de sudare a materialelor diferite. Diverse tipuri de laser, inclusiv Nd:YAG, CO2 și lasere cu diode, sunt folosite în funcție de caracteristicile și aplicațiile lor unice. Sudura cu laser este utilizată extensiv în fabricarea, repararea și personalizarea protezelor dentare, a aparatelor ortodontice și a instrumentelor endodontice. Precizia sa permite asamblarea, ajustările și modificările sofisticate cu o distorsiune minimă, contribuind la principiile de stomatologie minim invazivă. Sudura cu laser susține aplicații variate în diferitele specialități dentare, asigurând o potrivire optimă, durabilitate și rezultate estetice în tratamentele de restaurare și protetice, contribuind astfel la îngrijirea și eficacitatea tratamentului în practica dentară modernă.

3.3 Sudura cu plasmă în medicina dentară

Sudura cu plasmă, o tehnică sofisticată de unire în medicina dentară, utilizează plasmă de înaltă energie pentru a fuziona precis materialele dentare, revoluționând diverse aspecte ale tratamentului dentar și fabricației de proteze. Aplicațiile sale se întind de la fabricarea protezelor dentare până la repararea aparatelor ortodontice, oferind control precis asupra parametrilor de sudură și minimalizând daunele termice aduse țesuturilor înconjurătoare. Aparatele de sudură cu plasmă, inclusiv microplasmă, micro-TIG, arc de plasmă, arc pulsatoriu și aparate de sudură cu laser, satisfac diverse sarcini de sudură, fiecare cu avantaje și aplicații unice. Aceste aparate de sudură contribuie la îmbunătățirea rezultatelor tratamentului, simplificarea procedurilor și prioritizarea siguranței și confortului pacientului în practica dentară modernă. Sudura cu plasmă continuă să evolueze, integrându-se în fluxurile de lucru digitale și promovând terapiile regenerative, promițând îmbunătățiri suplimentare în îngrijirea și eficacitatea tratamentului pacientului.

PARTEA SPECIALĂ

4. Evaluarea structurii cristaline a infrastructurilor din aliaj dentar Co-Cr-W acoperite cu ceramică obținute prin topire selectivă cu laser - un studiu pilot

Scopul acestui studiu a fost de a evalua în mod cuprinzător impactul placării cu ceramică asupra structurii cristaline a unui aliaj dentar Co-Cr-W topit selectiv cu laser (SLM). Această investigație a fost realizată folosind o combinație de tehnici analitice, inclusiv difracția de raze X (XRD), microscopia cu forță atomică (AFM) și microscopia electronică cu scanare cuplată cu spectroscopia de dispersie de energie (SEM-EDS). Prin utilizarea acestor metodologii, am căutat să obținem o înțelegere subtilă a modificărilor care au loc în cadrul structurii cristaline a aliajului ca urmare a procesului de placare cu ceramică.

Pentru a atinge acest obiectiv, au fost selectate zece plăci identice fabricate folosind SLM pentru studiu. Aceste plăci au fost ulterior placate cu două tipuri diferite de ceramică. Am supus plăcile la mai multe cicluri de ardere, fiecare depășind temperaturile de 900°C, simulând procesul de placare cu ceramică. Prin analiza XRD, studiul a avut ca scop identificarea oricăror faze cristaline nou formate în aliajul Co-Cr-W și identificarea variațiilor în dimensiunile cristalitelor. Această tehnică a oferit perspective valoroase asupra modului în care arderea repetată a straturilor de ceramică a influențat structura cristalină a aliajului.

În plus, AFM a fost utilizat pentru a examina morfologia suprafeței aliajului după ciclurile de ardere. Prin generarea de micrograme și histograme, am urmărit să vizualizăm și să cuantificăm impactul arderii repetate asupra topografiei suprafeței aliajului Co-Cr-W. Acest lucru a permis o evaluare detaliată a modului în care suprafața aliajului a fost afectată de procesul de ardere a ceramicii, comparând constatările obținute din analiza XRD.

S-a efectuat o analiză SEM-EDS pentru a investiga impactul diferiților parametri de ardere asupra atât a aliajului, cât și a microstructurii ceramicii. Prin examinarea calității suprafeței și compoziției chimice a ceramicii, această tehnică a furnizat perspective suplimentare asupra comportamentului materialelor de placare. Discrepanțele în compoziția chimică identificate de EDS erau de așteptat să se coreleze cu variațiile în comportamentul ceramicii în timpul procesului de ardere.

Scopul principal al acestui studiu a fost de a elucida modul în care arderea repetată a straturilor de ceramică influențează structura cristalină a aliajului dentar Co-Cr-W obținut prin SLM. Prin utilizarea unei abordări multi-tehnice care include XRD, AFM, SEM și EDS, am urmărit să oferim o înțelegere cuprinzătoare a interacțiunilor complexe dintre aliaj și ceramica de placare, informând astfel dezvoltările viitoare în materialele protetice dentare și tehnicile de fabricație.

5. Evaluarea mecanică a structurilor metalice ale protezelor dentare sudate prin diverse tehnologii

Scopul principal al acestui studiu a fost de a evalua rezistența mecanică a structurilor metalice destinate protezelor parțiale fixe, concentrându-se în mod specific pe cele construite dintr-un aliaj Co-Cr. Protezele parțiale fixe, cunoscute în mod obișnuit sub numele de punți dentare, sunt componente critice în stomatologia restaurativă, servind pentru înlocuirea dinților lipsă și restaurarea funcției și esteticii orale. Având în vedere rolul lor integral în reabilitarea dentară, este imperativ să se evalueze integritatea mecanică a materialelor utilizate în fabricația lor pentru a asigura succesul clinic pe termen lung.

Pentru a atinge acest obiectiv, am utilizat o abordare sistematică. Inițial, structurile metalice au fost fabricate folosind un aliaj Co-Cr, un material cunoscut pentru proprietățile sale mecanice favorabile și biocompatibilitate. Aceste structuri au servit ca bază pentru testarea mecanică ulterioară. Studiul a continuat apoi să investigheze impactul a două tehnici distincte de sudură - cu laser și cu plasmă - asupra performanței mecanice a structurilor.

Decizia de a utiliza procesele de sudură cu laser și plasmă a survenit din utilizarea lor extensivă în protezele dentare și din potențialul lor de a influența proprietățile mecanice ale îmbinărilor sudate. Prin supunerea structurilor acestor metode de sudură, am urmărit să distingem orice diferențe în rezistența mecanică între probele sudate și cele nesudate, elucidând astfel eficacitatea fiecărei tehnici de sudură în consolidarea integrității structurale a cadrelor protetice.

Testarea mecanică s-a efectuat folosind dispozitivul Mecmesin MultiTest 5-i, un aparat specializat capabil să aplice forțe controlate pentru a evalua rezistența și comportamentul materialului. Rezultatele acestor teste au oferit perspective valoroase asupra răspunsului structurilor metalice la încărcări mecanice, permițând cercetătorilor să tragă concluzii cu privire la robustețea lor generală și rezistența la deformare și fractură.

În urma analizei datelor testelor mecanice, au rezultat mai multe constatări importante. În primul rând, mostrele de control, care nu fuseseră supuse sudurii, au prezentat comportament de cedare sub încărcările aplicate, indicând capacitatea lor de a se deforma fără a se fractura - o caracteristică dorită pentru materialele protetice dentare. În contrast, mostrele sudate folosind tehnici cu laser și plasmă au prezentat comportamente diferite de fractură. În timp ce mostrele sudate cu laser au prezentat fractură sub încărcări mecanice ridicate, mostrele sudate cu plasmă s-au fracturat la valori semnificativ mai mici.

În plus, studiul a identificat mai mulți factori care influențează succesul proceselor de sudură și rezistența mecanică a îmbinărilor sudate. Aceștia au inclus calitatea suprafeței îmbinării, prezența unghiurilor ascuțite, tehnici de pregătire a suprafeței și evitarea incluziunilor și discontinuităților - toate acestea fiind considerații critice în asigurarea restaurărilor protetice durabile și fiabile.

Scopul principal al acestui studiu a fost de a evalua rezistența mecanică a structurilor metalice destinate protezelor parțiale fixe, cu accent specific pe evaluarea eficacității tehnicilor de sudură cu laser și plasmă în consolidarea acestor structuri. Prin elucidarea influenței proceselor de sudură asupra proprietăților mecanice ale structurilor, studiul aduce perspective

valoroase în domeniul protezelor dentare, ghidând selecția metodelor optime de fabricație și reparare pentru a îmbunătăți longevitatea și performanța restaurărilor protetice fixe.

6. Analiza comparativă a modificărilor microstructurale în infrastructurile metalice sudate prin metode de arc electric, plasmă și laser

Conform constatărilor cercetării, deși practicile actuale oferă potențialul de a corecta defectele în componentele metalice ale protezelor dentare fixe, nu toate metodele duc la rezultate optime.

Analiza comparativă a metodelor de sudură, evidențiată de graficele de intensitate și caracteristicile microstructurale, oferă perspective valoroase asupra performanței lor respective și implicațiilor pentru integritatea materialului. În primul rând, scăderea observată a cristalinității în sudura cu arc în comparație cu sudura cu laser și plasmă sugerează efecte termice și comportamente de solidificare diferite. Sudura cu laser, în ciuda modificărilor minime în graficul de intensitate, prezintă cea mai mare deformare reticulară, indicând stres intern semnificativ în structura sudată. Acest fenomen poate afecta potențial proprietățile mecanice și stabilitatea pe termen lung a îmbinării sudate.

Pe de altă parte, sudura cu plasmă, caracterizată de cea mai mică deformare reticulară și conservarea dimensiunilor cristalitelor similare probelor de referință, evidențiază eficacitatea sa în menținerea integrității materialelor și minimizarea modificărilor structurale. Absența schimbărilor vizibile în graficul de intensitate subliniază în continuare stabilitatea și fiabilitatea sa în aplicațiile de sudură. Aceste constatări sugerează că sudura cu plasmă poate oferi un echilibru favorabil între integritatea structurală și rafinarea microstructurală.

În plus, discuția explorează mecanismele subiacente care conduc la diferențele observate între metodele de sudură. Capacitatea de a produce microstructuri mai fine și mai uniforme în sudura cu laser poate fi atribuită controlului precis asupra aportului de căldură și încălzirii localizate, facilitând formarea de structuri de granule rafinate. Similar, sudura cu plasmă, cu avantajele sale în controlul căldurii și generarea de microstructuri mai fine, prezintă o alternativă promițătoare la procesele tradiționale de sudură cu arc electric.

În contrast, sudura cu arc electric, deși larg utilizată, se caracterizează prin zone afectate de căldură mai largi și controlul mai puțin precis al căldurii, ceea ce poate duce la o mai mare variabilitate în microstructură și proprietăți mecanice. Discuția evidențiază compromisurile între simplificarea procesului și rafinarea microstructurală, subliniind importanța selectării metodelor de sudură adecvate în funcție de cerințele specifice de performanță și considerațiile materialelor. În ansamblu, constatările subliniază importanța evaluării și selecției comprehensive a metodelor de sudură pentru a asigura o performanță optimă și integritatea materialului în structurile sudate.