

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie tehnologică şi management industrial

Ing. Alexandru-Nicolae RUSU

**MONITORIZAREA ŞI OPTIMIZAREA PARAMETRILOR PROCESELOR
DE MICROPERFORARE CU LASER ŞI SUDURĂ PENTRU ASIGURAREA
FUNCTİONALITĂŢII NOMINALE A AIRBAGULUI**

**MONITORING AND OPTIMIZING THE PARAMETERS OF LASER
MICROPERFORATION AND WELDING PROCESSES TO ENSURE THE
NOMINAL FUNCTIONALITY OF THE AIRBAG**

REZUMAT

Conducător ştiinţific

Prof.habil.dr.ing. Adela-Eliza DUMITRAŞCU

BRAŞOV, 2025

CUPRINS

LISTA TABELELOR ŞI FIGURILOR.....	4
Lista Tabelelor	4
Lista Figurilor	4
TEMA ŞI DOMENIUL TEZEI DE DOCTORAT	6
INTRODUCERE	7
CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL PRELUCRĂRII	
MATERIALELOR UTILIZÂND TEHNOLOGIA LASER.....	8
1.1. Utilizarea tehnologiei laser în prelucrarea materialelor	8
1.2. Particularităţi ale tehnologiei laser	9
1.3. Avantaje şi limitări ale tehnologiei laser în prelucrarea materialelor.....	11
1.4. Tendinţe actuale în cercetarea tehnologiei laser	11
1.5. Aplicaţii ale tehnologiei laser în industria automotive	11
1.6. Concluzii	12
CAPITOLUL 2. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT	13
2.1. Tendinţe actuale ale cercetărilor privind microperforarea cu laser în industria auto ...	13
2.2. Delimitarea domeniului de cercetare	13
2.3. Obiectivele cercetării	14
2.4. Concluzii	15
CAPITOLUL 3. DETALIEREA PROCESULUI DE MICROPERFORARE APLICÂND TEHNOLOGIA	
LASER	16
3.1. Materiale utilizate în procesul de microperforare laser	16
3.2. Principii fundamentale ale microperforării cu fascicul laser	17
3.3. Tipuri de lasere utilizate pentru microperforare	17
3.4. Parametrii de prelucrare şi impactul lor asupra procesului de microperforare	18
3.6. Metode de control al calităţii în procesul de microperforare cu laser.....	20
3.7. Concluzii	20
CAPITOLUL 4. ANALIZA INFLUENŢEI PARAMETRILOR OPERAŢIONALI ASUPRA	
PROCESULUI DE MICROPERFORARE CU LASER ŞI SUDURĂ.....	21
4.1 Monitorizare, control şi optimizare procesului de microperforare cu laser pentru piese din piele sintetică.....	21
4.2 Influenţa nivelului de zgomot electromagnetic asupra procesului de microperforare cu laser specific componentelor auto.....	23
4.3. Studiu privind microperforarea cu laser pentru integrarea materialelor sandwich în zonele airbagului utilizând regimuri speciale	27
4.4 Studiu privind capacitatea maşinii de microperforare cu laser în zona airbagului	30
4.5. Eficienţa şi precizia procesului de sudură pentru componentele auto din zona airbag	32

4.6. Evaluarea rezultatelor experimentale ale procesului laser în zona airbagului şi analiza influenţei asupra procesului de sudură	33
4.7. Concluzii	35
CAPITOLUL 5. INTEGRAREA ŞI MONITORIZAREA ÎN TIMP REAL A PROCESULUI PRIN INTERMEDIUL SISTEMELOR DE VIZUALIZARE SHOPFLOOR (SFV).....	37
5.1. Obiectivele şi domeniul de aplicare al Ghidului SFV	37
5.2. Utilizator-cheie pentru Digitalizare	37
5.3. Introducerea unei staţii în Shopfloor	38
5.4. Acces la Vizualizarea Shopfloor	38
5.5. Denumirea standard pentru Vizualizarea Shopfloor	42
5.6. Maşini noi în SFV.....	43
5.7. Vizualizarea Shopfloor.....	44
5.8. Necesitatea Vizualizării Shopfloor	45
5.9. Arhitectura sistemului SFV	45
5.10. Navigare şi Funcţii ale Vizualizării Shopfloor	46
5.11. Descrierea interfeţei.....	50
5.12. Concluzii	51
CAPITOLUL 6. CONCLUZII, CONTRIBUŢII PERSONALE ŞI PERSPECTIVE PENTRU CERCETĂRI ULTERIOARE.....	53
6.1. Concluzii.....	53
6.2. Contribuţii personale.....	54
6.3. Aspecte inovative ale tezei de doctorat	56
6.4. Dezvoltări viitoare	57
6.5. Modalităţi de valorificare a rezultatelor cercetării	58
6.6. Relevanţa cercetării	58

LISTA TABELELOR ŞI FIGURILOR

Lista Tabelelor

Tabelul 5.1. Analiza comparativă a principalilor indicatori de performanţă.

Lista Figurilor

Figura 1.1. Imprimare 3D asistată de LASER.

Figura 1.2. Principiul de funcţionare al laserului.

Figura 1.3. Factori ce caracterizează alegerea laserului.

Figura 1.4. Sudură LASER cu diodă.

Figura 1.5. Sudură LASER Nd:YAG .

Figura 3.1. Microperforarea materialelor composite.

Figura 3.2. Microperforare cu fascicul laser.

Figura 3.3. Impulsuri laser ultra-rapide.

Figura 3.4. Parametrii procesului de microperforare.

Figura 3.5. Integrarea metodologiei experimentale.

Figura 4.1. Principiul de lucru al laserului.

Figura 4.2. Microperforare optima cu unda laser prin impulsuri.

Figura 4.3. Imagini microstructurale ale pieselor neconforme: (a) micro-orificii în stratul superior al materialului; (b) perforare completă a micro-orificiilor. Bara de scală este de 500 μm .

Figura 4.4. Imagini microstructurale ale pieselor conforme: (a) orificii în stratul superior al materialului; (b) microperforare finalizată a orificiilor. Bara de scală este de 500 μm .

Figura 4.5. Diagramă schematică a configuraţiei experimentale cu integrarea robotului.

Figura 4.6. Setările şi distribuţia puterii laserului.

Figura 4.7. Durata impulsului laser.

Figura 4.8. Configuraţia optică a sistemului LASER.

Figura 4.9. Rezultatele analizei după testul de tracţiune cu valori NOK şi nivelul de zgomot setat la 0,8 V.

Figura 4.10. Rezultatele analizei după testul de tracţiune cu valori NOK şi nivelul de zgomot setat la 1 V.

Figura 4.11. Rezultatele analizei după testul de tracţiune cu valori OK şi nivelul de zgomot setat la 1,2 V.

Figura 4.12. Declansarea optima a unui airbag.

Figura 4.13. a) Rezultatele testării mecanice: ruperea materialului; b) Analiza geometriei microperforaţiilor; c) Rezultatele testării forţei de rupere.

Figura 4.14. Rezultatele analizei conformităţii evaluării microscopice.

Figura 4.15. Rezultatele reducerii timpului ciclului de proces.

Figura 4.16. Ratele defectelor înainte şi după ajustarea procesului.

Figura 4.17. Analiza capabilităţii maşinii.

Figura 4.18. Eficienţa operaţională înainte şi după ajustare.

Figura 4.19. Principiul de funcţionare al echipamentului de sudură.

Figura 4.20. a) Utilaj sudură cu element încălzit; b) Topire; c) Sudură cu element încălzit; d) Ansamblu airbag format din imitație de piele, bord din plastic și canal de ghidare Airbag din plastic.

Figura 4.21. Radar tehnic: Performanță proces microperforare optimizat.

Figura 5.1 Utilizatori cheie pentru digitalizare.

Figura 5.2. Implementarea OPCUA/SFV.

Figura 5.3. Cereri servicii.

Figura 5.4. Cautare dedicate.

Figura 5.5. Catalog service acces-vizualizare SPV.

Figura 5.6. Cerere service acces-utilizator.

Figura 5.7. Opțiune cerere service acces-utilizator global.

Figura 5.8. Vizualizare punct de lucru în SPV.

Figura 5.9. Vizualizarea Shopfloor direct din SharePoint.

Figura 5.10. Vizualizarea Shopfloor .

Figura 5.11. Nume standard în Vizualizarea Shopfloor .

Figura 5.12. Solicitare implementare în Vizualizarea Shopfloor .

Figura 5.13. Solicitare în portal de generare automat pentru adăugarea unei noi stații în SFV.

Figura 5.14. Model table cu date corecte.

Figura 5.15. Afișare date masini.

Figura 5.16. Arhitectura sistemului SFV.

Figura 5.17. Navigare- sistem SFV.

Figura 5.18. Sistem SFV – Submeniu schimb curent.

Figura 5.19. Sistem SFV – Submeniu status utilaje.

Figura 5.20. Sistem SFV – Istoricul utilajului.

Figura 5.21. Sistem SFV – Vizualizare erori.

Figura 5.22. Sistem SFV – Grafice personalizate.

Figura 5.23. Sistem SFV – Timp de proces.

Figura 5.24. Sistem SFV – Vizualizare status MES.

Figura 5.25. Sistem SFV – Eroare de process.

Figura 5.26. Impactul implementării sistemului Shopfloor View (SFV).

TEMA ŞI DOMENIUL TEZEI DE DOCTORAT

Teza de doctorat intitulată „**Monitorizarea şi optimizarea parametrilor proceselor de microperforare cu laser şi sudură pentru asigurarea funcţionalităţii nominale a airbagului**” se înscrie în domeniul **Ingineriei Industriale**, abordează o problemă de interes major pentru industria auto, în special în contextul actual al digitalizării proceselor de fabricaţie şi al cerinţelor tot mai stricte privind siguranţa pasivă a vehiculelor.

Obiectivul principal al cercetării constă în dezvoltarea şi implementarea unor metode eficiente de monitorizare şi optimizare a parametrilor tehnologici implicaţi în procesele de microprelucrare cu laser şi sudură utilizate în fabricarea componentelor sistemelor de airbag. Teza propune o abordare integrată care combină metode experimentale, modelare matematică şi analiză statistică pentru a identifica relaţiile critice dintre parametrii de proces, materialele utilizate şi calitatea rezultatelor obţinute.

Microperforarea cu laser reprezintă un proces tehnologic esenţial pentru garantarea desfăşurării controlate a airbagului în momentul activării, asigurând ruperea precisă a materialelor textile sau polimerice în zonele prestabilite. În acest context, monitorizarea calităţii perforaţiilor şi stabilirea toleranţelor funcţionale devin aspecte fundamentale pentru asigurarea fiabilităţii sistemului. Sudura, pe de altă parte, este utilizată în ansamblarea componentelor airbagului, unde rezistenţa mecanică şi etanşeitatea sunt parametri critici. Optimizarea acestor procese urmăreşte reducerea defectelor, creşterea reproductibilităţii şi scăderea consumului energetic, toate contribuind la eficientizarea producţiei.

Cercetarea se desfăşoară într-un cadru interdisciplinar, la intersecţia dintre ingineria materialelor, tehnologiile de fabricaţie avansate şi automatizarea industrială. Sunt utilizate echipamente de înaltă precizie, metode moderne de inspecţie (inclusiv imagistică optică şi senzori integraţi), precum şi algoritmi de prelucrare a datelor pentru evaluarea performanţei procesului în timp real. De asemenea, teza explorează integrarea acestor procese în linii de producţie inteligente, compatibile cu principiile Industriei 4.0.

Teza de doctorat aduce un plus de valoare în direcţia creşterii calităţii şi siguranţei produselor din industria automotive, oferind soluţii concrete pentru optimizarea proceselor tehnologice critice şi evidenţiind importanţa cercetării aplicate în dezvoltarea de noi tehnologii de fabricaţie. Teza se adresează atât mediului academic, prin aprofundarea cunoaşterii fenomenelor implicate în procesele de microprelucrare, cât şi mediului industrial, prin furnizarea unor instrumente practice pentru îmbunătăţirea performanţelor de producţie.

INTRODUCERE

Capitolul de introducere al tezei oferă un cadru conceptual şi aplicativ bine conturat, în care sunt prezentate fundamentele cercetării privind utilizarea tehnologiilor moderne de microprelucrare în industria auto. Accentul este pus pe procesele de microperforare cu laser şi sudură, ambele fiind esenţiale în asigurarea performanţei şi fiabilităţii sistemelor de airbag. Este subliniată importanţa acestor procese în contextul cerinţelor stricte de siguranţă impuse de reglementările internaţionale şi de competiţia tehnologică tot mai intensă din sectorul automotive.

Introducerea trasează direcţiile principale ale cercetării, pornind de la o analiză critică a stadiului actual al tehnologiilor utilizate în fabricarea airbagurilor şi evidenţiind limitele soluţiilor convenţionale, precum lipsa monitorizării în timp real, variabilitatea procesului şi impactul parametrilor necontrolaţi asupra calităţii finale. Se identifică astfel o nevoie stringentă pentru dezvoltarea unor metode avansate de control şi optimizare a acestor procese, care să permită creşterea preciziei şi fiabilităţii în producţie.

Lucrarea propune integrarea unor metode experimentale riguroase şi a unor modele matematice predictive pentru investigarea influenţei parametrilor tehnologici asupra calităţii microperforării şi sudurii. În plus, se urmăreşte crearea unui cadru metodologic pentru monitorizarea continuă a proceselor, utilizând senzori, algoritmi de procesare a datelor şi tehnici de inspecţie non-distructivă. Astfel, se creează premisele unui control avansat în timp real, compatibil cu cerinţele Industry 4.0.

În cadrul introducerii sunt definite obiectivele specifice ale tezei, ipotezele de cercetare şi metodologia de lucru aplicată, care îmbină analiza teoretică cu investigaţia practică. Sunt justificate alegerile tehnologice şi ştiinţifice, iar utilitatea cercetării este argumentată prin aplicabilitatea directă în procese industriale de mare responsabilitate.

În concluzie, introducerea subliniază valoarea teoretică şi aplicativă a tezei, conturând o direcţie clară de cercetare orientată spre inovaţie, siguranţă şi eficienţă industrială. Această contribuţie îşi propune să răspundă atât cerinţelor academice, cât şi nevoilor reale din mediul industrial, consolidând legătura dintre cercetarea ştiinţifică şi implementarea practică a tehnologiilor avansate.

CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL PRELUCRĂRII MATERIALELOR UTILIZÂND TEHNOLOGIA LASER

1.1. Utilizarea tehnologiei laser în prelucrarea materialelor

Secțiunea 1.1 analizează contextul general și motivația utilizării tehnologiei laser în procesele de prelucrare a materialelor. Este subliniată tranziția de la metodele convenționale la tehnologii moderne, mai rapide, mai precise și mai eficiente energetic, care permit controlul riguros al procesului. Tehnologia laser este prezentată ca o soluție versatilă aplicabilă în prelucrări de înaltă precizie, precum tăierea, sudura, microperforarea sau gravarea. Se argumentează că utilizarea laserului în industria de fabricație a devenit o necesitate, nu doar o opțiune, în special pentru domenii în care precizia, viteza și fiabilitatea sunt esențiale.

Totodată, se pune accent pe istoria dezvoltării tehnologiei laser, pornind de la primele aplicații în laboratoare de cercetare până la implementarea la scară largă în industrie. Se subliniază evoluția surselor de laser și transformarea acestora din echipamente voluminoase și costisitoare în sisteme compacte, performante și scalabile. Este evidențiată și contribuția semnificativă a laserului la digitalizarea proceselor industriale și la integrarea conceptelor specifice Industry 4.0.

În această subsecțiune sunt prezentate exemple concrete de utilizare a laserului în domenii precum industria electronică, medicală, aerospațială și auto, cu accent pe adaptabilitatea tehnologiei la diverse tipuri de materiale: metale, polimere, materiale compozite sau ceramice. Se menționează că, datorită capacității sale de a livra energie focalizată cu precizie milimetrică, tehnologia laser reduce semnificativ pierderile materiale și contribuie la eficiența energetică generală a procesului de producție.(Figura 1.1).

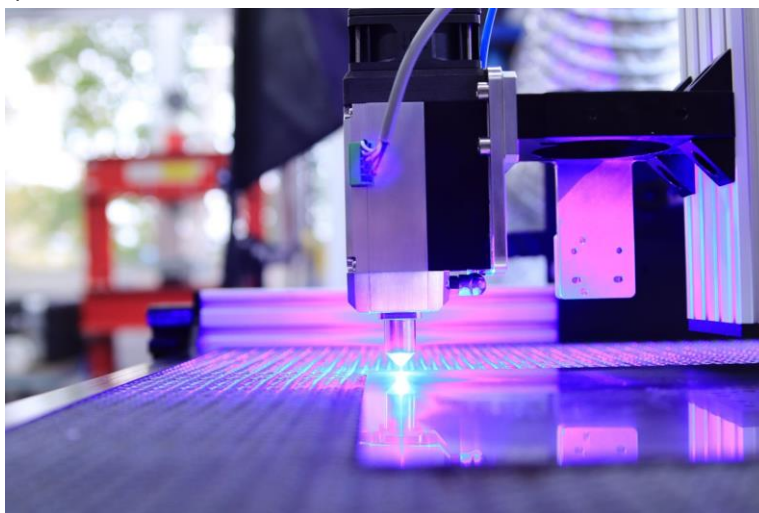


Figura 1.1. Imprimare 3D asistată de LASER [WWW3].

Se discută și despre importanța standardizării proceselor bazate pe tehnologie laser și a reglementărilor în vigoare privind siguranța operatorilor și protecția mediului. În final, secțiunea oferă o privire asupra perspectivelor viitoare și direcțiilor strategice de cercetare și dezvoltare în domeniul tehnologiilor de prelucrare cu laser.

1.2. Particularități ale tehnologiei laser

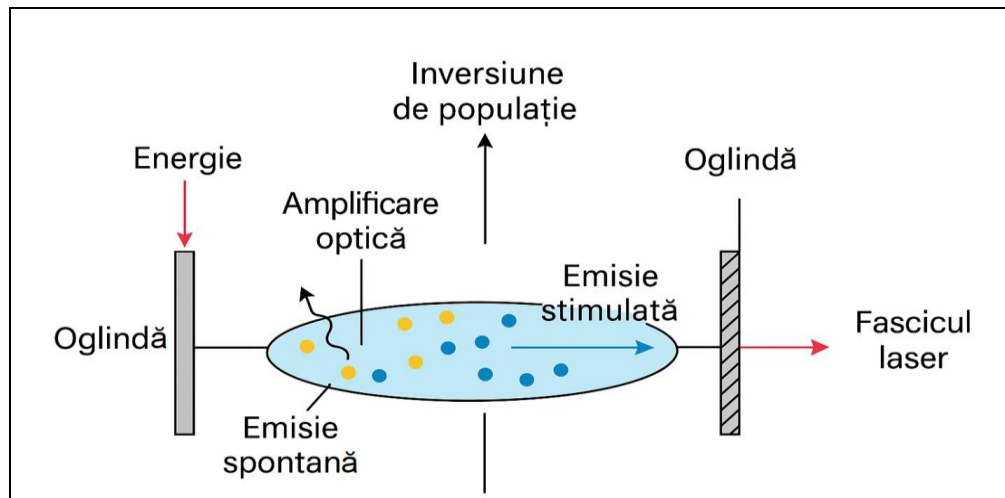


Figura 1.2. Principiul de funcționare al laserului.

Secțiunea 1.2 explorează caracteristicile fizice și funcționale ale tehnologiei laser, cu accent pe parametri ce influențează direct procesele de prelucrare. (Figura 1.3).

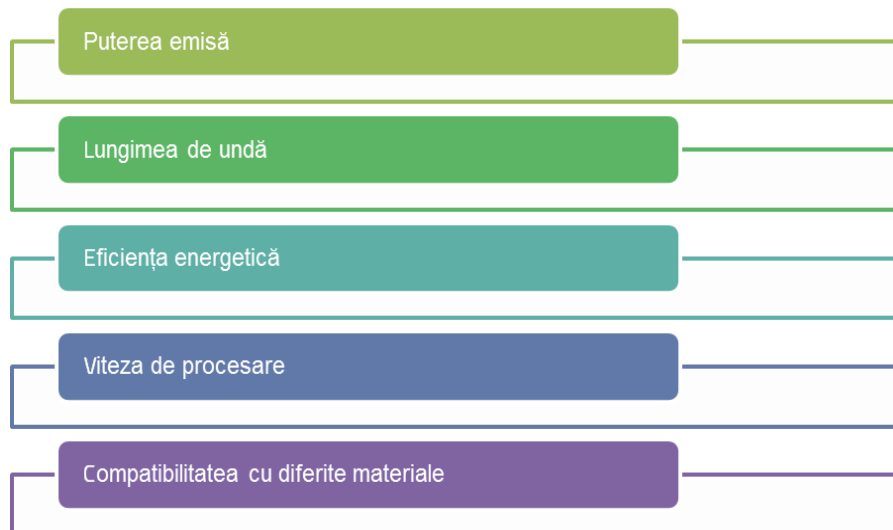


Figura 1.3. Factori ce caracterizează alegerea laserului.

Sunt descrise proprietățile esențiale ale fasciculului laser – coerența, direcționalitatea, monocromaticitatea și focalizarea – și modul în care acestea contribuie la precizia procesului. Se realizează o clasificare a principalelor tipuri de laseri utilizați industrial (CO_2 , Nd:YAG, cu fibră optică), fiind analizate diferențele între acestea în funcție de lungimea de undă, randamentul energetic, durabilitate și costuri de operare. (Figura 1.4) și (Figura 1.5).

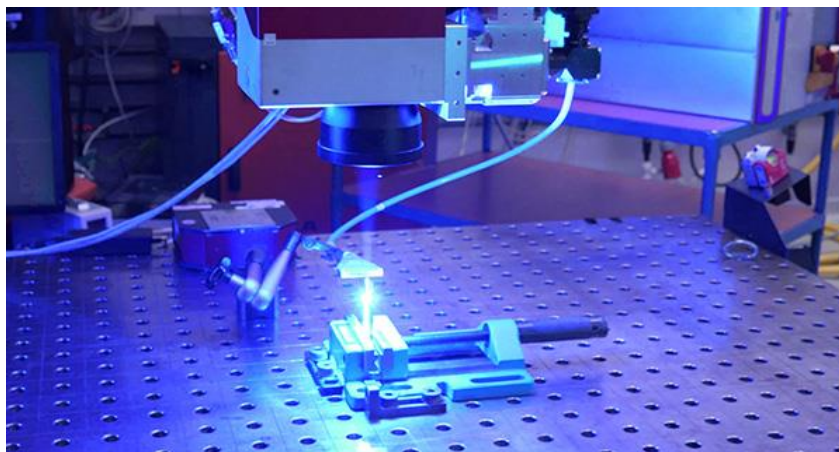


Figura 1.4. Sudură LASER cu diodă [WWW7].

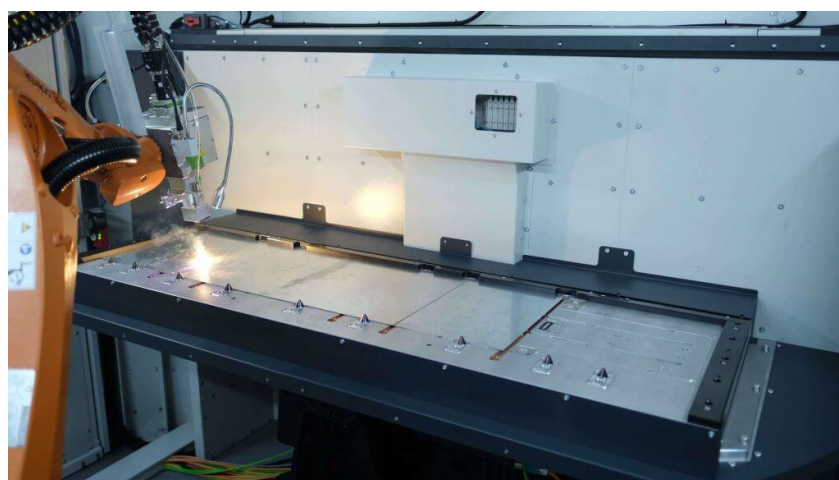


Figura 1.5. Sudură LASER Nd:YAG [WWW5].

Este prezentată structura generală a unui sistem laser utilizat în prelucrare: sursa de radiație, sistemul optic de ghidare și focalizare, precum și sistemele de comandă numerică (CNC) și control în buclă închisă. Sunt discutate principiile de interacțiune fascicul-material, cum ar fi absorbția, reflecția și conducția termică, care determină adâncimea de prelucrare, gradul de afectare termică și calitatea suprafeței obținute.

Secțiunea mai evidențiază importanța parametrilor tehnologici, precum puterea fasciculului, viteza de scanare, frecvența impulsurilor și durata interacțiunii. Se explică modul în care variațiile acestor parametri pot influența semnificativ rezultatul procesului, iar optimizarea acestora este esențială pentru obținerea unor prelucrări precise și reproductibile. Sunt oferite exemple de scenarii industriale în care controlul fin al acestor parametri determină succesul aplicației.

De asemenea, sunt prezentate avantajele sistemelor laser moderne care integrează feedback optic și senzorial pentru autoreglarea procesului în timp real. Aceste capacități permit adaptarea la variațiile materialului sau ale mediului de lucru, contribuind la creșterea fiabilității și consistenței proceselor industriale. În concluzie, secțiunea 1.2 fundamentează tehnologic aplicabilitatea și complexitatea controlului proceselor de prelucrare cu laser.

1.3. Avantaje şi limitări ale tehnologiei laser în prelucrarea materialelor

Această secţiune detaliază punctele forte şi provocările specifice asociate utilizării tehnologiei laser în procesele de prelucrare. Printre avantajele majore se numără: precizia ridicată, prelucrarea fără contact, reducerea zonelor afectate termic, capacitatea de a lucra cu materiale diverse şi integrarea facilă în sisteme automatizate. Aceste beneficii fac din laser o soluţie de vârf pentru aplicaţii industriale critice, în care controlul geometric şi calitatea suprafeţelor sunt esenţiale.

Prelucrarea fără contact permite minimizarea uzurii mecanice şi eliminarea vibraţiilor, ceea ce duce la o durată de viaţă crescută a echipamentelor şi la un control superior al forme finale. De asemenea, fasciculul laser poate fi adaptat în funcţie de cerinţele aplicaţiei, oferind o flexibilitate greu de egalat în alte metode. Posibilitatea de focalizare a energiei permite prelucrări localizate cu efect termic controlat, reducând deformările şi deteriorările materialelor sensibile.

Totuşi, tehnologia laser prezintă şi limitări importante. Costul iniţial de achiziţie al echipamentelor, precum şi necesitatea întreţinerii regulate şi a instruirii personalului calificat pot reprezenta obstacole pentru companiile mici sau medii.

În concluzie, această secţiune oferă o analiză echilibrată între potenţialul inovator al tehnologiei laser şi limitările practice care trebuie gestionate pentru a asigura performanţe optime în producţie.

1.4. Tendinţe actuale în cercetarea tehnologiei laser

Secţiunea 1.4 arată tendinţele moderne în cercetarea aplicată a tehnologiei laser, evidenţiind progresele recente şi direcţiile de dezvoltare strategică. Este subliniată orientarea către sisteme laser cu impulsuri scurte şi ultrarapide, care permit o prelucrare de înaltă rezoluţie cu afectare termică minimă. În plus, se remarcă integrarea tehnologiilor de monitorizare avansată, bazate pe senzori şi inteligenţă artificială, pentru controlul în timp real al procesului.

Un alt trend major este digitalizarea completă a proceselor bazate pe laser, prin conectarea echipamentelor la sisteme inteligente de control şi analiză a datelor (big data, machine learning). Astfel, devine posibilă adaptarea automată a parametrilor în funcţie de comportamentul materialului, asigurând o calitate constantă şi predictibilă. Totodată, se pune un accent tot mai mare pe sustenabilitate, reducerea emisiilor şi reciclarea materialelor prelucrate.

Se conturează şi o direcţie de cercetare în miniaturizarea surselor laser şi dezvoltarea de sisteme portabile pentru aplicaţii industriale mobile sau în spaţii restrânse. În concluzie, secţiunea scoate în evidenţă caracterul dinamic, multidisciplinar şi orientat spre inovaţie al domeniului tehnologiilor laser.

1.5. Aplicaţii ale tehnologiei laser în industria automotive

În această secţiune sunt analizate aplicaţiile concrete ale tehnologiei laser în industria automotive, cu accent pe contribuţia acestora la eficientizarea proceselor de fabricaţie şi creşterea siguranţei

produselor. Sunt prezentate aplicații precum sudura componentelor structurale, microperforarea materialelor pentru airbaguri, tăierea de precizie a pieselor metalice sau polimerice, precum și marcarea și gravarea elementelor pentru trasabilitate.

Sudura cu laser este utilizată pentru îmbinarea elementelor caroseriei și a pieselor metalice cu grosimi variabile, oferind o rezistență mecanică ridicată și o zonă afectată termic minimă. Aceasta permite reducerea greutateii componentelor, contribuind la optimizarea consumului energetic al vehiculului. Microperforarea materialelor textile utilizate în airbaguri este un alt exemplu esențial, întrucât garantează o deschidere controlată și sigură în momentul activării sistemului.

Gravarea cu laser este utilizată atât în scop decorativ, cât și funcțional, pe elemente vizibile sau ascunse ale vehiculului.

Integrarea proceselor laser în liniile de producție automatizate ale marilor producători auto este susținută de controlul precis al procesului, flexibilitatea în adaptarea la diferite geometrii și reducerea timpului de ciclu. În concluzie, tehnologia laser se dovedește a fi un instrument indispensabil în modernizarea industriei auto, susținând inovația, siguranța și sustenabilitatea.

1.6. Concluzii

Concluziile capitolului 1 evidențiază importanța tehnologiei laser în contextul modern al prelucrării materialelor, subliniind caracterul său inovator, adaptabil și strategic în numeroase domenii industriale, cu precădere în industria automotive. Analiza literaturii de specialitate și a aplicațiilor curente a demonstrat că utilizarea fasciculului laser permite realizarea de operații de prelucrare de înaltă precizie, cu eficiență energetică ridicată și control superior asupra parametrilor tehnologici.

Tehnologia laser este caracterizată printr-o serie de particularități fizice și funcționale care o diferențiază net de metodele tradiționale: coerența, direcționalitatea, focalizarea extrem de precisă și posibilitatea de automatizare completă a proceselor. Aceste proprietăți permit nu doar extinderea ariei de aplicabilitate, ci și creșterea calității produselor obținute.

Capitolul a evidențiat și un set important de avantaje competitive oferite de această tehnologie – precum prelucrarea fără contact, adaptabilitatea la materiale diverse, reducerea zonelor afectate termic – dar și limitările ce trebuie atent gestionate, printre care se numără costurile ridicate ale echipamentelor, complexitatea controlului proceselor și necesitatea expertizei tehnice specializate.

Tendențele recente din cercetare indică o orientare clară spre integrarea tehnologiei laser în fluxuri de producție inteligente, guvernate de conceptele Industry 4.0, unde monitorizarea în timp real, prelucrarea datelor și inteligența artificială joacă un rol esențial. Se conturează astfel o direcție de dezvoltare sustenabilă, eficientă și scalabilă a acestor tehnologii.

În concluzie, capitolul 1 fundamentează necesitatea aprofundării cercetării în direcția optimizării parametrilor de proces și a integrării controlului avansat în aplicații industriale, pentru a valorifica întregul potențial al tehnologiei laser în contextul actual și viitor al ingineriei moderne.

CAPITOLUL 2. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

2.1. Tendinţe actuale ale cercetărilor privind microperforarea cu laser în industria auto

Secţiunea 2.1 a tezei se concentrează asupra tendinţelor actuale în cercetarea procesului de microperforare cu laser, cu aplicabilitate directă în industria auto, în special în fabricarea componentelor pentru airbaguri. Este evidenţiată necesitatea asigurării unui control strict asupra formei, dimensiunii şi distribuţiei perforaţiilor, întrucât acestea influenţează direct modul de desfăşurare şi eficienţa sistemului de protecţie pasivă.

Sunt prezentate direcţiile principale de cercetare actuală, cum ar fi utilizarea laserelor cu impulsuri scurte şi ultrarapide pentru minimizarea efectelor termice, dezvoltarea de strategii de scanare adaptivă şi integrarea de sisteme de feedback optic pentru monitorizarea în timp real a calităţii microperforării. În paralel, se explorează modelarea numerică a procesului, prin metode cum ar fi elementul finit, pentru a simula interacţiunea fascicul-material şi a anticipa comportamentul materialului.

O atenţie deosebită este acordată caracterizării post-proces a perforaţiilor, utilizând metode de analiză optică, microscopie electronică şi tehnici non-distructive pentru a evalua calitatea şi conformitatea acestora cu standardele industriale. De asemenea, se analizează influenţa parametrilor tehnologici – puterea laserului, viteza de scanare, frecvenţa impulsurilor – asupra calităţii perforaţiilor şi asupra gradului de afectare termică a materialului.

Secţiunea mai scoate în evidenţă provocările întâlnite în integrarea acestor procese în linii de producţie automatizate, în special în ceea ce priveşte uniformitatea perforaţiilor şi controlul stabil al procesului în condiţii de producţie de masă. În concluzie, tendinţele actuale din cercetarea microperforării laser în domeniul auto vizează creşterea preciziei, repetabilităţii şi adaptabilităţii procesului, în paralel cu reducerea costurilor de producţie şi a impactului asupra mediului.

2.2. Delimitarea domeniului de cercetare

Având în vedere complexitatea problemelor asociate microperforării cu laser în industria auto, delimitarea domeniului de cercetare este esenţială pentru a asigura o abordare sistematică şi obiectivă. În acest context, teza de doctorat se va axa pe următoarele direcţii principale de studiu:

- Monitorizare, control şi optimizare în procesul de microperforare cu laser pentru piese fabricate din piele sintetică: analiza strategiilor de control al parametrilor laserului pentru îmbunătăţirea uniformităţii perforaţiilor;
- Influenţa nivelului de zgomot electromagnetic asupra procesului de microperforare cu laser specific componentelor auto: investigarea impactului fluctuaţiilor electromagnetice asupra preciziei perforaţiilor şi a performanţei mecanice a materialelor perforate;

- Studiu privind microperforarea cu laser pentru integrarea materialelor sandwich în zonele airbagului utilizând regimuri speciale: testarea compatibilităţii acestor materiale cu tehnologia laser şi analiza efectelor asupra siguranţei şi performanţei airbagurilor;
- Studiu privind capabilitatea procesului de microperforare cu laser în zona airbagului: evaluarea preciziei şi eficienţei procesului de fabricaţie în condiţii industriale;
- Eficienţa şi precizia procesului de sudură pentru componentele auto din zona airbag: analiza impactului microperforării asupra calităţii sudurii canalului de ghidare al airbagului şi optimizarea parametrilor procesului.
- Integrarea sistemelor de procesare vizuală (SPV) în bucla de control a procesului de microperforare cu laser şi sudură: dezvoltarea şi validarea unui sistem optic de inspecţie în timp real capabil să identifice, evalueze şi corecteze automat abaterile geometrice ale perforaţiilor, în vederea creşterii fiabilităţii, trasabilităţii şi consistenţei calităţii produsului finit.

2.3. Obiectivele cercetării

Pe baza analizei stadiului actual al cercetărilor din domeniu, precum şi studiul critic asupra soluţiilor existente, se propun următoarele obiective de cercetare:

- 1. Monitorizarea şi optimizarea procesului de microperforare cu laser:**
 - Analiza influenţei parametrilor laserului asupra preciziei perforaţiilor;
 - Îmbunătăţirea calităţii perforaţiilor, reducerea pierderilor tehnologice şi creşterea fiabilităţii produselor finite.
 - Dezvoltarea unui sistem automatizat de monitorizare şi ajustare a parametrilor în timp real;
- 1. Investigarea impactului zgomotului electromagnetic asupra calităţii perforaţiilor:**
 - Determinarea corelaţiei dintre intensitatea zgomotului electromagnetic (EMI) şi performanţa mecanică a materialului perforat;
 - Identificarea strategiilor de reducere a efectelor EMI asupra procesului de microperforare;
 - Evaluarea stabilităţii procesului pentru diferite niveluri de interferenţe electromagnetice.
- 2. Integrarea materialelor sandwich în zonele airbagului pentru microperforare cu laser:**
 - Studii experimentale ale proprietăţilor mecanice ale materialelor prelucrate cu tehnologia laser;
 - Optimizarea parametrilor laserului pentru a asigura o perforare precisă şi sigură;
 - Determinarea impactului acestor materiale asupra siguranţei şi performanţei airbagurilor.
- 3. Optimizarea procesului de sudură a canalului de ghidare al airbagului:**
 - Evaluarea influenţei microperforării asupra calităţii sudurii;
 - Optimizarea parametrilor de sudură pentru asigurarea unei îmbinări sigure şi eficiente;
 - Determinarea impactului procesului de perforare asupra fiabilităţii structurale a sistemului airbag.
- 4. Integrarea sistemului de procesare vizuală (SPV) în fluxul de microperforare cu laser şi sudură:**
 - Soluţie avansată de inspecţie optoelectronică în timp real;
 - Monitorizarea continuă a calităţii geometrice a perforaţiilor si a sudurii;

- Identificarea automată a abaterilor dimensionale şi corectarea adaptivă a parametrilor de process;
- Creşterea fiabilităţii, reproductibilităţii şi trasabilităţii procesului de fabricaţie în condiţii industriale de înaltă precizie.

Prin atingerea acestor obiective, teza de doctorat va contribui la dezvoltarea unor soluţii inovatoare pentru optimizarea procesului de microperforare cu laser şi sudură în industria autovehiculelor, astfel îmbunătăţind fiabilitatea şi siguranţa produselor finite.

2.4. Concluzii

Secţiunea 2.4 sintetizează concluziile capitolului 2 şi oferă o imagine de ansamblu asupra progresului şi provocărilor actuale în domeniul microperforării cu laser aplicate în industria auto. Este evidenţiat faptul că această tehnologie continuă să fie un punct central al cercetării aplicate, datorită capacităţii sale de a răspunde cerinţelor tot mai stricte privind siguranţa, calitatea şi eficienţa producţiei.

Cercetarea literaturii de specialitate a relevat că microperforarea cu laser s-a impus ca soluţie preferată în prelucrarea materialelor pentru airbaguri, întrucât oferă control de mare precizie asupra geometriei perforaţiilor, fără contact mecanic şi cu o zonă afectată termic minimă. Această precizie contribuie direct la fiabilitatea funcţionării sistemelor de protecţie pasivă, ceea ce este esenţial pentru standardele ridicate ale industriei auto.

Capitolul evidenţiază şi principalele direcţii de cercetare: utilizarea laserelor cu impulsuri ultrarapide, implementarea tehnologiilor de feedback optic pentru controlul procesului în timp real, dezvoltarea modelelor numerice avansate pentru optimizarea parametrilor şi caracterizarea detaliată a rezultatelor procesului. Aceste direcţii converg spre o automatizare tot mai completă şi o integrare facilă în liniile de producţie inteligente.

În concluzie, secţiunea 2.4 reafirmă relevanţa strategică a cercetării în microperforarea cu laser şi susţine necesitatea studiilor aprofundate privind optimizarea procesului, pentru a asigura tranziţia către o producţie industrială eficientă şi sigură.

CAPITOLUL 3. DETALIEREA PROCESULUI DE MICROPERFORARE APLICÂND TEHNOLOGIA LASER

Microperforarea cu laser reprezintă o tehnologie de vârf în industria auto, datorită capacității sale de a realiza perforații precise și omogene în materiale variate, contribuind la creșterea calității și performanței componentelor vehiculului. Această metodă de prelucrare se remarcă prin controlul excelent al parametrilor procesului, ceea ce permite optimizarea caracteristicilor funcționale ale pieselor și reducerea efectelor negative asupra structurii materialului.

În ultimii ani, direcțiile de cercetare s-au axat pe utilizarea laserelor cu impulsuri ultrarapide și integrarea inteligenței artificiale pentru reglarea în timp real a parametrilor, deschizând perspective promițătoare pentru automatizarea și digitalizarea procesului. Aceste progrese confirmă potențialul strategic al microperforării cu laser în contextul dezvoltării durabile și al tehnologiilor inteligente pentru industria auto.

3.1. Materiale utilizate în procesul de microperforare laser

Selecția materialelor utilizate în procesul de microperforare cu laser reprezintă o etapă esențială pentru asigurarea unei prelucrări eficiente și a unui produs final de înaltă calitate. Proprietățile specifice ale fiecărui material influențează modul în care acesta interacționează cu fasciculul laser, determinând astfel comportamentul său în timpul perforării. Alegerea corectă a materialului este fundamentală pentru obținerea unor perforații precise, curate și cu un impact minim asupra integrității materialelor.

Materialele compozite, devin tot mai populare datorită rezistenței lor mecanice ridicate și a greutateii reduse. Cu toate acestea, prelucrarea lor cu laser este provocatoare, deoarece poate produce delaminare, crăpături sau deteriorări termice. Pentru a atenua aceste efecte, se recomandă utilizarea laserelor cu impulsuri ultrarapide, care permit o interacțiune minim invazivă cu structura materialului. (Figura 3.1)

În concluzie, alegerea materialului potrivit pentru microperforare trebuie realizată în funcție de cerințele aplicației, proprietățile optice și termice ale materialului, precum și compatibilitatea cu tipul de fascicul laser.

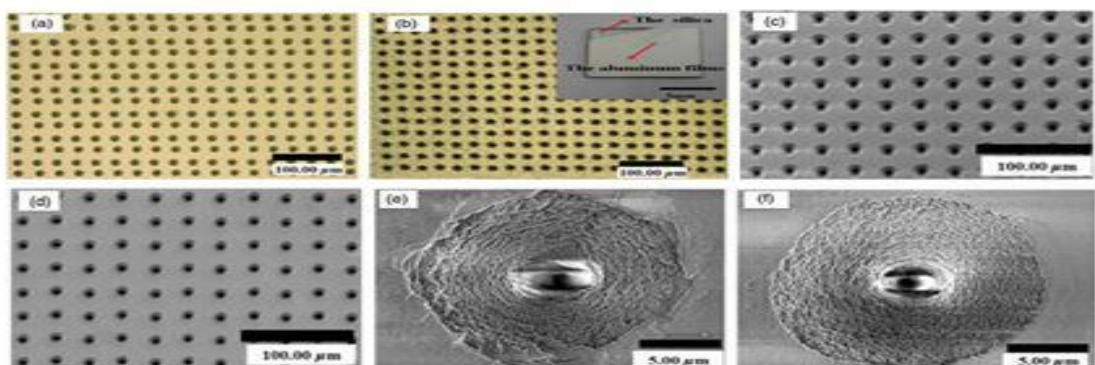


Figura 3.1. Microperforarea materialelor compozite [HU20].

3.2. Principii fundamentale ale microperforării cu fascicul laser

Această secțiune explorează bazele fizice ale procesului de microperforare cu fascicul laser, un fenomen complex care implică transferul de energie de la radiația electromagnetică la materialul solid. Se detaliază modul în care energia fasciculului laser este absorbită de suprafața materialului, generând o creștere bruscă a temperaturii, care conduce la topire, vaporizare sau sublimare localizată.

În concluzie, înțelegerea aprofundată a principiilor fundamentale ale microperforării cu fascicul laser este esențială pentru optimizarea procesului. Controlul fin al parametrilor fizici și adaptarea lor la proprietățile materialului permit realizarea unor perforații precise, durabile și conforme cu standardele ridicate ale industriei auto moderne. (Figura 3.2)

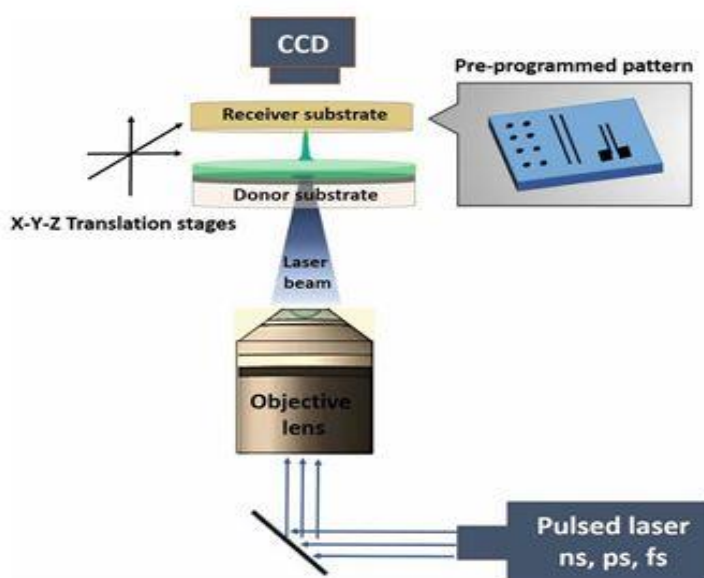


Figura 3.2. Microperforare cu fascicul laser.

3.3. Tipuri de lasere utilizate pentru microperforare

Această secțiune oferă o analiză comparativă a principalelor tipuri de lasere utilizate în microperforarea materialelor textile pentru aplicații în industria auto. Se pornește de la clasificarea generală a surselor laser în funcție de mediul activ: lasere CO₂, lasere Nd:YAG (neodim-iaștit-aluminiu-granat), lasere cu fibră optică și lasere cu impulsuri ultrarapide. Fiecare categorie este prezentată din perspectiva caracteristicilor tehnice relevante: lungimea de undă, tipul de radiație, impuls. (Figura 3.3)

O atenție deosebită este acordată laserelor cu impulsuri ultrarapide (picosecunde și femtosecunde), care permit microprelucrarea cu precizie aproape chirurgicală, fără afectarea termică a materialului. Acestea funcționează prin ablație fonică, nu termică, ceea ce înseamnă că nu există o zonă topită în jurul perforației. Astfel, se obțin orificii de o calitate superioară, însă echipamentele sunt semnificativ mai costisitoare și necesită condiții stricte de operare.

În concluzie, alegerea tipului de laser trebuie realizată în funcție de specificul materialului, cerințele geometrice ale perforațiilor și condițiile tehnologice disponibile. În contextul microperforării airbagurilor, laserele cu fibră și cele ultrarapide se dovedesc a fi cele mai eficiente din punct de vedere al preciziei, randamentului și integrării în liniile de producție moderne.

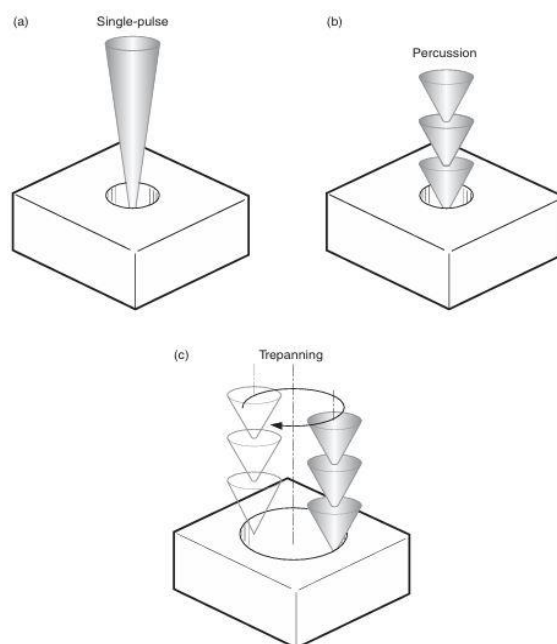


Figura 3.3. Impulsuri laser ultra-rapide.

3.4. Parametrii de prelucrare și impactul lor asupra procesului de microperforare

Această secțiune analizează influența parametrilor tehnologici asupra calității și eficienței procesului de microperforare cu laser. Sunt discutate în detaliu variabilele critice ale procesului: puterea fascicului laser, durata și frecvența impulsului, viteza de scanare, distanța focală și energia specifică aplicată. Fiecare dintre acești parametri contribuie în mod esențial la determinarea dimensiunii, formei și calității perforației obținute în materialul textil.

În concluzie, controlul precis și corelarea parametrilor de prelucrare sunt fundamentale pentru maximizarea eficienței microperforării cu laser. Înțelegerea influenței fiecărui parametru permite inginerilor să proiecteze procese robuste, eficiente și compatibile cu standardele industriale moderne, contribuind direct la creșterea fiabilității airbagurilor. (Figura 3.4)



Figura 3.4. Parametrii procesului de microperforare.

3.5. Metodologii experimentale aplicate pentru eficienţa microperforării cu laser

Această secţiune descrie în detaliu metodologia experimentală utilizată pentru evaluarea eficienţei procesului de microperforare cu laser în contextul aplicaţiilor din industria automotive. Sunt prezentate etapele esenţiale ale experimentelor: selecţia materialelor, stabilirea parametrilor de prelucrare, configurarea echipamentelor şi efectuarea testelor. Accentul este pus pe obţinerea unor perforaţii cu geometrie controlată şi comportament predictibil în condiţii reale de funcţionare a airbagului.

Un alt aspect important tratat în această secţiune este caracterizarea mecanică post-proces. Mostrele perforate au fost supuse testelor de tracţiune şi de rezistenţă la rupere, pentru a verifica dacă perforarea laser nu compromite integritatea structurală a materialului. De asemenea, au fost efectuate teste de îmbătrânire accelerată pentru a simula comportamentul în timp al materialului prelucrat.

În concluzie, metodologia experimentală adoptată a permis o caracterizare completă a procesului de microperforare, oferind date cantitative esenţiale pentru validarea şi implementarea tehnologiei în producţia de airbaguri. Abordarea sistematică şi multidisciplinară a contribuit la crearea unui cadru robust de analiză şi optimizare, compatibil cu cerinţele riguroase din industria auto.(Figura 3.5)

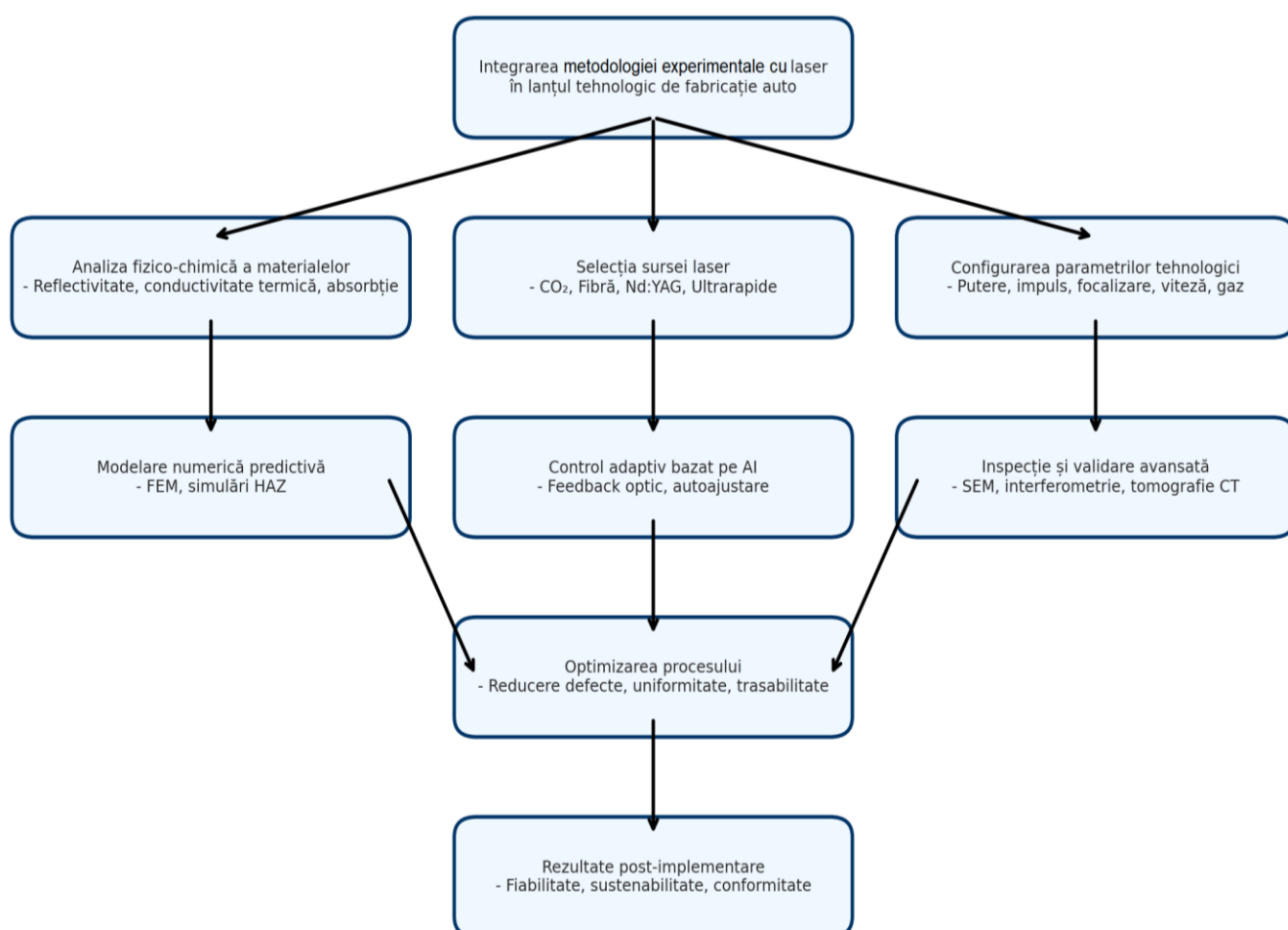


Figura 3.5. Integrarea metodologiei experimentale.

3.6. Metode de control al calităţii în procesul de microperforare cu laser

Secţiunea 3.6 prezintă metodele de control al calităţii utilizate în procesul de microperforare cu laser, esenţiale pentru asigurarea conformităţii şi fiabilităţii produsului finit. Se subliniază că procesul de microperforare, deşi automatizat şi precis, necesită o monitorizare atentă a calităţii pentru a preveni abaterile şi defectele care ar putea compromite funcţionalitatea airbagului. Sunt analizate metode de inspecţie vizuală, metode nedistructive, precum şi tehnici de evaluare cantitativă a geo...

Un accent deosebit este pus pe analiza imagistică de înaltă rezoluţie, utilizată pentru identificarea defectelor de margine, a neregularităţilor de formă sau a variaţiilor în diametrul perforaţiilor.

În concluzie, integrarea unor metode moderne şi eficiente de control al calităţii în procesul de microperforare cu laser este esenţială pentru validarea procesului tehnologic. Monitorizarea în timp real, inspecţia automată şi analiza nedistructivă oferă un cadru solid pentru garantarea siguranţei şi fiabilităţii sistemelor de airbag produse industrial.

3.7. Concluzii

Secţiunea 3.7 sintetizează principalele concluzii rezultate în urma analizelor teoretice şi experimentale din cadrul capitolului. Se confirmă că microperforarea cu laser reprezintă o tehnologie eficientă, precisă şi adaptabilă la cerinţele ridicate ale industriei auto, în special în contextul fabricării airbagurilor. Se evidenţiază că alegerea corectă a materialului textil, corelată cu parametrii de proces şi tipul de laser utilizat, joacă un rol esenţial în obţinerea unor perforaţii funcţionale.

În final, capitolul subliniază caracterul multidisciplinar al cercetării în domeniul microperforării laser: îmbinarea cunoştinţelor din optică, ingineria materialelor, controlul proceselor şi siguranţa auto este indispensabilă pentru dezvoltarea de tehnologii avansate, fiabile şi scalabile. Concluziile trase fundamentează direcţiile viitoare de cercetare, vizând integrarea inteligenţei artificiale în optimizarea proceselor şi extinderea aplicabilităţii tehnologiei la alte componente critice din industria automotive.

CAPITOLUL 4. ANALIZA INFLUENŢEI PARAMETRILOR OPERAŢIONALI ASUPRA PROCESULUI DE MICROPERFORARE CU LASER ŞI SUDURĂ

4.1 Monitorizare, control şi optimizare procesului de microperforare cu laser pentru piese din piele sintetică

Secţiunea 4.1 explorează procesul de monitorizare, control şi optimizare al microperforării cu laser, aplicat pieselor din piele sintetică, componente esenţiale în construcţia sistemelor de siguranţă auto, în special a airbagurilor. Procesul presupune perforarea precisă a materialului fără a compromite integritatea structurală sau estetică a suprafeţei, ceea ce implică un control riguros al parametrilor tehnologici şi integrarea unor strategii avansate de monitorizare în timp real.

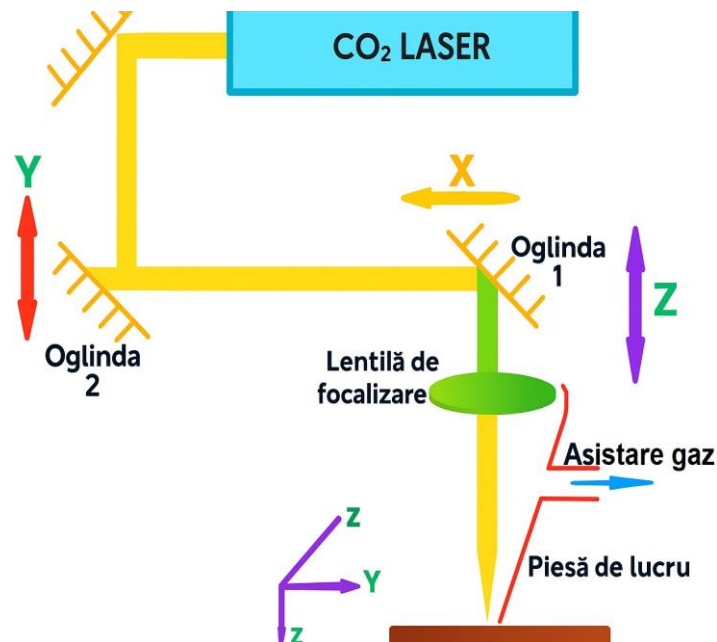


Figura 4.1. Principiul de lucru al laserului.

Pentru atingerea acestui obiectiv, în cadrul cercetării s-au analizat în detaliu factorii care influenţează calitatea perforaţiilor: energia impulsului laser, durata şi frecvenţa impulsurilor, geometria fascicului, viteza de avans şi poziţionarea focală. A fost realizată o caracterizare completă a interacţiunii dintre fasciculul laser şi pielea sintetică, material caracterizat printr-o structură stratificată şi compoziţie eterogenă, ce include substraturi textile acoperite cu PVC. Aceasta necesită o abordare specifică, care să evite arderea sau deteriorarea vizuală a suprafeţei.

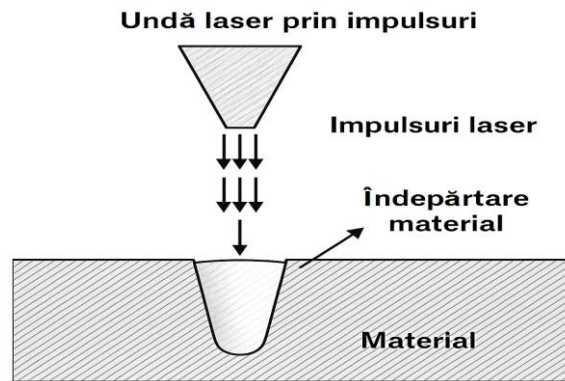
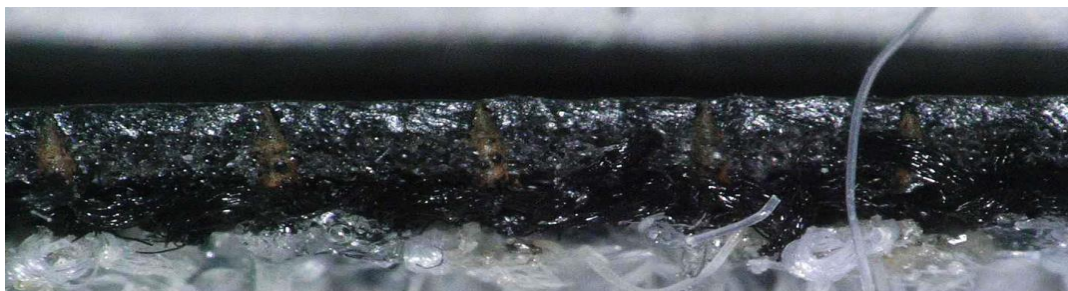
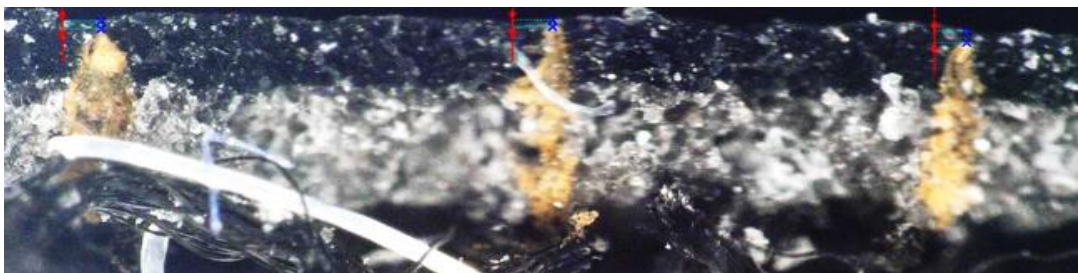


Figura 4.2. Microperforare optima cu undă laser prin impulsuri.

Procesul de monitorizare s-a bazat pe utilizarea unor sisteme optice de înaltă rezoluție, capabile să detecteze instantaneu variațiile în calitatea perforațiilor. Imaginile capturate în timp real au fost analizate cu ajutorul algoritmilor de prelucrare a imaginii, care permit identificarea defectelor precum perforații incomplete, margini topite sau lipsa uniformității. Monitorizarea spectroscopică a radiației emise în timpul procesului a fost utilizată pentru a evalua nivelul de energie transferat și pentru a detecta eventualele devieri de la parametrii optimi.



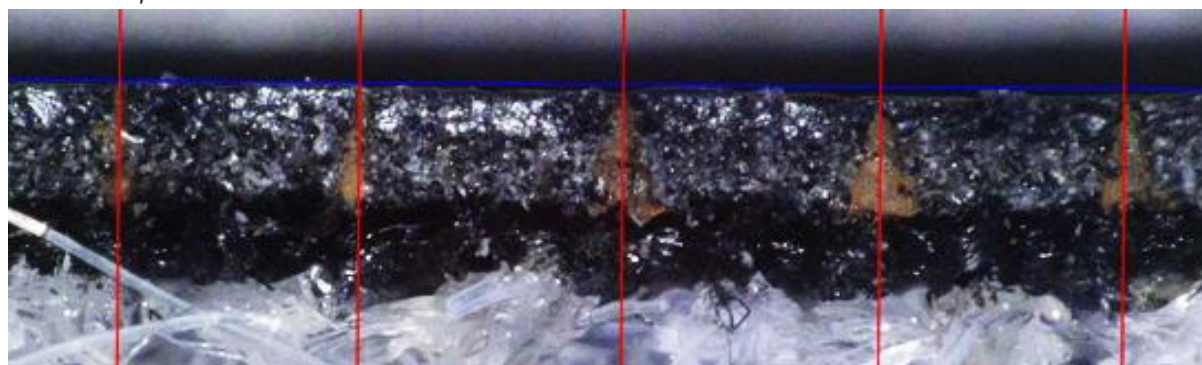
(a)



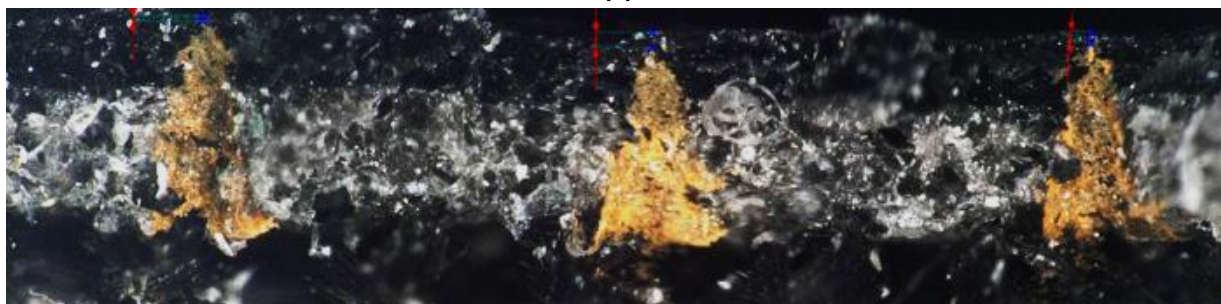
(b)

Figura 4.3. Imagini microstructurale ale pieselor neconforme: (a) micro-orificii în stratul superior al materialului; (b) perforare completă a micro-orificiilor. Bara de scală este de 500 μm .

Optimizarea procesului s-a realizat pe baza unor modele matematice dezvoltate prin planuri experimentale factoriale, analiză de regresie și metode de răspuns la suprafață (RSM). Aceste modele au fost utilizate pentru identificarea zonelor optime ale parametrilor care asigură un compromis favorabil între viteză, calitate și costuri energetice. Rezultatele au indicat că o combinație specifică de durată a impulsului, energie și frecvență duce la obținerea unor perforații de înaltă calitate fără a produce defecte secundare.



(a)



(b)

Figura 4.4. Imagini microstructurale ale pieselor conforme: (a) orificii în stratul superior al materialului; (b) microperforare finalizată a orificiilor. Bara de scală este de 500 μm .

În concluzie, această secțiune subliniază importanța unui control riguros și a unei strategii de optimizare avansate pentru obținerea unor rezultate fiabile în microperforarea pielii sintetice destinate airbagurilor. Combinarea tehnologiei laser de înaltă precizie cu sisteme de monitorizare optică și algoritmi de control adaptiv asigură nu doar calitatea și siguranța produsului final, ci și o eficiență sporită în procesul de fabricație, esențială pentru competitivitatea în industria auto modernă.

4.2 Influența nivelului de zgomot electromagnetic asupra procesului de microperforare cu laser specific componentelor auto

Secțiunea 4.2 abordează o tematică avansată și relativ nouă în domeniul procesării cu laser: influența zgomotului electromagnetic asupra performanței procesului de microperforare, în special în cazul componentelor auto sensibile precum cele din zona airbagului. Această problemă este relevantă în contextul automatizării și al creșterii densității echipamentelor electronice în liniile de producție, unde sursele multiple de interferențe pot afecta stabilitatea fasciculului laser și precizia prelucrării.

În plus, s-a analizat impactul zgomotului electromagnetic asupra sistemelor de monitorizare optică și a senzorilor utilizați în bucla de control a procesului. Aceste interferențe pot conduce la citiri eronate și la comenzi incorecte transmise către sursa laser, afectând în mod negativ adaptabilitatea sistemului la variațiile de material și condițiile de proces.

În concluzie, secțiunea subliniază importanța tratării zgomotului electromagnetic ca factor de risc major în aplicațiile de microperforare cu laser în industria auto. Integrarea unor strategii eficiente de protecție

electromagnetică este vitală pentru menţinerea performanţei ridicate a procesului, pentru reducerea defectelor şi pentru asigurarea compatibilităţii electromagnetice a întregului sistem de producţie. Cercetările deschid calea pentru dezvoltarea unor sisteme laser mai robuste şi mai bine protejate.

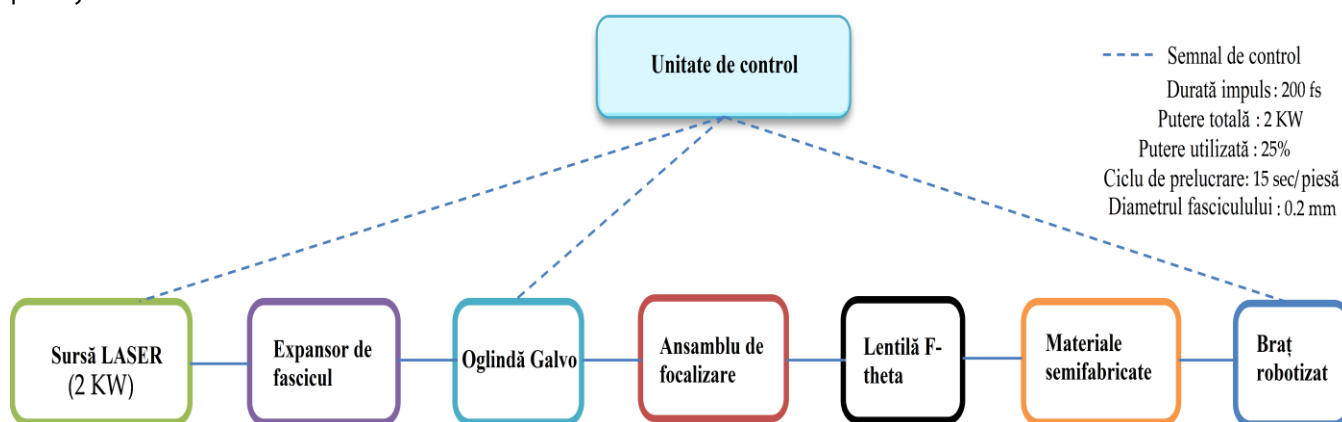


Figura 4.5. Diagramă schematică a configuraţiei experimentale cu integrarea robotului.

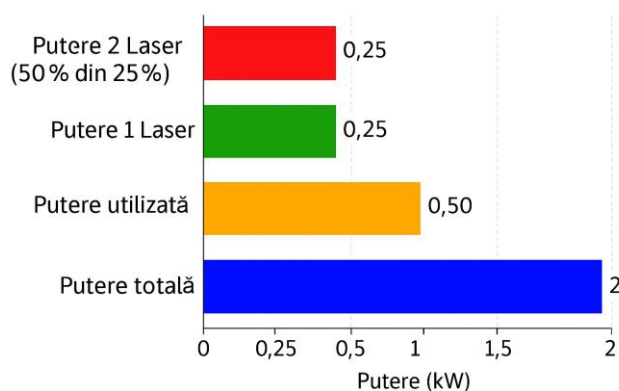


Figura 4.6. Setările şi distribuţia puterii laserului.

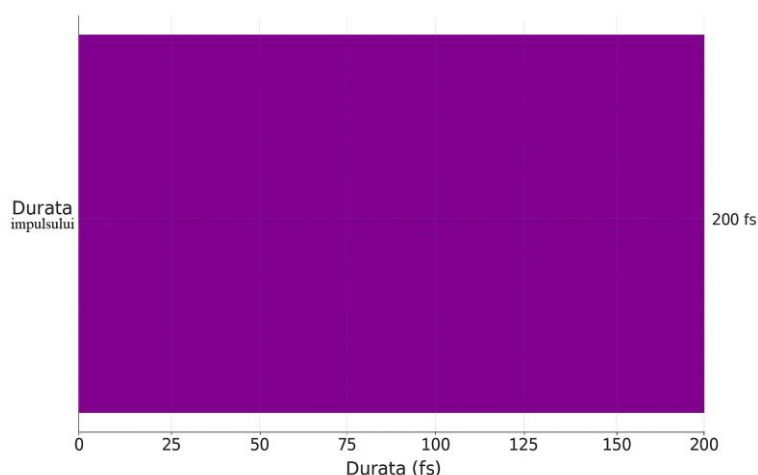


Figura 4.7. Durata impulsului laser.

Configuraţia Optică

Sistemul optic al laserului este alcătuit din lentile de scanare f-theta, expansoare de fascicul, ansambluri de focalizare şi oglinzi Galvo, toate fiind proiectate să funcţioneze la lungimile de undă specifice laserelor CO₂. Aceste componente sunt esenţiale pentru controlul şi ghidarea precisă a fasciculului laser, asigurând uniformitatea şi precizia microperforaţiilor.

Dimensiunea fascicului laser este controlată prin sistemul optic și poate fi ajustată astfel încât să se obțină un punct focal extrem de mic, necesar pentru procesarea de înaltă precizie a materialelor textile (Figura 4.8.). Această capacitate de ajustare este crucială pentru menținerea consistenței perforațiilor, reducând posibilitatea apariției deformărilor termice sau a imperfecțiunilor mecanice.

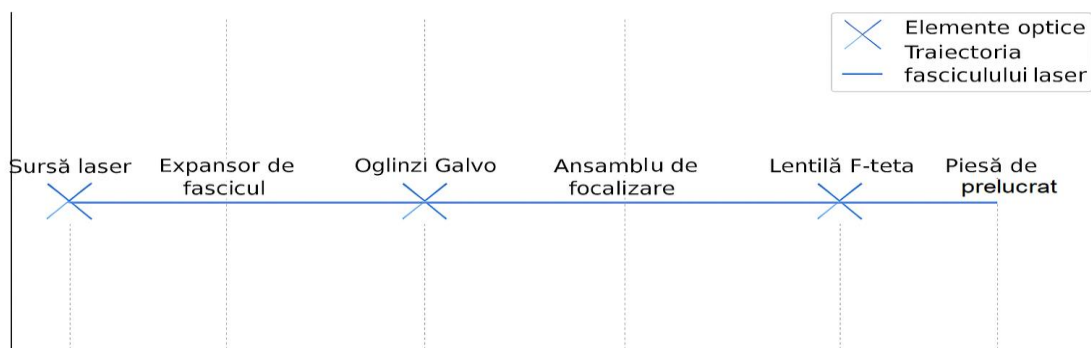


Figura 4.8. Configurația optică a sistemului LASER.

Analiza Rezultatelor Testului de Tracțiune

Rezultatele testelor de tracțiune efectuate asupra materialelor perforate cu laser evidențiază diferențe semnificative de performanță între eșantioanele clasificate ca NOK (Not OK) și cele clasificate ca OK, conform reprezentărilor din Figura 4.9. până la Figura 4.11. Aceste variații indică un impact semnificativ al zgomotului electromagnetic asupra comportamentului mecanic al materialului perforat, subliniind importanța controlului riguros și optimizării parametrilor experimentali pentru asigurarea calității procesului de microperforare cu laser.

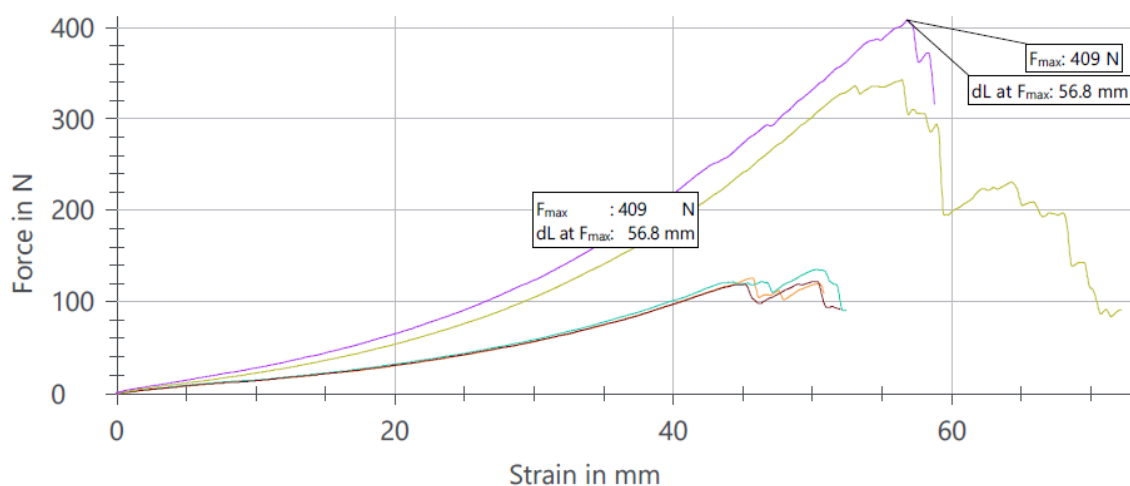


Figura 4.9. Rezultatele analizei după testul de tracțiune cu valori NOK și nivelul de zgomot setat la 0,8 V.

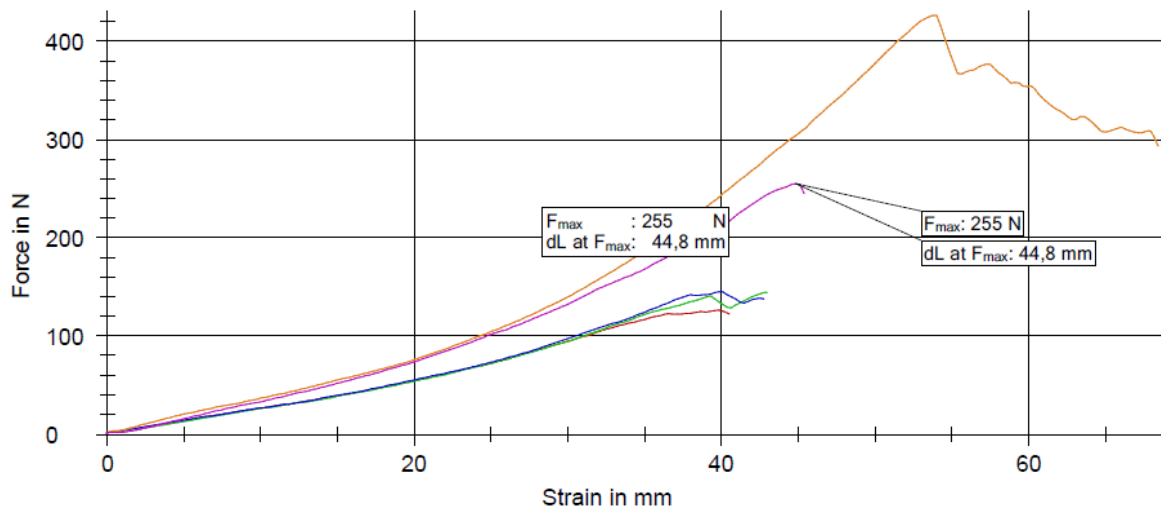


Figura 4.10. Rezultatele analizei după testul de tracţiune cu valori NOK şi nivelul de zgomot setat la 1 V.

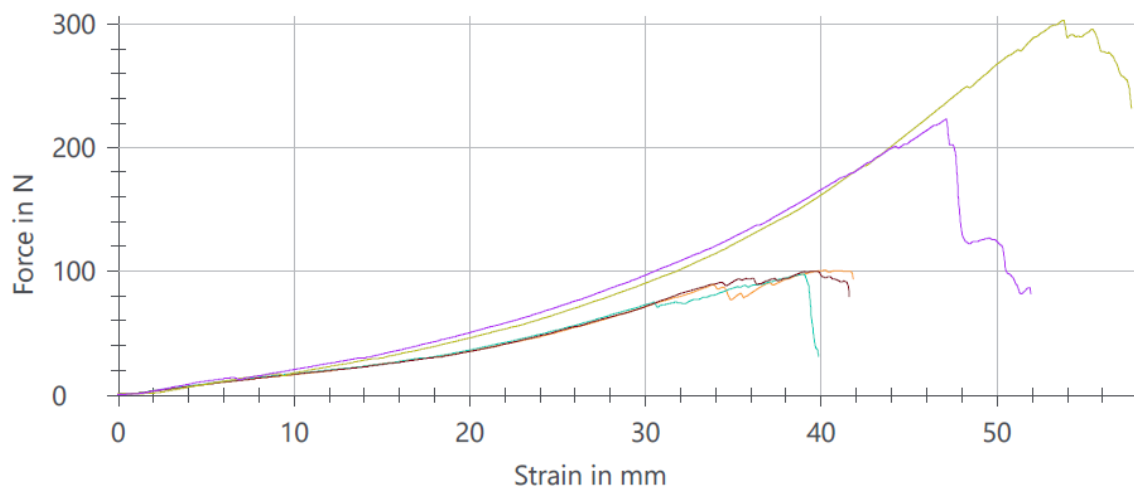


Figura 4.11. Rezultatele analizei după testul de tracţiune cu valori OK şi nivelul de zgomot setat la 1,2 V.

Impactul Nivelului de Zgomot Electromagnetic asupra Rezistenţei la Tracţiune

Analiza rezultatelor evidenţiază o corelaţie directă între nivelul zgomotului electromagnetic şi comportamentul mecanic al materialului perforat:

- La 0,8 V, perforaţiile tind să fie mai rigide şi cu margini mai aspre, ceea ce sugerează o acumulare excesivă de căldură în timpul procesului laser, determinând o modificare a structurii interne a materialului. Această supraîncălzire poate conduce la fragilitate crescută, ceea ce afectează capacitatea materialului de a absorbi şocuri mecanice fără a se deteriora.
- La 1 V, s-a observat o reducere a rezistenţei la tracţiune, ceea ce indică un grad crescut de instabilitate a perforaţiilor. Acest rezultat sugerează că fasciculul laser nu a avut un control optim asupra microperforării, ducând la perforaţii incomplete, neuniforme sau cu margini neregulate, ceea ce reduce capacitatea materialului de a distribui uniform forţele mecanice.
- La 1,2 V, rezultatele sunt mult mai constante şi mai apropiate de valorile optime impuse de standardele de siguranţă auto. Acest lucru sugerează că în acest interval de EMI, fasciculul

laser funcţionează într-un mod mai stabil, iar perforaţiile sunt executate cu un grad ridicat de precizie şi uniformitate.

- Aceste rezultate subliniază faptul că nivelurile de zgomot electromagnetic trebuie controlate cu precizie, deoarece o variaţie necontrolată a EMI poate afecta semnificativ rezistenţa mecanică a materialului perforat.

4.3. Studiu privind microperforarea cu laser pentru integrarea materialelor sandwich în zonele airbagului utilizând regimuri speciale

Secţiunea 4.3 investighează aplicabilitatea procesului de microperforare cu laser asupra materialelor sandwich, utilizate în construcţia airbagurilor, prin adoptarea unor regimuri speciale de lucru. Materialele sandwich sunt compuse din mai multe straturi funcţionale, cu roluri diferite, cum ar fi stratul exterior de protecţie, stratul intermediar de absorbţie şi stratul interior de suport mecanic.

Un aspect important analizat este comportamentul termic diferenţiat al fiecărui strat, care determină o absorbţie neuniformă a energiei laser. De exemplu, stratul superior poate avea o absorbţie crescută şi se topeşte uşor, în timp ce straturile interioare, mai termoizolante, pot reflecta sau dispersa energia, afectând uniformitatea perforaţiei.

Un beneficiu major evidenţiat de acest studiu este posibilitatea de integrare a materialelor sandwich în zone critice ale airbagului, acolo unde sunt necesare caracteristici diferite de rezistenţă mecanică, flexibilitate şi permeabilitate. Prin ajustarea fină a parametrilor laser în funcţie de arhitectura stratificată, este posibilă adaptarea locală a perforaţiilor în funcţie de rolul funcţional al fiecărei zone din material.

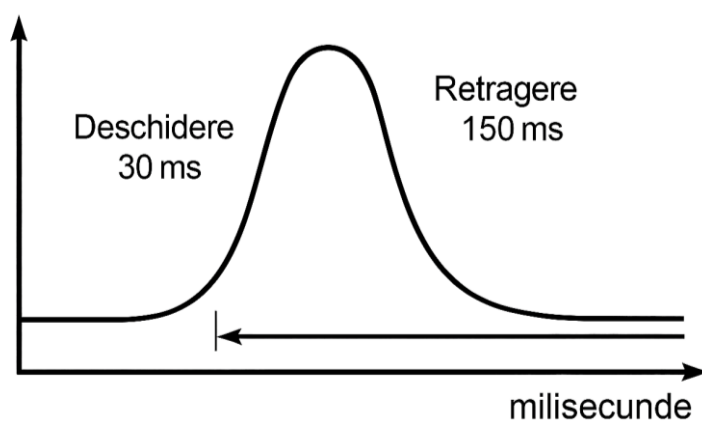
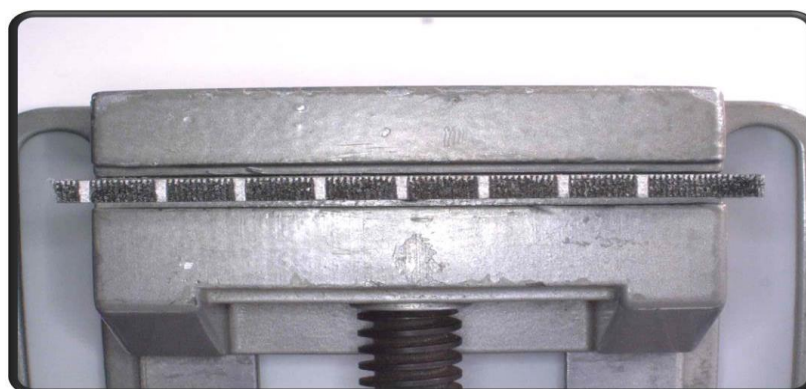


Figura 4.12. Declansarea optima a unui airbag.

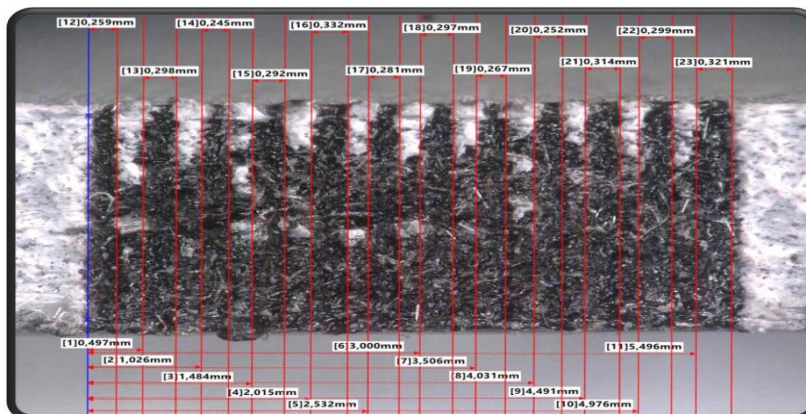
Testarea Forţei de Rupere

Analiza rezultatelor se referă la forţa de rupere, analiza gradului de conformitate microscopică şi eficienţa procesului.

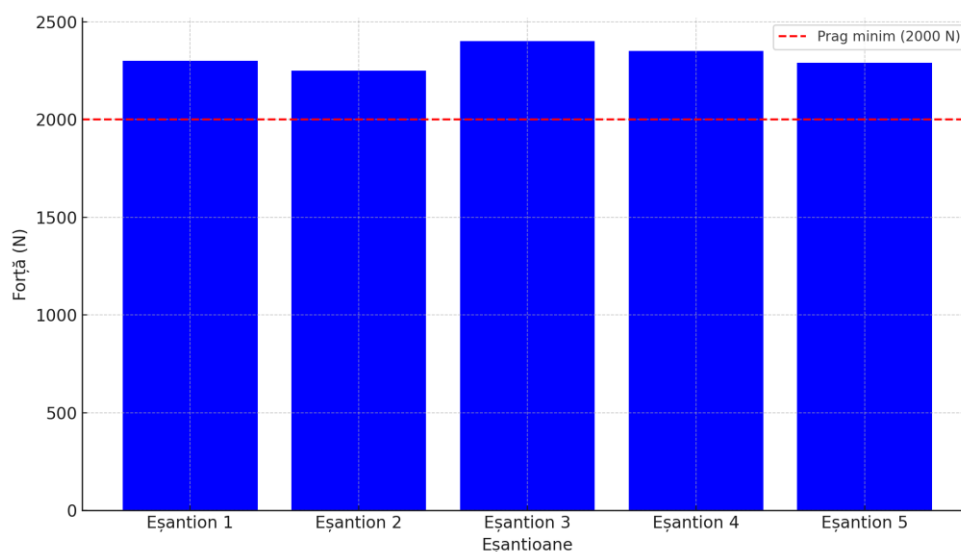
Forţa de rupere: Probele au depăşit pragul minim stabilit, înregistrând o forţă medie de rupere de 2300 N, confirmând astfel rezistenţa materialului (Figura 4.13).



a)



b)



c)

Figura 4.13. a) Rezultatele testării mecanice: ruperea materialului; b) Analiza geometriei microperforațiilor; c) Rezultatele testării forței de rupere.

Analiza rezultatelor a evidențiat performanța materialelor testate în ceea ce privește rezistența mecanică și conformitatea cu cerințele de siguranță din industria auto. Testele de tracțiune au fost efectuate pe un eşantion format din 50 de piese, selectate din mai multe sarje de injectare, pentru a asigura o evaluare reprezentativă a variabilității materialelor utilizate în procesul de fabricație. Această diversificare a probelor a fost esențială pentru a determina consistența proprietăților mecanice și pentru a identifica eventualele diferențe cauzate de variațiile în procesul de producție.

În cadrul testelor, toate probele au fost supuse unor forțe de tracțiune progresiv crescătoare până la atingerea punctului de rupere. Rezultatele au arătat că toate probele au depășit pragul minim de 2000 N, ceea ce demonstrează o bună performanță mecanică a materialului. Valoarea medie a forței de rupere înregistrată a fost de 2300 N, indicând faptul că materialul nu doar îndeplinește cerințele minime, ci oferă și o rezervă suplimentară de rezistență.

Perforațiile au respectat toleranțele de poziție și formă, prezentând daune termice minime, ceea ce reflectă optimizarea parametrilor (Figura 4.14.).

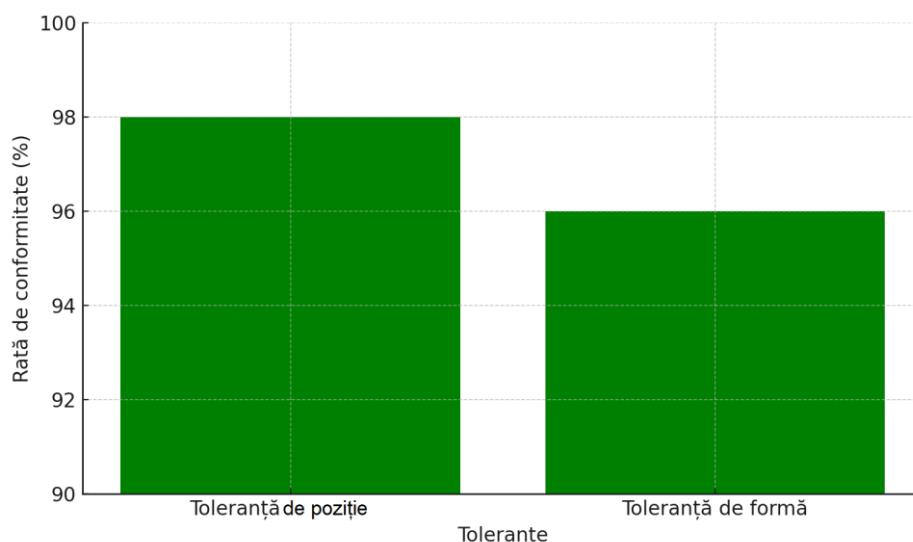


Figura 4.14. Rezultatele analizei conformității evaluării microscopice.

Evaluări Microscopice

În concluzie, microscopia de înaltă rezoluție a oferit informații esențiale despre interacțiunea dintre laser și material, permițând ajustări precise ale parametrilor de procesare pentru a îmbunătăți performanța materialului. Aceste rezultate au avut un impact semnificativ asupra dezvoltării unor soluții mai fiabile pentru integrarea materialelor sandwich în structurile vehiculelor moderne, contribuind la creșterea siguranței și fiabilității sistemelor de protecție pasivă din industria auto.

Eficiență: Timpurile ciclului de proces s-au redus cu 15%, iar rata defectelor a scăzut sub 2% datorită stabilității și controlului îmbunătățit (Figura 4.15.).

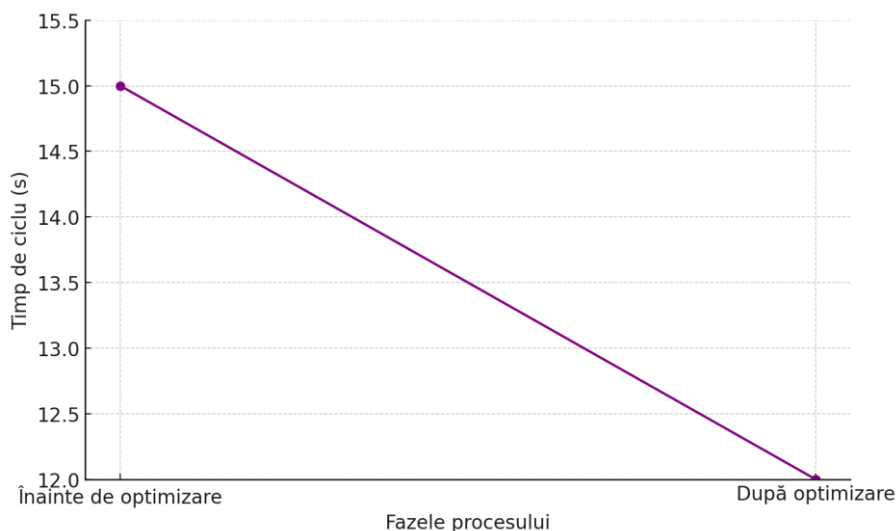


Figura 4.15. Rezultatele reducerii timpului ciclului de proces.

Analiza eficienței procesului a evidențiat îmbunătățiri semnificative în ceea ce privește timpii ciclului de producție și rata defectelor, demonstrând optimizarea parametrilor tehnologici. Optimizarea procesului a condus la o reducere a timpului ciclului de producție cu 15%, ceea ce indică o creștere semnificativă a eficienței operaționale. Această scădere a timpului de procesare a fost rezultatul unor ajustări precise ale parametrilor laserului, care au permis o perforare mai rapidă și mai uniformă, fără a compromite calitatea materialului.

Prin stabilizarea parametrilor de proces și îmbunătățirea controlului operațional, rata defectelor a scăzut sub 2%, marcând o îmbunătățire semnificativă față de valorile anterioare. Această reducere a defectelor a fost posibilă printr-o mai bună calibrare a echipamentului laser, minimizând variabilitatea în perforare și eliminând probleme precum deformările termice sau neregularitățile geometrice.

4.4 Studiu privind capabilitatea mașinii de microperforare cu laser în zona airbagului

Secțiunea 4.4 analizează în detaliu capabilitatea mașinii de microperforare cu laser utilizate pentru procesarea componentelor auto din zona airbagului. Această cercetare este fundamentală pentru validarea echipamentului tehnologic din punct de vedere al preciziei, repetabilității, fiabilității și adaptabilității la cerințele specifice ale industriei auto, unde siguranța este o condiție esențială.

Pentru cuantificarea capabilității, s-au aplicat indicatori statistici de tip Cp, Cpk, analiza ANOVA și diagrame de control. Aceste instrumente au permis evaluarea robustă a stabilității și capabilității procesului în timp, punând în evidență faptul că mașina testată se încadrează în cerințele stricte ale standardelor din industria automotive.

În concluzie, această secțiune confirmă capabilitatea ridicată a mașinii de microperforare cu laser analizate, atât din perspectiva calității cât și a productivității. Rezultatele susțin integrarea acestei tehnologii în procesele industriale critice, cum este fabricarea airbagurilor, oferind garanții privind siguranța, durabilitatea și eficiența economică a procesului. Studiul constituie un model de bună practică pentru evaluarea echipamentelor în contexte de fabricație avansată, contribuind la perfecționarea proceselor din industria automotive.

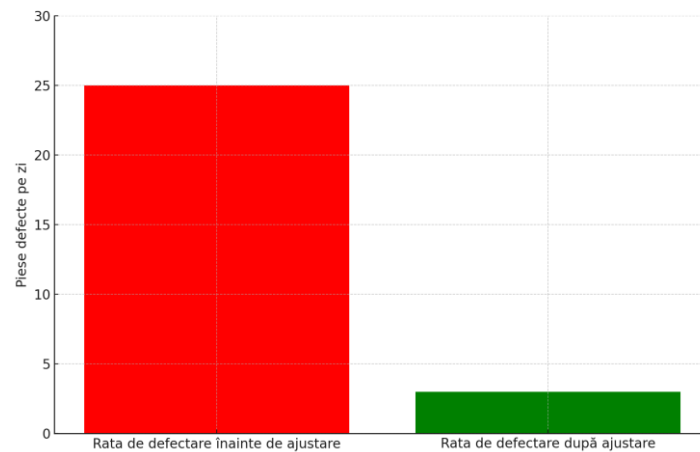
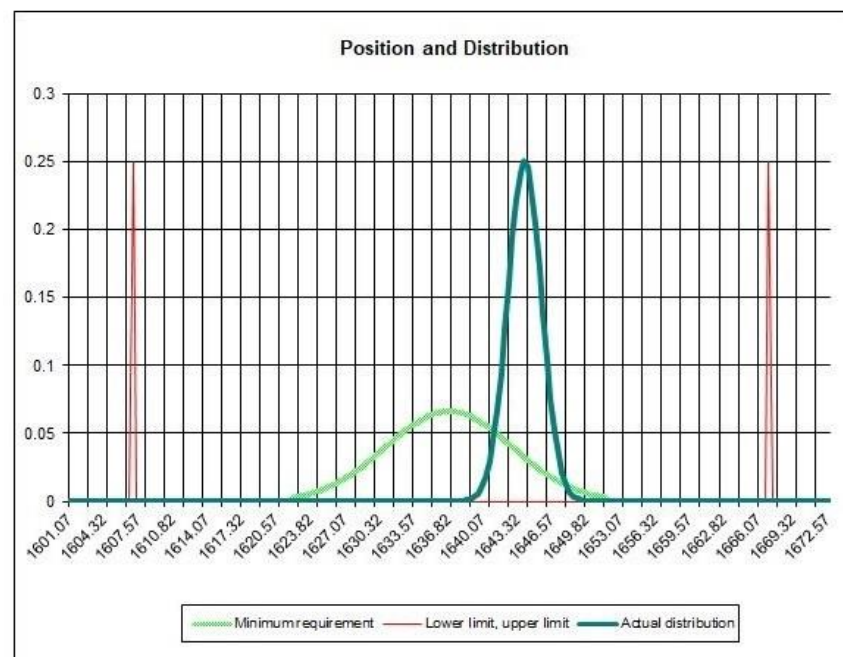


Figura 4.16. Ratele defectelor înainte și după ajustarea procesului.



Mean value $\bar{X}_q$: **1644.100**
Standard deviation s: **1.5940**
Peak value: **1645.000**
Minimum value: **1640.000**

Cm: **6.27** **capable**
Cmk: **4.79** **capable**

Evaluation
for C_p/C_k pk 1.67
required tolerance (+/-): **7.986 0**
and/or required dispersion: **5.9880**
and X_q correction: **-7.100 0**

Figura 4.17. Analiza capabilității mașinii.

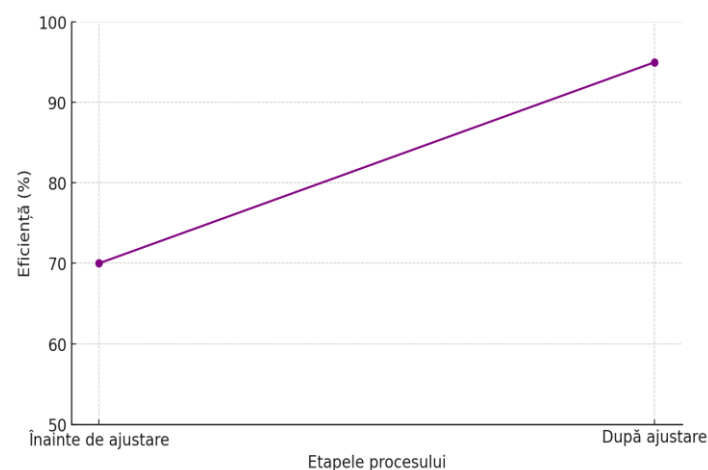


Figura 4.18. Eficiența operațională înainte și după ajustare.

Rezultatele acestui studiu demonstrează impactul semnificativ pe care optimizarea procesului îl poate avea asupra performanţei unei maşini de microperforare utilizate în producţia de componente pentru industria auto. Ajustările efectuate asupra parametrilor procesului au dus la o reducere semnificativă a defectelor, atingând o rată de eroare de doar 0,2%, ceea ce reflectă o îmbunătăţire considerabilă faţă de stadiul iniţial. Această scădere a defectelor nu doar că îmbunătăţeşte calitatea produsului final, dar contribuie şi la o utilizare mai eficientă a materialelor şi la reducerea pierderilor, conducând astfel la un proces mai sustenabil şi mai economic.

4.5. Eficienţa şi precizia procesului de sudură pentru componentele auto din zona airbag

Secţiunea 4.5 analizează eficienţa şi precizia procesului de sudură laser aplicat componentelor auto din zona airbagului, cu accent pe integrarea sigură a materialelor şi pe menţinerea performanţelor funcţionale ale sistemului de protecţie pasivă. Procesul de sudură este esenţial pentru unirea durabilă a pieselor din materiale metalice sau compozite, asigurând o rezistenţă mecanică ridicată şi o etanşare eficientă în condiţii critice de utilizare.

Pentru a valida calitatea sudurii, s-au efectuat teste mecanice, precum tracţiune, compresiune şi impact, precum şi examinări şi metode vizuale de înaltă rezoluţie. Rezultatele au confirmat că sudurile realizate în condiţiile optime prezintă o rezistenţă superioară şi nu compromit funcţionarea sistemului airbag în condiţii de declanşare rapidă.

O contribuţie importantă a studiului este dezvoltarea unor algoritmi de optimizare multi-obiectiv care să balanseze eficienţa energetică, viteza de lucru şi calitatea sudurii. Aceşti algoritmi au fost implementaţi în software-ul de control al maşinii de sudură, permiţând adaptarea în timp real a parametrilor în funcţie de variaţiile materialului sau de condiţiile ambientale.

Încălzirea

Faza de încălzire joacă un rol esenţial în procesul de sudare a materialelor termoplastice, fiind crucială pentru obţinerea unei fuziuni optime a materialului, fără a compromite integritatea acestuia. Această etapă implică o serie de paşi critici pentru a asigura o îmbinare eficientă a componentelor plastice utilizate, de exemplu, în asamblarea airbagurilor.

Proprietăţile materialului şi designul elementului de încălzire sunt factori determinanţi pentru eficienţa procesului de sudare. Punctele de topire ale materialelor termoplastice variază, ceea ce face necesară setarea unei temperaturi uniforme de 600°C, pentru a asigura o încălzire rapidă şi uniformă. În mod obişnuit, elementele de încălzire sunt fabricate din materiale cu conductivitate termică ridicată, cum ar fi aluminiul sau alamă, acestea fiind alese special pentru a permite distribuţia uniformă a căldurii în timpul procesului de sudare (Figura 4.36.).

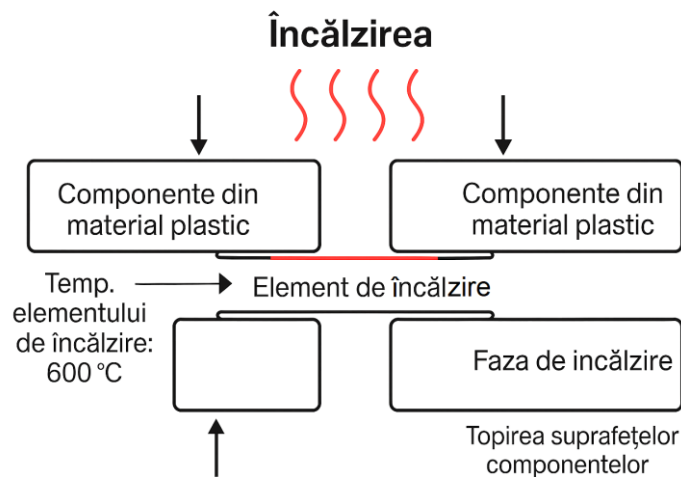


Figura 4.19. Principiul de funcționare al echipamentului de sudură.

Îndepărtarea elementului de încălzire

Îndepărtarea atentă și precisă a elementului de încălzire este esențială pentru menținerea integrității structurale și funcționale a componentelor plastice sudate. Această etapă este crucială, deoarece influențează direct calitatea finală și fiabilitatea îmbinării. Momentul în care se efectuează îndepărtarea este deosebit de important, deoarece elementul de încălzire trebuie retras imediat după ce suprafețele topite au atins un nivel optim de vâscozitate.

Îmbinarea

Faza de îmbinare reprezintă momentul culminant al procesului de sudare, deoarece este etapa în care are loc fuziunea propriu-zisă a componentelor plastice. Obținerea unei suduri rezistente și uniforme depinde în mod critic de alinierea precisă a pieselor și de aplicarea unei presiuni optime. Orice abatere în acest proces poate duce la formarea unor puncte slabe în sudură, afectând durabilitatea și rezistența îmbinării.

Înainte de îmbinare, este esențială o aliniere meticuloasă a suprafețelor plastice pentru a asigura o potrivire perfectă între ele. Această aliniere contribuie la integritatea structurală a îmbinării, prevenind formarea unor goluri sau zone cu distribuție neuniformă a materialului topit. Orice neconcordanță în aliniere poate duce la distribuția inegală a presiunii în timpul sudării, ceea ce afectează uniformitatea sudurii și poate genera puncte de slăbiciune.

În concluzie, faza de îmbinare este crucială pentru succesul întregului proces de sudare, deoarece influențează calitatea, uniformitatea și durabilitatea îmbinării. Prin aplicarea unor tehnologii avansate de presare și control al răcirii, se poate asigura o sudură rezistentă și fiabilă, capabilă să îndeplinească cerințele stricte ale industriei moderne.

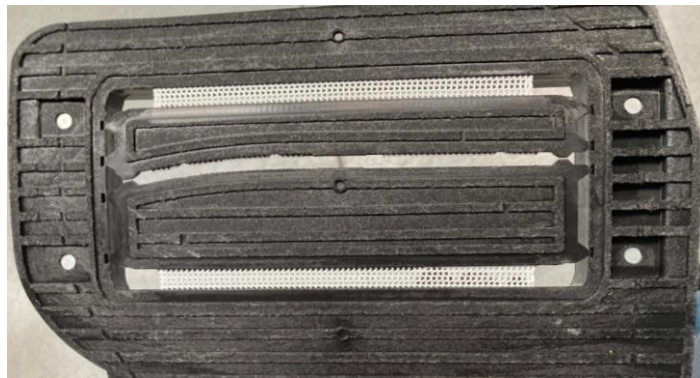
4.6. Evaluarea rezultatelor experimentale ale procesului laser în zona airbagului și analiza influenței asupra procesului de sudură

Secțiunea 4.6 prezintă o analiză detaliată a rezultatelor experimentale obținute în urma aplicării procesului laser în zona airbagului, punând accent pe impactul acestor rezultate asupra calității sudurii și performanței generale a componentelor auto. Evaluarea este esențială pentru validarea ipotezelor formulate în etapele anterioare ale cercetării și pentru dezvoltarea unor strategii de optimizare în cadrul procesului de fabricație.

Această secțiune confirmă faptul că evaluarea integrată a rezultatelor experimentale este esențială pentru îmbunătățirea proceselor de fabricație bazate pe tehnologia laser. Interdependența dintre microperforare și sudură este un element critic care trebuie luat în considerare în proiectarea liniilor de producție pentru componentele din zona airbagului. Rezultatele oferă o bază științifică solidă pentru implementarea unor soluții tehnologice avansate, cu beneficii directe asupra siguranței componentelor auto.



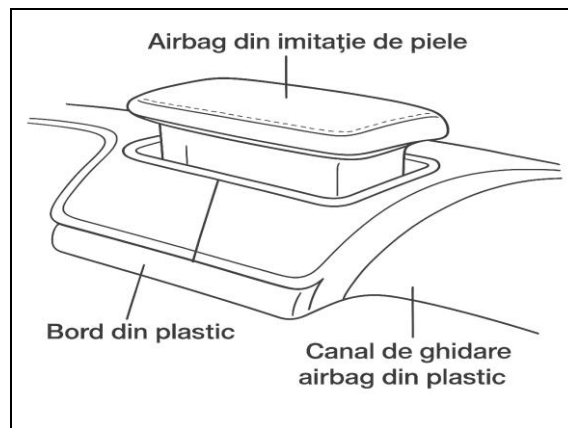
a)



b)



c)



d)

Figura 4.20. a) Utilaj sudură cu element încălzit; b) Topire; c) Sudură cu element încălzit; d) Ansamblu airbag format din imitație de piele, bord din plastic și canal de ghidare Airbag din plastic.

În concluzie, laserarea în zona airbag-ului, tratamentul atent al imitației de piele și sudura precisă a canalului de ghidare sunt procese care, împreună, formează un ansamblu esențial pentru obținerea unui produs final de calitate superioară

4.7. Concluzii

Secțiunea 4.7 oferă o sinteză amplă a concluziilor rezultate din cercetările și experimentele desfășurate în cadrul capitolului 4, care a vizat procesarea cu laser în zona airbagului auto. Concluziile reflectă atât validarea ipotezelor inițiale, cât și impactul major al tehnologiei laser în îmbunătățirea calității, eficienței și siguranței proceselor industriale implicate în fabricarea acestor componente critice. Această secțiune subliniază interdependența dintre procesele de microperforare și sudură.

Una dintre principalele concluzii evidențiate este eficiența tehnologiei laser în microperforarea pielii sintetice utilizate în airbaguri. Monitorizarea și controlul precis al parametrilor procesului au permis obținerea unor perforații uniforme, fără a compromite integritatea mecanică a materialului. Aplicarea regimurilor speciale de lucru și integrarea feedback-ului optic au demonstrat o adaptabilitate crescută a sistemelor laser la variabilitatea materialelor.

În ceea ce privește influența zgomotului electromagnetic, studiul a demonstrat că perturbările exterioare pot afecta semnificativ calitatea microperforării și sudurii. Măsurile de protecție electromagnetică implementate, împreună cu sistemele robuste de monitorizare, au asigurat o funcționare stabilă a echipamentelor. Astfel, s-a confirmat necesitatea integrării unei arhitecturi de protecție EM în proiectarea și operarea instalațiilor laser pentru industria auto.

Referitor la integrarea materialelor sandwich, cercetările au demonstrat fezabilitatea perforării acestora prin utilizarea unor strategii avansate, cum ar fi focalizarea dinamică și impulsurile ultrarapide. Rezultatele experimentale au arătat că perforațiile pot fi controlate cu precizie pe fiecare strat component, fără a afecta funcționalitatea materialului compozit. Această capacitate deschide noi direcții de cercetare și dezvoltare pentru utilizarea de materiale complexe în sistemele de siguranță.

Evaluarea capabilității mașinii de microperforare a confirmat performanța ridicată a echipamentului din punct de vedere al preciziei, repetabilității și flexibilității. Testele statistice aplicate au arătat că

variațiile sunt minime și se încadrează în limitele impuse de standardele industriale. În plus, adaptabilitatea mașinii la diverse configurații de materiale și geometrii face posibilă extinderea aplicațiilor în alte zone critice ale autovehiculului.

În final, analiza globală a rezultatelor experimentale a evidențiat corelația strânsă dintre microperforare și sudură în zona airbagului. Calitatea perforațiilor influențează direct succesul sudurii, iar optimizarea ambelor procese în mod integrat este esențială pentru atingerea standardelor de siguranță cerute în domeniul auto. Implementarea unei strategii comune de monitorizare, control și optimizare pentru ambele procese oferă un cadru solid pentru creșterea competitivității și inovației în acest sector.

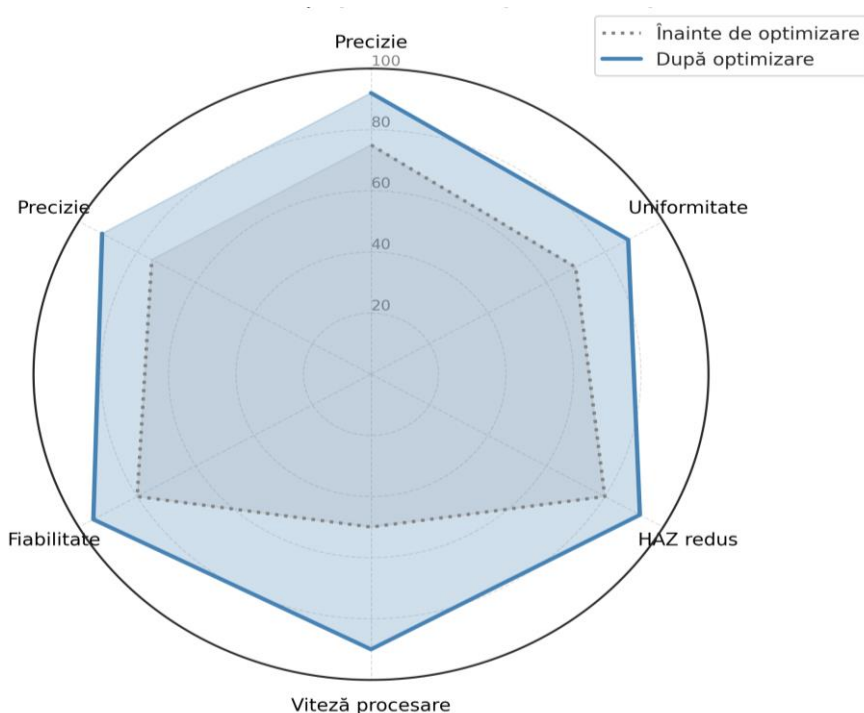


Figura 4.21. Radar tehnic: Performanță proces microperforare optimizat

În concluzie, rezultatele prezentate în acest capitol demonstrează că performanța procesului de microperforare cu laser este dependentă de un set complex de factori tehnici și de mediu, iar optimizarea acestuia presupune o abordare integrată, multidisciplinară, care să combine metodele de analiză experimentală, simularea numerică, automatizarea inteligentă și controlul statistic.

CAPITOLUL 5. INTEGRAREA ŞI MONITORIZAREA ÎN TIMP REAL A PROCESULUI PRIN INTERMEDIUL SISTEMELOR DE VIZUALIZARE SHOPFLOOR (SFV)

5.1. Obiectivele şi domeniul de aplicare al Ghidului SFV

Acest ghid dedicat shopfloor-ului are ca scop să servească drept resursă suplimentară pentru toate industriile interesate să utilizeze aplicația, oferind informații fundamentale pentru utilizatorii începători. În plus, acesta include un rezumat al submeniurilor specifice relevante, detalii complete despre structura și funcționalitățile interfeței, precum și informații clare despre responsabilitățile și persoanele de contact din cadrul Departamentelor.

Fiind un document dinamic, ghidul ar trebui să fie aplicat constant în activitatea practică, iar conținutul acestuia ar trebui să fie actualizat în mod regulat pentru a reflecta cele mai recente modificări și îmbunătățiri. Publicarea ghidului ar trebui să se realizeze întotdeauna în cea mai recentă versiune, pentru a garanta că utilizatorii au acces la informații precise și actualizate. Această abordare ar putea asigura o aliniere eficientă a echipelor și o utilizare optimă a resurselor shopfloor.

5.2. Utilizator-cheie pentru Digitalizare

Utilizatorii-cheie pentru digitalizare sunt angajați desemnați într-o organizație pentru a sprijini implementarea, utilizarea și optimizarea soluțiilor digitale. Aceștia au rolul de a acționa ca intermediari între utilizatorii finali și echipele tehnice sau IT, oferind feedback și propunând îmbunătățiri. De asemenea, ei se ocupă de instruirea colegilor în utilizarea noilor platforme și instrumente digitale, asigurând astfel o tranziție eficientă.

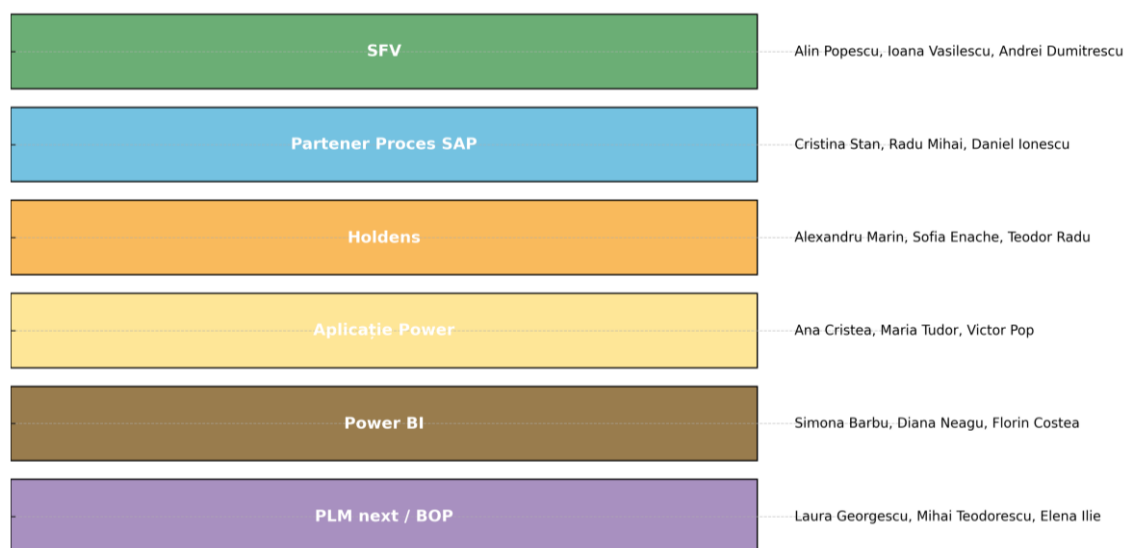


Figura 5.1 Utilizatori cheie pentru digitalizare

5.3. Introducerea unei stații în Shopfloor

Diagrama de mai jos detaliază toate cele trei scenarii în care implementarea OPC UA / SFV ar fi necesară, oferind o prezentare clară a situațiilor posibile și a pașilor ce ar trebui urmați pentru fiecare caz în parte.

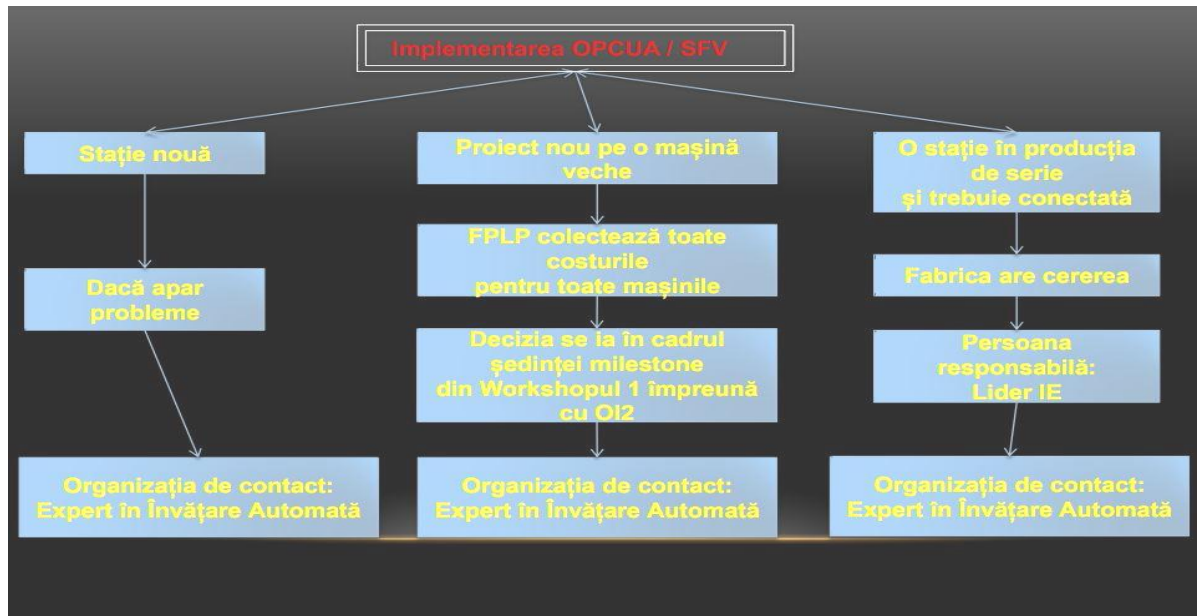


Figura 5.2. Implementarea OPCUA/SFV

5.4. Acces la Vizualizarea Shopfloor

Pentru a obține acces la Vizualizarea Shopfloor, ar trebui să fie stabilit un proces clar de solicitare, care să presupună autentificarea în platforma, identificarea și accesarea secțiunii „Cereri de Servicii”, unde utilizatorii ar trebui să aibă posibilitatea de a iniția o cerere dedicată pentru acest acces. În plus, acest proces ar trebui să includă criterii clare de aprobare și să respecte procedurile interne care urmează să fie definite și implementate (Figura 5.3.).

Ar trebui să existe o funcționalitate care să permită utilizatorilor să introducă termenul „Shopfloor” într-o bară de căutare dedicată, astfel încât să poată localiza rapid opțiunea dorită. Această funcționalitate ar trebui să fie integrată într-un mod intuitiv, facilitând accesul la informațiile relevante și optimizând experiența utilizatorilor în platformă (Figura 5.4.).

Utilizatorii ar trebui să aibă posibilitatea de a accesa Vizualizarea Shopfloor printr-o opțiune dedicată în platformă. Aceasta ar trebui să fie proiectată într-un mod accesibil și intuitiv, astfel încât navigarea să fie simplificată, iar informațiile esențiale să fie disponibile rapid și eficient (Figura 5.5.).

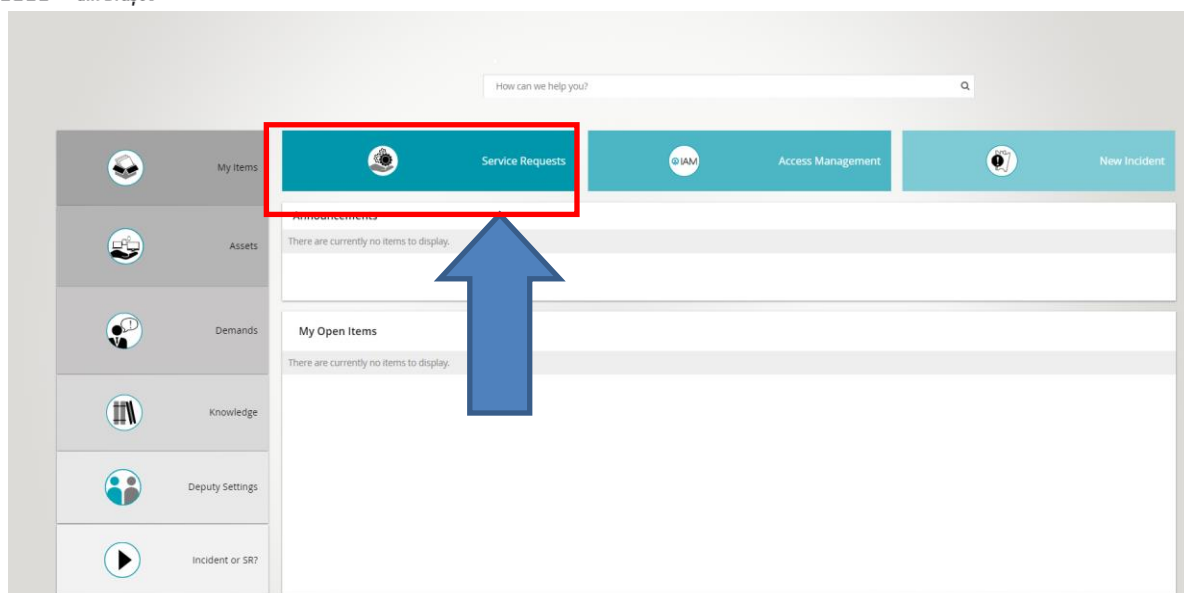


Figura 5.3. Cereri servicii

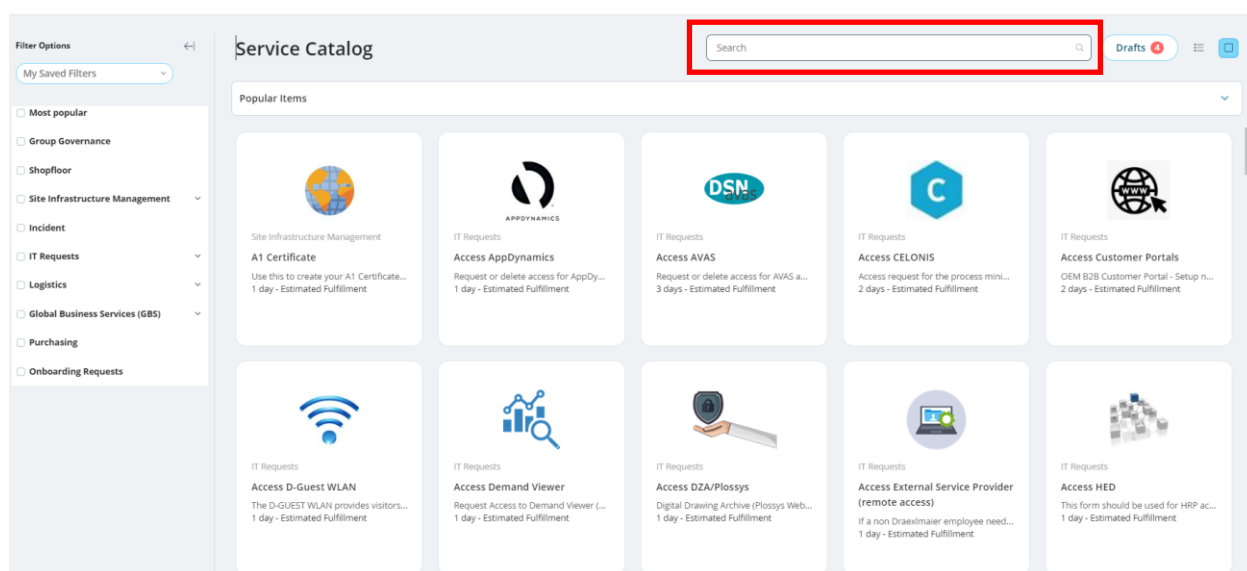


Figura 5.4. Cautare dedicată

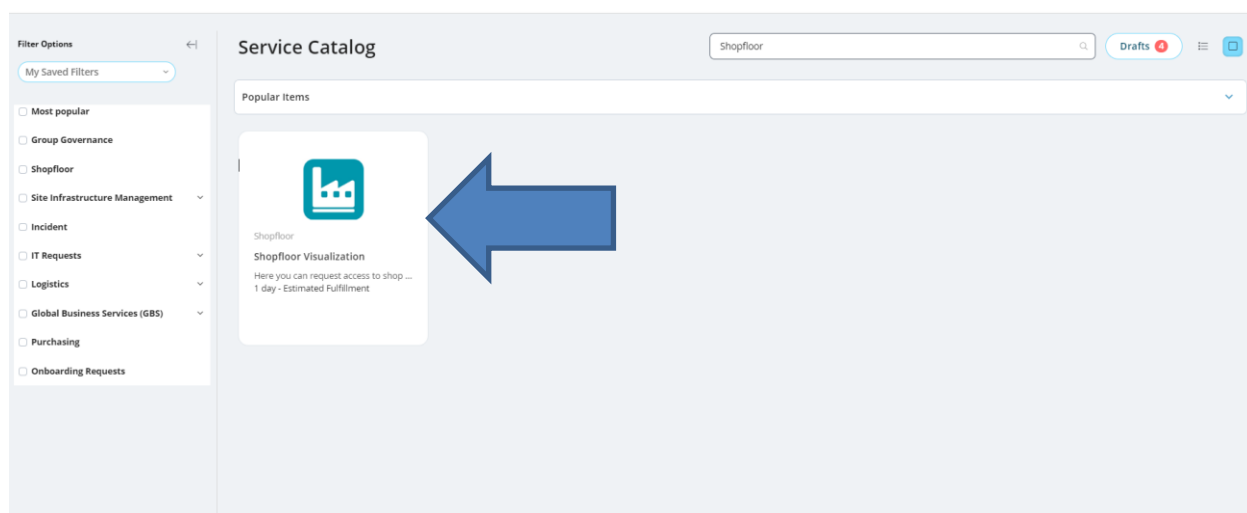


Figura 5.5. Catalog service acces-vizualizare SPV

Pentru a continua procesul, utilizatorii ar trebui să selecteze opțiunea „Acces Utilizator” în câmpul „Selecție”. În cazul în care un utilizator urmează să fie desemnat ca „Utilizator CHEIE”, ar trebui să existe o opțiune clară care să permită bifarea cerinței pentru „Cont tehnic necesar”, asigurând astfel accesul adecvat la resursele sistemului.

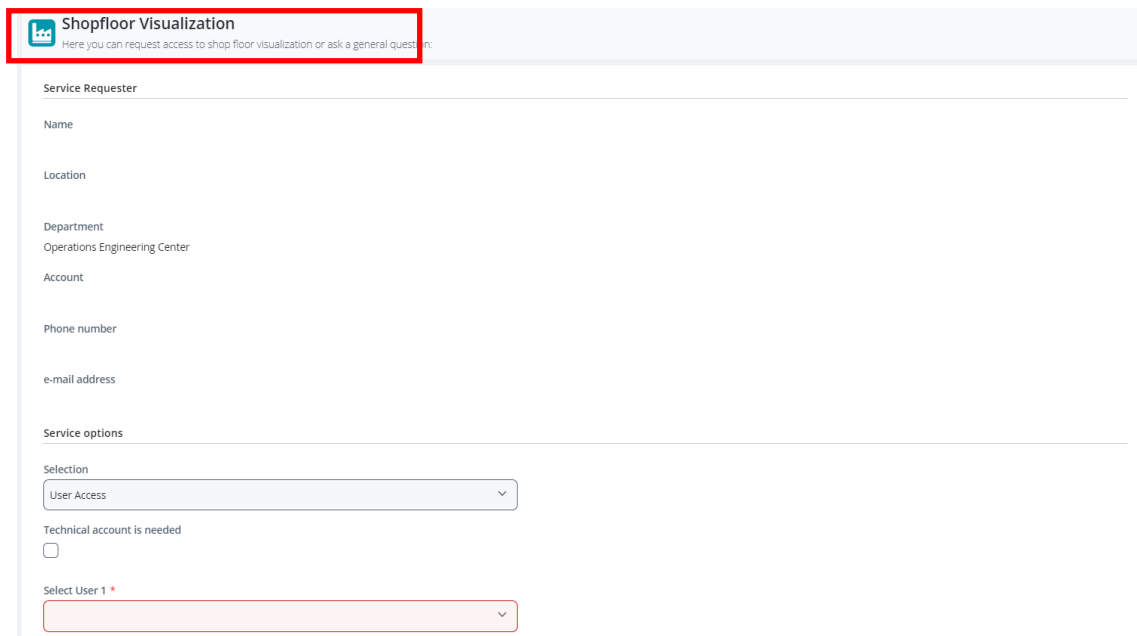


Figura 5.6. Cerere service acces-utilizator

De asemenea, utilizatorii ar trebui să aibă posibilitatea de a selecta numele persoanei pentru care se solicită accesul, utilizând câmpul „Selectare Utilizator”. În plus, în lista derulantă, ar trebui să poată alege unitatea de producție pentru care este necesar accesul. Opțiunea „GLOBAL” ar trebui să fie disponibilă pentru a permite accesul la toate unitățile de producție, facilitând astfel gestionarea utilizatorilor la nivel extins.

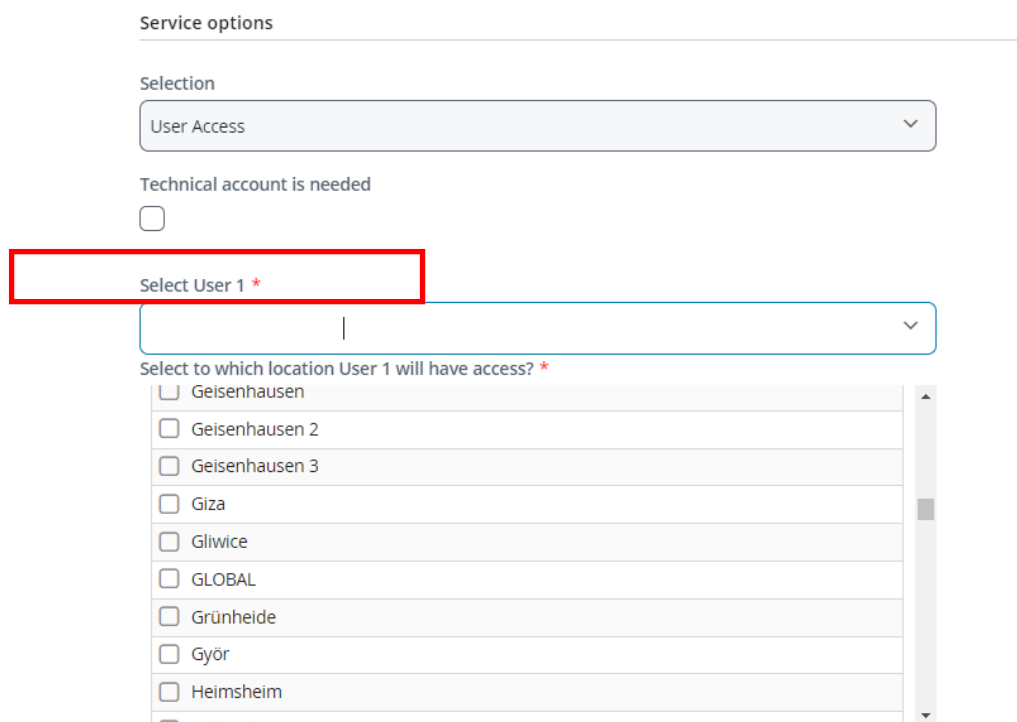


Figura 5.7. Opţiune cerere service acces-utilizator global

Pentru o administrare mai eficientă, ar trebui să existe şi opţiunea de a selecta mai multe persoane pentru care să fie solicitat accesul simultan, reducând astfel timpul necesar pentru gestionarea cererilor individuale şi optimizând procesul de atribuire a permisiunilor.

După aprobarea accesului, utilizatorii ar trebui să primească un link dedicat care să le permită accesul direct la prima pagină a Vizualizării Shopfloor, facilitând astfel o tranziţie rapidă şi eficientă către utilizarea platformei:

EX: <https://visual.shopfloor-internal.com/securehome/selection>

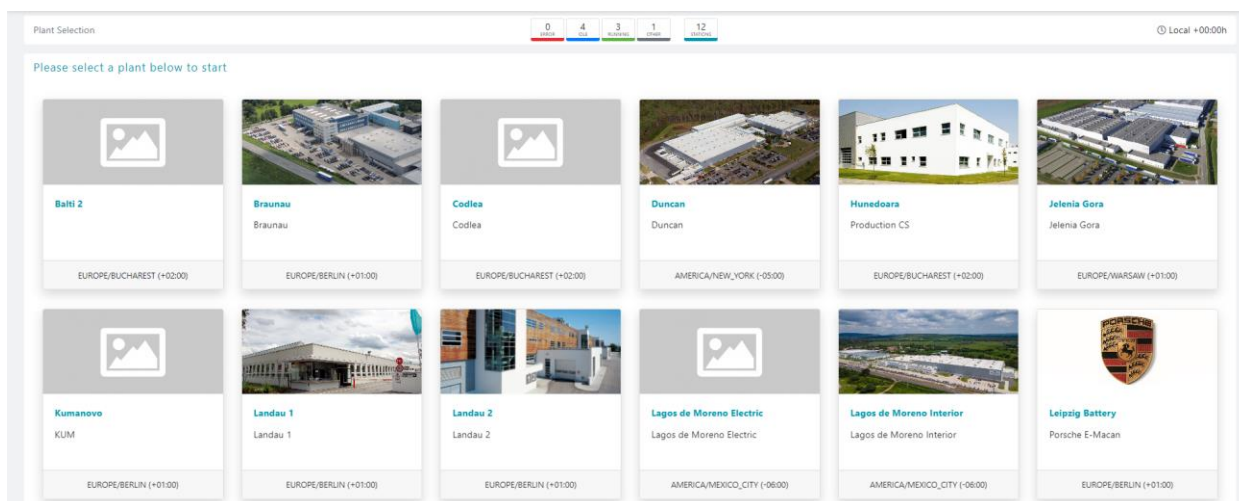


Figura 5.8. Vizualizare punct de lucru în SPV

În plus, ar trebui să existe şi posibilitatea de a accesa Vizualizarea Shopfloor direct din SharePoint, oferind utilizatorilor o alternativă flexibilă şi convenabilă pentru a ajunge rapid la interfaţa dorită, indiferent de platforma utilizată.

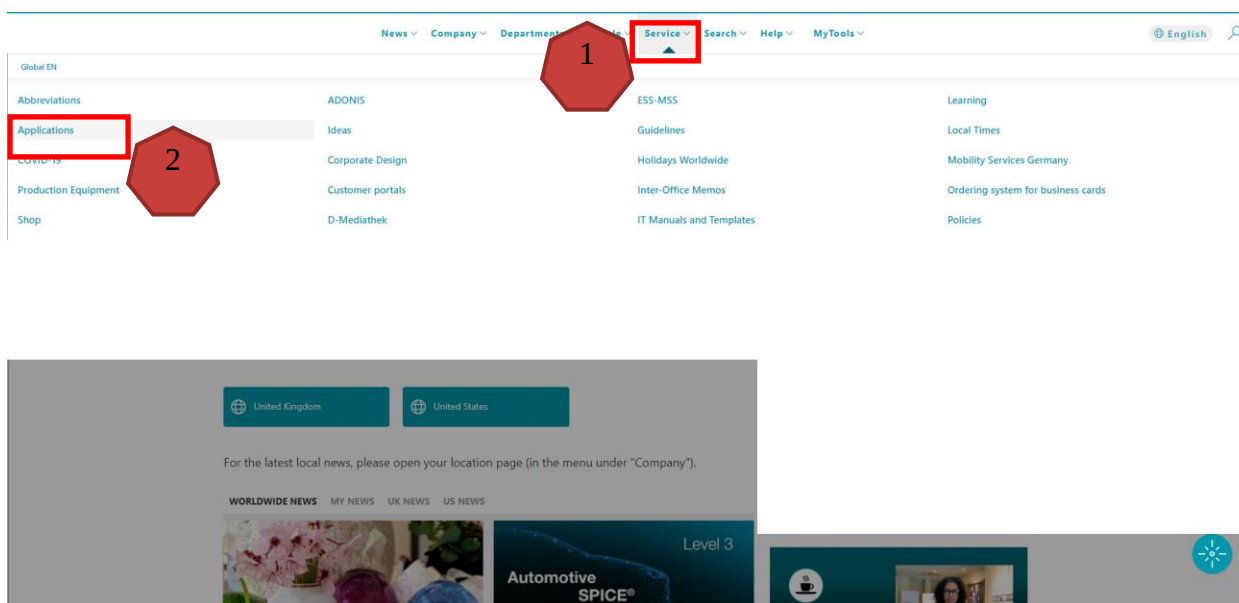


Figura 5.9. Vizualizarea Shopfloor direct din SharePoint

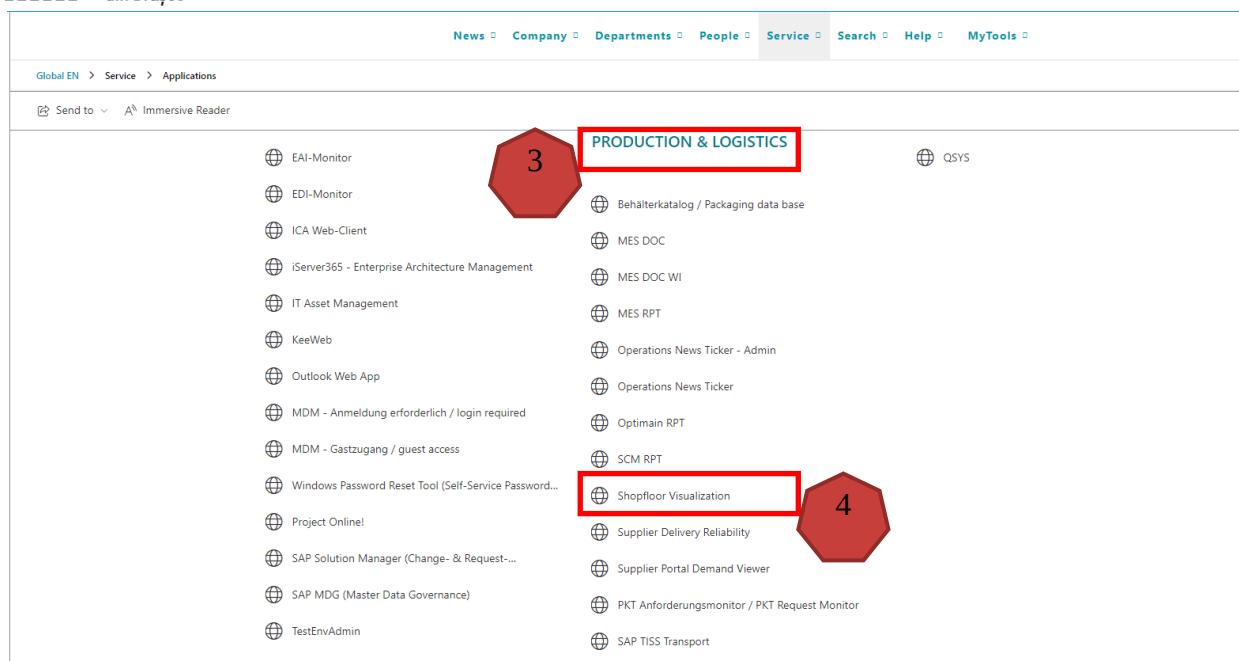


Figura 5.10. Vizualizarea Shopfloor

5.5. Denumirea standard pentru Vizualizarea Shopfloor

Ar trebui să existe o modalitate prin care utilizatorii să poată accesa prezentarea în Team Center, utilizând un link dedicat care să le permită navigarea rapidă către resursa necesară. Această funcționalitate ar trebui să fie integrată într-un mod intuitiv, asigurând accesibilitatea și ușurința în utilizare.

În cadrul unei prezentări dedicate, intitulată „Nume standard în Vizualizarea Shopfloor”, ar trebui să fie incluse instrucțiuni detaliate referitoare la procesul de creare a unităților de producție, a clădirilor, a zonelor de proiect și a stațiilor de lucru. Această prezentare ar trebui să ofere un ghid clar și structurat, care să sprijine utilizatorii în implementarea corectă a acestor elemente în sistem.



Figura 5.11. Nume standard în Vizualizarea Shopfloor

5.6. Maşini noi în SFV

În calitate de utilizator-cheie sau persoană responsabilă de SFV, ar trebui să existe un proces clar prin care să fie necesară completarea anumitor date esenţiale şi transmiterea acestora către persoanele responsabile din departamentul IT, în cazul în care s-ar dori introducerea unei noi staţii de lucru. Acest proces ar trebui să fie bine structurat şi să includă paşi definiţi pentru colectarea şi validarea informaţiilor necesare, asigurând astfel o integrare eficientă şi conformă a noii staţii în sistem.

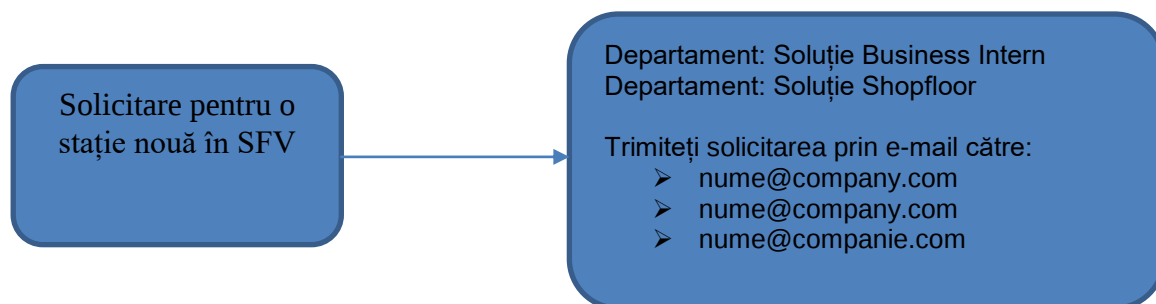


Figura 5.12. Solicitare implementare în Vizualizarea Shopfloor

Ar trebui să existe un proces prin care o solicitare în portal să fie generată automat pentru adăugarea unei noi staţii în SFV. În cazul în care mai multe staţii ar trebui integrate simultan, ar fi recomandat ca utilizatorii să trimită un e-mail cu toate staţiile necesare, astfel încât să se evite crearea unui număr mare de cereri individuale în unTe. Acest mecanism ar trebui să optimizeze procesul de solicitare şi să reducă volumul de muncă administrativă, asigurând o gestionare mai eficientă a noilor staţii.

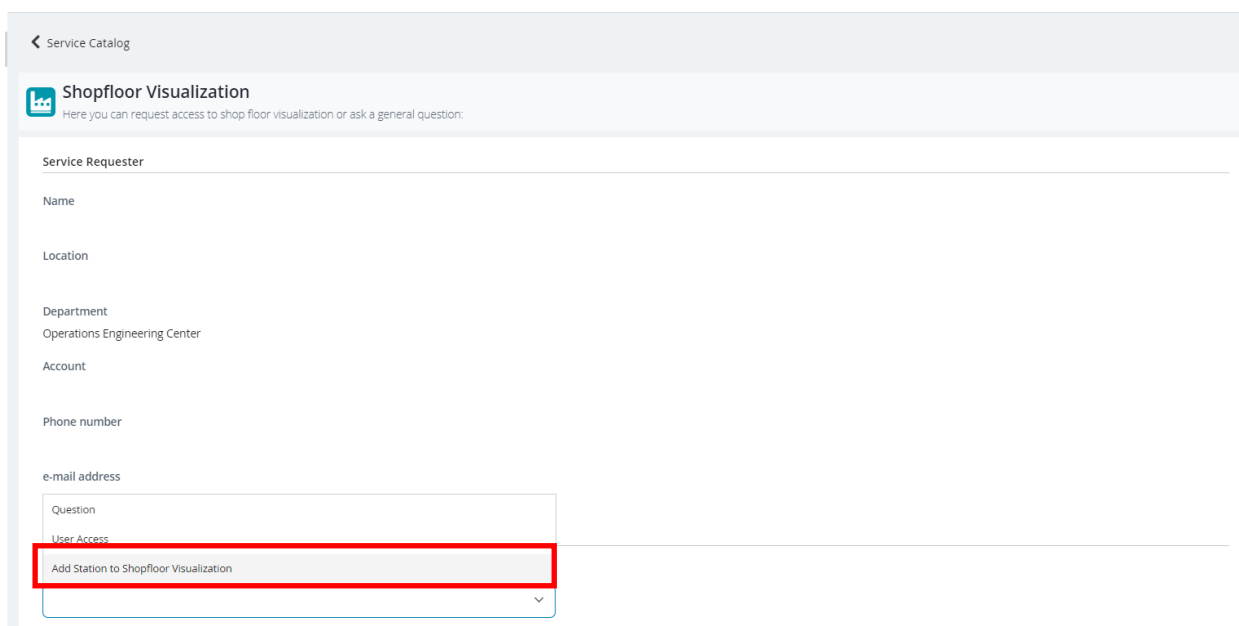


Figura 5.13. Solicitare în portal de generare automat pentru adăugarea unei noi staţii în SFV

Ar trebui să fie definit un tabel care să conţină toate datele necesare pentru completarea unei solicitări. Acest tabel ar trebui să includă câmpuri clar structurate, astfel încât utilizatorii să poată

furniza informațiile esențiale într-un mod organizat și ușor de gestionat. Implementarea unui astfel de format ar putea contribui la standardizarea procesului de solicitare și la reducerea erorilor asociate completării informațiilor.

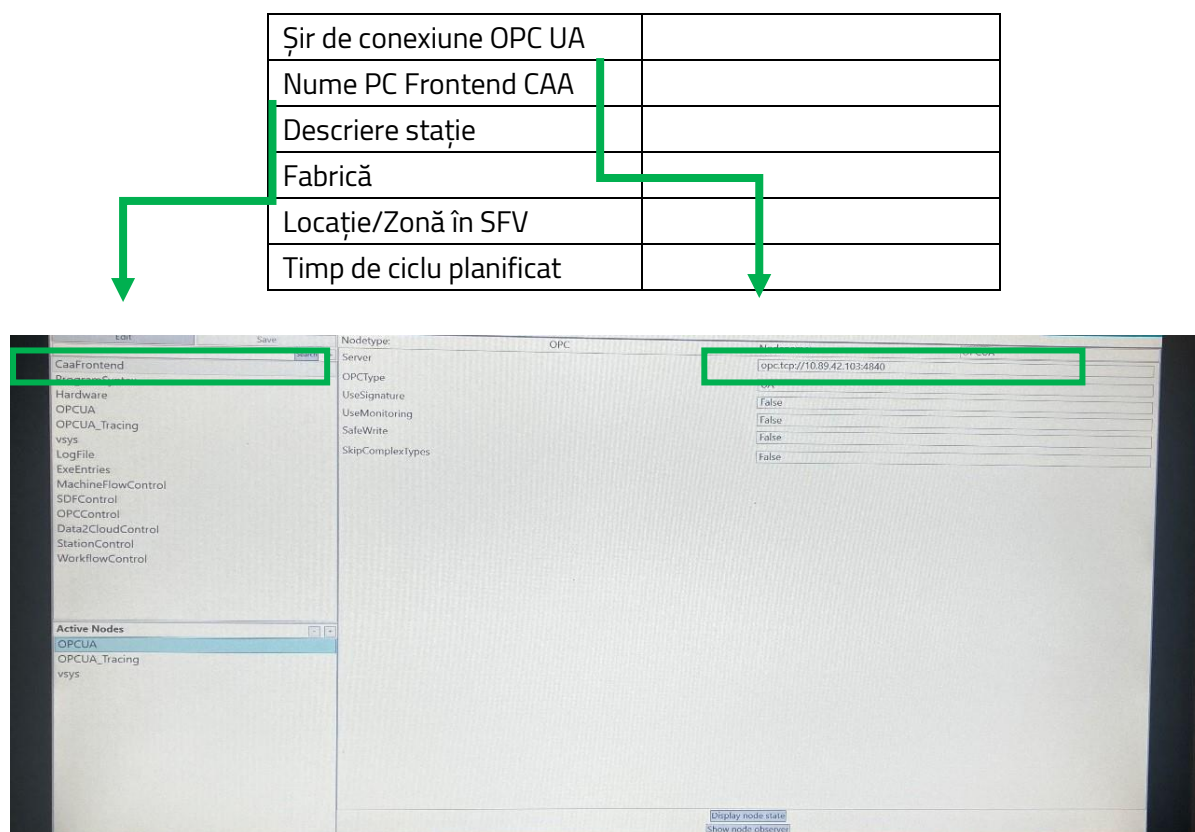


Figura 5.14. Model table cu date corecte

Șirul de conexiune OPC UA ar trebui să poată fi identificat direct pe computerul stației, prin accesarea setărilor corespunzătoare. Ar fi util să existe o metodă standardizată prin care această informație să fie ușor accesibilă utilizatorilor, reducând astfel timpul necesar pentru colectarea datelor necesare configurării.

Numele PC-ului Frontend CAA ar trebui să fie vizibil pe o etichetă amplasată pe ecranul stației. Pentru a facilita identificarea rapidă, ar putea fi implementată o procedură clară care să stabilească locația exactă a acestei etichete și modul în care informațiile afișate trebuie utilizate în procesul de configurare.

5.7. Vizualizarea Shopfloor

Ar trebui să existe un serviciu web bazat pe cloud, dezvoltat intern de companie, care să permită gestionarea și monitorizarea echipamentelor industriale. Acest serviciu ar putea facilita integrarea diferitelor sisteme și optimizarea fluxului de date operaționale.

Un sistem dedicat ar putea permite afișarea datelor mașinilor într-un mod structurat și accesibil, oferind utilizatorilor informații relevante despre performanța și starea acestora în orice moment.

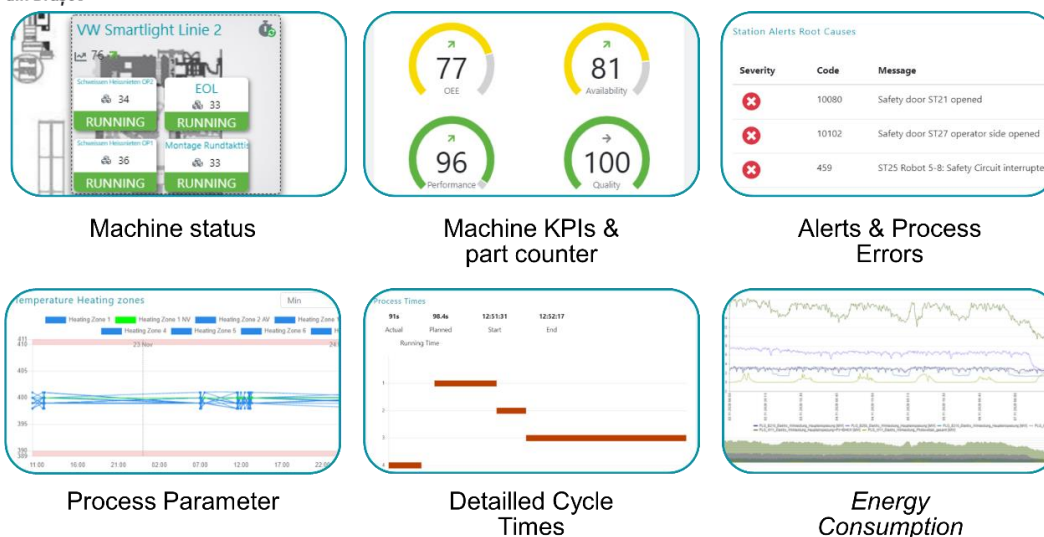


Figura 5.15. Afişare date masini

5.8. Necesitatea Vizualizării Shopfloor

Depanarea problemelor ar trebui să fie posibilă printr-un sistem care să furnizeze mesaje de eroare detaliate şi analize statistice relevante. Acest mecanism ar putea facilita identificarea rapidă a defecţiunilor şi optimizarea intervenţiilor tehnice.

Calitatea proceselor ar putea fi îmbunătăţită prin utilizarea unor indicatori de performanţă bine definiţi, care să permită monitorizarea şi optimizarea operaţiunilor în funcţie de date concrete şi obiective măsurabile.

Pentru a reduce timpii de ciclu, ar trebui să existe un sistem care să permită identificarea precisă a etapelor problematice din proces, oferind soluţii pentru optimizarea acestora şi creşterea eficienţei generale a producţiei.

Un astfel de sistem ar putea reprezenta primul pas către implementarea unei „Fabrici Digitale”, în care toate datele operaţionale sunt colectate, analizate şi utilizate pentru a automatiza şi optimiza procesele industriale.

Accesul în timp real la date ar trebui să fie posibil indiferent de locaţie, oferind utilizatorilor informaţii actualizate despre starea echipamentelor şi a proceselor, fără a fi necesară prezenţa fizică la faţa locului.

5.9. Arhitectura sistemului SFV

În diagrama următoare, ar trebui să fie alocate toate sistemele implicate pe nivelurile funcţionale, conform standardului VDI 5600. Diagrama ar putea ilustra în mod clar fluxul de date de la unitatea de producţie (nivelul de producţie) prin intermediul PLC-ului către toate celelalte sisteme relevante, inclusiv Vizualizarea Shopfloor.

Această reprezentare ar trebui să ofere o imagine detaliată asupra modului în care informaţiile circulă între diferitele niveluri operaţionale şi să evidenţieze conexiunile critice dintre echipamentele din

fabrică şi sistemele superioare. Totodată, diagrama ar putea sublinia importanţa unei integrări coerente pentru a asigura un schimb de date eficient şi transparent între toate componentele sistemului.

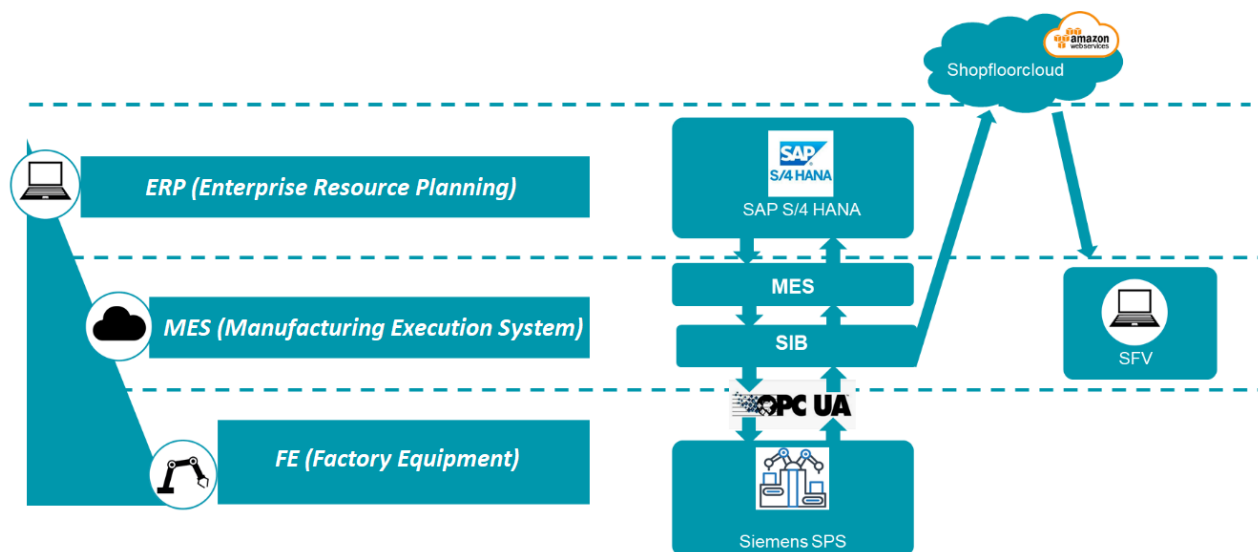


Figura 5.16. Arhitectura sistemului SFV

5.10. Navigare şi Funcţii ale Vizualizării Shopfloor

Navigarea şi funcţiile Vizualizării Shopfloor ar trebui să fie concepute într-un mod clar şi intuitiv, permiţând utilizatorilor să acceseze cu uşurinţă informaţiile relevante şi să interacţioneze eficient cu platforma. Sistemul ar putea include diverse funcţionalităţi bine definite, cum ar fi accesul rapid la datele operaţionale, vizualizarea în timp real a proceselor şi generarea de rapoarte detaliate.

În plus, ar trebui să existe opţiuni de navigare care să faciliteze tranziţia între diferitele secţiuni ale platformei, oferind utilizatorilor o experienţă uniformă şi simplificată. Aceste funcţionalităţi ar putea sprijini monitorizarea şi optimizarea operaţiunilor de producţie, contribuind la creşterea eficienţei şi transparenţei.

5.10.1. Navigare Generală

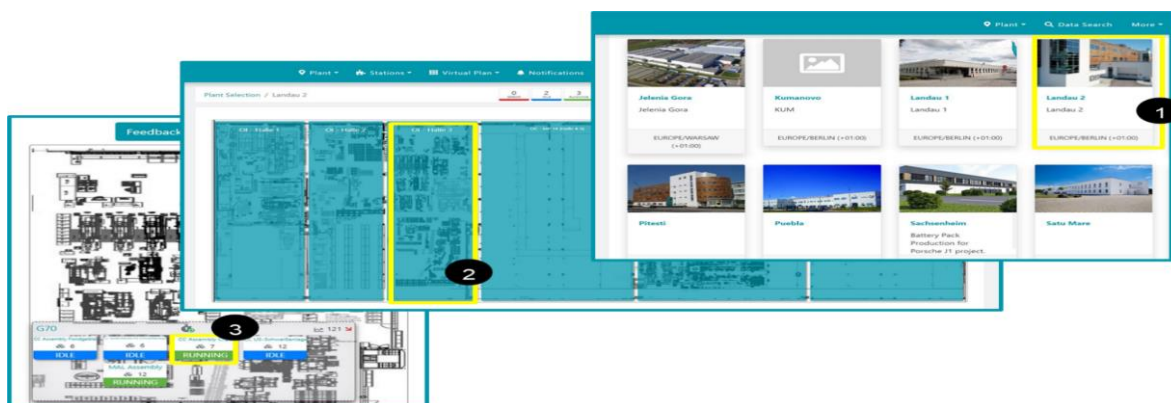


Figura 5.17. Navigare- sistem SFV

1. Alegerea fabricii

Ar trebui să fie implementată o opţiune clară care să permită utilizatorilor să selecteze fabrica dorită dintr-o listă prestabilită. Această funcţionalitate ar putea include criterii de filtrare pentru a facilita identificarea rapidă a fabricii corespunzătoare, contribuind astfel la o navigare mai eficientă în sistem.

2. Alegerea clădirii

Ar fi necesar să existe o modalitate prin care utilizatorii să selecteze clădirea specifică din cadrul fabricii. Această funcţionalitate ar putea fi integrată cu o hartă interactivă sau cu o listă detaliată, oferind utilizatorilor o imagine clară a structurii organizaţionale şi facilitând accesul la informaţiile relevante.

3. Alegerea staţiei

Sistemul ar trebui să includă o funcţie care să permită selectarea staţiei de lucru dorite. Aceasta ar putea fi realizată printr-o listă de opţiuni sau printr-o interfaţă vizuală care să afişeze locaţia staţiilor într-un mod intuitiv, sprijinind astfel monitorizarea şi gestionarea proceselor la nivel detaliat.

5.10.2. Submeniu specific maşinii: Schimb curent

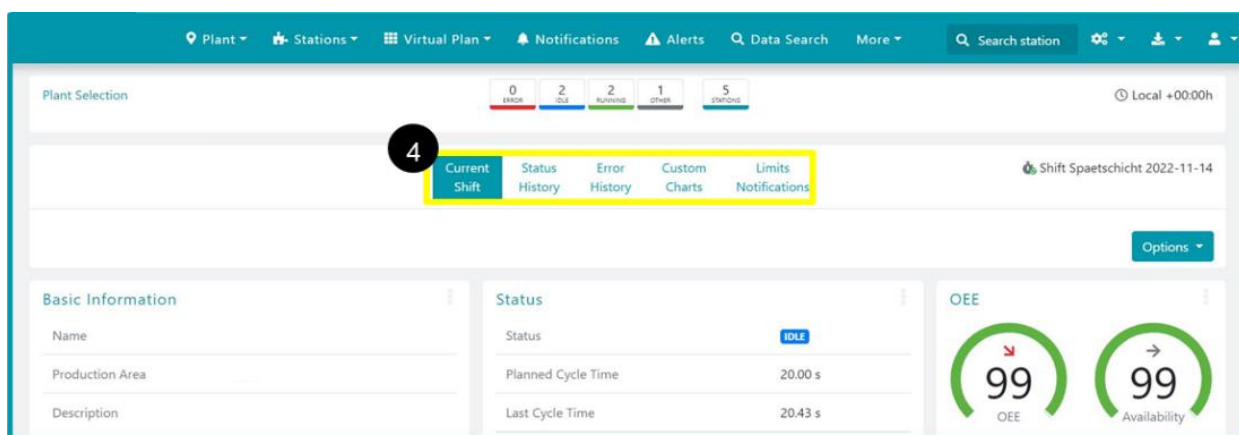


Figura 5.18. Sistem SFV – Submeniu schimb curent

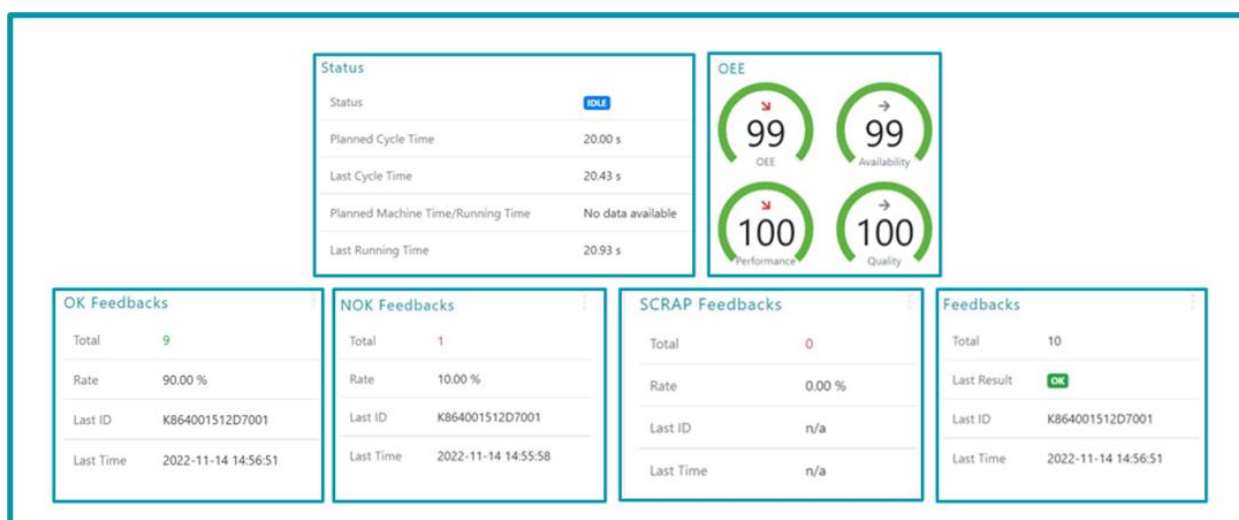


Figura 5.19. Sistem SFV – Submeniu status utilaje

5.10.3. Submeniu specific maşinii: Istoricul Statusului

Perioada de analiză ar trebui să poată fi selectată individual, oferind utilizatorilor flexibilitatea de a alege intervalul de timp relevant pentru evaluarea performanţei echipamentului. Această funcţionalitate ar putea permite o monitorizare mai detaliată a proceselor şi o ajustare mai precisă a strategiilor de optimizare.

Timpii de ciclu şi feedbackurile pentru toate componentele în perioada selectată ar trebui să fie prezentate într-un format grafic intuitiv. Acest sistem ar putea permite utilizatorilor să analizeze în detaliu evoluţia performanţei echipamentelor şi să identifice eventualele deviaţii faţă de valorile planificate.

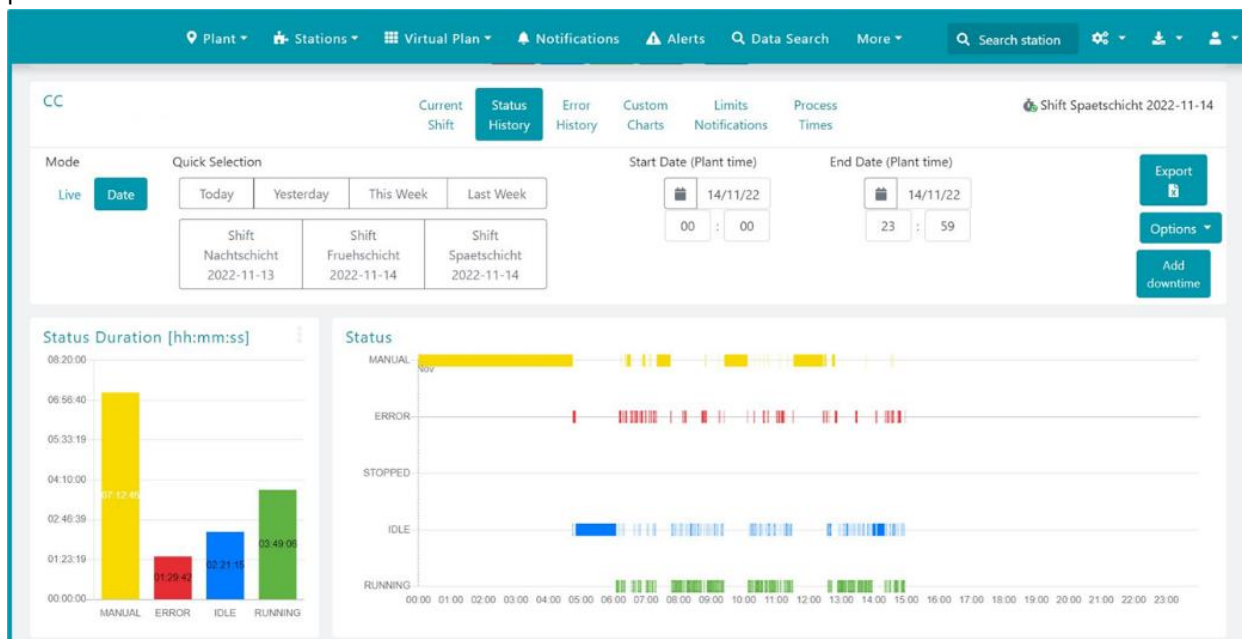


Figura 5.20. Sistem SFV – Istoricul utilajului

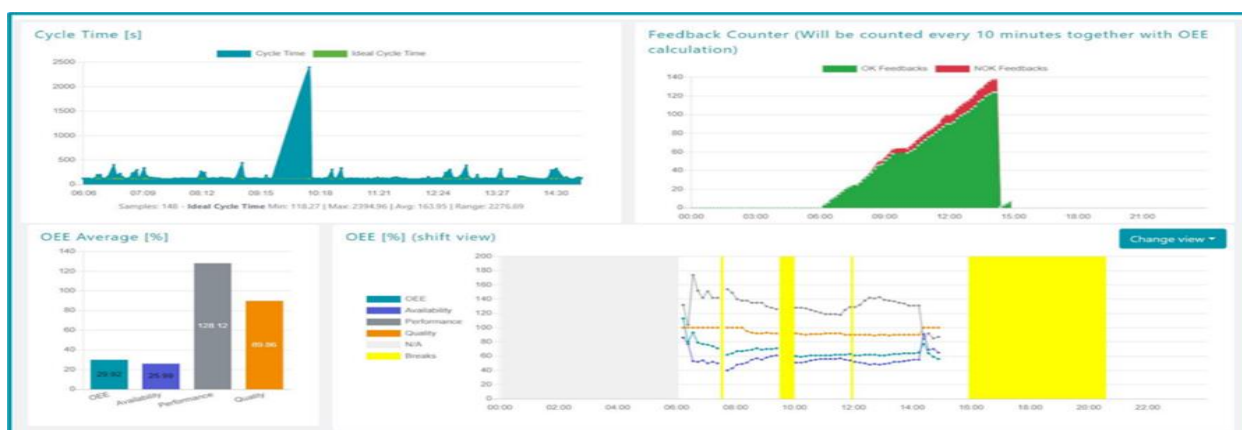


Figura 5.21. Sistem SFV – Vizualizare erori

5.10.4. Submeniu specific maşinii: Grafice Personalizate

Perioada de analiză ar trebui să fie configurabilă individual, permiţând utilizatorilor să selecteze intervalul de timp relevant pentru evaluarea performanţei maşinii. Această funcţionalitate ar putea facilita o monitorizare mai precisă şi adaptată nevoilor specifice ale fiecărui proces de producţie.

Crearea și modificarea graficelor ar trebui să poată fi realizată printr-o funcție dedicată, accesibilă printr-un meniu de opțiuni, unde utilizatorii să aibă posibilitatea de a adăuga noi reprezentări grafice conform cerințelor specifice. Acest sistem ar putea permite o personalizare avansată a modului în care sunt analizate și interpretate datele colectate.

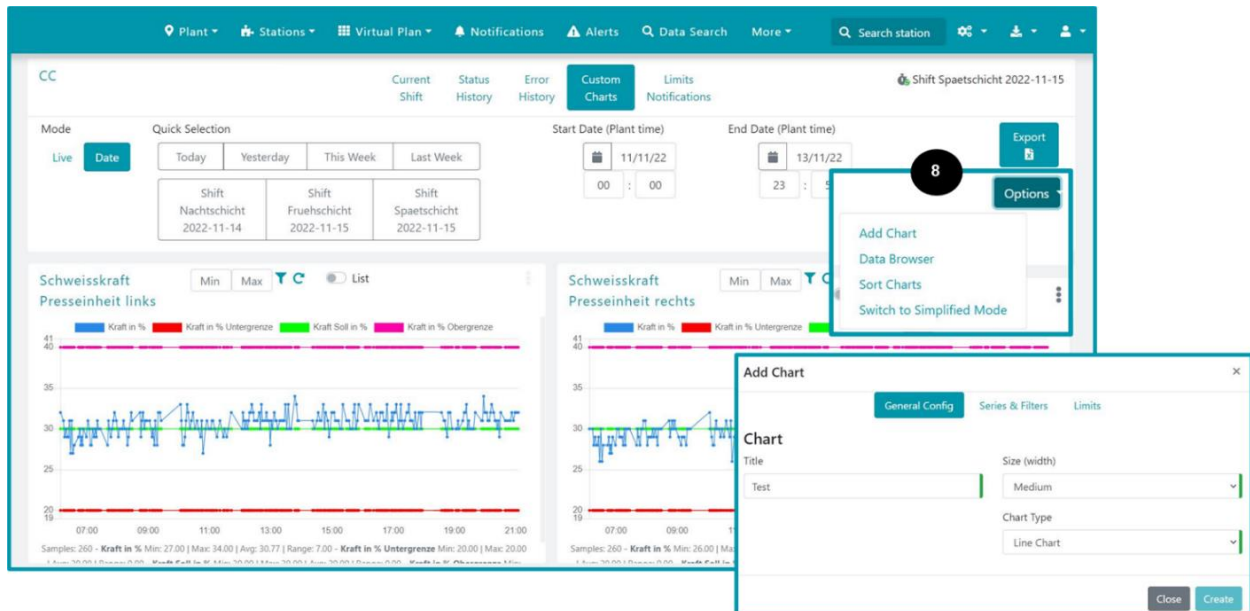


Figura 5.22. Sistem SFV – Grafice personalizate

5.10.5. Submeniu specific mașinii: Timp de Proces

Perioada de analiză ar trebui să poată fi selectată individual, oferind utilizatorilor flexibilitatea de a defini intervalul de timp relevant pentru evaluarea performanței procesului. Această funcționalitate ar putea permite o monitorizare mai precisă și adaptată cerințelor specifice ale fiecărui flux de producție. Pentru o analiză mai exactă, ar trebui să fie disponibile informații precise privind durata fiecărui pas al procesului. Aceste date ar putea sprijini optimizarea operațiunilor și îmbunătățirea planificării, contribuind la o mai bună utilizare a resurselor și la creșterea eficienței producției.

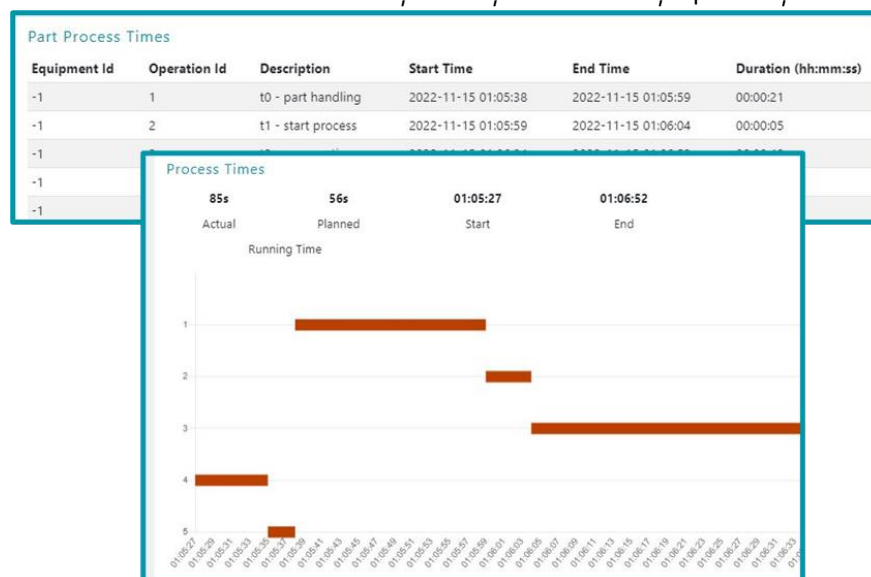


Figura 5.23. Sistem SFV – Timp de process

5.11. Descrierea interfeţei

Ar trebui să existe un document tehnic care să definească în mod clar toate datele şi semnalele ce urmează să fie transmise de la echipament către sistemul de Vizualizare Shopfloor sau către MES. Acest document ar putea stabili parametrii esenţiali ai comunicaţiei între sistemele de producţie şi platformele digitale, asigurând astfel o integrare coerentă şi eficientă.

O descriere generală a interfeţei ar trebui să fie disponibilă pentru fiecare tip de unitate de producţie, furnizând un cadru standardizat care să faciliteze implementarea şi compatibilitatea între diferite sisteme. Această abordare ar putea ajuta la uniformizarea proceselor şi la reducerea timpului necesar pentru integrarea noilor echipamente.

Pentru a asigura o funcţionalitate optimă, descrierea interfeţei ar trebui să fie adaptată individual pentru fiecare unitate de producţie în parte. Acest proces de personalizare ar putea permite ajustarea specifică a parametrilor de comunicare, transformând documentul într-o descriere unică, dedicată fiecărui echipament în funcţie de cerinţele operaţionale specifice.

5.11.1. Loc de muncă: Informaţii şi Status

O descriere detaliată a diferitelor stări ar trebui să fie disponibilă în cadrul documentaţiei intitulate „Navigare şi Funcţii ale Vizualizării Shopfloor”. Această documentaţie ar putea furniza informaţii cuprinzătoare şi bine structurate despre semnificaţia şi utilizarea fiecărui status, sprijinind astfel utilizatorii în înţelegerea şi aplicarea corectă a acestora în procesele operaţionale. Această secţiune ar putea servi drept referinţă centrală pentru clarificarea oricăror întrebări legate de funcţionalităţile şi interpretarea statusurilor sistemului.

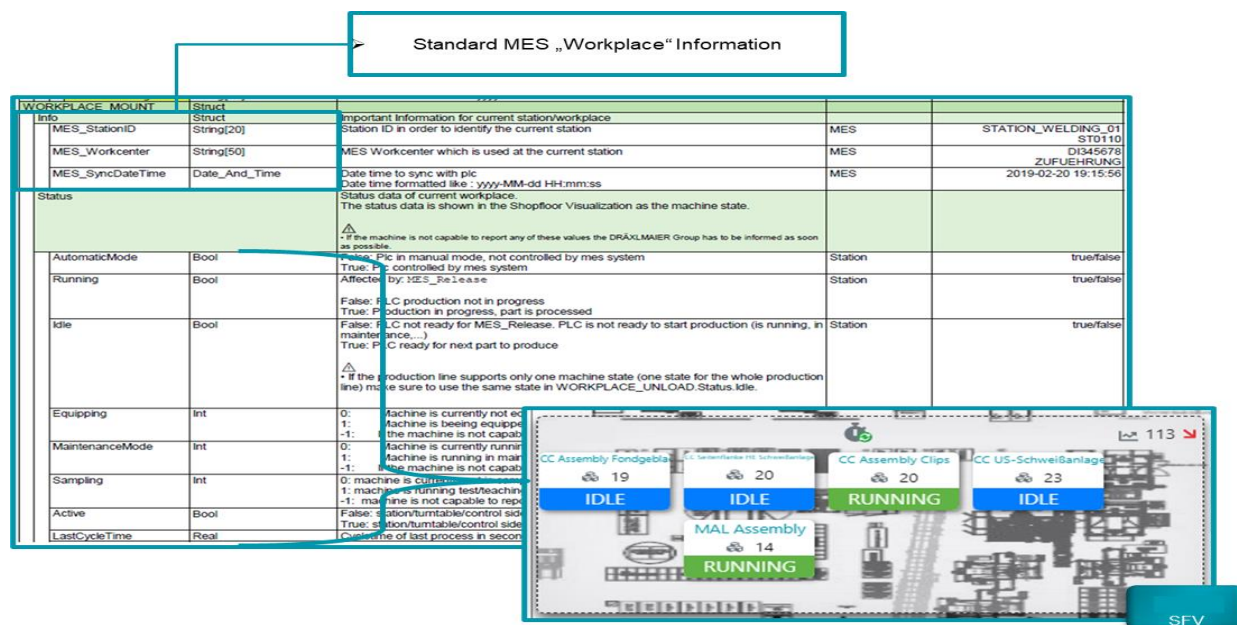


Figura 5.24. Sistem SFV – Vizualizare status MES

5.11.2. Rezultatele Procesului

Descrierea procesului ar trebui să fie realizată de către unitatea de producție după finalizarea fiecărei etape operaționale, astfel încât să fie asigurată o documentare clară și detaliată a modului în care s-a desfășurat activitatea. Acest lucru ar putea facilita analiza performanței și identificarea oportunităților de îmbunătățire în fluxul de producție.

În cadrul acestei descrieri, ar trebui să fie incluse exclusiv erorile de proces, fără a lua în considerare eventualele defecțiuni ale echipamentului. Această separare clară între problemele operaționale și cele tehnice ar putea contribui la o diagnosticare mai precisă și la aplicarea unor măsuri corective mai eficiente, asigurând astfel o gestionare optimă a producției.

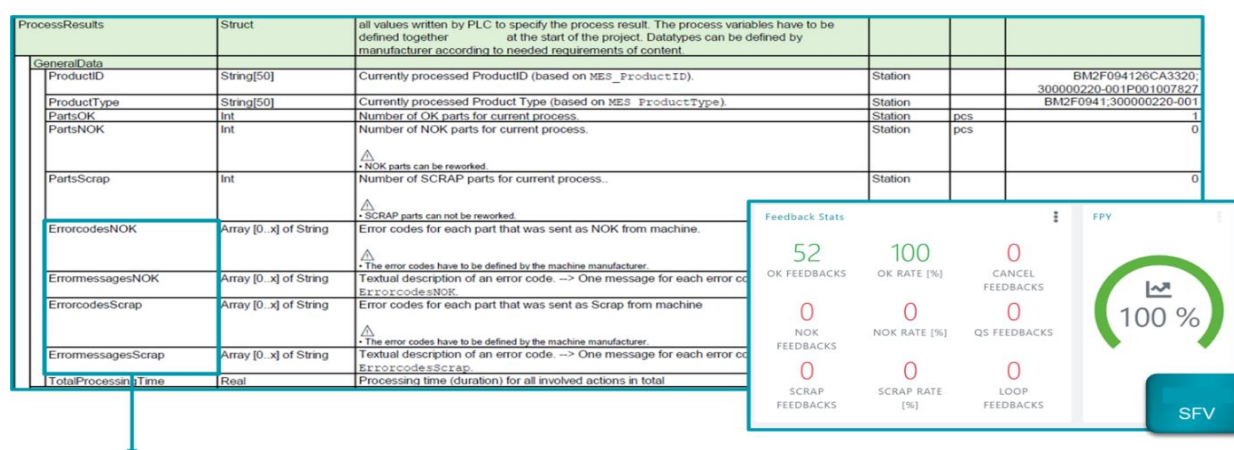


Figura 5.25. Sistem SFV – Eroare de proces

Eroare de proces:

Definirea și denumirea defectelor de proces ar trebui să fie stabilite direct de către furnizor, oferindu-i astfel flexibilitatea de a adapta nomenclatura la cerințele specifice ale sistemului său de producție. Această abordare ar putea facilita o mai bună gestionare a erorilor și o interpretare clară a datelor de către toate părțile implicate în proces.

5.12. Concluzii

Implementarea și integrarea completă a platformei digitale Shopfloor View (SFV) în cadrul infrastructurii industriale a condus la o transformare semnificativă a modului în care sunt gestionate, monitorizate și optimizate procesele de producție. Utilizarea acestui sistem a permis digitalizarea operațiunilor critice de pe linia de producție și a generat o vizibilitate în timp real asupra indicatorilor de performanță, facilitând luarea deciziilor bazate pe date concrete și actualizate.

Pe termen mediu și lung, beneficiile implementării platformei SFV s-au concretizat prin creșterea vizibilă a eficienței operaționale, reducerea pierderilor cauzate de defecțiuni și neconformități, creșterea gradului de standardizare a proceselor și optimizarea utilizării resurselor. Totodată, vizualizarea detaliată a consumurilor energetice și a utilizării materialelor a permis identificarea unor

zone de ineficiență și adoptarea unor măsuri corective cu impact pozitiv asupra sustenabilității producției.

În concluzie, integrarea sistemului Shopfloor View a reprezentat un pas major în direcția consolidării unei infrastructuri industriale digitale moderne. Această implementare a dus la creșterea transparenței, agilitatea decizională, reducerea costurilor operaționale și alinierea fabricii la principiile Industry 4.0. Beneficiile observate post-implementare confirmă faptul că platforma SFV nu este doar un instrument de monitorizare, ci un element strategic pentru excelența operațională și competitivitatea pe termen lung a organizației.

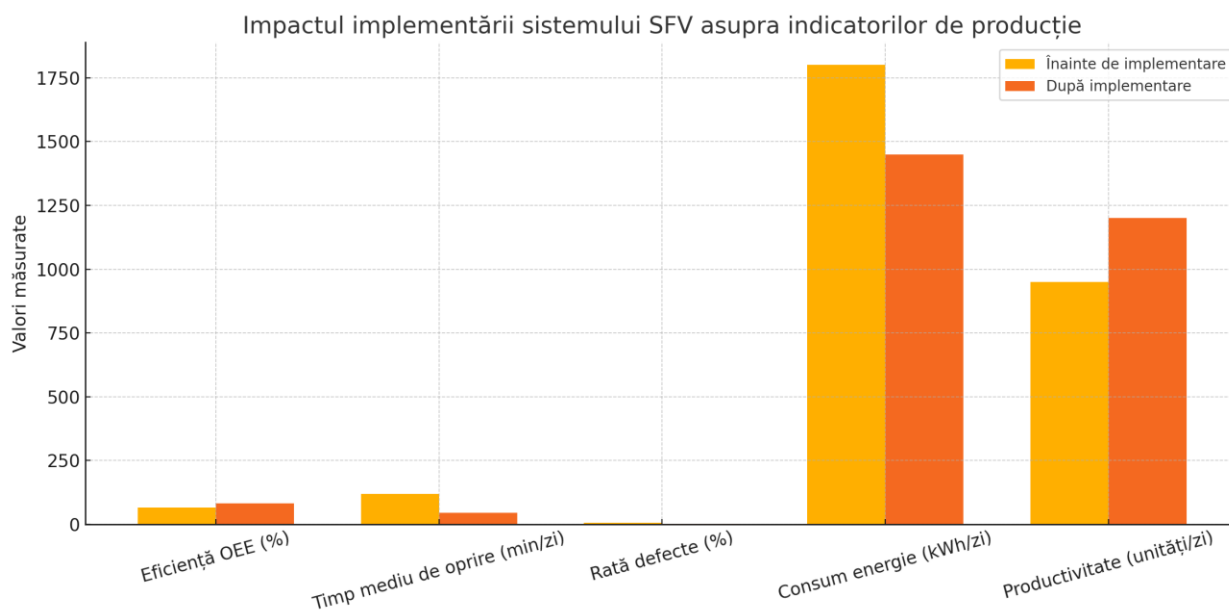


Figura 5.26. Impactul implementării sistemului Shopfloor View (SFV)

Tabelul 5.1. Analiza comparativă a principalilor indicatori de performanță.

Indicator	Înainte de implementare	După implementare
Eficiență OEE (%)	65	82
Timp mediu de oprire (min/zi)	120	45
Rată defecte (%)	5.5	1.8
Consum energie (kWh/zi)	1800	1450
Productivitate (unități/zi)	950	1200

Impactul implementării sistemului Shopfloor View (SFV) asupra principalilor indicatori de performanță industriali indică următoarele (Figura 5.48., Tabelul 5.3.).

- Creștere semnificativă a eficienței OEE, de la 65% la 82%.
- Reducerea timpului mediu zilnic de oprire de la 120 la 45 de minute.
- Scăderea ratei de defecte de la 5,5% la 1,8%, ceea ce evidențiază un control superior al calității.
- Optimizarea consumului energetic cu aproximativ 350 kWh/zi.
- Creșterea productivității cu peste 250 de unități pe zi.

Aceste îmbunătățiri confirmă eficiența integrării platformei SFV și relevanța sa strategică în optimizarea proceselor de producție.

CAPITOLUL 6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI PERSPECTIVE PENTRU CERCETĂRI ULTERIOARE

6.1. Concluzii

În cadrul prezentei teze de doctorat sunt tratate în mod sistematic și detaliat procesul de microperforare cu laser utilizat în industria auto, punând accent pe optimizarea procesului de microperforare cu laser a materialelor textile utilizate în industria auto, cu accent pe îmbunătățirea preciziei și uniformității microperforațiilor, precum și evidențierea impactului acestora asupra eficienței și sustenabilității procesului. De asemenea, evaluarea rezultatelor experimentale a demonstrat impactul semnificativ al zgomotului electromagnetic asupra calității perforațiilor și performanței mecanice a materialului perforat.

Printr-o abordare științifică riguroasă, care combină studii teoretice cu analize experimentale și modelări statistice adecvate, obiectivul final a fost de a îmbunătăți calitatea și fiabilitatea componentelor auto microperforate, optimizând astfel producția industrială și contribuind la dezvoltarea unor soluții tehnologice mai eficiente și mai sustenabile.

Un alt aspect fundamental al acestei cercetări constă în evaluarea implicațiilor economice și ecologice ale utilizării tehnologiei laser în industria auto, având în vedere creșterea accentuată a cerințelor de sustenabilitate și eficiență energetică. Integrarea rezultatelor obținute în cadrul acestei teze în procesele de producție din industrie pot contribui la dezvoltarea unor metodologii avansate pentru creșterea productivității și reducerea pierderilor de material. Astfel, prin corelarea datelor experimentale cu modelele teoretice elaborate, această lucrare urmărește să ofere un set de soluții aplicabile care să permită optimizarea procesului de microperforare cu laser pentru industria auto.

Principalele concluzii obținute sunt următoarele:

- Microperforarea cu laser permite realizarea unor perforații precise și uniforme, critice pentru performanța materialelor utilizate în airbaguri.
- Optimizarea parametrilor laserului, precum puterea, frecvența și durata impulsului, contribuie la reducerea defectelor de fabricație și la îmbunătățirea eficienței operaționale.
- Nivelurile fluctuante de zgomot electromagnetic au un efect direct asupra calității perforațiilor și asupra comportamentului mecanic al materialului perforat.
- Stabilitatea fasciculului laser este afectată de intensitatea interferențelor electromagnetice, ceea ce poate duce la variații în dimensiunea și conturul perforațiilor.
- La un nivel optim de zgomot electromagnetic (1,2 V), perforațiile sunt mai uniforme, iar distribuția tensiunilor mecanice în material este optimizată.
- Procesul de laserare din zona airbagului este esențial pentru siguranța pasagerilor, asigurând o deschidere controlată și rapidă la declanșare.
- Precizia perforării influențează procesul de sudură al canalului de ghidare al airbagului, asigurând o îmbinare optimă între componente și reducerea riscului de deschidere necontrolată.
- Imitația de piele care acoperă bordul trebuie tratată atent prin laserare, astfel încât să permită o rupere controlată și sigură în caz de impact, fără a compromite aspectul estetic.

Se poate menţiona faptul că cercetările întreprinse abordează o nişă esenţială în domeniul procesării materialelor cu laser, concentrându-se în particular pe analiza impactul zgomotului electromagnetic asupra calităţii şi consistenţei perforaţiilor realizate pe materiale textile pentru airbaguri. Analiza rezultatelor experimentale ale microperforării cu laser a demonstrat că zgomotul electromagnetic are un impact semnificativ asupra calităţii perforaţiilor şi asupra performanţei mecanice a materialului perforat. Optimizarea nivelului de zgomot electromagnetic la 1,2 V oferă un echilibru optim între performanţa mecanică şi consistenţa perforaţiilor, reducând variaţiile de proces şi îmbunătăţind fiabilitatea produsului final.

Studiile anterioare s-au concentrat preponderent pe optimizarea parametrilor laserului, fără a explora în detaliu influenţa factorilor externi, precum zgomotul electromagnetic, asupra microperforării. Acest studiu completează acest gol prin evidenţierea modului în care nivelurile fluctuante de zgomot pot induce erori sistematice în procesul de perforare şi oferă soluţii pentru eliminarea acestor efecte negative.

Prin integrarea unor mecanisme avansate de compensare a fluctuaţiilor electromagnetice şi prin utilizarea unor tehnici de filtrare a semnalelor parazite, acest studiu propune noi metode de stabilizare a microperforării cu laser, având drept rezultat:

- Îmbunătăţirea preciziei perforaţiilor şi reducerea defectelor structurale ale materialelor perforate;
- Creşterea repetabilităţii procesului şi reducerea abaterilor de la dimensiunile nominale;
- Integrarea unor strategii inteligente de control al zgomotului electromagnetic, care să permită ajustarea în timp real a parametrilor laserului.

Prin controlul eficient al nivelului de zgomot electromagnetic, această cercetare contribuie la creşterea performanţei generale a procesului de fabricaţie, consolidând standardele de siguranţă şi fiabilitate pentru componentele utilizate în airbagurile auto.

În concluzie, tehnologia de fabricaţie laser în zona airbagului, tratamentul atent al imitaţiei de piele şi sudura precisă a canalului de ghidare sunt procese care, împreună, formează un ansamblu esenţial pentru obţinerea unui produs final de calitate superioară. Acest ansamblu nu doar că asigură o funcţionalitate optimă a sistemului de siguranţă pasivă, dar contribuie şi la menţinerea unui aspect estetic premium al bordului. Prin utilizarea tehnologiei laser, se poate garanta o execuţie impecabilă, care să răspundă atât cerinţelor de siguranţă, cât şi celor de design. Astfel, se obţine un echilibru perfect între funcţionalitate şi estetică, oferind un nivel superior de siguranţă şi confort pentru toţi pasagerii vehiculului.

6.2. Contribuţii personale

În cadrul acestei teze de doctorat s-au adus contribuţii originale în domeniul optimizării procesului de microperforare cu laser, cu accent pe reducerea impactului zgomotului electromagnetic şi pe îmbunătăţirea funcţionalităţii sistemului airbag.

Cele mai importante contribuţii se referă la:

- Dezvoltarea unei metodologii de optimizare a procesului de microperforare, care să asigure uniformitatea perforaţiilor şi o distribuţie optimă a tensiunilor mecanice. Această metodologie include ajustarea precisă a parametrilor laserului, analiza efectului vitezei de deplasare a

fasciculului asupra uniformităţii perforaţiilor şi utilizarea unor algoritmi de control avansaţi pentru stabilizarea procesului.

- Propunerea unor soluţii pentru controlul şi stabilizarea fasciculului laser prin utilizarea unor sisteme avansate de monitorizare şi ajustare automată a parametrilor laserului. Aceste soluţii au fost testate experimental şi au condus la o creştere a stabilităţii procesului de perforare, reducând variaţiile dimensiunii şi formeî perforaţiilor.
- Realizarea unei analize detaliate asupra influenţei zgomotului electromagnetic asupra calităţii perforaţiilor şi asupra performanţei mecanice a materialului perforat. Studiul a inclus o evaluare aprofundată a modului în care diferite niveluri de interferenţe electromagnetice afectează procesul de perforare cu laser şi au fost identificate metode de reducere a acestor influenţe prin optimizarea parametrilor de proces.
- Evaluarea experimentală a impactului fluctuaţiilor electromagnetice asupra rezistenţei materialelor perforate cu laser, printr-un set de experimente sistematice care au evidenţiat modul în care variaţiile câmpurilor electromagnetice influenţează microstructura şi proprietăţile mecanice ale materialului perforat. Acest studiu a permis stabilirea unor limite optime pentru expunerea materialului la astfel de factori.
- Investigarea influenţei procesului de laserare asupra calităţii sudurii canalului de ghidare al airbagului şi elaborarea unor strategii de optimizare pentru asigurarea unei fixări corecte şi sigure. Studiul a evidenţiat importanţa parametrilor laserului în menţinerea integrităţii structurale a materialului şi a permis identificarea unor strategii eficiente pentru îmbunătăţirea sudurii componentelor airbagului.
- Identificarea de soluţii viabile pentru utilizarea tehnologiilor de filtrare şi control al nivelului de zgomot electromagnetic asupra calităţii perforaţiilor şi a rezistenţei materialului perforat. Analizele experimentale asupra testelor de rupere au arătat că filtrarea activă a interferenţelor electromagnetice poate contribui la îmbunătăţirea calităţii procesului de perforare.
- Dezvoltarea unor strategii de optimizare pentru tratamentul imitaţiei de piele, astfel încât să se asigure un echilibru între siguranţă, aspect estetic şi performanţă mecanică. Aceste strategii au inclus utilizarea unor tratamente termice şi chimice care să îmbunătăţească rezistenţa materialului fără a afecta estetica sau flexibilitatea acestuia.
- Studiarea influenţei grosimii materialului şi a puterii laserului asupra variabilităţii perforaţiilor, printr-o analiză factorială realizată pe un eşantion extins de 950 de probe. Rezultatele au demonstrat corelaţii semnificative între aceşti parametri şi precizia perforaţiilor, contribuind la îmbunătăţirea controlului procesului.
- Implementarea unui sistem avansat de monitorizare şi control în timp real al procesului de microperforare, care permite detectarea rapidă a deviaţiilor şi ajustarea automată a parametrilor pentru menţinerea consistenţei perforaţiilor pe suprafaţa materialului. Acest sistem a condus la o reducere semnificativă a defectelor de perforare şi la o creştere a eficienţei procesului.
- Studiu detaliat referitor la materialului utilizat în procesul de perforare, incluzând analiza grosimii, texturii şi comportamentului său la temperaturi ridicate. Aceste caracterizări au permis determinarea unor parametri optimi de proces şi adaptarea tehnologiilor laser pentru perforarea materialului fără a compromite proprietăţile sale mecanice.

- Optimizarea parametrilor laserului pentru îmbunătăţirea calităţii perforaţiilor, având în vedere factori precum focalizarea fasciculului, numărul de impulsuri şi viteza de deplasare. S-a demonstrat că o configurare precisă a acestor parametri reduce defectele şi asigură perforaţii uniforme, contribuind la îmbunătăţirea performanţei materialului perforat.
- Implementarea un sistem cu impulsuri de 200 femtosecunde şi o frecvenţă de repetiţie de 2 KHz cu scopul utilizării unui laser cu regim pulsant pentru minimizarea deteriorării termice a materialului. Această abordare a permis realizarea unor perforaţii precise, fără a afecta negativ structura materialului.

6.3. Aspecte inovative ale tezei de doctorat

Prezenta teză de doctorat este caracterizată de o serie de aspecte inovative relevante, atât prin prisma fundamentării științifice riguroase, cât și prin aplicabilitatea directă în context industrial, în special în cadrul proceselor de sudare cu laser asociate produselor de tip airbag cu caracteristici critice de siguranță. Elementele de noutate metodologică și tehnologică constau în:

➤ ***Validarea dublă a procesului prin testare mecanică și funcțională***

Inovația metodologică este consolidată printr-o strategie de validare pe două niveluri: validare mecanică prin teste de rupere standardizate și validare funcțională prin testarea ansamblurilor airbag. Această dublă verificare, rareori întâlnită în abordările clasice, permite transferul direct al concluziilor către cerințele aplicative de siguranță funcțională, specific industriilor reglementate.

➤ ***Analiza influenței zgomotului electromagnetic ca factor perturbator de proces***

Un alt aspect inovativ semnificativ constă în introducerea zgomotului electromagnetic (EMI) în modelarea comportamentului procesului. Pe baza rezultatelor testelor specifice caracteristicilor mecanice, se conturează o perspectivă emergentă asupra robusteții electromagnetice a procesului cu tehnologia laser, tematică insuficient tratată în literatura de specialitate. Această abordare are potențial de extindere în proiectarea sistemelor cu tehnologia laser cu cerințe stricte de compatibilitate electromagnetică (EMC).

➤ ***Integrarea proceselor și a rezultatelor într-un model corelativ proces–produs***

Prin corelarea directă a parametrilor de proces cu performanțele mecanice și funcționale ale produsului finit, se dezvoltă o perspectivă de tip end-to-end. Acest model integrează datele de proces, rezultatele testelor și trasabilitatea, sprijinind implementarea unui sistem calitativ proactiv, bazat pe prevenție și control integrat în timp real.

➤ ***Dezvoltarea și implementarea unui sistem de vizualizare (SPV) pentru shopfloor***

Un aspect de noutate practică cu impact semnificativ asupra operaționalizării procesului constă în implementarea unei soluții de tip Shopfloor Process Visualization (SPV), ce permite afișarea și urmărirea în timp real a parametrilor critici și a deviațiilor de proces. Acest sistem asigură integrarea datelor de proces cu sistemul MES, facilitând detecția rapidă a neconformităților și fundamentarea deciziilor operative într-un mediu de producție digitalizat.

➤ ***Conceperea unei stații dedicate de verificare și măsurare a poziției liniei laser, cu trasabilitate completă***

Unul dintre cele mai relevante aspecte inovative ale cercetării constă în dezvoltarea unei stații automatizate de verificare a poziției liniei laser, destinată procesului de microperforare. Această stație realizează:

- asocierea univocă a fiecărei piese cu imaginea preluată a traiectoriei laserului;
- înregistrarea în sistemul de trasabilitate a corelației dintre identificatorul unic al piesei, imaginea obținută și parametrii procesului;
- validarea dublă a procesului – atât din punct de vedere optic, cât și funcțional, pentru garantarea conformității în aplicații cu caracter critic.

Întregul concept a fost dezvoltat pentru a asigura redundanță și robustețe în controlul unui proces cu impact direct asupra siguranței utilizatorului final, în conformitate cu cerințele sistemelor critice. Având în vedere gradul său ridicat de originalitate, aplicabilitatea industrială directă și caracterul inovativ al integrării proces–imagine–trasabilitate, soluția poate fi patentată prin propunerea unui brevet de invenție.

6.4. Dezvoltări viitoare

Rezultatele cercetărilor elaborate în prezenta teză de doctorat pot constitui premise pentru noi direcții de investigare în vederea îmbunătățirea procesului de microperforare cu laser, printre care:

- Extinderea studiilor asupra efectelor zgomotului electromagnetic asupra altor tipuri de procese laser utilizate în industria auto.
- Dezvoltarea unor modele predictive bazate pe inteligență artificială pentru reglarea automată a parametrilor laserului în funcție de nivelul zgomotului electromagnetic.
- Optimizarea sudurii canalului de ghidare al airbagului prin tehnologii laser avansate, pentru a asigura o performanță optimă a sistemului de siguranță.
- Integrarea unor senzori de feedback optic care să permită ajustarea în timp real a parametrilor laserului, menținând o calitate constantă a perforațiilor.
- Testare unor noi tipuri de materiale textile pentru airbaguri care să fie mai rezistente la variațiile de proces și care să asigure o performanță îmbunătățită a sistemului de siguranță.
- Dezvoltarea unor sisteme avansate de control al nivelului de zgomot electromagnetic pentru a asigura stabilitatea fasciculului laser și consistența perforațiilor.

Analiza influenței parametrilor specifici procesului de microperforare deschide noi oportunități pentru cercetări suplimentare, care pot contribui la dezvoltarea cunoștințelor și a tehnologiilor utilizate în procesarea cu laser pentru industria auto.

Analiza procesului de prelucrare cu laser nu se limitează doar la detectarea neconformităților, ci își propune să contribuie la dezvoltarea unor soluții inovatoare, care să permită îmbunătățirea semnificativă a procesului de prelucrare cu laser a decupajelor pentru airbaguri. Prin implementarea unor tehnici avansate de analiză și optimizare a parametrilor de proces, studiile dezvoltate în cadrul prezentei teze de doctorat pot oferi recomandări precise privind ajustările necesare pentru a obține perforații uniforme și precise, indiferent de configurația vehiculului. De asemenea, investigațiile ample elaborate reprezintă un pas semnificativ către îmbunătățirea fiabilității și consistenței tehnologiilor de prelucrare cu laser a microperforării componentelor airbag. Studiile detaliate și măsurile propuse subliniază importanța asigurării calității și optimizarea proceselor din industria siguranței auto. Este

esențial ca părțile interesate să colaboreze îndeaproape pentru a asigura implementarea de măsuri eficiente, promovând astfel o cultură a îmbunătățirii continue și a excelenței în practicile de fabricație.

6.5. Modalități de valorificare a rezultatelor cercetării

Rezultatele obținute pe parcursul desfășurării programului de cercetare științifică au fost valorificate prin:

- Publicarea unor articole științifice în reviste internaționale de specialitate cotate Clarivate Analytics (ISI Web of Science), contribuind la dezvoltarea cunoștințelor în domeniul tehnologiilor de prelucrare și în particular al microperforării cu laser: [RUS24a], [RUS24b], [DUM23].
- Prezentarea rezultatelor la conferințe internaționale, facilitând schimbul de informații cu alți cercetători și specialiști din industrie: [RUS23], [RUS24c], [DUM24a], [DUM24b], [DUM24c], [DUM24d], [RUS25a], [RUS25b].
- Colaborarea cu parteneri din industria auto pentru implementarea soluțiilor propuse în procesele de fabricație a airbagurilor și a altor componente textile prelucrate cu laser.
- Integrarea concluziilor studiului în proiecte de dezvoltare a unor noi echipamente laser, adaptate la cerințele specifice ale industriei auto.
- Elaborarea unor ghiduri tehnologice pentru optimizarea procesului de perforare cu laser, destinate specialiștilor din industrie.
- Aplicarea strategiilor de optimizare propuse în fabricarea componentelor critice pentru siguranța pasagerilor, îmbunătățind fiabilitatea și asigurarea conformității produselor finite în concordanță cu standardele internaționale.

6.6. Relevanța cercetării

Relevanța tezei de doctorat este multiplu stratificată și se manifestă atât la nivel tehnologic și industrial, cât și la nivel metodologic și academic. Cercetarea evidențiază o problemă critică pentru siguranța pasivă în industria auto — micro-perforarea precisă și controlată a materialelor utilizate în construcția sistemelor de airbag — și o face printr-o combinație de instrumente științifice avansate, tehnologii moderne de proces și principii ale fabricației inteligente.

Din punct de vedere tehnologic, relevanța lucrării derivă din aplicabilitatea directă a rezultatelor asupra procesului de fabricație a airbagurilor. Aceste componente sunt esențiale pentru protecția pasagerilor în cazul impactului și trebuie să funcționeze cu o precizie și o fiabilitate extremă. Micro-perforarea reprezintă o etapă critică în proiectarea acestora, deoarece afectează modul de desfășurare al airbagului în momentul declanșării.

Totodată, cercetarea este relevantă și prin faptul că propune metode de validare statistică și inspecție nedistructivă care pot fi adoptate pe scară largă în industrii cu cerințe stricte de calitate și

trasabilitate, precum industria aerospațială, biomedicală sau cea a electronicii de putere. Modelul de analiză factorială și integrarea evaluărilor SPV oferă un exemplu concret de cum se poate realiza controlul calității în timp real, reducând semnificativ costurile și timpul asociate metodelor de evaluare.

În contextul dezvoltării durabile și al cerințelor de eficiență energetică, teza este relevantă prin accentul pus pe optimizarea resurselor utilizate în proces. Prin ajustarea fină a parametrilor de proces, autorul demonstrează posibilitatea reducerii pierderilor materiale (deșeurii rezultate din perforații defecte), minimizării consumului de energie (prin reducerea duratei de proces) și îmbunătățirii randamentului. Aceste aspecte răspund nevoilor actuale ale industriei auto.

La nivel metodologic, teza este relevantă prin oferirea unui model replicabil și extensibil de analiză și optimizare a proceselor complexe. Orice proces de fabricație care presupune mai mulți parametri de control, interacțiuni multiple și toleranțe restrânse poate beneficia de metodologia propusă. Această relevanță transversală crește valoarea lucrării ca referință în dezvoltarea de procese industriale robuste.

Una dintre cele mai importante surse de relevanță o constituie integrarea completă a conceptului de Shopfloor digital. Acesta devine tot mai important în contextul revoluției Industry 4.0, care propune transformarea fabricilor tradiționale în medii interconectate, inteligente și complet automatizate. Shopfloor-ul dezvoltat în cadrul tezei nu este doar un colector pasiv de date, ci un element activ de control adaptiv, capabil să analizeze în timp real informațiile provenite de la senzori, camere optice. De asemenea, relevanța cercetării se extinde în domeniul educațional și al formării specialiștilor din industrie. Teza oferă un exemplu aplicabil de cum poate fi construit un sistem de experimentare, modelare și validare a proceselor complexe într-un cadru didactic sau de cercetare aplicată. Modelele și algoritmi dezvoltati pot fi adaptați în scopuri pedagogice, iar platforma experimentală poate deveni o resursă utilă în formarea inginerilor în domeniul fabricației avansate.

În plan științific, relevanța lucrării este susținută și de oportunitatea pe care o oferă pentru cercetări viitoare. Sunt conturate în concluzii o serie de direcții emergente care pot constitui teme de cercetare viitoare, atât în mediul academic, cât și în centrele industriale de inovare.

Nu în ultimul rând, teza are relevanță strategică în contextul globalizării și al relocării lanțurilor de producție în regiuni cu cerințe crescânde de calitate și trasabilitate. Prin utilizarea unor metode precise și controlate, dezvoltate local, se pot asigura condițiile pentru fabricarea de produse de înaltă tehnologie cu un grad ridicat de conformitate, contribuind astfel la competitivitatea industriei auto la nivel regional și european.

În concluzie, relevanța cercetării este una sistemică: ea oferă soluții pentru o problemă practică critică, contribuie la consolidarea unei metodologii științifice robuste, aduce inovație tehnologică prin integrarea digitală și oferă un model replicabil pentru alte domenii ale fabricației avansate. Prin toate acestea, lucrarea contribuie la avansarea cunoașterii în domeniul ingineriei industriale și sprijină tranziția către o producție mai eficientă, mai sigură și mai inteligentă.