

# **CERCETAREA METODELOR ALTERNATIVE DE REALIZARE A BILELOR DE DEO ROLL**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea Politehnica Timișoara  
în domeniul inginerie mecanică  
de către

**Ing. Dan Florin TEUȘDEA**

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Erwin-Christian LOVASZ

Ziua susținerii tezei: 30.09.2022

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Automatică                               | 11. Știința și Ingineria Materialelor                                      |
| 2. Chimie                                   | 12. Ingineria Sistemelor   |
| 3. Energetică                               | 13. Inginerie Energetică   |
| 4. Inginerie Chimică                        | 14. Calculatoare și Tehnologia Informației                                 |
| 5. Inginerie Civilă                         | 15. Ingineria Materialelor   |
| 6. Inginerie Electrică                      | 16. Inginerie și Management  |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 17. Arhitectură  |
| 8. Inginerie Industrială                    | 18. Inginerie Civilă și Instalații   |
| 9. Inginerie mecanică                       | 19. Inginerie Electronică, Telecomunicații<br>și Tehnologii Informaționale |
| 10. Știința Calculatoarelor                 |  |

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul Școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2022

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii nr. 9  
e-mail : editura@upt.ro

## CUVÂNT-ÎNAINTE

Elaborarea tezei de doctorat, realizarea programului de cercetare, scrierea și publicarea lucrărilor științifice au constituit cea mai intensă și cea mai importantă etapă a carierei mele. Experiențele trăite în acești ultimi patru ani mi-au dat o nouă perspectivă profesională, m-au motivat și mi-au dat forța necesară atingerii unui astfel de obiectiv. Parcurgerea acestui program nu a fost întotdeauna simplă în condițiile restricțiilor cauzate de pandemia prin care am trecut în ultimii ani.

Am avut privilegiul de a învăța și lucra sub îndrumarea unei adevărate echipe alcătuite din personalități din domeniul universitar și al cercetării. Tema aleasă a necesitat realizarea unor studii și cercetări avansate în domenii multiple: studiul materialelor polimerice, tehnologii de fabricație a reperelor din materiale polimerice, grafică asistată și desen tehnic, sinteza mecanismelor cu camă, tehnologii de sudare, rezistența materialelor, statistică aplicată, sustenabilitate și reciclarea deșeurilor din materiale polimerice. Gândurile mele cele mai bune se îndreaptă către cei care m-au sprijinit continuu în acest lung demers.

Aș dori să încep prin a-i mulțumi D-lui prof.dr.ing. Erwin-Christian Lovasz, conducătorul meu de doctorat, pentru timpul, răbdarea și sprijinul acordat pe toată durata studiilor și a scrierii tezei. Procesul de elaborare a tezei de doctorat a necesitat un lung șir de întâlniri pe diverse tematici (cursuri, studii, cercetări, scriere de articole, referate, revizii, prezentări). În calitate de fost coleg de facultate, am regăsit aceeași persoană entuziastă, empatică și altruistă. Pentru mine a fost o experiență deosebită să lucrăm din nou împreună.

Adresez multe mulțumiri D-lui prof.dr.ing. Mircea Vodă pentru încrederea acordată și suportul total pe toată durata studiilor. Îi sunt foarte recunoscător pentru implicarea directă și facilitarea derulării de experimente extrem de importante pentru redactarea tezei și scrierea de lucrări științifice. Una dintre lucrările științifice scrise cu D-l Vodă a fost publicată într-o revistă indexată ISI -Web of Science. Aș dori să menționez, și în cazul D-lui Vodă, relația de prietenie din perioada anilor 1990, în care am fost colegi la Catedra de Geometrie Descriptivă și Desen Tehnic.

Doresc să-i mulțumesc D-lui dr.ing. Nicușor-Alin Sîrbu, Director General al Institutului de Cercetare & Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale – ISIM Timișoara pentru sprijinul acordat la realizarea cercetărilor și a experimentelor de sudare a bilelor de deo roll prin diverse tehnologii. Cele mai importante experimente de sudare au fost realizate prin bunăvoința și cu sprijinul Domniei sale. Un sincer mulțumesc întregului colectiv de la ISIM Timișoara pentru timpul acordat în realizarea programului de cercetare și pentru aportul substanțial în scrierea celor patru lucrări științifice apărute în conferințe cotate BDI.

Multe mulțumiri D-lui conf.dr.ing. Daniel Voicu Stan pentru sprijinul acordat în studierea materialelor polimerice, a tehnologiilor de injecție și la scrierea unui articol apărut într-o manifestare științifică indexată ISI-Web of Science.

Îi mulțumesc foarte mult D-lui Prof.dr.ing. Liviu Marșavina pentru sprijinul dat la efectuarea testelor de rezistență mecanică și pentru încrederea acordată prin participarea ca referent oficial în comisia de analiză și evaluare a tezei de doctorat.

Alese mulțumiri aduc D-lui Prof.dr.ing. Ioan Doroftei și D-lui dr.ing. Victor Verbițchi pentru onoarea acordată prin participarea ca referenți oficiali în comisia de analiză și evaluare a tezei de doctorat, pentru atenția și răbdarea cu care au studiat lucrarea.

Mulțumesc pentru sprijinul acordat, întregului colectiv al Departamentului de Mecatronică, în cadrul căruia mi-am desfășurat o mare parte din activitatea de cercetare, în special D-nei Conf.dr.ing. Carmen Sticlaru și D-lui Conf.dr.ing. Valentin Ciupe.

În calitate de angajat, le sunt foarte recunoscător colegilor și conducătorilor societăților comerciale Obrist Eastern Europe România și Zeller Engineering Germania pentru materialele puse la dispoziție în vederea realizării studiilor experimentale din cadrul programului de cercetare.

Nu în ultimul rând aș dori să mulțumesc familiei mele pentru înțelegerea, suportul moral și sprijinul acordat în această perioadă.

Teușdea, Dan – Florin

**Cercetarea metodelor alternative de realizare a bilelor de deo-roll**

Teze de doctorat ale UPT, Seria X, Nr. YY, Editura Politehnica, 2022, 184 pagini, 164 figuri, 63 tabele.

ISSN:

ISBN:

Cuvinte cheie: bile, deo roll, polipropilenă, sudare, came

Rezumat:

Lucrarea a avut ca obiectiv major identificarea unor metode și tehnologii alternative de fabricare a unor componente din industria produselor cosmetice, denumite generic bile de deo roll, cu un consum redus de materii prime și energie. Prin tehnologia actuală aceste bile se realizează dintr-o singură bucată, dar consumurile specifice de materii prime și energie sunt încă foarte mari. Această lucrare propune ca metodă alternativă, realizarea bilelor de deo roll prin *îmbinarea a două semisfere*, obiectivele principale fiind reducerea consumurilor de materii prime și energie, creșterea productivității și reducerea deșeurilor.

Au fost realizate studii comparative ale tehnologiilor de sudare a componentelor din materiale polimerice, fiind efectuate experimente și măsurări calitative multiple de dimensiuni, rezistență mecanică și aspect vizual. Tehnologiile alternative studiate au vizat îmbinarea prin sudare a semisferelor din polipropilenă (termică, ultrasunete, laser, frecare, gaze fierbinți). În urma experimentelor efectuate a fost selectată o tehnologie care poate asigura creșteri semnificative de productivitate în cazul fabricației de serie mare a bilelor de deo roll.

Materializarea rezultatelor acestor cercetări poate sta la baza conceperii unei linii de fabricație de mare productivitate a bilelor de deo roll.

Rezultatele cercetării pot fi valorificate și la fabricarea obiectelor sferice cu pereți subțiri, în diverse industrii (auto, jucării, articole de agrement, implanturi medicale, protecția mediului, etc).



## CUPRINS

Nomenclator .....	8
Capitolul 1. INTRODUCERE.....	19
Capitolul 2. CONSIDERAȚII TEORETICE PRIVIND MATERIALELE POLIMERICE ȘI TEHNOLOGIILE DE PROCESARE .....	21
2.1. Considerații teoretice privind materialele polimerice .....	21
2.2. Surse de obținere a materialelor polimerice .....	25
2.2.1. Materiale polimerice obținute din hidrocarburi .....	25
2.2.2. Materiale polimerice provenite din reciclare. ....	28
2.3. Aplicații ale materialelor polimerice în industria produselor cosmetice .....	30
2.4. Aplicații ale reperelor de formă sferică fabricate din materiale polimerice.....	32
2.5. Aspecte de sustenabilitate și economie circulară .....	32
2.5.1. Aspecte de reciclabilitate în proiectarea produselor de tip deo roll .....	34
2.6. Tehnologii principale de procesare a materialelor polimerice .....	38
2.6.1. Tehnologia de matrițare prin injectare .....	39
2.6.2. Tehnologia de matrițare prin compresie .....	40
2.6.3. Tehnologia de matrițare prin extrudare-injectare-suflare.....	42
CAPITOLUL 3. PREZENTAREA TEMEI DE CERCETARE A TEZEI DE DOCTORAT.....	44
3.1. Prezentarea tehnologiilor actuale de fabricație a bilelor de deo roll .....	44
3.2. Prezentarea metodelor alternative de realizare a bilelor de deo roll .....	46
3.3. Considerații de fezabilitate tehnico-economică .....	47
3.4. Obiectivele tezei de doctorat.....	49
Capitolul 4. METODE ALTERNATIVE DE REALIZARE A BILELOR DE DEO ROLL .....	50
4.1. Considerații generale referitoare la metodele de îmbinare a reperelor din materiale polimerice.....	50
4.1.1. Clasificarea procedeelor de îmbinare prin sudare a materialelor polimerice .....	51
4.1.2. Fundamente referitoare la îmbinarea prin sudare a materialelor polimerice .....	53
4.2. Sudarea materialelor polimerice cu element încălzitor .....	56
4.2.1. Sudarea bilelor de deo roll cu element încălzitor.....	59
4.3. Sudarea materialelor polimerice cu radiații infraroșii.....	67
4.3.1. Sudarea bilelor de deo roll cu radiații infraroșii.....	68
4.4. Sudarea materialelor polimerice cu gaze fierbinți .....	80
4.4.1. Sudarea bilelor de deo roll cu gaze fierbinți .....	82
4.5. Sudarea prin extrudare cu material topit.....	84

6 Cercetarea metodelor alternative de realizare a bilelor de deo roll	
4.5.1. Sudarea bilelor de deo roll prin extrudare cu material topit.....	84
4.6. Sudarea materialelor polimerice cu radiații laser .....	85
4.6.1. Sudarea cu laser a bilelor deo roll .....	92
4.6.2. Program experimental de sudare cu laser a bilelor de deo roll .....	94
4.7. Sudarea prin frecare a materialelor polimerice .....	95
4.7.1. Procedee tehnologice de sudare prin frecare de rotire a materialelor polimerice .....	99
4.7.2. Tehnologii noi de sudare prin frecare .....	100
4.7.3. Sudarea prin frecare a bilelor de deo roll.....	100
4.8. Sudarea cu ultrasunete a materialelor polimerice .....	101
4.8.1. Tipuri de îmbinări la sudarea cu ultrasunete .....	105
4.8.2. Considerente legate de proiectarea reperelor sudate cu ultrasunete.....	106
4.8.3. Principalii parametri tehnologici la sudarea cu ultrasunete .....	108
4.8.4. Sudarea cu ultrasunete a bilelor de deo roll .....	108
4.8.4.1. Experimente de sudare cu ultrasunete a bilelor de deo roll .....	109
4.8.4.1.1. Experimente de sudare cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz...109	
4.8.4.1.2. Experimente de sudare cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz...115	
4.9. Sudarea materialelor polimerice prin inducție .....	123
4.10. Fabricarea componentelor din materiale polimerice prin centrifugare .....	124
4.10.1. Fabricarea bilelor de deo roll prin rotomulaj .....	125
Capitolul 5. DETERMINĂRI DE CALITATE A BILELOR DE DEO ROLL.....	127
5.1. Proprietățile materialelor utilizate în fabricarea bilelor de deo roll. ....	127
5.2. Metode de determinare a calității sudurilor la componentele din materiale polimerice.....	129
5.3. Metode de determinare a calității sudurilor la bilele de deo roll. ....	130
5.3.1. Metode de control nedistructiv al bilelor de deo roll .....	130
5.3.2. Metode de control distructiv al bilelor de deo roll.....	132
5.4. Controlul bilelor de deo roll prin testarea proprietăților mecanice .....	133
5.4.1. Măsurări de rezistență la compresiune a bilelor de deo roll .....	135
5.5. Observații și discuții. ....	149
Capitolul 6. CONFIGURAREA UNEI LINII DE FABRICAȚIE A BILELOR DE DEO ROLL.....	151
6.1. Alegerea tehnologiei de fabricație.....	151
6.2. Configurarea unei linii de fabricație a bilelor de deo roll prin sudarea semisferelor cu element încălzitor. ....	152
6.3. Proiectarea mecanismului cu camă .....	157
6.3.1. Planul optim de mișcare a tchetului mecanismului cu camă.....	158
6.3.2. Alegerea legilor de mișcare a tchetului mecanismului cu camă .....	160
6.3.3. Determinarea gabaritului minim al mecanismului cu camă.....	166
6.3.4. Determinarea profilelor camelor mecanismului cu camă .....	167
6.4. Construcția CAD a camelor cilindrice cu canal .....	168

---

Capitolul 7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE .....	170
7.1. Concluzii finale.....	170
7.2. Contribuții personale. ....	170
7.3. Direcții viitoare de cercetare .....	174
Capitolul 8. LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE .....	176
Bibliografie.....	177

## NOTAȚII ȘI ABREVIERI

ABS	Acrilonitril butadien stiren
ASA	Acrilonitril stiren acrilat
CAD	Grafică asistată de calculator
COC	Copolimer ciclic de olefină
COP	Polimer ciclic de olefină
Cpk	Măsura capabilității potențiale a procesului
EI	Element încălzitor
EPDM	Monomer de Etilen-Propilen-Dienă
ETFE	Etil tetra flor
IR	Infraroșu
PA	Poliamidă
PBT	Polibuten tereftalat
PC	Policarbonat
PCR	Post consumer resin (Rășină post consumator)
PE	Polietilenă
PEEK	Polieter eter cetonă
PEID	Polietilenă de înaltă densitate
PEJD	Polietilenă de joasă densitate
PES	Polieteresulfona
PET	Tereftalat de polietilenă
PIR	Post Industrial Resin (Rășină post industrială)
PMMA	Polimetacrilat de metil
POM	Polioximetilenă
PP	Polipropilenă
PPS	Polifenilen sulfură
PS	Polistiren
PTFE	Politetrafluoretilenă
PU	Poliuretan
PVC	Policlorură de vinil
SAN	Acrilonitril stiren
TPE	Elastomer termoplastic
TPU	Poliuretan termoplastic
US	Ultrasunete

# LISTĂ DE FIGURI

## Capitolul 1

Figura 1.1. Ponderea sectoarelor consumatoare de materiale polimerice

## Capitolul 2

Figura 2.1. Schema reacției de polimerizare a polipropilenei

Figura 2.2. Structura semicristalină a macromoleculelor de polimeri

Figura 2.3. Formele geometrice ale lanțurilor macromoleculare

Figura 2.4. Comportamentul polimerilor termoplastici la încălzire

Figura 2.5. Stările fizice ale polimerilor amorfi

Figura 2.6. Stările fizice ale polimerilor semicristalini

Figura 2.7. Sursele de obținere a materialelor polimerice

Figura 2.8. Distribuția consumului pe tipuri de materiale polimerice

Figura 2.9. Schema de reciclare și reutilizare a deșeurilor din materiale polimerice

Figura 2.10. Schema de obținere și utilizare a materialelor de tip PCR prin reciclare chimică

Figura 2.11. Recipienți din materiale polimerice care imită sticla

Figura 2.12. Exemple de deodoranți de tip deo roll, deo spray și deo stick

Figura 2.13. Evoluția pieței globale de deodoranți

Figura 2.14. Deodoranți de tip deo roll

Figura 2.15. Exemple de aplicații ale obiectelor din materiale polimerice de formă sferică

Figura 2.16. Etapele de tranziție spre economia circulară

Figura 2.17. Tratarea și eliminarea deșeurilor la nivel global

Figura 2.18. Simbolizarea reciclabilității pentru polipropilenă

Figura 2.19. Reciclabilitatea principalelor categorii de materiale polimerice

Figura 2.20. Ambalaj pentru deodorant alcătuit din materiale care prezintă compatibilitate bună la reciclare mecanică

Figura 2.21. Ambalaj pentru deodorant alcătuit din materiale care prezintă compatibilitate limitată la reciclare mecanică

Figura 2.22. Ambalaj pentru deodorant alcătuit din materiale care prezintă incompatibilități la reciclare mecanică

Figura 2.23. Ambalaj pentru deodorant alcătuit din materiale care prezintă compatibilitate totală la reciclare mecanică

Figura 2.24. Modul de amprentare a ambalajelor prin coduri digitale în vederea sortării automatizate a deșeurilor

Figura 2.25. Gradul de reutilizare a ambalajelor din materiale polimerice

Figura 2.26. Procedeele de punere în formă a topiturii și de obținere a piesei

Figura 2.27. Părțile componente ale mașinii de injecție

Figura 2.28. Echipament de matrițare prin compresie cu 24 de posturi

Figura 2.29. Etapele procesului de matrițare prin compresie

Figura 2.30. Exemple de repere obținute prin tehnologia de matrițare prin compresie

Figura 2.31. Dispunerea posturilor de lucru la o mașină clasică de injectare-suflare

Figura 2.32. Exemple de piese obținute prin injectare-suflare

Figura 2.33. Etapele procesului de extrudare-suflare

Figura 2.34. Exemple de produse obținute prin extrudare-suflare

### **Capitolul 3**

Figura 3.1. Tehnologia clasică de extrudare-suflare-matrițare a bilelor de deo roll

Figura 3.2. Deșeu rezultat prin tehnologia clasică de extrudare-suflare-matrițare

Figura 3.3. Schema de principiu a unui dispozitiv de șlefuire-calibrare a bilelor

Figura 3.4. Secțiune transversală prin placa de presiune

Figura 3.5. Tehnologia alternativă de obținere a bilelor prin sudarea a două semisfere

Figura 3.6. Bile brute cu bavuri tehnologice pe cordonul de sudură

Figura 3.7. Imagini cu bila brută neșlefuită și bila finală șlefuită

### **Capitolul 4**

Figura 4.1. Metode de îmbinare a materialelor polimerice

Figura 4.2. Procedee de îmbinare prin sudare a materialelor polimerice

Figura 4.3. Modelul de evoluție a neregularităților în timpul sudării

Figura 4.4. Etapele refacerii în timp a lanțurilor moleculare pe interfața de contact a două piese sudate, din același polimer

Figura 4.5. Modelul analogic de simulare cu trei bare a stresului rezidual în îmbinarea sudată

Figura 4.6. Principiul sudării prin contact direct cu element încălzitor

Figura 4.7. Modul de transmitere a căldurii de la elementul încălzitor la piesă

Figura 4.8. Schematizarea operațiilor de sudare a semisferelor cu plită fierbinte

Figura 4.9. Schița semisferei care stă la baza obținerii bilelor de deo roll prin sudarea cu plită fierbinte

- Figura 4.10. Stand experimental de sudare a bilelor de deo roll cu plită fierbinte
- Figura 4.11. Deviații de la forma sferică a bilelor de deo roll după sudarea cu plită fierbinte
- Figura 4.12. Excentricități ale bilelor sudate cu plită fierbinte
- Figura 4.13. Bavuri rezultate din expulzarea materialului topit în interiorul sau exteriorul îmbinării sudate
- Figura 4.14. Inconsistența sudurii și crăpături în cordonul de sudură
- Figura 4.15. Acumulări de reziduuri pe bile și pe plita fierbinte
- Figura 4.16. Notarea diametrelor exterioare ale bilelor sudate
- Figura 4.17. Capabilitățile de proces pentru diametrele măsurate la ecuator ( $D_e$ )
- Figura 4.18. Capabilitățile de proces pentru diametrele măsurate la poli ( $D_p$ )
- Figura 4.19. Capabilitățile de proces referitoare la masele bilelor sudate cu plită fierbinte
- Figura 4.20. Principiul sudării materialelor polimerice cu radiații infraroșii
- Figura 4.21. Schematizarea operațiilor de sudare a bilei de deo roll cu sursă radiantă în infraroșu
- Figura 4.22. Schema de principiu a standului experimental de sudare a bilelor de deo roll cu radiații infraroșii
- Figura 4.23. Stand experimental de sudare a bilelor de deo roll cu radiații infraroșii
- Figura 4.24. Captură de pe panoul de comandă referitoare la faza de apropiere a semisferelor de sursa de caldură
- Figura 4.25. Captură de ecran furnizată de camera termografică ThermoCAM Researcher Professional 2.8 SR
- Figura 4.26. Graficul de variație temperatură - tensiune de alimentare a sursei radiante
- Figura 4.27. Defecte vizuale ale bilelor sudate cu radiații infraroșii
- Figura 4.28. Capabilitățile de proces referitoare la masele bilelor sudate cu radiații infraroșii
- Figura 4.29. Reprezentarea grafică a diametrelor măsurate ale bilelelor sudate cu radiații infraroșii
- Figura 4.30. Capabilitățile de proces pentru diametrele la ecuator ( $D_e$ ) ale bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 1)
- Figura 4.31. Capabilitățile de proces pentru diametrele la poli ( $D_p$ ) ale bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 1)
- Figura 4.32. Bilă sudată cu interpenetrare excesivă
- Figura 4.33. Limitarea interpenetrării semisferelor în faza de sudare
- Figura 4.34. Aspectul vizual al bilelor sudate în secțiune și în vedere (Set 2)
- Figura 4.35. Capabilitățile de proces pentru diametrele la ecuator ( $D_e$ ) ale bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 2)
- Figura 4.36. Capabilitățile de proces pentru diametrele la poli ( $D_p$ ) ale bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 2)
- Figura 4.37. Sudarea cu gaz încălzit cu material de adaos

- Figura 4.38. Stand experimental de sudare a bilelor de deo roll cu aer încălzit
- Figura 4.39. Defecte ale bilelor sudate cu aer încălzit
- Figura 4.40. Metoda de realizare a bilelor de deo roll prin sudarea cu extrudare de material topit (supra-injectare)
- Figura 4.41. Fazele de realizare a bilelor de deo roll prin supra-injectare
- Figura 4.42. Principiul sudării cu radiații laser a materialelor polimerice
- Figura 4.43. Încălzirea suprafețelor prin scanare laser de mare viteză
- Figura 4.44. Sudarea prin transmisie laser (TTIr) a materialelor polimerice
- Figura 4.45. Scanarea laser la viteză redusă și apariția fenomenului de „localizare” a încălzirii
- Figura 4.46. Exemplu de sudare (TTIr) cu mască
- Figura 4.47. Sudarea laser cu element de difracție optică
- Figura 4.48. Tehnologia de sudare de tip „Globo Welding”
- Figura 4.49. Sudarea cu fascicul laser prin rotirea semisferelor
- Figura 4.50. Sudarea cu laser de tip „blitz” a bilelor de deo roll
- Figura 4.51. Interferența fascicului laser cu dispozitivul de fixare a semisferei superioare
- Figura 4.52. Bile sudate cu tehnologie laser
- Figura 4.53. Sudarea liniară prin frecare pe direcție longitudinală și transversală
- Figura 4.54. Reprezentarea amplitudinilor la sudarea prin orbitare
- Figura 4.55. Traiectoria mișcării relative la sudarea prin rotire
- Figura 4.56. Traiectoria mișcării relative la sudarea prin frecare unghiulară
- Figura 4.57. Variația cantității de material topit ca funcție de timp la sudarea prin frecare
- Figura 4.58. Sudarea prin frecare cap la cap prin rotirea unui singur reper
- Figura 4.59. Sudarea prin frecare cap la cap prin rotirea ambelor repere
- Figura 4.60. Bilă de deo roll sudată prin procedeul de sudare prin frecare
- Figura 4.61. Schema de principiu a unui echipament de sudare cu ultrasunete
- Figura 4.62. Profile uzuale de sonotrode
- Figura 4.63. Variante de sudare cu ultrasunete
- Figura 4.64. Tipuri de îmbinări utilizate la sudarea cu ultrasunete
- Figura 4.65. Forme constructive ale îmbinărilor sudate cu ultrasunete
- Figura 4.66. Fazele tehnologice ale procedurii de sudare cu ultrasunete a bilelor de deo roll
- Figura 4.67. Stand experimental de sudare a bilelor de deo roll cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz
- Figura 4.68. Schița dispozitivului de fixare a semisferei inferioare (nicovală)



- Figura 4.69. Reprezentarea în secțiune a semisferei superioare și a concentratorului de energie
- Figura 4.70. Diagrama curbei de variație a stării de solicitare internă a sonotrodei obținută prin programul de simulare Krell Engineering
- Figura 4.71. Forma și dimensiunile sonotrodei utilizate pentru sudarea cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz a bilelor de deo roll
- Figura 4.72. Defecte de calitate ale bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 KHz
- Figura 4.73. Imagini ale cordonului de sudură obținut cu timp de sudare de 2,5 s
- Figura 4.74. Masele medii ale bilelor brute obținute prin tehnologia clasică și prin sudare cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz
- Figura 4.75. Capabilitățile de proces pentru masele bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz
- Figura 4.76. Capabilitățile diametrelor bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz
- Figura 4.77. Echipament Herman Ultrasonics de sudare cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz
- Figura 4.78. Graficul cu parametrii de sudare utilizați la măsurările cu numărul ID 155402
- Figura 4.79. Graficul cu parametrii de sudare utilizați la măsurările cu numărul ID 155484
- Figura 4.80. Aspectul vizual al bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 35 KHz, cu parametrii utilizați la măsurările cu numărul ID 155484
- Figura 4.81. Reprezentarea diametrelor exterioare ale bilelor sudate la frecvențele de 20 kHz și 35 kHz
- Figura 4.82. Capabilitățile dimensionale de proces ale diametrelor bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz
- Figura 4.83. Principiul sudării prin inducție a materialelor polimerice
- Figura 4.84. Etapele fabricării prin rotomulaj a pieselor din materiale polimerice
- Figura 4.85. Dispozitiv experimental de fabricare a bilelor de deo roll prin rotomulaj

## Capitolul 5

- Figura 5.1. Metoda de control nedistructiv cu arc electric al îmbinărilor prin sudare a componentelor din materiale polimerice
- Figura 5.2. Direcțiile de aplicare a forței de compresiune
- Figura 5.3. Dispozitiv pentru determinarea rezistenței la compresiune a bilelor de deo roll
- Figura 5.4. Stand de măsurare a forțelor și deformațiilor marca Zwick /Roell
- Figura 5.5. Software Zwick/Roell de trasare a curbelor de sarcină
- Figura 5.6. Reprezentarea grupurilor de măsurări ale forței maxime de compresiune pentru toate loturile de bile de deo roll
- Figura 5.7. Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, neșlefuite, măsurate la poli

- Figura 5.8. Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, neșlefuite, măsurate la ecuator
- Figura 5.9. Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, șlefuite, măsurate la poli
- Figura 5.10. Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, șlefuite, măsurate la ecuator
- Figura 5.11. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin tehnologia clasică
- Figura 5.12. Bile de deo roll obținute cu tehnologia clasică, supuse la compresiune, cu apariția de zone cu modificări în volum
- Figura 5.13. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz
- Figura 5.14. Bilă de deo roll neșlefuită, obținută prin sudare cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz, supusă la compresiune pe direcție polară, cu apariția de zone cu modificări în volum
- Figura 5.15. Crăpături apărute la bilele de deo roll neșlefuite, sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială
- Figura 5.16. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudare cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz
- Figura 5.17. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu element încălzitor
- Figura 5.18. Deformații ale bilei șlefuite obținute prin sudare cu element încălzitor, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială
- Figura 5.19. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu radiații infraroșii
- Figura 5.20. Reprezentarea grafică a curbelor de compresiune obținute cu programul de software Zwick/Roell pentru toate tehnologiile de fabricare a bilelor de deo roll
- Figura 5.21. Reprezentarea forțelor medii de compresiune pentru toate loturile de bile de deo roll
- Figura 5.22. Schimbarea structurii morfologice a materialului polimeric în cordonul de sudură

## Capitolul 6

- Figura 6.1. Schema de principiu a unei linii flexibile de mare productivitate pentru producerea și asamblarea bilelor de deo roll
- Figura 6.2. Sistemul de producție a semisferelor de deo roll
- Figura 6.3. Orientator centrifugal
- Figura 6.4. Platan rotativ cu alveole
- Figura 6.5. Variantă de orientator vibrant
- Figura 6.6. Unitatea de inserție a semisferelor de deo roll

- Figura 6.7. Schița echipamentului de asamblare a bilelor de deo roll
- Figura 6.8. Schematizarea operațiilor de sudare cu element încălzitor
- Figura 6.9. Sistem sincron de evacuare a bilelor sudate
- Figura 6.10. Schema cinematică a unui sistem de tip carusel pentru asamblarea bilelor de deo roll
- Figura 6.11. Planul general de mișcare a tachetului pentru mecanismul cu camă cilindrică cu canal (superioară)
- Figura 6.12. Legea de mișcare a tachetului pentru mecanismul cu camă cilindrică cu canal, superioară și inferioară
- Figura 6.13. Profilele teoretice și reale ale camelor cilindrice cu canal, superioară și inferioară
- Figura 6.14. Reprezentarea 3D a camelor cilindrice
- Figura 6.15. Profilele camelor pe diferite faze de mișcare a tachetului

## LISTĂ DE TABELE

- Tabelul 2.1. Gradul de cristalinitate pentru diferite materiale polimerice
- Tabelul 2.2. Clasificarea polimerilor în funcție de proprietățile termice și mecanice
- Tabelul 2.3. Caracteristici ale materialelor termoplastice semicristaline (valori medii)
- Tabelul 2.4. Proprietăți generale ale polipropilenelor
- Tabelul 2.5. Tehnologii de procesare a materialelor polimerice
- Tabelul 3.1. Analiza SWOT a tehnologiei clasice de extrudare-suflare-matrițare
- Tabelul 3.2. Analiza SWOT a tehnologiilor alternative de fabricație a bilelor de deo roll
- Tabelul 4.1. Analiza comparativă a procedeelor de sudare a reperelor din materiale polimerice
- Tabelul 4.2. Valori orientative ale principalilor parametri tehnologici la sudarea cu element încălzitor
- Tabelul 4.3. Parametrii tehnologici utilizați în programul experimental de sudare cu plită fierbinte (Set 1)
- Tabelul 4.4. Parametrii tehnologici utilizați în programul experimental de sudare cu plită fierbinte (Set 2)
- Tabelul 4.5. Măsurări ale diametrelor și maselor bilelor sudate cu plită fierbinte
- Tabelul 4.6. Elementele de caracterizare a procedului de sudare cu plită fierbinte
- Tabelul 4.7. Regimuri orientative de sudare cu radiații infraroșii
- Tabelul 4.8. Temperatura în focar în funcție de tensiunea de alimentare a sursei radiante
- Tabelul 4.9. Parametrii tehnologici utilizați în programul experimental de sudare cu radiații infraroșii (Set 1)
- Tabelul 4.10. Valori ale diametrelor și maselor bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 1)
- Tabelul 4.11. Parametrii tehnologici la sudarea cu radiații intraroșii (Set 2)
- Tabelul 4.12. Măsurări ale diametrelor bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 2)
- Tabelul 4.13. Elementele de caracterizare a procedului de sudare cu sursă radiantă în infraroșu a bilelor de deo roll
- Tabelul 4.14. Temperaturile gazului încălzitor și temperaturile la suprafața pieselor
- Tabelul 4.15. Coeficienți de calitate ai sudurilor pentru diferite materiale polimerice
- Tabelul 4.16. Valorile principalilor parametri tehnologici utilizați la sudarea cu aer încălzit
- Tabelul 4.17. Elementele de caracterizare a procedului de sudare a bilelor deo roll cu aer încălzit

- Tabelul 4.18. Combinații posibile de materiale polimerice sudate cu tehnologii laser
- Tabelul 4.19. Elementele de caracterizare a procedurii de sudare cu laser a bilelor de deo roll
- Tabelul 4.20. Parametrii principali care definesc sudarea prin frecare
- Tabelul 4.21. Coeficienții de calitate ai sudurilor obținute prin frecare
- Tabelul 4.22. Parametrii tehnologici de sudare prin frecare
- Tabelul 4.23. Elementele de caracterizare a procedurii de sudare prin frecare a bilelor de deo roll
- Tabelul 4.24. Proprietățile de sudabilitate cu ultrasunete ale materialelor polimerice uzuale
- Tabelul 4.25. Compatibilitățile la sudarea cu ultrasunete a principalelor materiale polimerice
- Tabelul 4.26. Dimensiuni constructive recomandate pentru îmbinările sudate cu ultrasunete
- Tabelul 4.27. Caracteristicile sonotrodei utilizate în programul experimental de sudare cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz
- Tabelul 4.28. Parametrii tehnologici utilizați la sudarea cu ultrasunete a bilelor de deo roll la frecvența de 20 kHz
- Tabelul 4.29. Valorile diametrelor și maselor pentru bilele sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz și timp de sudare de 2,5 s
- Tabelul 4.30. Schița sonotrodei și proprietățile materialului utilizat
- Tabelul 4.31. Harta deplasărilor totale și amplitudinile pe direcția axei Z
- Tabelul 4.32. Harta tensiunilor de oboseală Von Mises
- Tabelul 4.33. Parametrii de proces utilizați la sudarea cu ultrasunete a bilelor de deo roll la frecvența de 35 kHz cu sonotroda de lungime 75 mm
- Tabelul 4.34. Măsurările dimensionale ale diametrelor exterioare ale bilelor sudate cu ultrasunete la frecvențele de 20 kHz, respectiv 35 kHz
- Tabelul 4.35. Elementele de caracterizare a procedurii de sudare cu ultrasunete a bilelor de deo roll
- Tabelul 5.1. Proprietățile fizice, mecanice și termice ale materialului H 2150
- Tabelul 5.2. Proprietățile fizice, mecanice și de procesare ale materialului HE 125 MO
- Tabelul 5.3. Proprietățile fizico-chimice, mecanice și de procesare ale materialului HP 648
- Tabelul 5.4. Principalele defecte vizuale detectate la bilele de deo roll obținute prin sudarea a două semisfere
- Tabelul 5.5. Tipuri de defecte ale bilelor de deo roll detectabile prin testarea cu lichide penetrante
- Tabelul 5.6. Tipuri de defecte observate la metoda de control de secționare a bilelor de deo roll
- Tabelul 5.7. Principalele efecte observate la bilele de deo roll testate la compresiune
- Tabelul 5.8. Centralizator cu loturile de bile de deo roll testate la compresiune

## 18 Cercetarea metodelor alternative de realizare a bilelor de deo roll

---

- Tabelul 5.9. Valorile forțelor maxime de compresiune la care au fost supuse bilele de deo roll
- Tabelul 5.10. Centralizator sintetic cu rezultatele obținute pentru fiecare tehnologie de fabricare a bilelor de deo roll
- Tabelul 6.1. Cuantificarea tehnologiilor de sudare a bilelor de deo roll
- Tabelul 6.2. Valorile curselor acceptate în procesul tehnologic de sudare a semisferelor
- Tabelul 6.3. Valorile timpilor aferenți fazelor de mișcare pentru variantele analizate
- Tabelul 6.4. Valorile caracteristice adimensionale ale legilor de mișcare și condițiile tehnologice aferente
- Tabelul 6.5. Legile de mișcare polinomiale
- Tabelul 6.6. Legile de mișcare armonice
- Tabelul 6.7. Legile de mișcare modificate
- Tabelul 6.8. Valorile caracteristice adimensionale ale legilor de mișcare considerate
- Tabelul 6.9. Legile de mișcare aferente fiecărei faze tehnologice
- Tabelul 6.10. Valorile razelor de bază aferente fazelor de mișcare
- Tabelul 7.1. Cuantificarea finală a tehnologiilor de sudare a bilelor de deo roll

# 1. INTRODUCERE

Creșterea continuă a populației și a nivelului de trai au generat o dezvoltare spectaculoasă a producției de bunuri de consum și produse alimentare.

O evoluție rapidă a fost înregistrată în majoritatea domeniilor care utilizează materiale polimerice, întrucât acestea sunt materiale ieftine, ușoare, rezistente și implică costuri mici în raport cu alte tipuri de materiale [1, 2].

Cercetarea și dezvoltarea accelerată în domeniul petrochimiei au dus la apariția unui număr foarte mare de materiale polimerice, care sunt disponibile pentru cele mai diverse aplicații (aproximativ 100.000 de tipuri de materiale) [3].

Conform publicației T&T (Industry-Business Opportunities) „începând cu anul 1950, creșterea medie anuală a pieței globale de materiale polimerice a fost de 8,5%” [4].

Materialele polimerice pot fi utilizate într-o varietate largă de produse și aplicații industriale, dintre care cea mai mare pondere o reprezintă ambalajele. Dezvoltarea infrastructurii a stimulat domeniul auto și al construcțiilor, acestea fiind la rândul lor mari consumatoare de materiale polimerice (țevi de apă, cablaje pentru electricitate, accesorii pentru locuințe, sisteme de încălzire, aparatură electrică și electronică) [1, 2, 4 ,5].

Potrivit publicației Plastics Europe [5], în anul 2020, industria ambalajelor a generat cel mai mare consum de materiale polimerice cu 39,6% din total, urmată de construcții cu 20,4% și industria auto cu 9,6%. Pe următoarele locuri se situează electrotehnica și electronica cu 6,2%, bunurile de larg consum, cele de uz casnic și articolele sportive cu 4,1%, sectorul agroalimentar cu 3,4%, urmate de industria mobilei, a bunurilor industriale, sectorul medical și producția de electrocasnice cu un total de 16,7% (Figura 1.1).

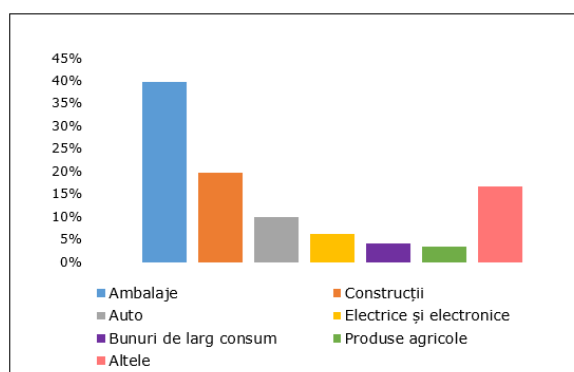


Figura 1.1. Ponderea sectoarelor consumatoare de materiale polimerice.

Utilizarea pe scară largă a produselor din materiale polimerice generează însă tot mai multe probleme de mediu. Poluarea mărilor și oceanelor cu deșeurile din materiale polimerice reprezintă un subiect aflat în atenția mass-mediei și în discursul public. Efectele negative produse de poluare trebuie contracarate prin schimbarea comportamentelor și obiceiurilor de consum în societate.

Până la urmă, nu materialele polimerice reprezintă cea mai mare problemă a poluării globale, ci comportamentul uman responsabil cu utilizarea, colectarea și dispunerea deșeurilor generate de consumul produselor achiziționate de pe piață [6].

Parlamentul European a emis Directiva 2019/904, obligatorie a fi pusă în aplicare în toate țările Uniunii Europene [7]. Directiva reglementează conceptul de economie circulară și acordă prioritate produselor reciclabile, reutilizabile, durabile și netoxice. Directiva recomandă introducerea sistemelor de reutilizare și reducere a cantităților de deșeurile generate. Principalele reglementări care se referă la produsele din materiale polimerice sunt redate mai jos :

- „În întreaga lume, materialele polimerice reprezintă 85 % din deșeurile marine. Aceste materiale ajung în corpul viețuitoarelor marine și pe mesele oamenilor, iar efectele micropolimerilor din aer, apă și alimente asupra sănătății publice sunt încă necunoscute. Devine indispensabil să se găsească soluții pentru problematica materialelor polimerice, iar acestea pot aduce noi oportunități de inovare, de creștere a competitivității și de creare de noi locuri de muncă” [8];
- „Ambalajele din materiale polimerice sunt printre articolele de unică folosință care se găsesc cel mai mult pe plajele din Uniunea Europeană. Prin urmare, aceste produse de unică utilizare ar trebui să fie autorizate pentru a fi introduse pe piață numai dacă îndeplinesc cerințele specifice de proiectare care reduc semnificativ impactul asupra mediului înconjurător” [7];
- „Până în anul 2025, statele membre vor avea obligația de a colecta 90 % din recipientii din materiale polimerice de unică folosință provenite de la băuturi, una dintre soluții fiind utilizarea sistemelor de returnare a garanției” [7].

Prin implementarea de soluții sustenabile, întreprinderile își pot crea un avantaj tehnologic asupra competitorilor pe piața mondială.

Pandemia de Covid'19 a produs modificări semnificative în ceea ce privește obiceiurile de consum ale populației. A crescut cererea de produse din categoria dezinfectanților, echipamentelor de protecție, a pungilor și foliilor protectoare, iar sistemului „e-commerce” a înregistrat o dezvoltare exponențială. Toate aceste categorii sunt strâns legate de utilizarea materialelor polimerice.



## 2. CONSIDERAȚII TEORETICE PRIVIND MATERIALELE POLIMERICE ȘI TEHNOLOGIILE DE PROCESARE

### 2.1 Considerații teoretice privind materialele polimerice

Monomerii sunt grupări chimice alcătuite din atomi de: C, H, O, N, Cl, F etc. și pot fi obținuți din resurse naturale (lemn, reziduuri agricole, amidon) sau din resurse fosile (petrol, gaz natural, cărbune) [1, 2, 8].

Polimerii sunt compuși macromoleculari, obținuți din monomeri, prin reacții de polimerizare. Gradul de polimerizare „n” reprezintă numărul moleculelor de monomer care se unesc pentru a forma o macromoleculă [1, 2, 8].

Spre exemplu, polipropilena este obținută în urma reacției de polimerizare a propilenei (Figura 2.1).

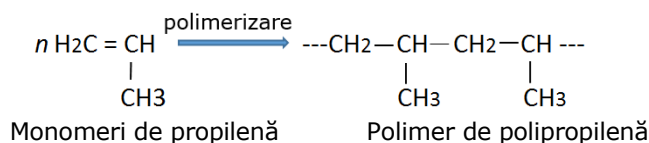
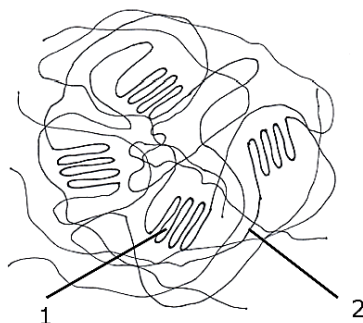


Figura 2.1. Schema reacției de polimerizare a polipropilenei.

În funcție de structură, polimerii se clasifică în [1, 2]:

- polimeri semicristalini care au o structură bifazică, sunt constituiți din zone cristaline (cu macromolecule bine ordonate) și zone amorfe (cu macromolecule dispuse aleator) care alternează (Figura 2.2);
- polimeri „cristalini” care sunt de fapt polimeri semicristalini, cu grad de cristalinitate mai mare de 90%;
- polimeri amorfi.



1-zonă orientată (cristalină) ; 2-zonă neorientată (amorfă).

Figura 2.2. Structura semicristalină a macromoleculelor de polimer [2].

22 Considerații teoretice privind materialele polimerice - 2

Semicristalinitatea este o proprietate de dorit pentru majoritatea materialelor polimerice deoarece combină rezistența polimerilor cristalini cu flexibilitatea celor amorfi.

Gradul de cristalinitate se determină conform relației 2.1.

$$\text{Gradul de cristalinitate} = \frac{\text{volum total cristalinitate}}{\text{volum total}} \cdot 100 (\%) \quad (2.1)$$

Valorile gradului de cristalinitate pentru diferite materiale polimerice sunt prezentate în Tabelul 2.1 [1, 2].

Tabelul 2.1. Gradul de cristalinitate pentru diferite materiale polimerice.

Material termoplasic	Simbol	Grad de cristalinitate (%)
Polipropilenă	PP	60
Tereftalat de polietilenă	PET	50
Polietilenă de joasă densitate	PEJD	65
Polietilenă de înaltă densitate	PEID	80
Politetrafluoretilenă	PTFE	95

În funcție de forma geometrică a lanțului macromolecular, polimerii se clasifică în:

- polimeri liniari - sunt formați din lanțuri lungi, liniare;
- polimeri ramificați - sunt formați din lanțuri liniare, lanțul molecular principal este ramificat;
- polimeri reticulați (tridimensionali) – sunt formați din lanțuri lungi, liniare sau ramificate, legate între ele prin legături covalente și care alcătuiesc o rețea spațială.

În Figura 2.3 se prezintă formele geometrice ale lanțurilor macromoleculare [1, 2].




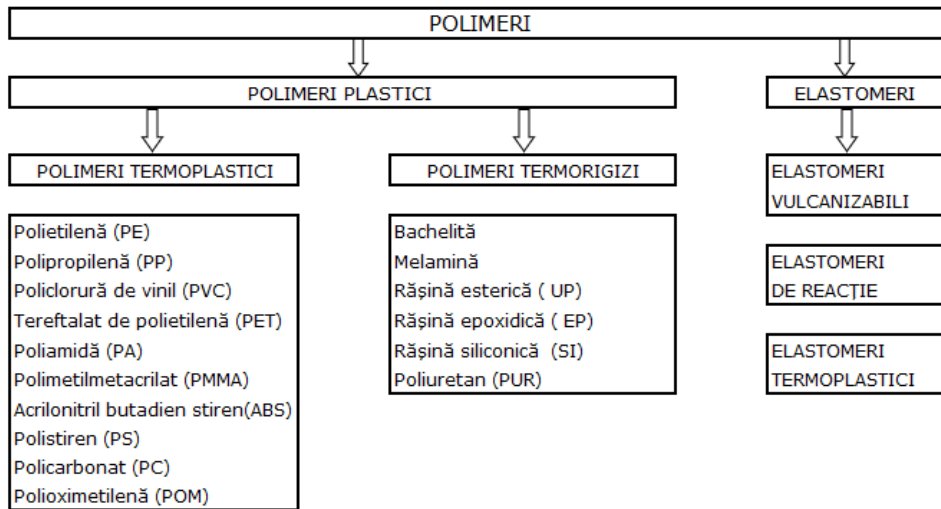
POLIMERI LINIARI	POLIMERI RAMIFICAȚI	POLIMERI RETICULAȚI
		
POLIMERI TERMOPLASTICI		POLIMERI TERMORIGIZI, ELASTOMERI

Figura 2.3. Formele geometrice ale lanțurilor macromoleculare.

În funcție de proprietățile termice și mecanice, polimerii se împart în două categorii: polimeri plastici și elastomeri (Tabelul 2.2) [1, 2, 8].

Tabelul 2.2. Clasificarea polimerilor în funcție de proprietățile termice și mecanice.



Polimerii plastici, la temperatura mediului ambiant, sunt materiale dure, cu o plasticitate redusă. La temperaturi ridicate devin lichide vâscoelastice și pot fi prelucrați ușor. În funcție de comportamentul la încălzire, polimerii plastici se clasifică în:

- Polimeri termoplastici care prin încălzire își măresc reversibil plasticitatea. Polimerii termoplastici pot fi modelați de mai multe ori, prin numeroase topiri sau înmuieri ulterioare, fără a suferi transformări chimice. Această calitate face ca polimerii termoplastici să fie reciclabili.

În Figura 2.4 este reprezentat schematic comportamentul la încălzire al polimerilor termoplastici [1, 2, 8].

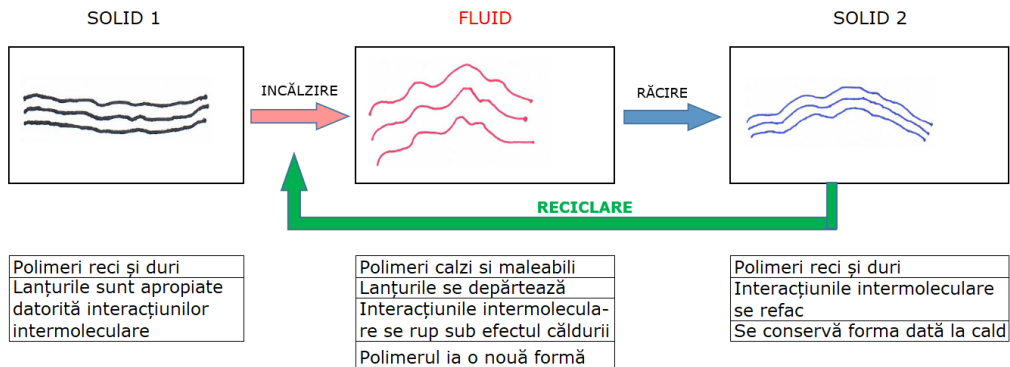


Figura 2.4. Comportamentul polimerilor termoplastici la încălzire.

## 24 Considerații teoretice privind materialele polimerice - 2

- Polimeri termorigizi care prin încălzire devin plastici și se pot prelucra. Sub efectul căldurii, moleculele suferă transformări chimice, se întăresc ireversibil și nu se mai pot prelucra ulterior. Polimerii termorigizi nu se pot recicla.

Elastomerii sunt materiale polimerice cu proprietăți elastice care se comportă asemănător cu cauciucul natural. Sub efectul unei acțiuni mecanice, aceștia se întind și își revin la forma inițială, atunci când acțiunea mecanică încetează.

Temperaturile caracteristice materialelor polimerice sunt [1, 2, 8]:

- Temperatura de vitrifiere ( $T_v$ ) - reprezintă temperatura până la care se menține starea „sticloasă” (solidă), caracterizată de deformații elastice foarte mici;
- Temperatura de curgere ( $T_c$ ) - reprezintă temperatura până la care se menține starea înalt elastică (cauciucată);
- Temperatura de topire ( $T_t$ ) - este caracteristică polimerilor cristalini și semicristalini, marcând trecerea de la starea solidă la cea lichidă. Polimerii amorfi nu au temperatură de topire;
- Temperatura de degradare termică ( $T_d$ ) - reprezintă temperatura la care începe descompunerea polimerului sub influența căldurii;
- Temperatura de fragilizare ( $T_b$ ) - reprezintă temperatura minimă până la care materialul nu este casant, în condiții de solicitare mecanică.

În Tabelul 2.3 sunt indicate câteva caracteristici ale materialelor termoplastice semicristaline [3].

Tabelul 2.3. Caracteristici ale materialelor termoplastice semicristaline (valori medii).

Material termoplasic	Simbol	Densitate (g/cm <sup>3</sup> )	$T_v$ (°C)	$T_t$ (°C)
Polipropilenă	PP	0,93	-20	160
Tereftalat de polietilenă	PET	1,28	73	246
Polietilenă de joasă densitate	PEJD	0,92	-52	108
Polietilenă de înaltă densitate	PEID	0,96	-74	131
Policlorură de vinil	PVC	1,30	-36	179

La compuşii macromoleculari se definește conceptul de stare fizică [1, 2, 8]. În funcție de temperatură, polimerii amorfi se prezintă în trei stări fizice: vitroasă, înalt elastică și vâscoelastică (Figura 2.5).

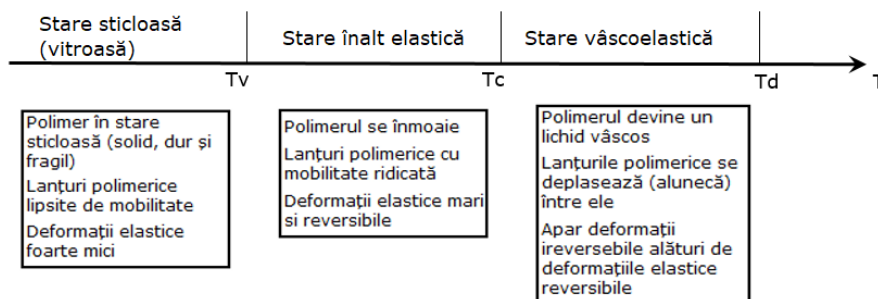


Figura 2.5. Stările fizice ale polimerilor amorfi.

Stările fizice ale polimerilor semicristalini sunt reprezentate în Figura 2.6 [1,2].

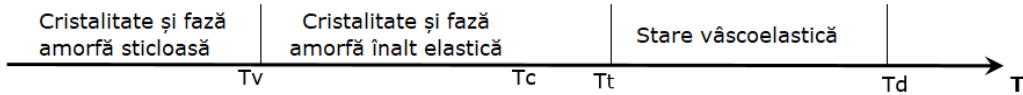


Figura 2.6. Stările fizice ale polimerilor semicristalini.

Polimerii semicristalini, la temperaturi scăzute, sunt rigizi și nu există o mișcare a lanțurilor polimerice. Prin creșterea temperaturii, peste temperatura de topire T<sub>t</sub>, energia termică este suficient de puternică pentru a declanșa mișcările lanțurilor, structura cristalină este distrusă și polimerul devine un lichid vâscos.

## 2.2 Surse de obținere a materialelor polimerice

Sursele principale de obținere a materialelor polimerice sunt hidrocarburile (combustibili fosili sau gazoși) [1, 2, 8]. În ultimii ani, aceste surse s-au diversificat, prin implementarea tehnologiilor de reciclare mecanică și chimică precum și prin dezvoltarea bio-polimerilor (Figura 2.7) [7].

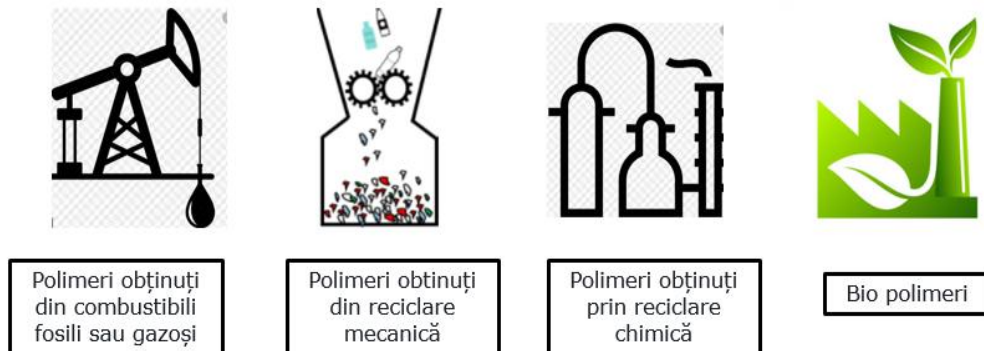


Figura 2.7. Sursele de obținere a materialelor polimerice.

### 2.2.1 Materiale polimerice obținute din hidrocarburi

Cele mai utilizate materiale polimerice obținute din hidrocarburi sunt poliolefinele. Din această categorie fac parte polietilena și polipropiliena [1].

Conform publicației „Plastics Europe”, consumul de materiale polimerice la nivel global a fost de 367 milioane de tone în anul 2020 [5]. La nivel european acest consum a fost de 56 milioane de tone (nu include producția de materiale polimerice reciclate). Distribuția consumului pe tipuri de materiale polimerice este redată în Figura 2.8 [5].

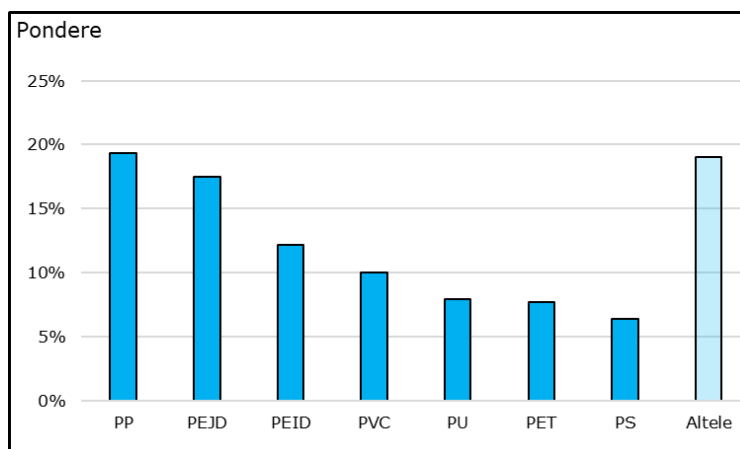


Figura 2.8. Distribuția consumului pe tipuri de materiale polimerice [5].

Conform graficului din Figura 2.8, polietilena și polipropilena sunt cele mai utilizate tipuri de materiale polimerice.

Polietilena este un polimer termoplastic, semicristalin, de culoare albă sau semitransparent, obținut prin procesul de polimerizare al etilenei [2, 8]. Structura macromoleculară este liniară cu un număr mai mic sau mai mare de ramificații.

Polietilenele, fabricate prin diverse tehnologii, se deosebesc prin valorile unor caracteristici precum: masă moleculară, densitate, grad de ramificare, proprietăți mecanice, proprietăți termice.

După modul de obținere, polietilenele se împart în: polietilene de joasă densitate (PEJD) și polietilene de înaltă densitate (PEID).

Polipropilena este un material termoplastic, semicristalin, care se obține prin polimerizarea propilenei. În funcție de structură, distingem:

- Polipropilenă izotactică la care atomii de carbon terțiar (grupa  $-CH_3$ ) sunt situați de aceeași parte a lanțului principal;
- Polipropilenă sindiotactică la care atomii de carbon terțiar sunt organizați regulat de o parte și de alta a lanțului principal;
- Polipropilenă atactică la care atomii de carbon terțiar sunt situați fără nici o regulă de o parte și de alta a lanțului principal.

Polipropilenele au diferite compoziții chimice, fiind disponibile sub formă de: homopolimeri sau copolimeri.

La homopolimerul de polipropilenă, lanțul macromolecular conține doar monomeri de propilenă și are cel mai frecvent o structură izotactică. Acest tip de polipropilenă are un nivel ridicat de rigiditate, rezistență chimică bună și un punct de topire ridicat, dar transparență mai mică și rezistență la impact redusă.

Copolimerul de polipropilenă este, în general, un copolimer propilenă/etilenă, obținut prin reacția de copolimerizare a propilenei cu cantități mici de etilenă.

Copolimerul este mai moale, are proprietăți de impact bune, punct de topire scăzut și flexibilitate sporită.

Pentru îmbunătățirea anumitor proprietăți, în masa de polipropilenă se pot introduce anumite materiale de adaos (aditivi, coloranți, agenți antistatici, agenți de nucleere) [8].

La începutul anului 2021, în baza de date MatWeb [3], erau înregistrate peste 11.000 tipuri de polipropilene, ale căror proprietăți generale sunt prezentate în Tabelul 2.4.

Tabelul 2.4. Proprietăți generale ale polipropilenelor [3].

Proprietăți	UM	Domeniu/ Limite	Valoare Medie
<b>Fizice</b>			
Densitate ( 23° C)	g/cm <sup>3</sup>	0,880- 2,40	0,929
Indice de curgere în topitură (230 °C/2,16 g)	g/10 min	20-1200	24
<b>Mecanice</b>			
Rezistență la tracțiune la curgere (23° C, v=50 mm/min)	MPa	4-369	31,6
Rezistență la compresiune la curgere (23° C, v=1,3 mm/min)	MPa	34,5-55,2	39
Alungire la curgere (23° C, v=50 mm/min)	%	2-100	10,6
Modul de elasticitate	MPa	8 - 8250	1700
Modul de elasticitate la încovoiere (23° C, v=50 mm/min)	MPa	26-6890	1410
Modul de compresiune	GPa	1,38	1,8
Rezistență la șoc Izod (23° C, crestă)	kJ/m <sup>2</sup>	1,10-62	6,09
Duritate, Rockwell HR	unități	20 - 118	94,8
Duritate, Shore HD	unități	30 - 83	68,6
Coeficient de frecare	-	0,25	0,25
<b>Termice</b>			
Punct de topire	°C	61-220	160
Punct de înmuiere VICAT (A-50 °C/h-1,80 Mpa)	°C	35-160	24
Temperatură de vitrifiere	°C	-20	-20
Temperatură de aprindere	°C	370-390	380

**Proprietăți de procesare**

Temperatură de procesare	°C	88-274	208
Temperatură la duza de injectare	°C	204-243	215
Temperatură topitură	°C	160-320	213
Temperatură matriță	°C	4 - 91	41
Presiune de injecție	MPa	2,76-103	58

Principalele proprietăți chimice ale polipropilenei sunt [1, 8]:

- rezistență bună la acizi, baze slabe și soluții de săruri anorganice;
- instabilă la acizi concentrați, baze concentrate;
- stabilitate parțială la alcoolii, cetone, eteri, esteri, ulei și grăsimi;
- nu absoarbe apa.

Din punct de vedere al proprietăților electrice, polipropilena este un foarte bun izolator, caracterizat de o rezistivitate mică.

Polipropilena se poate folosi în diferite domenii de activitate precum [1]:

- ambalaje (caserole, recipienti, pahare, capace filetate, cutii);
- articole de întreținere și înfrumusețare (cutii pentru creme, dispensere, deodoranți);
- articole de menaj (castroane, găleți);
- articole de grădină (mese, scaune, ghivece, jardiniere);
- componente auto (spoilere, bare antișoc, haioane, tablouri de bord);
- medicină (pungi cu soluții perfuzabile, seringi, pipete, implanturi, măști chirurgicale);
- industria electronică și electrotehnică (accesorii pentru aparatură electrică și electronică);
- articole sportive (clăpări, patine cu rotile, etc).

**2.2.2 Materiale polimerice provenite din reciclare**

Polipropilena este un material des întâlnit în schemele de reciclare. De cele mai multe ori deșeurile din polipropilenă se regăsesc în amestec cu deșeurile provenite din alte tipuri de materiale (PET, PEID, PEJD, etc). Din acest motiv, pot apărea probleme la procesarea ulterioară, cauzate de diferențele dintre valorile temperaturilor de topire. Acest aspect poate afecta proprietățile mecanice ale produsului finit, rezultat în urma utilizării materialului reciclat.

Două sau mai multe materiale polimerice sunt compatibile în amestec doar dacă temperaturile lor de topire au valori apropiate.

Materialele provenite din reciclare se împart în două mari categorii: materiale polimerice *post industriale* (PIR) și materiale polimerice *post consumator* (PCR) [9, 10, 11].



Materialele polimerice *post industriale* sunt materiale polimerice netransformate, provenite din colectarea deșeurilor care intră în lanțul de reciclare înainte de a ajunge la utilizatorul final.

Din orice proces de producție rezultă un procent de deșeu. În aplicațiile industriale, reutilizarea deșeurilor are loc prin recuperarea acestora imediat de la sursa care le generează (in-house). Acest model de reciclare oferă avantajele unei trasabilități facile și costuri reduse de colectare.

Cel mai frecvent procedeu de reciclare este reciclarea mecanică (prin măcinarea cu mori mecanice). În Figura 2.9 este redată o schemă de reciclare și reutilizare a deșeurilor din materiale polimerice.

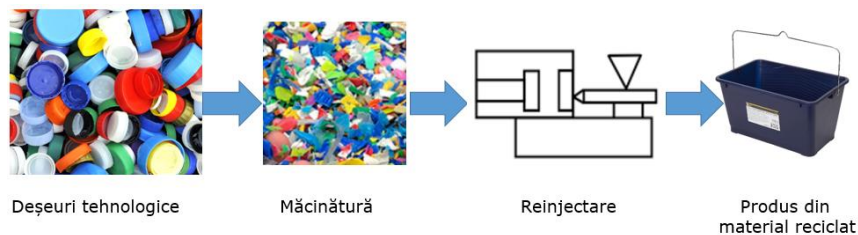


Figura 2.9. Schema de reciclare și reutilizare a deșeurilor din materiale polimerice.

Materialul reciclat se poate reutiliza în produse similare sau în produse cu performanțe inferioare. Acest procedeu de reciclare este cunoscut și sub denumirea de reciclare prin „declasare” de produs (recycling by downgrading). Mai jos sunt prezentate câteva exemple de deșeuri care se pot recupera la sursă:

- deșeuri care provin din start de lot nou sau reporniri de utilaje;
- deșeuri care provin din schimbări de culoare sau de material;
- deșeuri rezultate din măsurări distructive sau nedistructive de calitate;
- produse neconforme care nu îndeplinesc cerințele de calitate;
- produse neconforme returnate de către clienți.

Materialele polimerice *post consumator* se obțin prin reciclare chimică. În Figura 2.10 este redată schema de obținere și utilizare a materialului de tip PCR prin reciclare chimică.

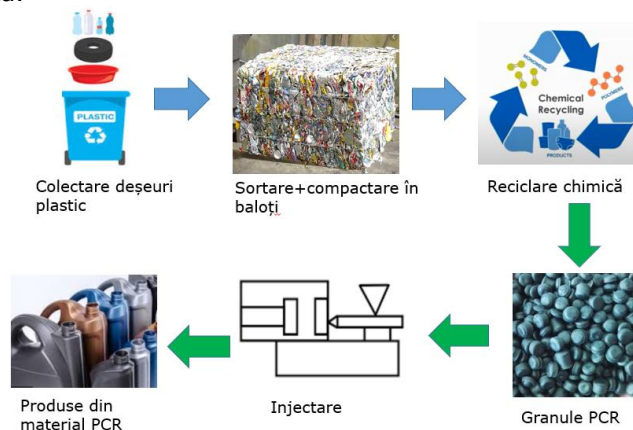


Figura 2.10. Schema de obținere și utilizare a materialelor de tip PCR prin reciclare chimică.

Materialele polimerice post consum PCR sunt materiale provenite din produse care și-au îndeplinit și epuizat rolul pentru care au fost puse pe piață (recipienți din PET, ambalaje pentru produse alimentare, etc).

Schema de obținere a materialului de tip PCR este mult mai complexă decât cea de obținere a materialului de tip PIR, iar prețul materialelor de tip PCR este mai mare decât prețul materialului virgin. Cu toate acestea, în prezent, materialul de tip PCR reprezintă una dintre puținele variante disponibile pentru reciclarea deșeurilor post consum. Se recomandă utilizarea acestor materiale în combinație cu materialele virgine în proporție de 10-50%.

Se preconizează că până în anul 2050 aproximativ 50% din producția de materiale polimerice să provină din reciclare [7].

### 2.3 Aplicații ale materialelor polimerice în industria produselor cosmetice

Materialele polimerice sunt utilizate pe scară largă la fabricarea ambalajelor pentru industria produselor cosmetice. În ultima perioadă, au fost dezvoltate tehnologii moderne de fabricație și au apărut rețete noi de materiale polimerice. Materialele polimerice noi-apărute substituie cu succes materiale precum: sticla, metalul sau lemnul (Figura 2.11).



Figura 2.11. Recipienți din materiale polimerice care imită sticla.

La nivel global, se înregistrează o creștere permanentă a consumului de produse cosmetice precum: creme, deodoranți și antiperspirante (Figura 2.12).



Figura 2.12. Exemple de deodoranți de tip deo roll, deo spray și deo stick.

Publicația „Statista” prezintă o sinteză a pieței globale a deodoranților începând cu anul 2012, precum și previziunile până în anul 2025 (Figura 2.13).

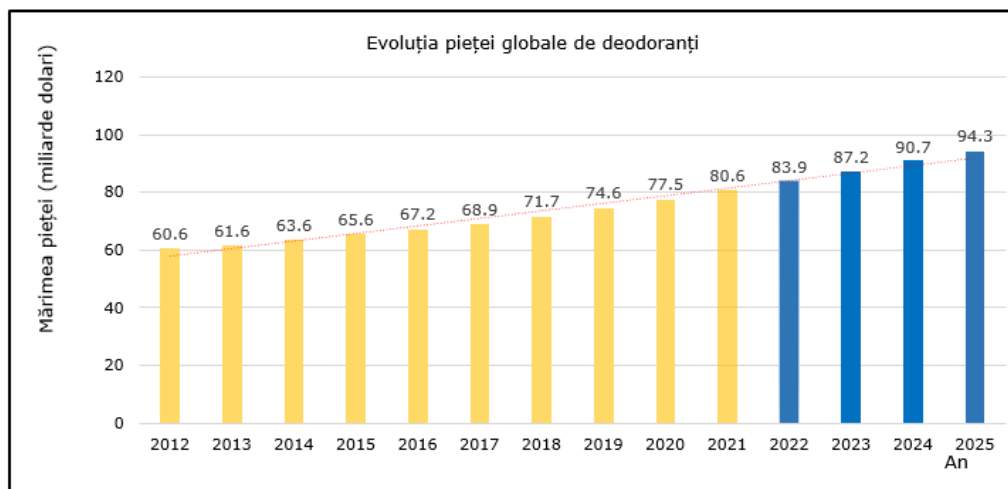


Figura 2.13. Evoluția pieței globale de deodoranți [12].

Conform publicației, ritmul mediu anual de creștere al acestei piețe este de 3,5-4% [12]. Se estimează ca în anul 2025 piața globală a deodoranților să atingă cifra de 94,3 miliarde de dolari americani [12].

În Figura 2.14 sunt prezentate exemple de produse de tip deo roll întâlnite frecvent pe rafturile magazinelor de profil.



Figura 2.14. Deodoranți de tip deo roll.

Reperetele care alcătuiesc aceste produse pot fi realizate din materiale polimerice precum: polipropilenă (PP), polietilenă de înaltă densitate (PEID), polietilenă de joasă densitate (PEJD), tereftalat de polietilenă (PET).

## 2.4 Aplicații ale reperelor de formă sferică fabricate din materiale polimerice

Reperele de formă sferică (pline sau cu pereți subțiri) din materiale polimerice sunt întâlnite într-o gamă largă de aplicații cum ar fi:

- a) mecanisme de dozare și transfer a substanțelor odorizante lichide către corpul uman (deo roll) [13, 14, 15, 16];
- b) componente pentru jucării;
- c) componente ale produselor medicale și farmaceutice (proteze, implanturi)[17,18];
- d) articole sportive și de agrement [19];
- e) perdele de protecție solară (obiecte sferice pentru diminuarea evaporării apei din lacuri) [20];
- f) plutitoare de nivel pentru rezervoare, supape, indicatoare de nivel [21];
- g) articole decorative de uz casnic;
- h) bile de precizie pentru rulmenți cu sarcină redusă;
- k) componente pentru industria auto.

În Figura 2.15 sunt prezentate câteva exemple de aplicații ale obiectelor din materiale polimerice de formă sferică.



a-dozare și transfer (deo roll)

b-jucării

c-implanturi medicale \*

\*sursa: Scientific American magazine- right to use KMM130451523V28755L0KM [17]

Figura 2.15. Exemple de aplicații ale obiectelor din materiale polimerice de formă sferică.

## 2.5 Aspecte de sustenabilitate și economie circulară

Conceptele de „sustenabilitate” și „economie circulară” sunt strâns legate de reciclarea materialelor provenite din diverse surse (ambalaje, deșeuri tehnologice, deșeuri comunale, etc) și ocupă agenda principalilor actori angrenați în lanțurile economice mondiale.

Reciclarea unei simple sticle de 0,5 l din material plastic, poate duce la o economie de energie necesară funcționării unei lămpi de iluminat timp de nouă ore.

„Foaia de parcurs” pentru o economie circulară conține borne de verificare (Figura 2.16).

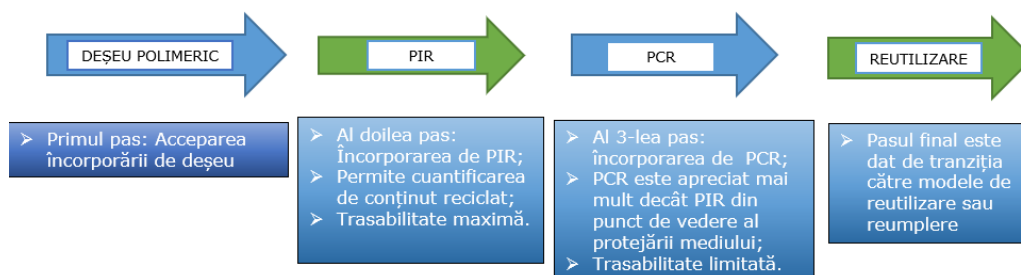


Figura 2.16. Etapele de tranziție spre economia circulară.

La nivel global, metodele principale de eliminare a deșeurilor sunt depozitarea în deponee și incinerarea ( Figura 2.17) [6].

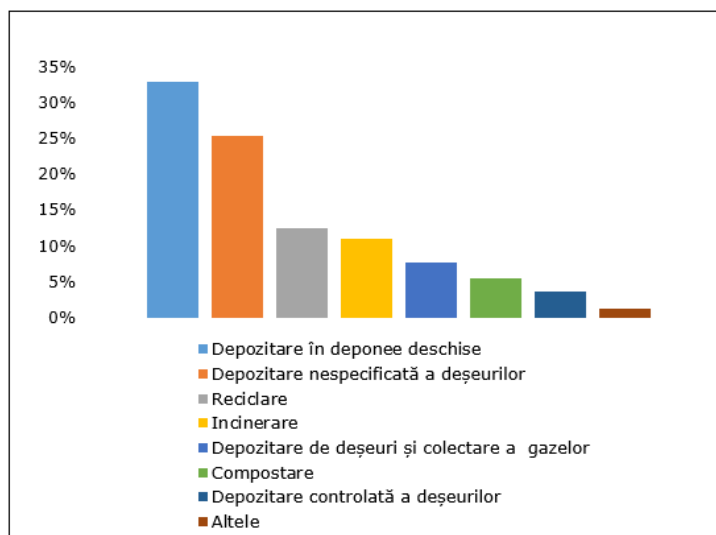


Figura 2.17. Tratarea și eliminarea deșeurilor la nivel global [6].

Din Figura 2.17, se observă faptul că ponderea reciclării la nivel global este încă foarte mică.

Prin decizia Comisiei Europene nr.97/129/EC [22] și a standardului ASTM D7611/ D7611M - 20, fiecărui tip uzual de material polimeric îi corespunde un simbol și un număr de identificare în materie de reciclabilitate [23].

Simbolul de reciclabilitate pentru polipropilenă este prezentat în Figura 2.18.



Figura 2.18. Simbolizarea reciclabilității pentru polipropilenă [23].

Pe piață există materiale reciclabile la scară largă, dar și materiale cu limitări semnificative de reciclare (amestecuri de materiale de tipuri diferite). Colectarea lor selectivă și sortarea pe tipuri de materiale este foarte importantă (Figura 2.19).

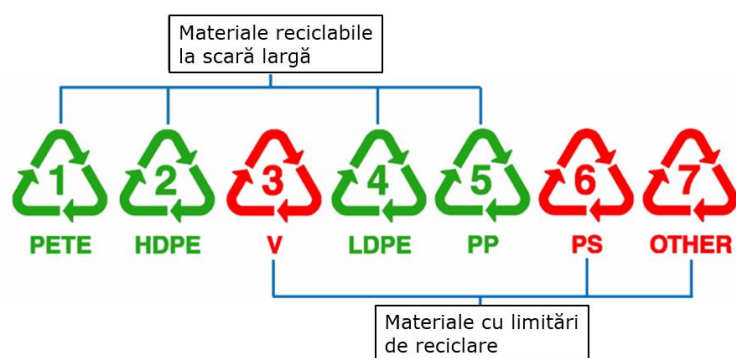


Figura 2.19. Reciclabilitatea principalelor categorii de materiale polimerice [23].

Cele mai frecvente categorii de materiale polimerice regăsite în deșeurile menajere și industriale sunt polipropilena (PP), tereftalatul de polietilenă (PET) și polietilena (HDPE și LDPE).

În contextul noilor reglementări, reciclarea inteligentă va deveni o provocare majoră pentru sectoarele de prelucrare a materialelor polimerice. Reciclarea inteligentă presupune noi abordări încă din faza de proiectare, precum și introducerea etichetei digitale de reciclare [24, 25, 26, 27, 28].

În faza de proiectare a reperelor din materiale polimerice, trebuie să se țină cont de următoarele aspecte:

- materialele din care sunt fabricate reperele să fie reciclabile pe scară largă (PET, PE, PP);
- componentele produsului să conțină materiale compatibile la reciclare;
- componentele produsului, după utilizare, să fie sortabile cu instalații de sortare automată;
- dezvoltarea și integrarea unor soluții de reutilizare sau de reumplere;
- posibilitatea utilizării de biomateriale;
- optimizarea cantității de material utilizat.

### 2.5.1 Aspecte de reciclabilitate în proiectarea produselor de tip deo roll

În cazul ambalajelor pentru deodoranți de tip deo roll pot exista mai multe combinații de materiale din care sunt alcătuite părțile componente. Aceste materiale nu sunt întotdeauna compatibile la reciclare mecanică [24, 25, 26].

O combinație des întâlnită este cea în care recipientul este injectat din material PET, iar bila, răzuitorul și capacul, sunt fabricate din polipropilenă (Figura 2.20). Aceasta combinație prezintă o compatibilitate bună la reciclare.

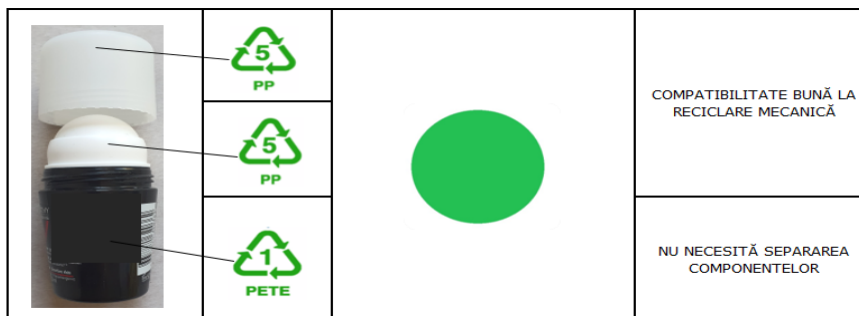


Figura 2.20. Ambalaj pentru deodorant alcătuit din materiale care prezintă compatibilitate bună la reciclare mecanică.

Toate reperele sunt realizate din materiale polimerice care pot fi ușor procesate prin reciclare mecanică. Amestecul provenit din măcinarea acestor componente oferă posibilități bune de reciclare.

O altă combinație des întâlnită este cea în care recipientul este din polietilenă, iar bila, răzuitorul și capacul sunt din polipropilenă (Figura 2.21). Compatibilitatea la reciclare în acest caz este limitată.

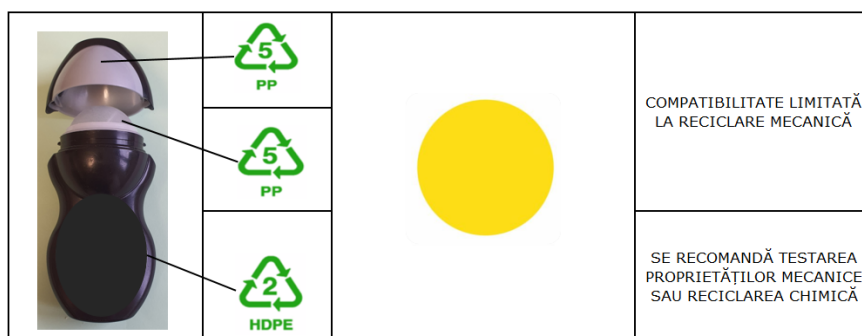


Figura 2.21. Ambalaj pentru deodorant alcătuit din materiale care prezintă compatibilitate limitată la reciclare mecanică.

Limitarea este dată de faptul că amestecul de măcinături, obținut după reciclarea mecanică, poate prezenta dificultăți de procesare întrucât polietilena și polipropilena au temperaturi de topire diferite [3]. Acest aspect poate duce la diminuarea performanțelor mecanice ale produsului final obținut din material reciclat [24, 25]. Utilizarea amestecului de măcinături (PIR) în produse similare necesită o testare prealabilă a proprietăților mecanice. Această schemă de reciclare se recomandă la fabricarea de reperi ale căror specificații nu necesită performanțe mecanice înalte (reciclare prin declasare). Deasemenea, este recomandată și reciclarea chimică, în urma căreia se obțin rășinile de tip PCR.

Combi-nația în care recipientul este din sticlă, iar bila, răzuitorul și capacul sunt din polipropilenă conduc la dificultăți de reciclare mecanică (Figura 2.22).

În situația prezentată în Figura 2.22, este necesară o separare a componentelor din polipropilenă de cele din sticlă. Ulterior, atât polipropilena cât și sticla pot fi direcționate către scheme de reciclare mecanică separate.

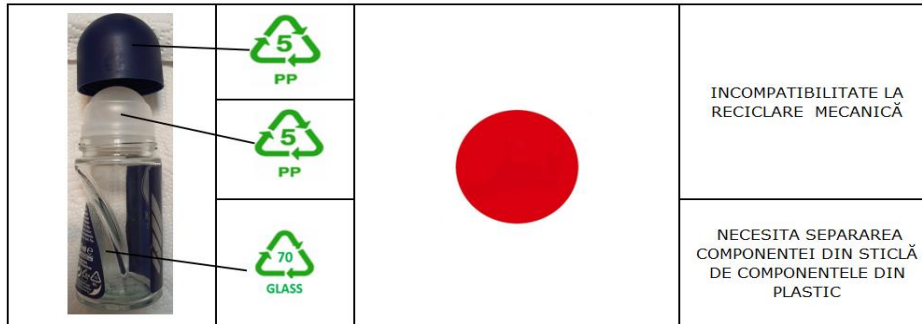


Figura 2.22. Ambalaj pentru deodorant alcătuit din materiale care prezintă incompatibilități la reciclare mecanică.

Combinatia ideală este cea în care toate componentele sunt confecționate din același material (Figura 2.23).

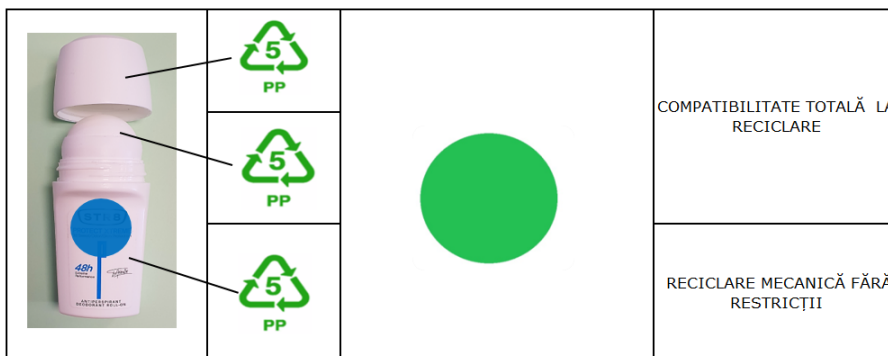


Figura 2.23. Ambalaj pentru deodorant alcătuit din materiale care prezintă compatibilitate totală la reciclare mecanică.

În situația prezentată în Figura 2.23 nu există restricții de reciclare a amestecurilor provenite din măcinarea reperelor care compun ambalajul. Toate reperatele sunt confecționate din același material, au aceeași culoare și se pot reutiliza în orice schemă de reciclare (mecanică, chimică). Reciclarea în buclă închisă („in house”) este deosebit de avantajoasă și permite reintroducerea imediată a deșeurii măcinată în procesul de fabricație.

În prezent, sunt în curs de implementare tehnologii avansate de sortare a deșeurilor, mai eficiente și de capacitate mult mai mare [26, 27].

În acest sens, se derulează proiectul „Holy Grail” care are ca scop implementarea unor soluții armonizate de detectare și sortare automatizată a deșeurilor din materiale polimerice [28]. Proiectul utilizează conceptul de tip „digital



watermark” (filigran digital) și presupune amprentarea materialului ambalajului cu un cod digital (cod QR).

În Figura 2.24, este prezentat un exemplu de ambalaj în care se amprentează imagini multiple de cod digital de tip QR, încă din faza de injectare-suflare.

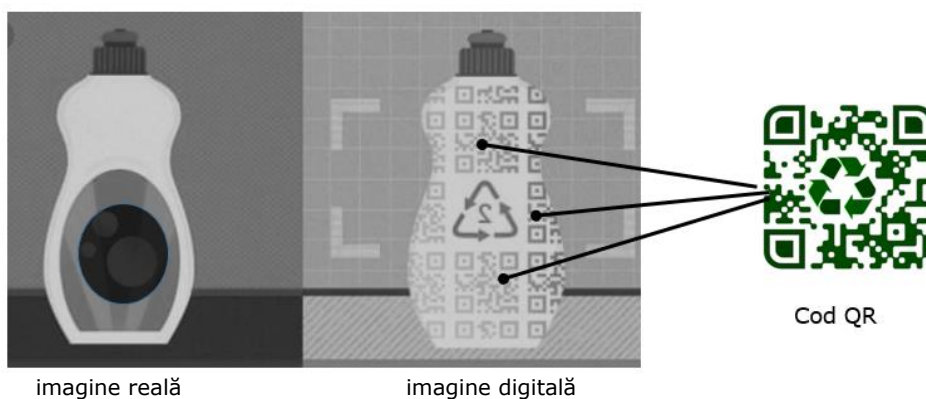


Figura 2.24. Modul de amprentare a ambalajelor prin coduri digitale în vederea sortării automatizate a deșeurilor [28].

Imaginile digitale, amprentate în pereții ambalajului, nu pot fi observate cu ochiul liber, dar pot fi detectate de camerele de sortare, chiar dacă ambalajul este deformat sau deteriorat.

Reutilizarea ambalajelor reprezintă un pilon important în implementarea conceptului de economie circulară. Conform studiului publicat de fundația Ellen MacArthur, ponderea ambalajelor reutilizabile este încă extrem de redusă (Figura 2.25). În continuare, se utilizează masiv ambalaje de unică folosință care, invariabil, se vor transforma în deșeuri. Aceasta este o mare problemă a societății contemporane și necesită un efort sporit în vederea schimbării obiceiurilor consumatorilor [9].

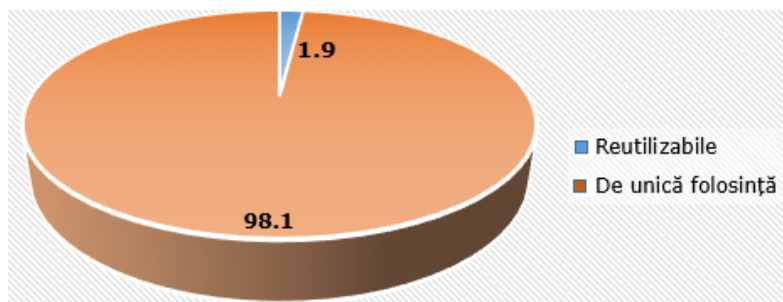


Figura 2.25. Gradul de reutilizare a ambalajelor din materiale polimerice [9].

Pentru creșterea gradului de reutilizare, în prezent sunt promovate următoarele soluții:

- refill at home: reumplere acasă (rezerve de săpun lichid, odorizanți, etc);
- refill on the go: reumplere pe traseu (ex: în magazine, direct la producători, etc);

- return from home: returnare de acasă (ambalaje preluate de reciclatori, ambalaje aduse la schimb, etc);
- B2B: business to business, direct între agenții economici (ex: containere returnabile, paleți returnabili, ambalaje reutilizabile, etc);
- return on the go: returnare în puncte de colectare automată situate în fața magazinelor sau pe stradă, cu sau fără compensații financiare.

## 2.6 Tehnologii principale de procesare a materialelor polimerice

Materialele termoplastice sunt formate din macromolecule liniare capabile să devină mobile între ele prin creșterea temperaturii [1, 2, 8].

Procesarea polimerilor este dependentă de starea lor fizică. Aceasta face ca un anumit procedeu de prelucrare să poată fi aplicat numai într-un anumit interval de temperatură [1, 2, 8, 29].

Sub temperatura de vitrifiere ( $T < T_v$ ), polimerul se află în stare solidă, sticloasă și poate suferi doar deformații reversibile foarte mici. Polimerul se poate prelucra numai prin procedee mecanice. Peste temperatura de vitrifiere ( $T > T_v$ ), polimerul se află în stare înalt elastică, în care mobilitatea elementelor structurale este situată între starea sticloasă și cea fluidă. În această stare, deformația elastică crește apreciabil, iar procedeele de prelucrare sunt cele de formare la cald. La depășirea temperaturii de curgere ( $T_c$ ), polimerul trece în stare fluidă, când alături de deformațiile elastice apar deformații ireversibile datorită curgerii și ca urmare a mișcării termice moleculare. Procedeele de prelucrare sunt matrițarea prin injectare și extrudarea.

Principalele procedee de prelucrare a materialelor polimerice sunt [1, 2, 8]:

- matrițarea prin injectare – aplicabilă la formarea pieselor masive sau cave cu pereți subțiri, printr-un proces care presupune solidificarea materialului într-o cavitate închisă. Procesul de prelucrare este unul discontinuu;
- matrițarea prin compresie – procedeu asociat formării pieselor din materiale polimerice cu pereți subțiri în matrițe cu elemente active rigide;
- extrudarea – aplicabilă pentru obținerea pieselor de tip profil, tub, peliculă prin curgerea dirijată a materialului în spații tehnologice special create. Procesul este continuu, de înaltă productivitate;
- calandrarea – procedeu de formare continuă a peliculelor plăcilor de material termoplastic prin trecere progresivă printre rolele de deformare;
- asamblarea – grupează o serie de operații care utilizează încălzirea, presarea și lipirea pentru a realiza îmbinări demontabile sau nedemontabile [29].

Aceste procedee de prelucrare nu pot fi aplicate universal la prelucrarea tuturor grupelor de materiale polimerice, deci nu toate materialele pot fi procesate în același fel și prin aceleași metode.

În Tabelul 2.5 sunt prezentate tehnologiile de procesare pentru diferite materiale polimerice [1,2].

Tabelul 2.5. Tehnologii de procesare a materialelor polimerice.

Procedeu Material	Injectare	Matritare prin compresie	Extrudare- suflare	Injectare - suflare	Formare rotativă
ABS	+	+	+	-	+
PA	+	-	+	-	+
PC	+	+	+	+	-
PEID	+	+	+	+	+
PMMA	+	+	+	-	-
PP	+	+	+	+	-
PS	+	+	+	+	+
PVC	+	+	+	+	+
SAN	+	-	+	+	-

(+) – se poate prelucra; (-) – nu se poate prelucra

### 2.6.1 Tehnologia de matritare prin injectare

Injectarea reprezintă procedeul de punere în formă al materialelor polimerice [1, 2, 8, 29]. Procedeul presupune transferarea topiturii de material din cilindrul de plastifiere al unei mașini de injecție în cavitățile închise (cuiburi) ale unei matrițe de injecție. Prin răcire liberă sau forțată, topitura trece în stare solidă, iar forma geometrică a reperului final reprezintă copia (negativul) cavității /cuibului (Figura 2.26).

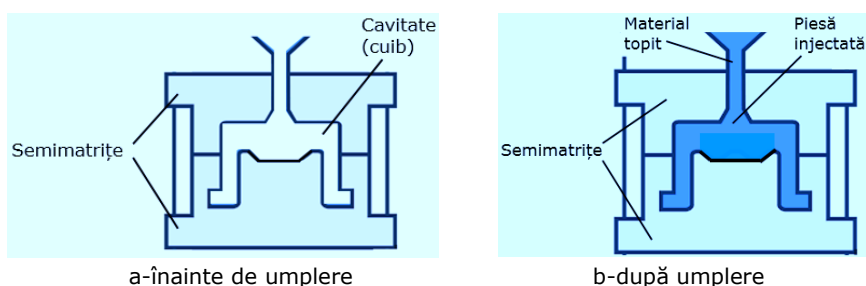


Figura 2.26. Procedeul de punere în formă (cuib) a topiturii și de obținere a piesei.

Așa cum se observă în Figura 2.26-a, matrița este alcătuită din două semimatrițe (fixă și mobilă) în care este executată cavitatea (cuibul). Prin injectarea materialului topit, acesta va ocupa volumul alveolar al cuibului și astfel se obține piesa injectată (Figura 2.26-b).

O linie de injecție este alcătuită din următoarele componente (Figura 2.27):

- unitatea de injecție (cilindru de plastifiere, piston de injecție, duză de injecție);
- unitatea de închidere (piston și cilindru de închidere, platan mobil);
- șasiul/structura mecanică (batiu, coloane, platan fix);
- unitatea de acționare (pompă hidraulică, motor electric);
- matrița de injecție;
- sistemul de alimentare cu material (pâlnie, dozator aditivi, etc);
- echipamentele auxiliare (răcitoare, conveioare, etc).

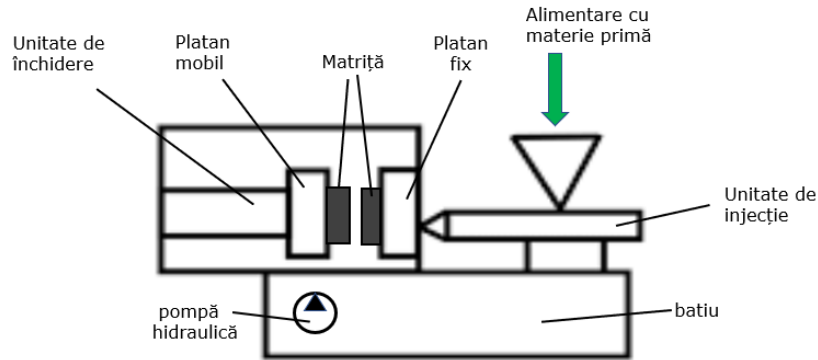


Figura 2.27. Părțile componente ale mașinii de injecție.

Procesul de injecție este unul ciclic, fiecare ciclu este compus din:

- alimentarea și plastifierea materialului în cilindrul mașinii de injecție;
- injectarea sub presiune a materialului topit în matriță;
- răcirea și solidificarea materialului în matrița răcită;
- deschiderea matriței;
- evacuarea piesei;
- închiderea matriței.

## 2.6.2 Tehnologia de matrițare prin compresie

Matrițarea prin compresie este un procedeu tot mai des utilizat datorită productivității ridicate, costurilor scăzute și controlului mult mai bun al procesului de fabricație [1, 2, 8]. Tehnologia de matrițare prin compresie constă în umplerea cavităților prin inserția materialului plastifiat sub formă de peleți. Sub acțiunea unei forțe de compresie exercitată de semimatrița superioară (poanson) asupra materialului plastifiat din semimatrița inferioară (cavitate), acesta va lua forma cavității. După răcirea piesei în cavitate are loc faza finală de evacuare a piesei de pe poanson. Pentru obținerea unei productivități ridicate, acest procedeu poate fi realizat pe o presă rotativă (Figura 2.28), cu mai multe posturi de lucru (24, 32, 64 sau 96).

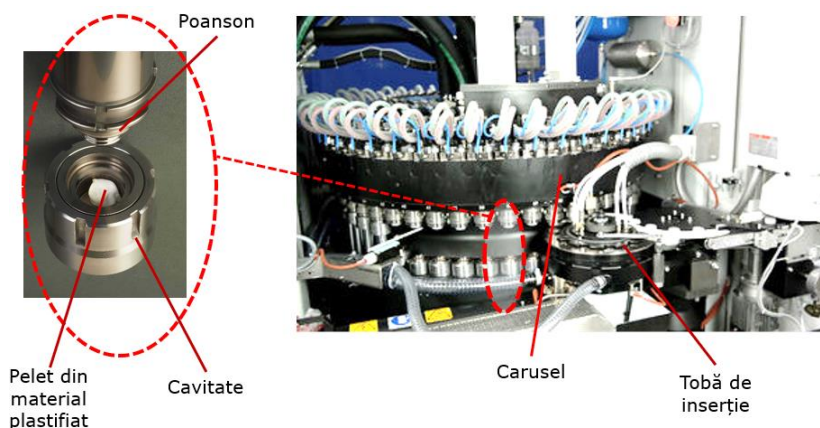


Figura 2.28. Echipament de matrițare prin compresie cu 24 de posturi.

Etapele procesului de matrițare prin compresie au o desfășurare ciclică și sunt redate în Figura 2.29:

1. Inserția materialului sub forma de pelet (E) în cavitatea (D). Inserția este realizată de toba de inserție (C), dozarea greutateii peletului fiind foarte precisă;
2. Retragera tobei de inserție și apropierea poansonului (A);
3. Aplicarea forței de compresie asupra materialului plastifiat (E) până când acesta ia forma piesei finite (F). În această etapă are loc și răcirea piesei;
4. Retragera poansonului și evacuarea piesei finite de pe poanson. Reluarea ciclului prin inserția unui nou pelet din material topit.

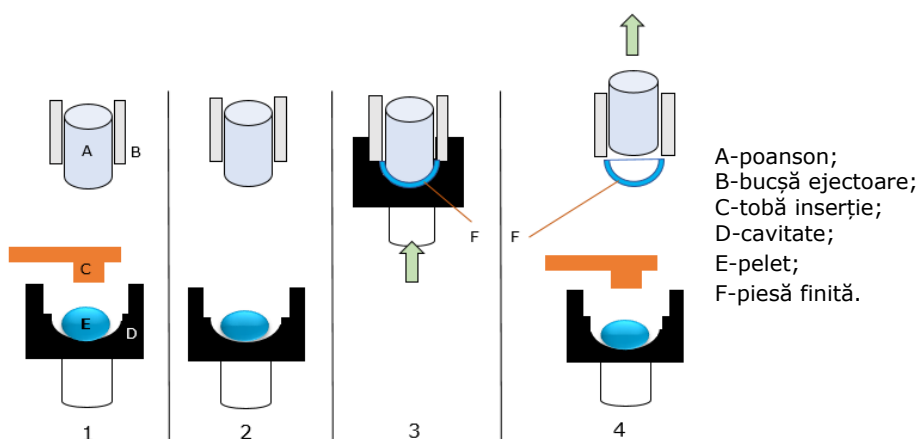


Figura 2.29. Etapele procesului de matrițare prin compresie.

Această tehnologie este utilizată pentru obținerea unor piese de mare precizie, de dimensiuni mici, cu pereți subțiri (capace din PP sau PEID, inserturi, repere de formă semisferică, etc). În Figura 2.30 sunt prezentate câteva exemple de piese fabricate prin tehnologia de compresie.



capace



repere de diverse forme

Figura 2.30. Exemple de repere obținute prin tehnologia de matrițare prin compresie.

### 2.6.3 Tehnologia de matrițare prin extrudare-injectare-suflare

Procedeul de extrudare-injectare-suflare este un procedeu de fabricație prin care se obțin repere din materiale polimerice goale pe dinăuntru și este des utilizat pentru fabricarea recipientelor. Există trei procedee principale de formare prin suflare: prin injectare-suflare, prin extrudare-suflare și prin suflare-matrițare [1, 2, 8, 29, 30, 31, 32, 33, 34].

Procedeul de injectare-suflare este procedeul cel mai des întâlnit în fabricarea flacoanelor de tip PET sau din PEID, destinate industriei de îmbuteliere (apă minerală, băuturi carbogazoase, lapte, bere, detergenți lichizi, lichid parbriz, soluții pentru curățare vase, etc).

Procedeul este redat în Figura 2.31 și este caracteristic unei mașini de injectare-suflare cu mai multe posturi [2].

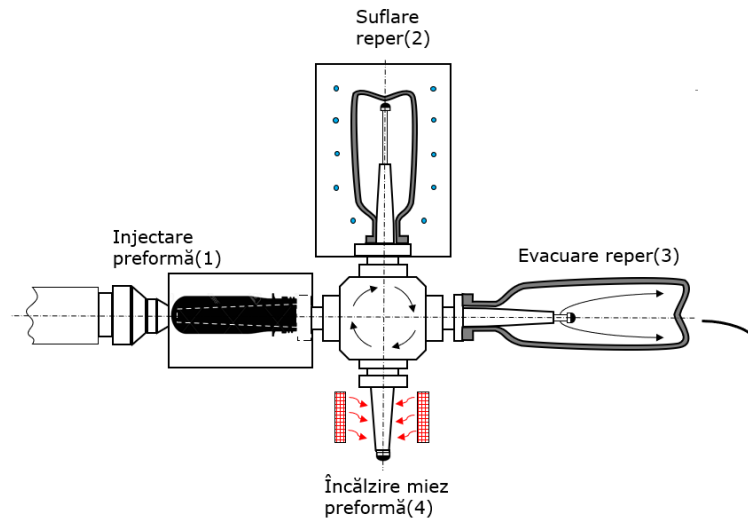


Figura 2.31. Dispunerea posturilor de lucru la o mașină clasică de injectare-suflare [2].

Cele patru etape de formare a reperului prin injectare-suflare sunt:

1. injectarea preformei;
2. suflarea în matrice;
3. evacuarea piesei (recipientului);
4. reîncălzirea miezului preformei și reluarea ciclului.

Exemple de repere obținute prin injectare-suflare sunt redată în Figura 2.32.



preforme PET



recipienti din PET

Figura 2.32. Exemple de repere obținute prin injectare-suflare.

Formarea prin extrudare-suflare se desfășoară în mai multe etape (Figura 2.33) [33, 34]. Materialul polimeric este topit și extrudat continuu sub formă tubulară (1). Tubul este ulterior captat în matriță (2). În etapa următoare, în cavitatea matriței se insuflă aer comprimat (3), până când materialul topit va lua forma matriței (4). După ce materialul s-a răcit suficient, matrița se deschide și piesa finită este debavurată și evacuată (5).

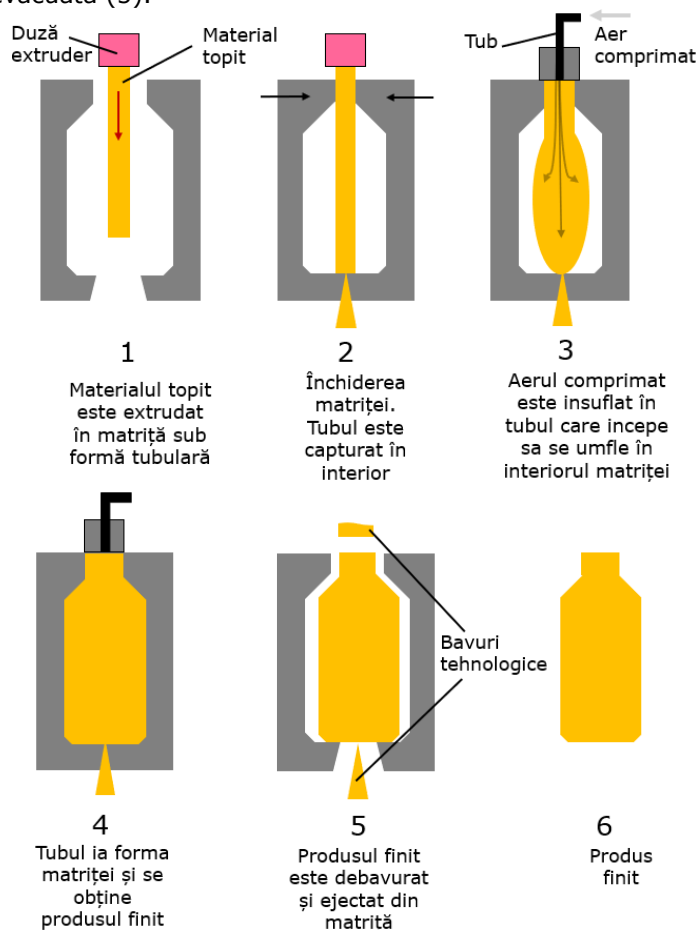


Figura 2.33. Etapele procesului de extrudare-suflare.

Exemple de produse obținute prin extrudare-suflare sunt prezentate în Figura 2.34.



recipienți



obiecte sferice și accesorii de dozare

Figura 2.34. Exemple de produse obținute prin extrudare-suflare.

### 3. PREZENTAREA TEMEI DE CERCETARE A TEZEI DE DOCTORAT

Tema de cercetare se referă la metodele alternative de fabricație a bilelor de deo roll.

Definiție: *bila de deo roll este un obiect din material polimeric de forma sferică, cu pereți subțiri, care prin mișcarea de rotație în dispozitivul de dozare, asigură transferul lichidului (deodorantului) dintr-un recipient pe corpul uman [13, 14].*

#### 3.1 Prezentarea tehnologiilor actuale de fabricație a bilelor de deo roll

Metoda clasică de obținere a bilelor de deo roll constă în fabricarea acestora prin tehnologia de extrudare-suflare-matrițare, bilele sferice obținându-se dintr-o singură bucată [15, 35].

Prin tehnologia de extrudare-suflare-matrițare, materialul polimeric topit (1) în cilindrul unității de injecție (2) este extrudat vertical descendent sub forma unui tub (3) în matrița de formare (4) aflată în poziție deschisă. La închiderea matriței, tubul din material moale, deformabil, este prins în cavitatea de formare și aerul sub presiune insuflat printr-o duză centrală (5) îl umflă până când aderă la pereții cavității (6). După ce materialul polimeric s-a răcit suficient, matrița este deschisă și bila de deo roll (7) este evacuată (Figura 3.1). În urma acestui proces rezultă un deșeu tehnologic (8).

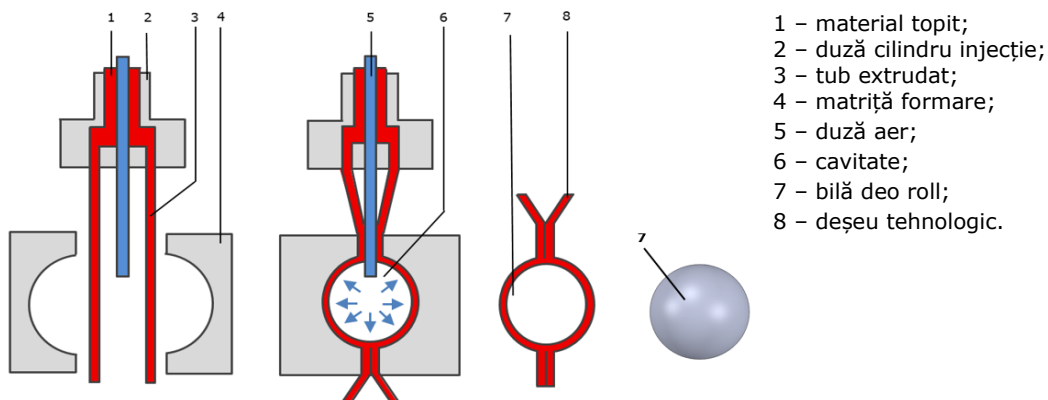


Figura 3.1. Tehnologia clasică de extrudare-suflare-matrițare a bilelor de deo roll.

Inconveniențele majore ale tehnologiei clasice sunt:

- cantitatea mare de deșeu tehnologic, care poate ajunge până la 40% din cantitatea de material procesată. Acest deșeu trebuie măcinat și reintrodus în proces, ceea ce duce la consumuri suplimentare de material și energie (Figura 3.2);
- grosimea inconstantă a pereților, ceea ce implică consumuri suplimentare de material.



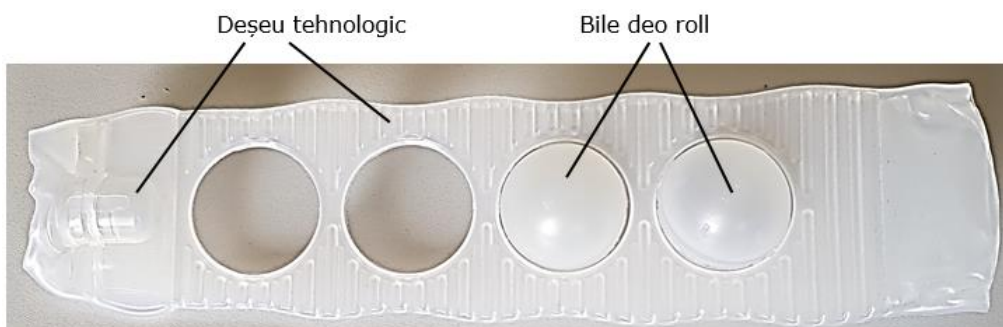


Figura 3.2. Deșeu rezultat la tehnologia clasică de extrudare-suflare-matrițare.

În ultimii ani, au fost dezvoltate și alte tehnologii de fabricație a obiectelor de formă sferică, dintr-o singură componentă, cum ar fi:

- tehnologia de fabricație prin rotomulaj [14, 36];
- tehnologia de fabricație prin printare 3D.

Aceste tehnologii pot fi utilizate cu succes în prototipări sau în producții de serie mică, însă pot deveni limitative în cazul producției de serie mare.

După fabricarea bilelor brute, urmează faza de șlefuire și calibrare la dimensiunile și toleranțele cerute de beneficiari. În urma procesului de șlefuire are loc debavurarea și calibrarea bilelor la diametrul nominal de 25,4 mm. Schema de principiu a echipamentului de șlefuire-calibrare este prezentată în Figura 3.3.

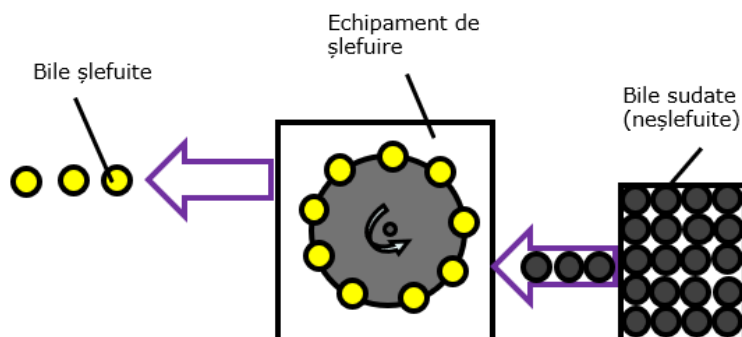


Figura 3.3. Schema de principiu a echipamentului de șlefuire-calibrare a bilelor.

Bilele brute sunt introduse pe un canal circular executat în placa de bază (fixă). În timpul procesului de șlefuire, asupra bilei se exercită o forță de apăsare prin intermediul plăcii de presiune. Placa de presiune, aflată în mișcare de rotație, este prevăzută cu un canal profilat după forma și dimensiunile bilelor de deo roll ( Figura 3.4).

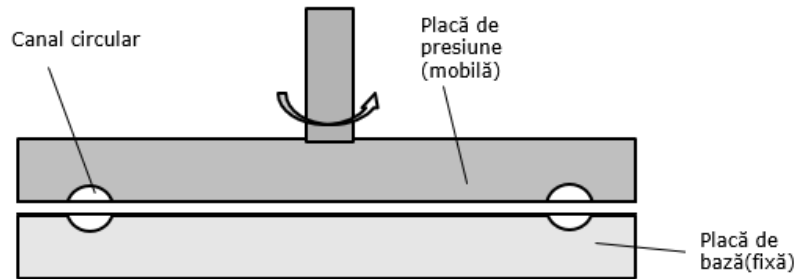


Figura 3.4. Secțiune transversală prin placa de presiune.

Detaliile legate de tehnologia de șlefuire a bilelor de deo roll nu fac obiectul tezei de doctorat.

### 3.2 Prezentarea metodelor alternative de realizare a bilelor de deo roll

Cercetările derulate în cadrul prezentei teze de doctorat au vizat identificarea *metodelor alternative* de fabricație a bilelor de deo roll, prin *sudarea a două semisfere* (Figura 3.5). Prin aceste metode se poate controla mai precis grosimea pereților bilelor și implicit masa lor.



Figura 3.5. Tehnologia alternativă de obținere a bilelor prin sudarea a două semisfere.

În urma procesului de sudare rezultă un cordon (rând) de sudură. Bilele brute obținute prezintă de cele mai multe ori bavuri datorate refulării de material topit în zona cordonului de sudură (Figura 3.6).



Figura 3.6. Bile brute cu bavuri tehnologice pe cordonul de sudură.

Și în cazul bilelor obținute prin metodele alternative de sudare a semisferelor, este necesară operația suplimentară de șlefuire-calibrare. În Figura 3.7 se observă diferența dintre bila brută neșlefuită și cea finală, șlefuită.

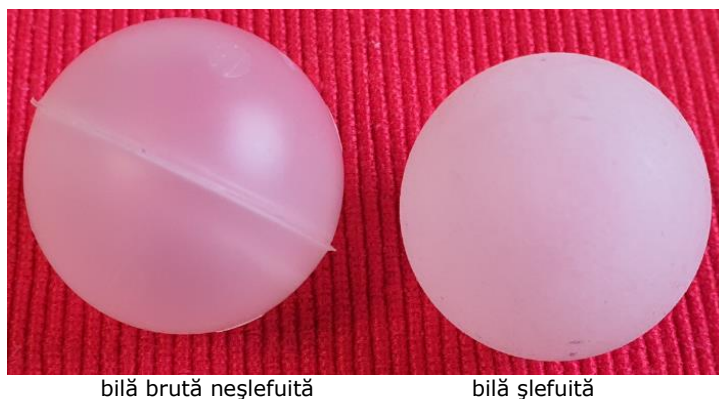


Figura 3.7. Imagini cu bila brută neșlefuită și bila finală șlefuită.

Diametrul nominal al bilelor neșlefuite este de 25,7 mm. După faza de șlefuire-calibrare, diametrul exterior al bilei se reduce la dimensiunea de 25,4 mm.

### **3.3 Considerații de fezabilitate tehnico-economică a metodelor de fabricație a bilelor de deo roll**

Tehnologia clasică de producere a bilelor de deo roll este stabilă, dar se caracterizează prin productivități mici și consumuri mari de materii prime și energie. Având în vedere volumele considerabile de produse de acest gen pe piața globală, este foarte important ca tehnologiile alternative să ofere productivități mult mai mari. Pe piață, au început să apară echipamente de fabricație a bilelor de deo roll prin metode alternative [37], dar numărul acestora este încă foarte mic, procesele tehnologice sunt încă instabile și volumele produse sunt reduse. Așadar, există în continuare un mare potențial de dezvoltare a tehnologiilor alternative.

Din studiile efectuate, rezultă că ar trebui dezvoltată o linie de fabricație care să asigure o productivitate de 60-80 de milioane de bile deo roll pe an. Costul unei linii complete de producție a bilelor deo roll ar putea ajunge la aproximativ un milion de euro. Având în vedere trendul de creștere accelerată a prețurilor la materii prime și energie, amortizarea investiției se poate realiza într-un timp relativ scurt.

În vederea stabilirii fezabilității tehnologiilor alternative a fost întocmită o analiză SWOT.

Analiza SWOT referitoare la tehnologia clasică de extrudare-suflare-matrițare a bilelor de deo roll este prezentată în Tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Analiza SWOT a tehnologiei clasice de extrudare-sufolare-matrițare.

<b>PUNCTE TARI</b>	<b>PUNCTE SLABE</b>
Proces stabil, verificat, standardizat și optimizat în timp, experiență relevantă în firmele producătoare	Proces limitat în ceea ce privește optimizarea masei și grosimii pereților bilelor de deo roll
Cost relativ scăzut al echipamentelor de fabricație în serie	Productivitate scăzută
Calitate constantă, capabilități bune ale produsului finit	Deșeu tehnologic mare (aproximativ 40%), care necesită măcinare și reintroducere în sistem
Faza finală de șlefuire și calibrare a bilelor se pretează foarte bine pe această tehnologie de fabricație	Consumuri energetice mari
	Apariția unor competitori care utilizează deja tehnologii alternative
<b>OPORTUNITĂȚI</b>	<b>AMENINȚĂRI</b>
Producători prezenți în toate zonele geografice	Cerințe legislative de mediu și dezvoltare durabilă
Expertiză tehnică disponibilă și consolidată	Campanii de presă privind materialele polimerice
Posibilități de start-up rapid	Trend de creștere permanentă a prețului la materii prime și energie

Din analiza prezentată în Tabelul 3.1 se observă că tehnologia clasică (actulă) este stabilă și foarte răspândită ca arie geografică, dar nu răspunde noilor provocări legate de creșterea accelerată a prețurilor la materii prime și energie. Perturbarea lanțurilor logistice de aprovizionare din Asia reprezintă o nouă amenințare. Drept urmare, este necesară studierea unor tehnologii alternative de fabricație care să răspundă mult mai bine acestor cerințe.

Analiza SWOT referitoare la tehnologiile alternative de fabricație a bilelor de deo roll este prezentată în Tabelul 3.2.

Tabelul 3.2. Analiza SWOT a tehnologiilor alternative de fabricație a bilelor de deo roll.

<b>PUNCTE TARI</b>	<b>PUNCTE SLABE</b>
Studii și cercetări demarate în firmele producătoare	Tehnologie validată insuficient în producția de serie și pe liniile clienților
Cost scăzut de fabricație a semisferelor (injectare în matrițe, termoformare)	Cerințe de calitate în creștere
Productivitate mare a liniilor de injectare și asamblare a semisferelor	Capabilități scăzute după fazele de asamblare și șlefuire
Costuri mici pentru faza de prototipare	Costuri mari pentru liniile de fabricație în serie
Consumuri specifice reduse de materii prime și energie	Fază suplimentară de îmbinare
	Expertiză tehnică limitată pe tehnologiile alternative

Tabelul 3.2. Analiza SWOT a tehnologiilor alternative de fabricație a bilelor de deo roll (continuare).

<b>OPORTUNITĂȚI</b>	<b>AMENINȚĂRI</b>
Trend de creștere permanentă a prețului la materii prime și energie	Cercetări similare derulate de companiile concurente
Dezvoltarea rapidă a materialelor și tehnologiilor noi	Riscuri la implementarea noilor produse pe liniile fabricanților de produse cosmetice
Cerințe legislative de mediu și dezvoltare durabilă	Cerințe legislative de mediu și dezvoltare durabilă
Număr mic de competitori care utilizează tehnologii alternative	Campanii de presă privind materialele plastice
Creșterea demografică, modificări climatice, piață de cosmetice în creștere permanentă	

După cum rezultă din Tabelul 3.2, există oportunități, dar și amenințări în dezvoltarea tehnologiilor alternative de realizare a bilelor de deo roll.

### 3.4 Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivele principale ale tezei de doctorat au fost următoarele:

1. Reducerea consumului de materii prime și energie la fabricarea bilelor de deo roll, în contextul actual de creștere generalizată a prețurilor la nivel mondial;
2. Asigurarea reciclabilității bilelor de deo roll în contextul cerințelor de sustenabilitate și de trecere la o economie circulară;
3. Studiarea unor tehnologii de sudare a reperelor din materiale polimerice;
4. Identificarea unor tehnologii de fabricație a bilelor de deo roll care să asigure productivități mai mari în comparație cu tehnologia clasică;
5. Configurarea unei linii de producție de mare viteză a bilelor de deo roll;
6. Valorificarea rezultatelor cercetării în industrii care utilizează repere de formă sferică (automotive, jucării, agrement, medicină, etc).

## 4. METODE ALTERNATIVE DE REALIZARE A BILELOR DE DEO ROLL

### 4.1 Considerații generale referitoare la metodele de îmbinare a reperelor din materiale polimerice

Încă din faza de proiectare a produselor din materiale polimerice, există o tendință firească de realizare a acestora dintr-o singură componentă. De foarte multe ori însă, forma acestor produse este mult prea complexă pentru a putea fi injectate în matrițe. Ca urmare, devine inevitabilă realizarea acestora din două sau mai multe componente, care vor fi ulterior asamblate în vederea obținerii produsului finit [38].

Metodele de îmbinare a componentelor din materiale polimerice se împart în trei categorii principale: îmbinări mecanice, îmbinări cu adezivi și îmbinări prin sudare (Figura 4.1) [18, 38].

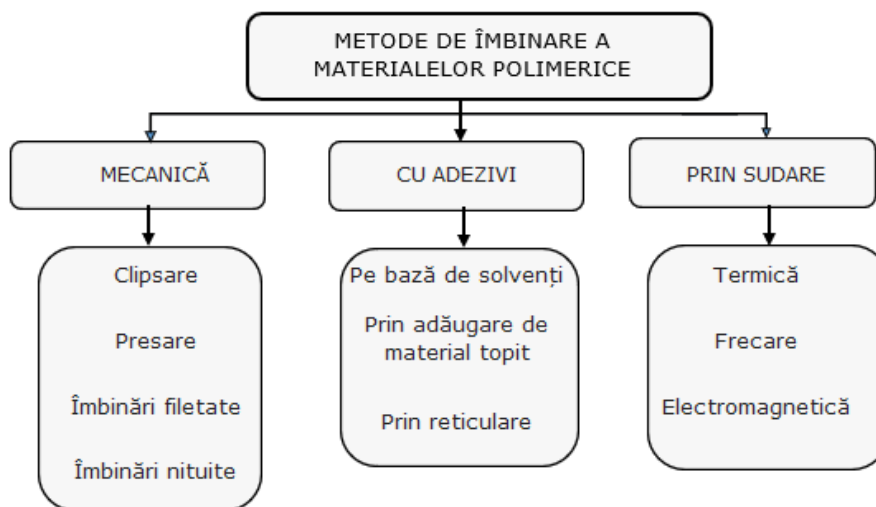


Figura 4.1. Metode de îmbinare a materialelor polimerice [38].

Îmbinările mecanice presupun utilizarea unor elemente specifice de proiectare (filete, clipsuri etc) [38,39].

Îmbinările cu adezivi necesită aplicarea unor consumabile, cu bune proprietăți de aderență, între componentele care urmează a fi asamblate [38].

Îmbinările realizate prin sudare se realizează cu aport de căldură în vederea topirii zonale a materialului pe interfața de contact dintre componentele care urmează a fi îmbinate. Prin încălzire, sub influența unei presiuni de sudare, se inițiază difuzia

intermoleculară precum și împletirea lanțurilor moleculare pe interfața de contact [38].

Îmbinarea prin sudare este metoda de îmbinare cea mai des utilizată în industrie și este posibilă doar în cazul materialelor polimerice termoplastice. Materialele polimerice termorigide nu permit utilizarea acestei metode de îmbinare [1, 2, 38].

#### 4.1.1 Clasificarea procedeeleor de îmbinare prin sudare a materialelor polimerice

Procedeele de sudare se împart în trei categorii: sudarea termică, sudarea prin frecare și sudarea cu unde electromagnetice (Figura 4.2) [18,38].

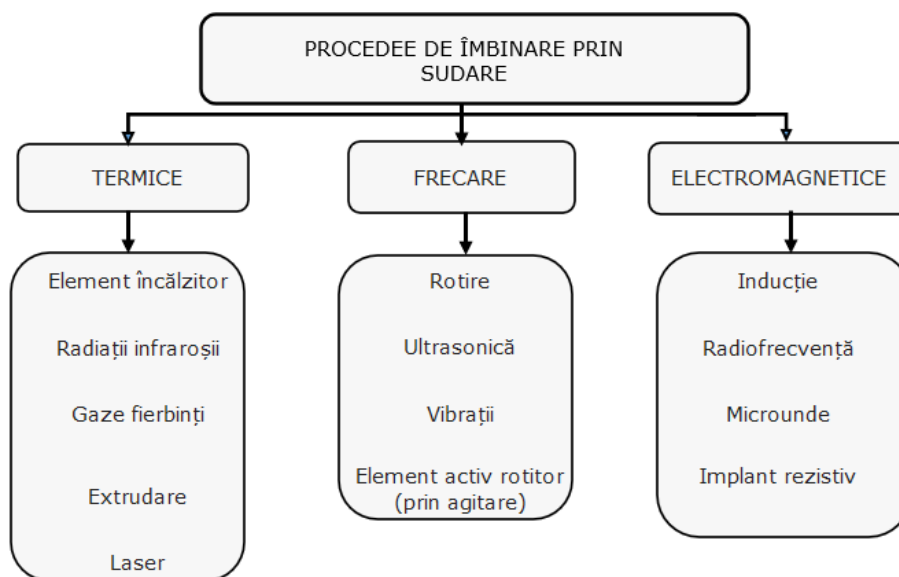


Figura 4.2. Procedee de îmbinare prin sudare a materialelor polimerice [38].

La procedeele de sudare termică, încălzirea pieselor în zona de contact se realizează prin intermediul unei surse de căldură cum ar fi: element încălzitor (plită fierbinte) [38, 40, 41, 42, 43, 44], radiații infraroșii [38, 45, 46, 47, 48], gaze fierbinți [38, 49, 50], prin extrudare de material topit [13, 38] sau radiații laser [38, 51, 52, 53, 54].

Procedeele de sudare prin frecare se bazează pe conversia energiei mecanice în căldură, obținută prin frecare de suprafață sau prin frecare intermoleculară [18, 38]. Aceste procedee utilizează ca surse de energie: ultrasunetele [29, 39, 56, 57, 58, 59], vibrațiile mecanice [60] sau frecarea mecanică: prin rotire [39, 61], prin inerție [39] sau prin agitare [62].

Procedeele de sudare cu sursă de natură electromagnetică se bazează pe conversia radiațiilor electromagnetice în căldură. Aceste procedee includ sudarea prin inducție, prin radiofrecvență, cu microunde sau pe bază de implant rezistiv [38].

O analiză comparativă a procedeeleor de sudare a reperelor din materiale polimerice este redată în Tabelul 4.1 [18].

Tabelul 4.1. Analiza comparativă a procedeelelor de sudare a reperelor din materiale polimerice.

<b>Procedee de sudare</b>	<b>Avantaje</b>	<b>Dezavantaje</b>
<i>Termice</i>	<i>În general - economice</i>	<i>În general - timpi mari de proces</i>
Element încălzitor	Simplu și economic	Proces în doi pași, contact cu elementul încălzitor, timp lung de proces, risc de supraîncălzire și degradare termică, neadecvat pentru polimeri cu temperatură înaltă de topire
Radiații infraroșii	Încălzire fără contact direct, timp redus de proces în comparație cu elementul încălzitor, adecvat pentru polimeri cu temperatură înaltă de topire	Proces în doi pași, dependent de rata de absorbție a căldurii în piesele de sudat
Gaze fierbinți	Economic, adecvat pentru piese cu geometrii complexe	Proces manual, necesită operatori specializați
Extrudare de material topit	Timp de proces mai scurt în comparație cu gazele fierbinți	Necesită operatori specializați
Laser	Proces într-un singur pas, încălzire localizată, sudare instantanee, fără vibrații, fără contaminare cu particule, solicitări reziduale scăzute, trend de scădere a costurilor cu energia laser	Necesită absorbție laser pe interfața de contact a pieselor de sudat, componenta superioară trebuie să fie laser transmisibilă, limitări ale grosimii componentelor, poate necesita pigmentarea componentei inferioare, costuri de capital ridicate
<i>Frecare</i>	<i>Investiții de capital reduse</i>	<i>În general - cu generare de particule și vibrații</i>
Rotire	Simplu și economic	Componentele trebuie să fie simetrice și de secțiune circulară
Ultrasonică	Economic, timp scurt de proces, fezabil la producția de serie mare	Necesită prezența concentratorilor de energie
Vibrații	Timp de proces scurt	Limitat la componente de dimensiuni mari, limitat la suprafețe plane, nu se recomandă la piese de mare precizie, nerecomandabil la piese cu pereți subțiri, apariția unor forțe de încovoiere ridicate



Tabelul 4.1. Analiza comparativă a procedeelelor de sudare a reperelor din materiale polimerice (continuare).

Element activ rotitor (prin agitare)	Sudare în stare solidă, îmbinări disimilare	Investiție mare, echipament complex, imperfecțiuni, golul de ieșire al sculei poate acționa ca un concentrator de tensiune
Electromagnetice	Permit sudarea unor componente cu geometrii complexe	<i>În general (cu excepția radiofrecvenței) - necesită implantarea materialului feromagnetic în îmbinare</i>
		<i>Efecte necunoscute ale câmpului electromagnetic asupra componentelor interne</i>
Inducție	Timp scurt de proces, simplu și economic	Costuri de capital ridicate cu echipamentele, inserțiile din îmbinări sunt supuse coroziunii
Radiofrecvență	Timp scurt de proces, permite sudarea componentelor cu geometrii complexe	Necesită polimeri cu grupări polare și cu factor mare de pierdere în dielectric, limitat la folii/filme subțiri
Microunde	Timp scurt de proces, permite sudarea componentelor cu geometrii complexe	Polimerii sunt transparenți la microunde, dificil de sudat, necesită acoperiri cu pulbere ceramică
Rezistență	Permite sudarea componentelor complexe	Proces lent de mică productivitate

#### 4.1.2 Fundamente referitoare la îmbinarea prin sudare a materialelor polimerice

Atunci când două interfețe ale aceluiași polimer sunt reunite într-o stare topită, acestea se vor forma reciproc (conforma) în timp pentru a obține un contact strâns între suprafețe, urmat de o difuzie intermoleculară și de o împletire a lanțurilor intermoleculare [8, 38].

Cercetători, precum De Gennes, [63] au demonstrat faptul că mișcarea moleculară a polimerului în stare topită poate fi abordată ca o mișcare caracteristică deplasării reptilelor. În teorie, există mai multe ipoteze fundamentale conform cărora interfețele sunt dispuse în contact perfect, la o temperatură relativ constantă. În majoritatea aplicațiilor, aceste ipoteze nu sunt valabile. Chiar și în cazul suprafețelor netede, microneregularitățile (striații, rizuri, goluri, pori, fisuri, etc) împiedică realizarea unui contact strâns între suprafețe. În timpul sudării, aceste neregularități sunt atenuate într-un mod prin care are loc o nivelare, respectiv o umplere a spațiilor interstițiale, obținându-se în final acel contact strâns între suprafețele aduse în contact.

Pentru o mai bună înțelegere a celor descrise mai sus, neregularitățile pot fi modelate într-o multitudine de cilindri identici, de mici dimensiuni din material dispus

între două discuri rigide (de rază  $R$ ), separate de o distanță arbitrară  $2h$  [64]. Pentru a simplifica modelul se propune analiza unei singure neregularități (Figura 4.3).

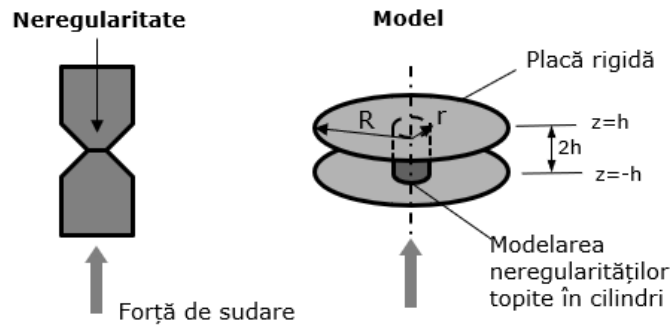


Figura 4.3. Modelul de evoluție a neregularităților în timpul sudării [38].

În Figura 4.3, înălțimea și raza inițială a neregularității sunt notate cu  $2h_0$  și, respectiv,  $r_0$ . Grewell și Benatar arată faptul că este posibilă definirea relației adimensionale între  $h_0/h$  [38]:

$$\frac{h_0}{h(t)} = \left( \frac{16\pi F h_0^2}{\mu r_0^4} t - 1 \right)^{1/4} \quad (4.1)$$

unde:

- h - jumătate din dimensiunea neregularității la un moment dat (t)
- r - raza neregularității
- F - forța aplicată la sudare
- t - timp de încălzire
- $\mu$  - vâscozitatea fluidului newtonian

Conform relației 4.1, conformarea celor două suprafețe, prin reducerea neregularităților este o funcție de timp. Așa cum se observă în Figura 4.4, o dată cu trecerea timpului, are loc refacerea lanțurilor moleculare pe interfața de contact.

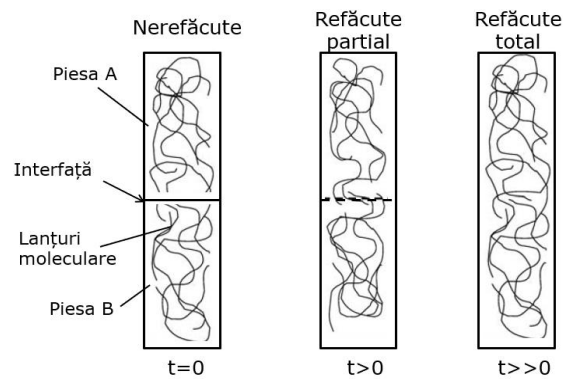


Fig.4.4. Etapele refacerii în timp a lanțurilor moleculare pe interfața de contact a două piese sudate, din același polimer [38].

În anumite condiții, este posibil ca interfața de contact să se refacă la nivelul materialului de bază.

După ce procesul de sudare este finalizat, sursa de căldură este îndepărtată și interfața de contact se solidifică. Pe măsură ce piesele se răcesc, tensiunile reziduale care rezultă din dilatarea și contracția nelineară rămân în componente. Dacă tensiunea de forfecare este mare, alinierea moleculară va dobândi o direcție paralelă cu direcția fluxului de curgere a materialului în zona de îmbinare [38]. Această orientare moleculară poate duce la suduri slabe, precum și la apariția unor tensiuni reziduale deoarece moleculele sunt forțate să rămână într-o stare tensionată. Analiza tensiunilor reziduale este importantă din mai multe motive [38]:

- tensiunile reziduale pot reduce considerabil rezistența și calitatea îmbinării în condiții de solicitări statice sau dinamice;
- tensiunile reziduale pot reduce rezistența la oboseală a îmbinării;
- tensiunile reziduale pot reduce rezistența la rupere a sudurii;
- tensiunile reziduale pot duce la accelerarea efectelor corozive, în prezența unor substanțe chimice aflate în contact cu îmbinarea, fapt ce poate determina apariția de microfisuri.

Prin studiile realizate de către Park [65], s-a constatat faptul că tensiunile reziduale care se dezvoltă în direcție paralelă cu sudura sunt mult mai mari decât tensiunile pe direcție perpendiculară [38]. Modelul analogic cu trei bare este un mod simplu în care se analizează tensiunea reziduală pe direcție paralelă cu sudura, neglijându-se solicitările perpendiculare pe sudură. Utilizând acest model se pot estima tensiunile reziduale produse de gradientii de temperatură din îmbinarea sudată (Figura 4.5).

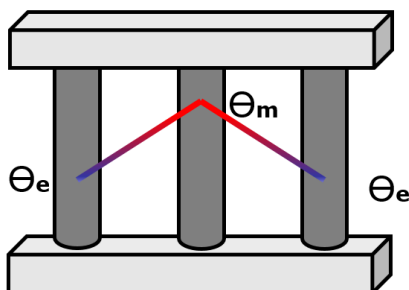


Figura 4.5. Modelul analogic de simulare cu trei bare a stresului rezidual în îmbinarea sudată [38].

Conform acestui model, zona îmbinării sudate este asimilată unui sistem cu trei bare. Bara din mijloc reprezintă zona fierbinte și este cea mai apropiată de linia de sudură. Barele laterale reprezintă zonele mai reci, situate la periferia liniei de sudură. În timpul încălzirii și răcirii, dilatațiile în regiunile mai calde sunt constrânse de dilatațiile în regiunile mai reci. Bara mediană este încălzită la o temperatură  $\Theta_m$ , iar cele două bare laterale sunt încălzite la temperatura  $\Theta_e$ . Pentru ca sistemul să ajungă la starea de echilibru, suma tensiunilor în cele trei bare trebuie să fie egală cu zero, iar dilatațiile trebuie să fie egale. Pe baza acestor modele, este posibil să se obțină determinări legate de starea de solicitare și de alungiri pe o gamă relativ largă de temperaturi [63, 65].

## 4.2 Sudarea materialelor polimerice cu element încălzitor

Sudarea cu element încălzitor este una dintre cele mai simple tehnici de sudare. Procesul de sudare constă în aducerea suprafețelor de îmbinare în contact *direct* sau *indirect* cu un element încălzitor [18, 38, 39, 40]. Elementul încălzitor poate avea o formă relativ complexă pentru a permite sudarea unor componente cu o geometrie complexă. Elementul încălzitor este adesea acoperit cu un material antiaderent (de regulă teflon) care acționează ca un agent de demulare.

La sudarea prin contact direct, în faza inițială, pentru realizarea contactului dintre piese și elementul încălzitor, se aplică o anumită presiune care să conducă la nivelarea neregularităților și la generarea unei suprafețe de contact bine definite. La încheierea acestei faze, presiunea de contact este înlăturată și începe topirea unui strat subțire de material. După trecerea unui timp de încălzire bine stabilit, elementul încălzitor este retras și piesele de sudat se aduc în contact direct. În acest moment, pe interfața de contact începe formarea cordonului (rândului) de sudură. Interpenetrarea celor două repere este controlată, pe o anumită distanță, cu ajutorul unor limitatoare mecanice pentru a preveni expulzarea excesivă de material topit în afara cordonului de sudură.

Sudarea prin contact direct cu element încălzitor, prezentată schematizat în Figura 4.6, constă în:

- încălzirea pieselor de sudat (1), prin aducerea în contact cu elementul încălzitor (2);
- retragerea elementului încălzitor, la atingerea temperaturii de topire;
- sudarea pieselor prin punerea în contact a suprafețelor încălzite.

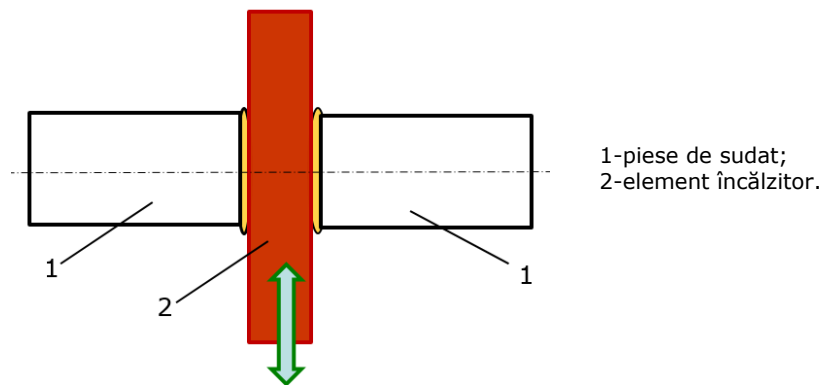


Figura 4.6. Principiul sudării prin contact direct cu element încălzitor.

Încălzirea pieselor, care urmează a fi sudate, se realizează ca urmare a transmiterii căldurii de la elementul încălzitor spre piesele de sudat prin convecție, conducție și radiație (Figura 4.7).

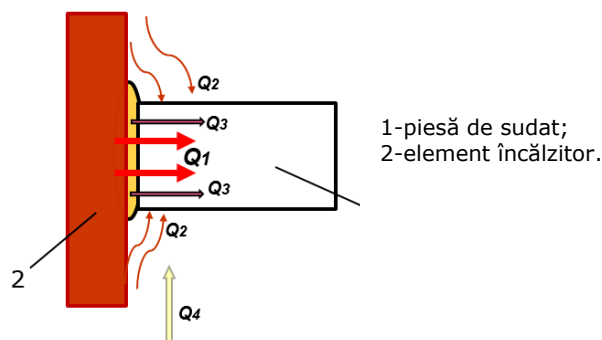


Figura 4.7. Modul de transmitere a căldurii de la elementul încălzitor la piesă.

Cantitatea totală de căldură introdusă în zona de îmbinare se poate exprima prin relația (4.2):

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (4.2)$$

unde:

- $Q_1$  - cantitatea de căldură transmisă piesei prin conducție în urma contactului direct cu elementul încălzitor;
- $Q_2$  - cantitatea de căldură transmisă piesei prin radiație;
- $Q_3$  - cantitatea de căldură transmisă piesei prin conducție de la zona aflată în contact cu elementul încălzitor;
- $Q_4$  - cantitatea de căldură transmisă piesei prin convecție.

În timpul fazelor de aliniere și de încălzire, piesele sunt în contact cu elementul încălzitor. Datorită neregularităților de pe suprafețele pieselor și de pe elementul încălzitor, apare o rezistență termică de contact, care reduce transmiterea fluxului de căldură dinspre element spre piesele de sudat [18, 38]. Rezistența termică scade gradual imediat ce începe generarea de material topit și suprafețele pieselor se conformează cu suprafața elementului încălzitor [18, 38].

Parametrii tehnologici principali la sudarea cu element încălzitor sunt [38]:

- temperatura elementului încălzitor ( $T_{ei}$ ) este dată de valoarea temperaturii la care este adus elementul încălzitor. Temperatura elementului încălzitor nu trebuie să depășească temperatura de degradare termică a polimerului pentru a nu produce modificări structurale în zona îmbinării. O temperatură prea ridicată a elementului încălzitor poate afecta rezistența îmbinării sudate;
- timpul de încălzire ( $t_i$ ) reprezintă timpul în care piesele de sudat sunt în contact cu elementul încălzitor. Timpul de încălzire influențează cantitatea de căldură introdusă în piesă. Cu cât timpul de încălzire crește, cu atât crește și cantitatea de material polimeric topit, care are drept consecință o creștere a rezistenței îmbinării sudate. Utilizarea unui timp de încălzire prea mare poate avea însă și consecințe negative din cauza faptului că se produce o cantitate prea mare de material topit în paralel cu scăderea productivității procesului de sudare. În timpul sudării, materialul topit în exces refulează din zona îmbinării, ceea ce poate duce la apariția unor bavuri;

- timpul de sudare ( $t_s$ ) reprezintă timpul în care piesele încălzite sunt ținute în contact până la formarea cordonului de sudură;
- timpul de menținere ( $t_m$ ) este timpul în care are loc răcirea reperelor menținute în contact sub presiune;
- presiunea de încălzire ( $P_i$ ) asigură menținerea în contact a reperelor cu elementul încălzitor și introducerea uniformă de căldură în zona îmbinării. Presiunea de încălzire se alege astfel încât să nu se producă o expulzare masivă de material în zona de contact cu elementul încălzitor;
- presiunea de sudare ( $P_s$ ) asigură menținerea în contact a reperelor în timpul sudării și este dependentă de mărimea suprafeței de contact. Presiunea de sudare trebuie să fie suficient de mare pentru a asigura realizarea îmbinării sudate. Valori prea ridicate însă, pot genera expulzări de material în zona îmbinării, având drept consecință obținerea de îmbinări cu bavură mare și rezistență mecanică scăzută.

Shim și Kim [66] au efectuat experimente de sudare prin suprapunere a reperelor din ABS și au constatat faptul că rezistența mecanică a sudurii crește o dată cu mărirea timpului de contact și a temperaturii elementului încălzitor. Au fost realizate experimente cu diferite temperaturi ale elementului încălzitor (180°C, 200°C, 220°C, 240°C și 260°C) și cu timpi diferiți de contact (10, 20, 30, 40, 50 și 60 minute). Pentru fiecare timp de contact, rezistența maximă a fost atinsă la temperatura elementului încălzitor de 260°C, cu o creștere a rezistenței îmbinării de la 8 MPa la 11 MPa pentru fiecare interval de timp. Ca și inconvenient major, au semnalat o creștere a deformațiilor o dată cu creșterea temperaturilor.

Watson și Murch [40] au efectuat experimente de sudare cu țevi din PP și PS și au constatat faptul că parametrii cei mai importanți pentru obținerea unor suduri de calitate sunt asociați cu faza de încălzire (timp și temperatură). Rezistența la tracțiune a cordonului de sudură o poate egala pe cea a materialului de bază, dar numai în condiții foarte stricte de control ai parametrilor de proces.

Nonhof [41] a efectuat experimente de sudare cu ABS și cu PP pentru a determina parametrii optimi de proces la sudarea cu element încălzitor (plită fierbinte), în varianta producției de masă. Experimentele au scos în evidență dificultățile majore în a defini un set de parametri standard, din cauza multitudinii de aplicații în sudarea materialelor polimerice.

Valorile orientative ale principalilor parametri tehnologici utilizați la sudarea cu element încălzitor sunt prezentate în Tabelul 4.2.

Tabelul 4.2. Valori orientative ale principalilor parametri tehnologici la sudarea cu element încălzitor.

Material	Parametri tehnologici				
	$T_{ei}$ (°C)	$t_i$ (s)	$t_s$ (s)	$P_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	$P_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
PA-66	230-260	10-20	2-4	0,05	0,1-0,3
POM	210-230	10-15	2-4	0,05	0,05-0,2
PEID	230-280	45-60	2-4	0,05	0,1-0,2
PS	230-250	10-50	2-4	0,05	0,2-0,4
PP	240-280	8-15	2-4	0,1-0,15	0,2-0,3

Valoarea timpului de încălzire se alege în funcție de dimensiunile reperelor de sudat. În cazul reperelor de dimensiuni mici, cu pereți subțiri se poate alege un timp

de încălzire scurt (3-8 s). În cazul reperelor de dimensiuni mari (țevi, tuburi, plăci), timpul de încălzire poate avea valori mult mai mari.

În ultimii ani au fost dezvoltate diverse soluții de sudare cu element încălzitor la temperaturi ridicate, prin contact direct și fără contact direct. Aceste soluții au rolul de a minimiza reziduurile de material rămas pe plita fierbinte în urma ciclurilor multiple de sudare.

În urma contactului dintre plită și repera de sudat, se generează firicele (scame) de material care aderă pe suprafața fierbinte a plitei [38]. Pentru rezolvarea acestor deficiențe, au fost dezvoltate sisteme de retragere rapidă a elementului încălzitor cu actuator servo-electric. Aceste sisteme realizează o desprindere rapidă a reperelor, ceea ce va conduce la „fracturarea” topiturii polimerice și la reducerea semnificativă a depunerilor pe elementul încălzitor.

La sudarea cu element încălzitor, la temperaturi înalte, cuprinse între 300 și 400°C, suprafața plitei nu este tratată cu agent de demulare. Această soluție are avantajul unui timp redus de încălzire. Imediat ce repera de sudat sunt desprinse de pe plită, are loc o oxidare instantanee a reziduurilor de material remanent, reziduuri care pot fi ulterior îndepărtate mecanic foarte ușor.

În cazul sudării fără contact direct, temperatura elementului încălzitor este mult mai mare, avantajul major fiind dat de faptul că nu se mai generează acele reziduuri de material topit. Distanța dintre plita fierbinte și repera de sudat este de 1 ÷ 3 mm, iar căldura este transmisă prin radiație și convecție. Un dezavantaj major al sudării fără contact direct îl reprezintă lipsa fazei de aliniere și nivelare a asperităților, ca urmare este necesară o precizie mare în execuția reperelor de sudat [18, 38].

#### 4.2.1 Sudarea bilelor de deo roll cu element încălzitor

Elementul încălzitor utilizat la acest procedeu este o plită fierbinte. Transferul de căldură de la plită la semisferele supuse sudării se realizează prin aducerea semisferelor în contact direct cu plita fierbinte [67].

Schematizarea operațiilor de sudare cu plită fierbinte este redată în Figura 4.8.

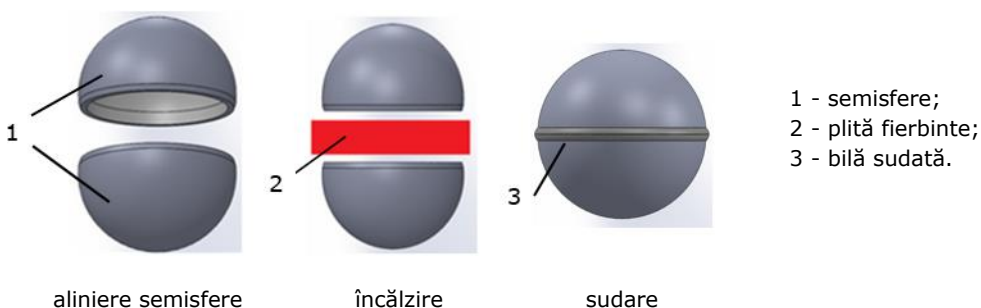


Figura 4.8. Schematizarea operațiilor de sudare a semisferelor cu plită fierbinte.

Schița semisferei care stă la baza obținerii bilelor de deo roll prin sudarea cu plită fierbinte este prezentată în Figura 4.9.

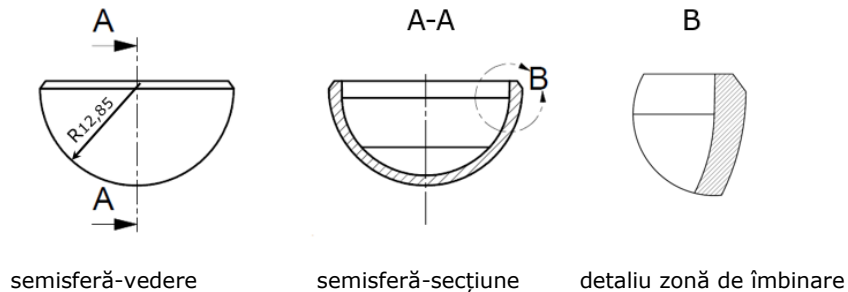


Figura 4.9. Schița semisferei care stă la baza obținerii bilelor de deo roll prin sudarea cu plită fierbinte.

Experimentele efectuate pe standul de sudare, prezentat în Figura 4.10, au următoarea succesiune:

- semisferele (1) sunt poziționate manual în cele două dispozitive purtătoare (3) și fixate vacuumatic prin intermediul unui generator de vacuum (4);
- semisferele sunt aduse în contact cu plita fierbinte (2) prin intermediul actuatorilor pneumatici (6) și menținute în contact cu aceasta până la atingerea temperaturii prestabilite, controlată de senzorii de temperatură (8), conectați la un controler (5);
- după încălzirea semisferelor, plita este retrasă prin intermediul cilindrului pneumatic (7);
- cele două semisfere încălzite se aduc în contact direct de către actuatorii pneumatici și sunt menținute până la finalizarea fazei de răcire;
- actuatorii pneumatici se retrag, vacuumul se întrerupe și bila sudată este evacuată.

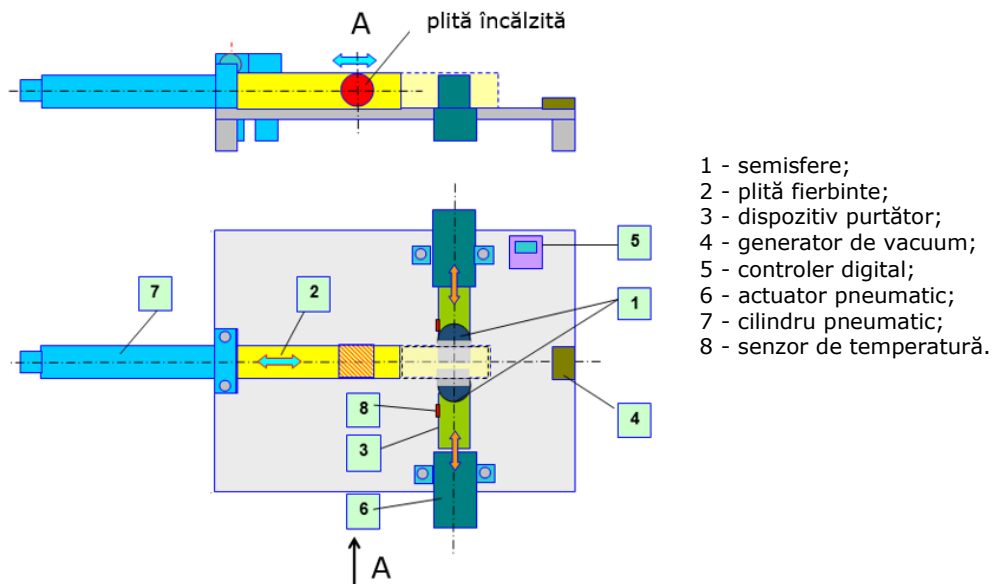


Figura 4.10. Stand experimental de sudare a bilelor de deo roll cu plită fierbinte.



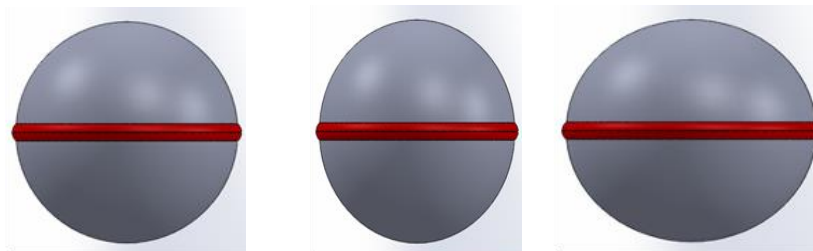
Parametrii tehnologici utilizați în primele experimente sunt prezentați în Tabelul 4.3.

Tabelul 4.3. Parametrii tehnologici utilizați în programul experimental de sudare cu plită fierbinte (Set 1).

Temperatură element încălzitor $T_{ei}$ (°C)	Timp de încălzire $t_i$ (s)	Timp de sudare $t_s$ (s)	Presiune de încălzire $P_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	Presiune de sudare $P_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
260	4	2,3 - 2,4	empirică	empirică

În timpul experimentelor au apărut probleme de calitate a bilelor sudate, după cum urmează:

- deviații de la forma sferică a bilelor sudate cu plită fierbinte, redată schematizat în Figura 4.11;



bilă sferică

bile de formă ovală

Figura 4.11. Deviații de la forma sferică a bilelor de deo roll după sudarea cu plită fierbinte.

Pentru remedierea acestui tip de defect se recomandă ajustarea distanței de interpenetrare a reperelor de sudat.

- excentricități ale bilelor sudate cu plită fierbinte (Figura 4.12);

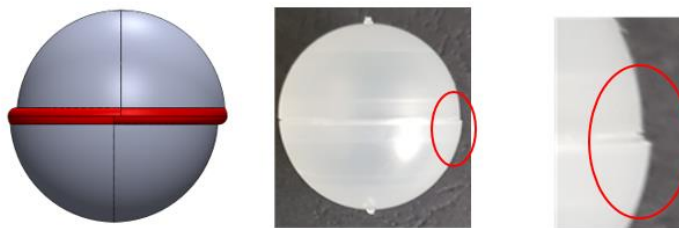


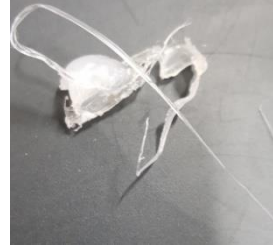
Figura 4.12. Excentricități ale bilelor sudate cu plită fierbinte.



Aceste reziduuri pot contamina echipamentele de sudare, mai ales în cazul proceselor de fabricație în serie mare ( Figura 4.15).



acumulare de scame



acumulare de material topit

Figura 4.15. Acumulări de reziduuri pe bile și pe plita fierbinte.

Ca și remediu există soluția oxidării sau arderii acestor reziduuri prin creșterea temperaturii plitei [38]. Periodic, se recomandă curățarea mecanică a suprafeței plitei cu ajutorul unor raclete.

În vederea diminuării sau eliminării defectelor mai sus enumerate au fost modificate temperatura plitei fierbinți și timpul de încălzire, cele mai bune rezultate fiind obținute cu parametrii de sudare prezentați în Tabelul 4.4.

Tabelul 4.4. Parametrii tehnologici utilizați în programul experimental de sudare cu plită fierbinte (Set 2).

Temperatură element încălzitor $T_{ei}$ (°C)	Timp de încălzire $t_i$ (s)	Timp de sudare $t_s$ (s)	Presiune de încălzire $P_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	Presiune de sudare $P_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
280	3	2,3	empirică	empirică

Pentru determinarea abaterilor dimensionale și de formă ale bilelor sudate cu parametrii din Tabelul 4.4, au fost efectuate măsurări ale diametrelor exterioare: la ecuator ( $D_e$ ) și la poli ( $D_p$ ), (Figura 4.16).



Figura 4.16. Notarea diametrelor exterioare ale bilelor sudate.

64 Metode alternative de realizare a bilelor de deo roll - 4

Măsurările dimensionale și ale maselor au fost comparate cu valorile din specificația de produs și a fost analizată încadrarea acestora în toleranțele admisibile. Diametrul nominal al bilei sudate din specificația de produs este:  $D_n = 25,7 \pm 0,1$  mm. Masa nominală a bilei sudate din specificația de produs este:  $m = 2,2 \pm 0,1$  g.

Au fost măsurate și cântărite un număr de 10 bile sudate. Valorile diametrelor și maselor sunt redată în Tabelul 4.5.

Tabelul 4.5. Măsurări ale diametrelor și maselor bilelor sudate cu plită fierbinte.

Nr. piesă	Diametru la ecuator $D_e$ (mm)	Diametru la poli $D_p$ (mm)	Masa (g)
	$25,7 \pm 0,1$		$2,2 \pm 0,1$
1	25,64	25,70	2,21
2	25,66	25,66	2,21
3	25,70	25,68	2,19
4	25,72	25,64	2,21
5	25,69	25,69	2,20
6	25,68	25,68	2,23
7	25,71	25,66	2,21
8	25,65	25,64	2,22
9	25,68	25,68	2,20
10	25,68	25,69	2,21

Pentru o analiză a distribuției diametrelor măsurate a fost utilizat softul Minitab18, cu ajutorul căruia se pot determina capabilitățile de proces și deviațiile standard [68,69].

În Figura 4.17 au fost reprezentate capabilitățile de proces referitoare la diametrele măsurate la ecuator ( $D_e$ ).

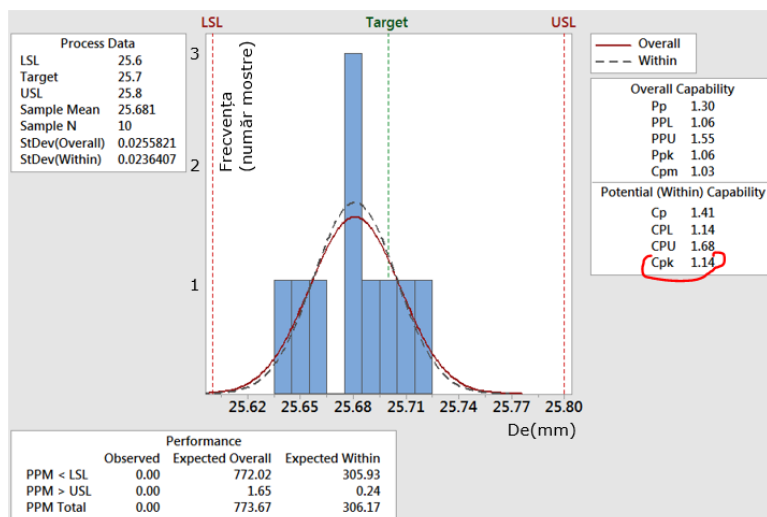


Figura 4.17. Capabilitățile de proces pentru diametrele măsurate la ecuator ( $D_e$ ).

Definițiile indicatorilor de capabilitate ai procesului sunt:

- LSL - limita inferioară impusă diametrului bilei;
- USL - limita superioară impusă diametrului bilei;
- Target - valoarea nominală impusă diametrului bilei;
- Sample mean - media tuturor măsurărilor;
- Sample N - numărul de măsurări;
- Standard deviation - măsura variabilității procesului;
- PPM - părți per milion;
- Pp - măsura capabilității totale a procesului;
- PPL - capabilitatea generală a procesului în raport cu limita sa inferioară din specificație;
- PPU - capabilitatea generală a procesului în raport cu limita sa superioară din specificație;
- Ppk - măsura capabilității generale a procesului și este egală cu minimumul dintre PPU și PPL;
- Cpm - măsura capabilității generale a procesului;
- Cp - măsura capabilității potențiale a procesului;
- CPL - măsura capabilității potențiale a procesului în raport cu limita sa inferioară din specificație;
- CPU - măsura capabilității potențiale a procesului în raport cu limita sa superioară din specificație;
- Cpk - măsura capabilității potențiale a procesului și este egală cu minimumul dintre CPU și CPL.

Indicatorul cel mai frecvent utilizat la analiza capabilităților dimensionale ale bilelor de deo roll este Cpk. Valorile înregistrate ale Cpk pot fi interpretate astfel:

- Cpk < 0 – indică anumite valori situate în afara specificației (inacceptabil);
- 0 < Cpk < 1 – indică valori dispersate, dar situate în limitele specificate (slab);
- 1 < Cpk < 1,33 – indică valori relativ grupate situate în specificație (acceptabil);
- Cpk > 1,33 – indică valori grupate, centrate pe valoarea nominală (world class).

Din Figura 4.17 se observă că:

- toate valorile diametrelor măsurate la ecuator se încadrează în limitele prevăzute de specificația dimensională;
- capabilitatea potențială de proces are o valoare supraunitară (Cpk = 1,14), situată peste valoarea minimă, dar sub 1,33;
- în cazul transpunerii acestei tehnologii în linii de fabricație se recomandă un control mai riguros al parametrilor de sudare.

Capabilitățile de proces referitoare la diametrele măsurate la poli ( $D_p$ ) sunt prezentate în Figura 4.18.

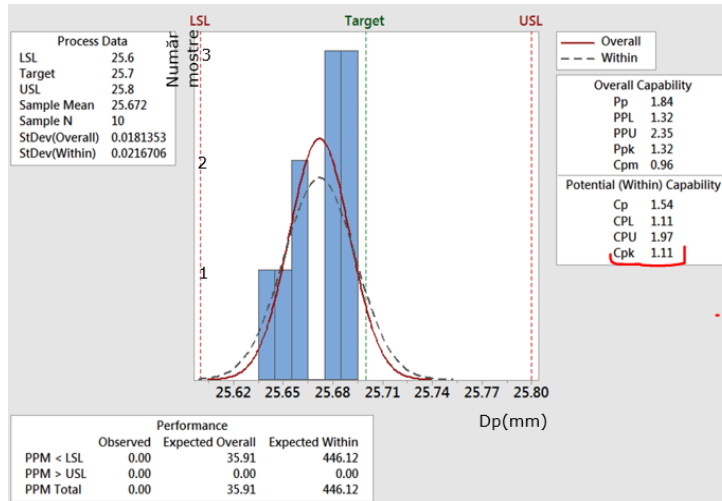


Figura 4.18. Capabilitățile de proces pentru diametrele măsurate la poli ( $D_p$ ).

Din Figura 4.18 se observă că:

- toate valorile diametrelor măsurate la poli se încadrează în limitele prevăzute de specificația dimensională;
- capabilitatea potențială de proces are o valoare supraunitară ( $C_{pk} = 1,11$ ), situată peste valoarea minimă, dar sub 1,33;
- în cazul transpunerii acestei tehnologii în linii de fabricație se recomandă un control mai riguros al parametrilor de sudare.

Capabilitățile de proces referitoare la masele măsurate ale bilelor sudate cu plită fierbinte se pot vizualiza în Figura 4.19.

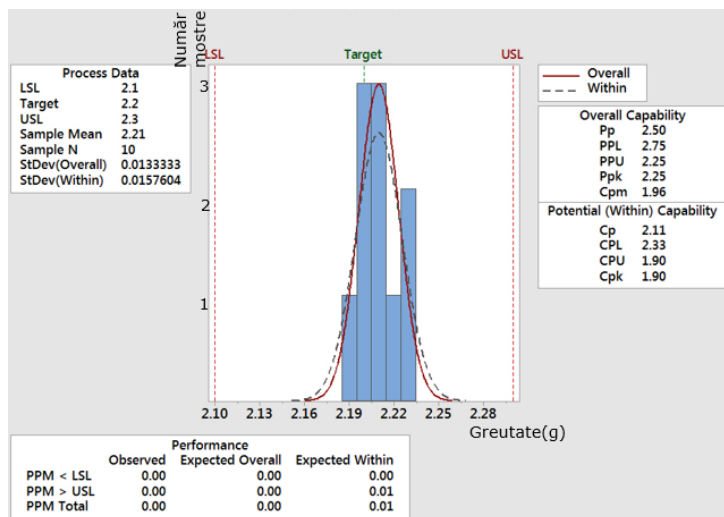


Figura 4.19. Capabilitățile de proces referitoare la masele bilelor sudate cu plită fierbinte.

Din analiza graficului din Figura 4.19 rezultă următoarele:

- valorile maselor măsurate sunt centrate pe valoarea nominală și se încadrează în totalitate în limitele stabilite în specificația tehnică de  $2,2 \pm 0,1$  g;
- capabilitatea potențială a procesului din punct de vedere al maselor ( $C_{pk}=1,90$ ) este foarte bună ( $C_{pk}>1,33$ ).

Elementele de caracterizare a procedurii de sudare a bilelor de deo roll cu plită fierbinte sunt redate în Tabelul 4.6.

Tabelul 4.6. Elementele de caracterizare a procedurii de sudare cu plită fierbinte.

Procedeu (tip) de sudare	Cu element încălzitor (plită)
Timp de sudare	Mediu
Forță de sudare	Mică
Tip de repere	Identice
Calitatea sudurii	Bună, fără defecte vizuale
Productivitate	Mare, aproximativ 10.000-12.000 bile/oră

### 4.3 Sudarea materialelor polimerice cu radiații infraroșii

Procedeu, prezentat schematizat în Figura 4.20, constă în încălzirea pieselor de sudat (1) sub acțiunea radiațiilor infraroșii emise de o sursă radiantă (2).

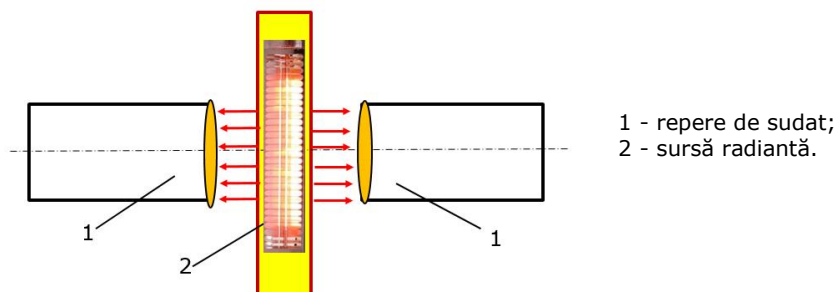


Figura 4.20. Principiul sudării materialelor polimerice cu radiații infraroșii.

Sudarea cu radiații infraroșii se poate aplica la sudarea prin suprapunere (folii, plăci) sau cap la cap a reperelor din PP, PEIJ, PEID sau PVC [18, 38]. Pentru obținerea unor îmbinări sudate de calitate, suprafețele reperelor trebuie să fie curate, fără urme de grăsimi sau impurități.

Studii efectuate de Chen și Potente [18, 45, 46, 70] au scos în evidență faptul că rezistența îmbinării crește o dată cu creșterea grosimii stratului de material polimeric topit până la un nivel optim. Orice creștere suplimentară peste acest nivel poate duce la scăderea rezistenței îmbinării.

Dezavantajul principal al acestei metode constă în necesitatea adăugării în materialul de bază a unor pigmenți absorbantți. Un alt dezavantaj constă în influența răcirii materialului topit în timpul fazei de retragere a sursei de căldură, ceea ce poate

duce la scăderea rezistenței sudurii. Pentru remedierea acestei deficiențe, este necesar un timp de încălzire mai lung, dar acest aspect va genera un timp de ciclu mai mare.

Parametrii tehnologici ai procedurii de sudare cu radiații infraroșii sunt:

- temperatura focarului ( $T_f$ ) - determină gradul de încălzire a reperelor în zona îmbinării și depinde de puterea sursei radiante;
- timpul de încălzire ( $t_i$ ) - este timpul în care reperele sunt expuse radiațiilor emise de sursă și determină cantitatea de material topit în zona îmbinării;
- timpul de sudare ( $t_s$ );
- timpul de menținere ( $t_m$ );
- presiunea de sudare ( $P_s$ );
- distanța dintre sursa de căldură și suprafețele reperelor de sudat.

Valorile orientative ale parametrilor tehnologici, determinați experimental, la sudarea cu radiații infraroșii sunt prezentate în Tabelul 4.7.

Tabelul 4.7. Regimuri orientative de sudare cu radiații infraroșii.

Material	$T_f$ (°C)	$t_i$ (s)	$t_m$ (s)	$P_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
PEID	240-410	5-10	<3	0,2-0,25
PEJD	280-380	4-11	<3	0,15-0,2
PVC-M	240-390	12-14	<3	0,15-0,2
PP	300-420	5-10	<3	0,15-0,2
PVC-D	235-260	25-45	<3	0,3-0,5

#### 4.3.1 Sudarea bilelor de deo roll cu radiații infraroșii

În cazul sudării bilelor de deo roll cu radiații infraroșii, procesul de sudare cuprinde fazele prezentate schematizat în Figura 4.21 [48]:

- încălzirea semisferelor (1) aflate în proximitatea sursei radiante (2);
- oprirea sursei de radiații infraroșii și sudarea propriu-zisă (3) a bilei de deo roll (4).

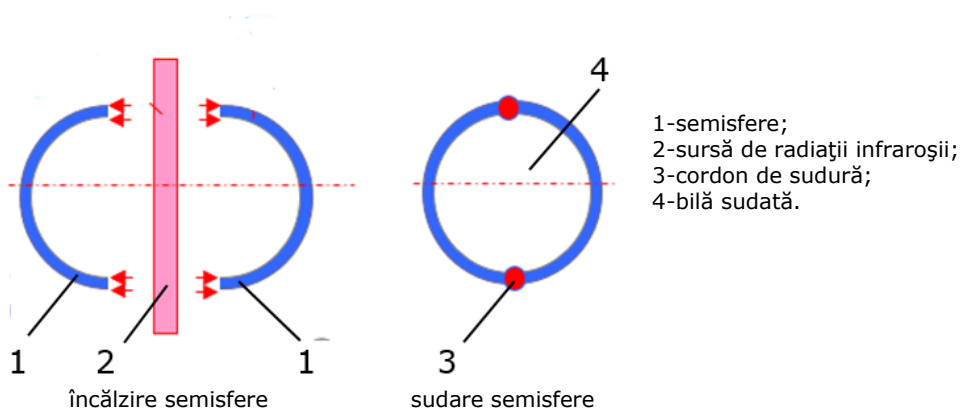


Figura 4.21. Schematizarea operațiilor de sudare a bilei de deo roll cu sursă radiantă în infraroșu.



Semisferele utilizate la sudarea bilelor de deo roll cu radiații infraroșii au forma și dimensiunile identice cu semisferele utilizate la sudarea bilelor cu plită fierbinte.

Programul experimental de sudare a bilelor de deo roll cu radiații infraroșii a avut în vedere o dispozitivare specifică a semisferelor din polipropilenă, prin care să se realizeze amplasarea reperelor de sudat în proximitatea sursei radiante. După atingerea temperaturii de sudare a materialului în zona de îmbinare, s-a realizat operația de îndepărtare a semisferelor din zona de proximitate a sursei radiante, urmată de poziționarea și presarea cap la cap a semisferelor.

Standul de sudare cu radiații infraroșii [48], prezentat schematizat în Figura 4.22, conține multe elemente comune cu standul de sudare cu plită fierbinte (Figura 4.10). Deosebirea fundamentală este dată de sursa radiantă, care în cazul de față constă dintr-un montaj cu trei becuri halogen de 1000 W (Figura 4.22-poziția 2).

Cele două semisfere (1) sunt încălzite de către sursa radiantă (2). Încărcarea semisferelor în dispozitivele purtătoare (3) se face manual, iar fixarea lor se realizează cu ajutorul unui generator de vid (4). Dispozitivele purtătoare sunt echipate cu senzori de temperatură (8), conectați la un controler digital (5). La atingerea temperaturii de sudare, cilindrul pneumatic (7) acționează retragerea sursei radiante, iar semisferele sunt presate cap la cap prin intermediul actuatorilor pneumatici (6).

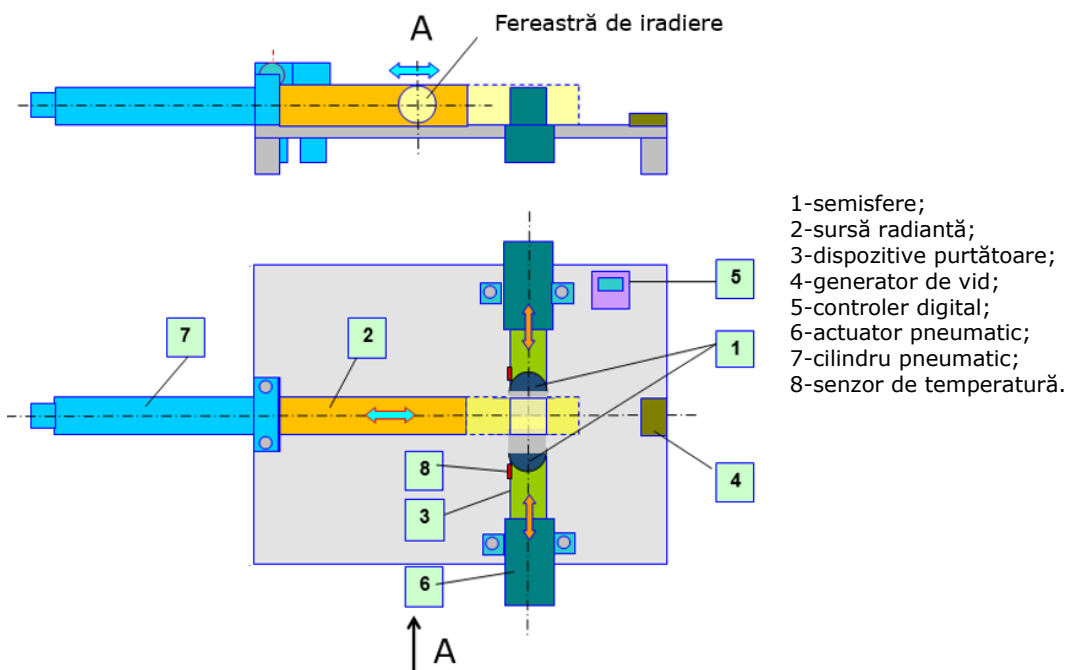


Figura 4.22. Schema de principiu a standului experimental de sudare a bilelor de deo roll cu radiații infraroșii.

Standul pe care s-au realizat experimentele de sudare este prezentat în Figura 4.23. Controlul fazelor de sudare s-a realizat cu un programator logic, cu panou tactil (Figura 4.23-poziția 9).

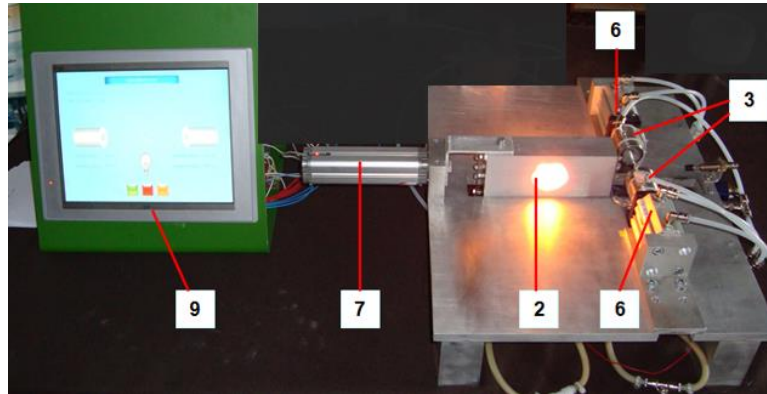


Figura 4.23. Stand experimental de sudare a bilelor de deo roll cu radiații infraroșii.

Un ciclu complet de sudare a bilelor de deo roll cuprinde următoarele faze:

- încărcarea manuală a semisferelor în dispozitivele purtătoare;
- apropierea semisferelor de sursă, prin acționarea actuatorilor pneumatici;
- încălzirea semisferelor până la atingerea temperaturii de sudare;
- întreruperea alimentării și retragerea sursei de caldură;
- avansul actuatorilor și punerea în contact a semisferelor încălzite;
- realizarea îmbinării sudate;
- retragerea actuatorilor și descărcarea bilei sudate.

În Figura 4.24 este redată o captură de pe panoul de comandă, referitoare la faza de apropiere a semisferelor de sursa de caldură.

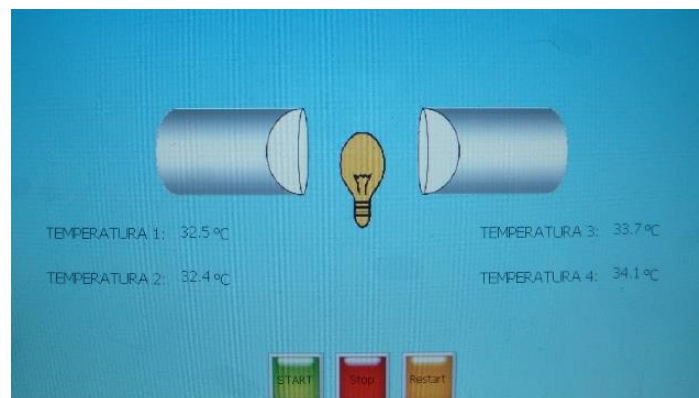


Figura 4.24. Captură de pe panoul de comandă referitoare la faza de apropiere a semisferelor de sursa de caldură.

În cadrul studiului experimental, a fost utilizată o cameră temografică pentru măsurarea temperaturii în focarul sursei radiante. Captura de ecran furnizată de camera temografică TermoCAM Researcher Professional 2.8 SR este prezentată în imaginea din Figura 4.25.

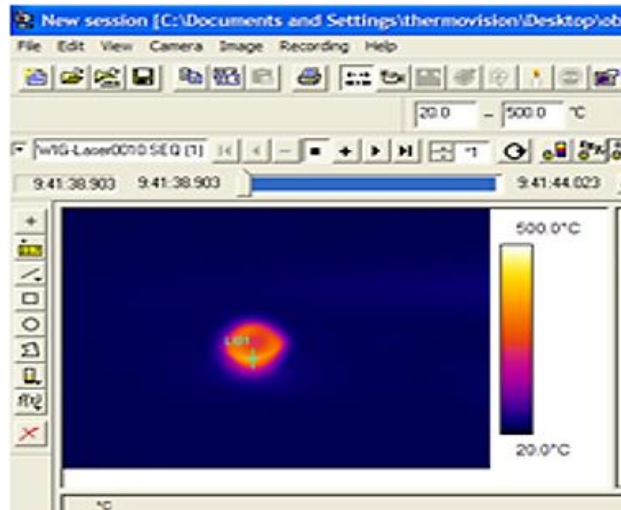


Figura 4.25. Captură de ecran furnizată de camera termografică ThermoCAM Researcher Professional 2.8 SR.

Valorile temperaturilor în focar depind de tensiunea de alimentare a sursei radiante și sunt redată în Tabelul 4.8.

Tabelul 4.8. Temperatura în focar în funcție de tensiunea de alimentare a sursei radiante.

<b>Tensiunea (V)</b>	60	100	120	130	160	180
<b>Temperatura (°C)</b>	137	238	270	340	365	410

Graficul de variație a temperaturii în focar funcție de tensiunea de alimentare a sursei radiante în infraroșu cu bec halogen este prezentat în Figura 4.26.

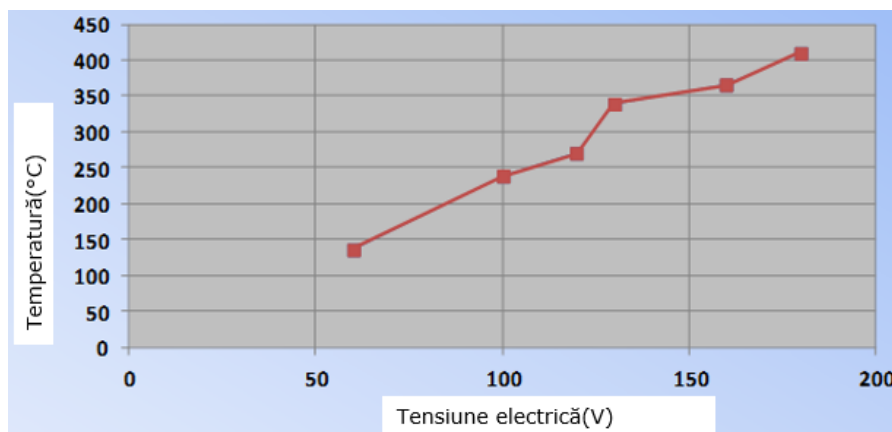


Figura 4.26. Graficul de variație temperatură - tensiune de alimentare a sursei radiante.

În primele teste ale programului experimental de sudare cu radiații infraroșii au fost utilizați parametrii din Tabelul 4.9.

Tabelul 4.9. Parametrii tehnologici utilizați în programul experimental de sudare cu radiații infraroșii (Set 1).

Forță sudare $F_s$ (N)	Temperatură focar $T_f$ (°C)	Timp încălzire $t_i$ (s)	Timp sudare $t_s$ (s)	Timp menținere $t_m$ (s)
Empirică	410	6,0	1,5	4,0

S-a urmărit obținerea unor suduri etanșe și consistente. Timpul de încălzire este relativ mare și are ca explicație necesitatea topirii unei cantități suficiente de material în zona cordonului de sudură. A fost ales un timp de menținere mare pentru a obține răcirea și solidificarea optimă a materialului în zona cordonului de sudură. Reducerea timpului de menținere se poate realiza prin intensificarea răcirii dispozitivelor în care sunt fixate semisferele cu aer sau cu apă.

Din analiza vizuală a bilelor sudate, cu parametrii din Tabelul 4.9, la unele bile au fost identificate defecte în zona cordonului de sudură (Figura 4.27).

În imaginile din Figura 4.27 se observă o refulare de material în zona cordonului de sudură, materializată prin apariția de bavuri în interiorul și exteriorul bilei sudate.



Figura 4.27. Defecte vizuale ale bilelor sudate cu radiații infraroșii.

Au fost efectuate măsurări pentru un număr de 10 bile sudate. Valorile diametrelor și maselor sunt redată în Tabelul 4.10.

Tabelul 4.10. Valori ale diametrelor și maselor bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 1).

Nr. piesă	Diametru la ecuator $D_e$ (mm)	Diametru la poli $D_p$ (mm)	Masa (g)
	$25,7\pm 0,1$		$2,2\pm 0,1$
1	25,41	25,44	2,20
2	25,48	25,43	2,20
3	25,5	25,39	2,21
4	25,43	25,38	2,21
5	25,44	25,41	2,21
6	25,49	25,38	2,19
7	25,48	25,40	2,21
8	25,46	25,36	2,20
9	25,45	25,58	2,20
10	25,44	25,44	2,23

În urma măsurărilor se constată că valorile maselor se încadrează în specificația impusă ( $2,2\pm 0,1$  g).

În Figura 4.28 sunt reprezentate capabilitățile de proces referitoare la masele bilelor sudate cu radiații infraroșii [68].

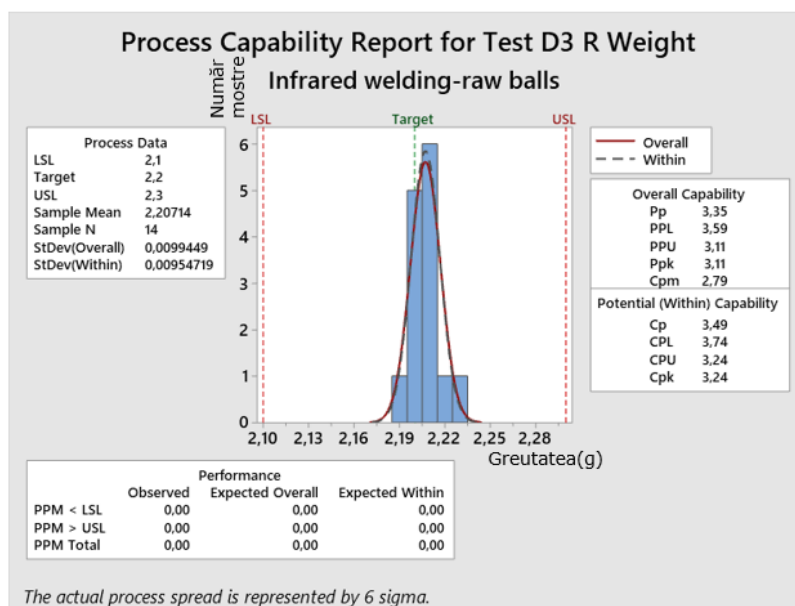
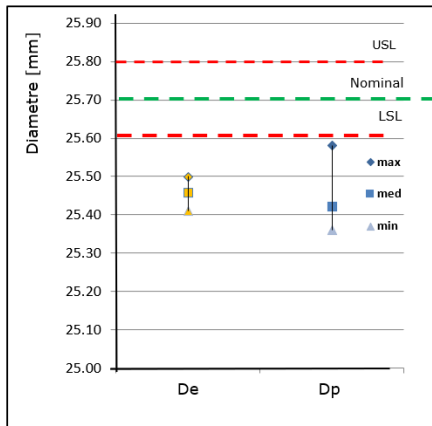


Figura 4.28. Capabilitățile de proces referitoare la masele bilelor sudate cu radiații infraroșii.

Din analiza graficului din Figura 4.28, putem concluziona următoarele:

- valorile măsurate ale maselor sunt centrate pe valoarea nominală și se încadrează în limitele stabilite în specificația dimensională;
- capacitatea potențială a procesului de fabricare prin injectare a semisferelor este foarte bună ( $C_{pk}=3,24$ ).

În ceea ce privește valorile diametrelor măsurate, acestea sunt situate sub limita prevăzută în specificație. Pentru vizualizarea valorilor măsurate ale diametrelor a fost generat graficul din Figura 4.29.



$D_e$ -diametrul bilei măsurat la ecuator;  
 $D_p$ -diametrul bilei măsurat la poli;  
 $D_{med}$  - diametrul mediu;  
 $D_{max}$  - diametrul maxim;  
 $D_{min}$  - diametrul minim;  
 Nominal-valoarea nominală impusă diametrului bilei;  
 USL- limita superioară a specificației;  
 LSL- limita inferioară a specificației.

Figura 4.29. Reprezentarea grafică a diametrelor măsurate ale bilelelor sudate cu radiații infraroșii.

Cu ajutorul programului Minitab18 s-au determinat capabilitățile de proces și deviațiile standard F.

În Figura 4.30 sunt reprezentate capabilitățile de proces referitoare la diametrele măsurate la ecuator ( $D_e$ ).

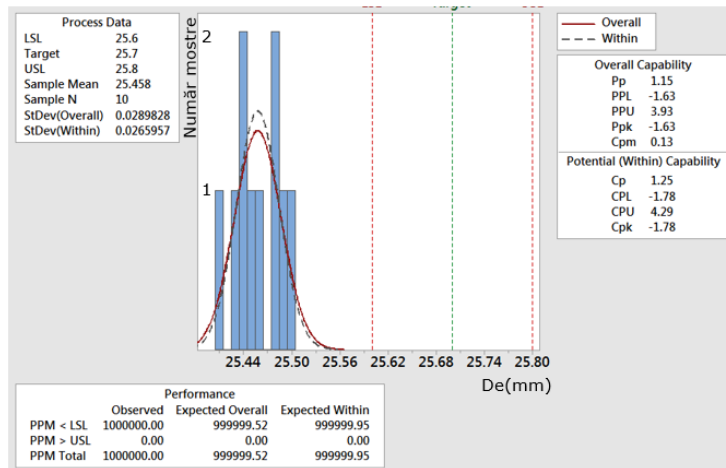


Figura 4.30 Capabilitățile de proces pentru diametrele la ecuator ( $D_e$ ) ale bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 1).

Din Figura 4.30 se observă că:

- toate valorile măsurate ale diametrelor la ecuator sunt sub limita inferioară prevăzută în specificația dimensională (LSL);
- capabilitatea potențială de proces (Cpk) are o valoare negativă (-1,78), ceea ce pune în evidență un proces cu o capabilitate mică, cu potențialul redus ca diametrele măsurate să fie aduse în specificații;

În Figura 4.31 sunt reprezentate capabilitățile de proces referitoare la diametrele măsurate la poli ( $D_p$ ).

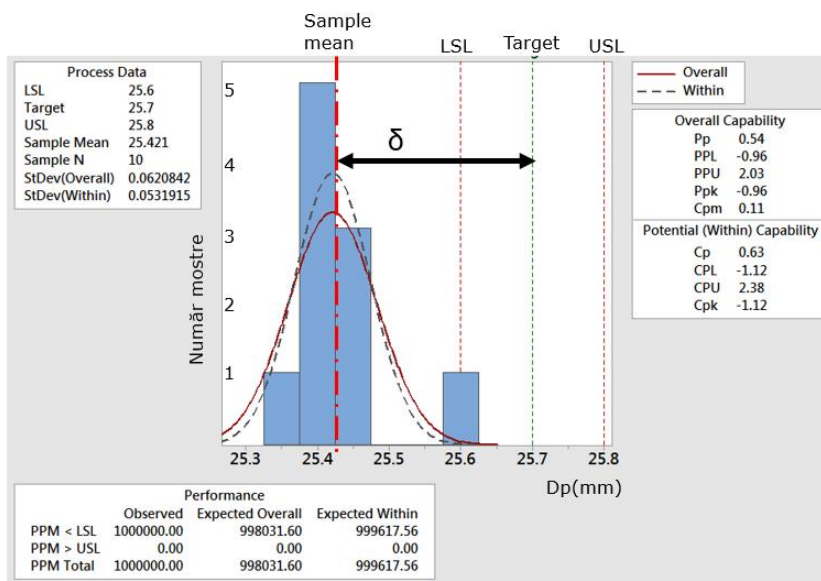


Figura 4.31. Capabilitățile de proces pentru diametrele la poli ( $D_p$ ) ale bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 1).

Din Figura 4.31 se observă că:

- toate valorile măsurate ale diametrelor la poli sunt sub limita inferioară prevăzută în specificația dimensională (LSL);
- capabilitatea potențială de proces este mică și are o valoare negativă (-1,12);
- valorile măsurate sunt dispersate, iar posibilitățile de corecție ale procesului de sudare cu parametrii de sudare din Tabelul 4.9 sunt limitate.

Valorile măsurate ale ambelor diametre ( $D_e$  și  $D_p$ ) s-au situat sub limitele impuse. Conform graficului din Figura 4.31, valoarea medie (sample mean) a diametrelor măsurate la poli este de 25,42 mm. Diferența față de diametrul nominal (target) este:  $\delta = 25,70 - 25,42 = 0,28$  mm.

Scurtarea axială a bilei a fost cauzată de interpenetrarea excesivă a semisferelor, ca urmare a refulării unei cantități prea mari de material topit în zona cordonului de sudură (Figura 4.32).

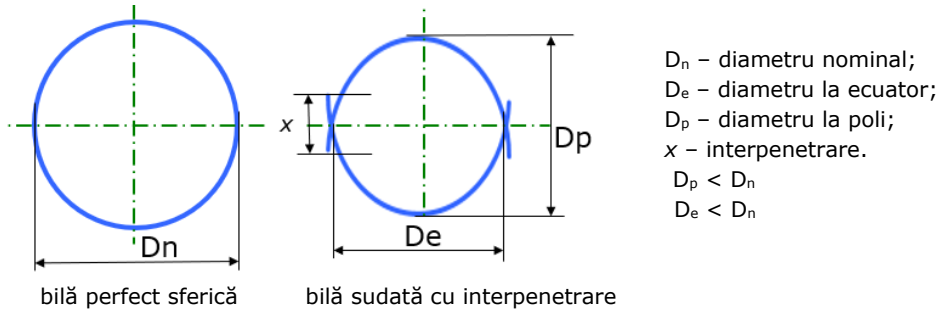


Figura 4.32. Bilă sudată cu interpenetrare excesivă.

Pentru corectarea dimensională a bilelor sudate, conform cu specificația, este necesară o ajustare care se realizează prin diminuarea cantității de material topit, refulat din cordonul de sudură. Corecția presupune limitarea interpenetrării semisferelor și implicit creșterea diametrului mediu al bilei cu diferența  $\delta = 0,28$  mm (Figura 4.33).

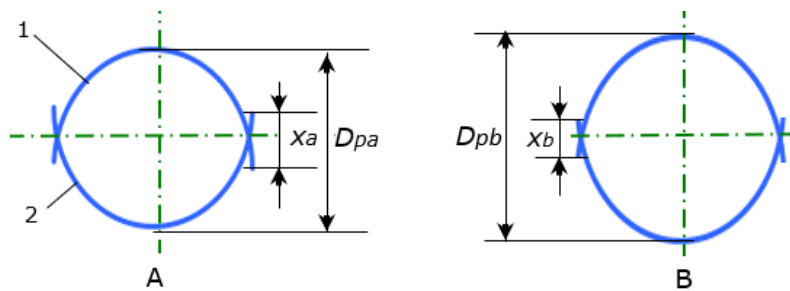


Figura 4.33. Limitarea interpenetrării semisferelor în faza de sudare.

A-poziția semisferelor înainte de corecție;  
 1,2-semisfere;

$D_{pa}$ -diametrul bilei înainte de corecție;

$D_{pb}$ -diametrul bilei după corecție;

$x_a$ -interpenetrarea înainte de corecție;

$x_b$ - interpenetrarea după corecție.

$D_{pa} < D_{pb}$ ;  $x_b < x_a$

B-poziția semisferelor după corecție;

Relațiile dintre dimensiuni înainte și după corecție sunt următoarele:

$$\delta = x_a - x_b \quad (4.3)$$

$$D_{pb} = D_{pa} + \delta \quad (4.4)$$



După reglajul distanței dintre dispozitivele purtătoare, în conformitate cu distanța  $\delta = 0,28$  mm, au fost setați parametri noi de proces. În Tabelul 4.11 sunt prezentați parametrii de sudare care au dat cele mai bune rezultate.

Tabelul 4.11. Parametrii tehnologici la sudarea cu radiații infraroșii (Set 2).

Forță sudare $F_s$ (N)	Temperatură focar $T_f$ (°C)	Timp încălzire $t_i$ (s)	Timp sudare $t_s$ (s)	Timp menținere $t_m$ (s)
Empirică	365	5,0	2,25	4,0

Conform datelor din Tabelul 4.11, se constată următoarele:

- temperatura focarului a fost scăzută de la 410°C la 365°C, pentru a limita generarea excesivă de material topit în îmbinare;
- timpul de încălzire a fost redus cu 1 s iar timpul de sudare a crescut de la 1,5 la 2,25 s, prin aplicarea unui procedeu de sudare mai „moale”, pentru a limita expulzarea excesivă de material în afara sudurii. Creșterea timpului de sudare duce la o omogenizare mai bună a materialului topit din cordonul de sudură, cu efecte benefice asupra rezistenței mecanice a bilei sudate;
- timpul de menținere a fost setat tot la 4 s, acesta se poate optimiza în cazul transpunerii în linii de fabricație de serie mare.

În urma verificărilor vizuale ale bilelor sudate, se observă îmbunătățiri în ceea ce privește cantitatea de material expulzat (Figura 4.34).

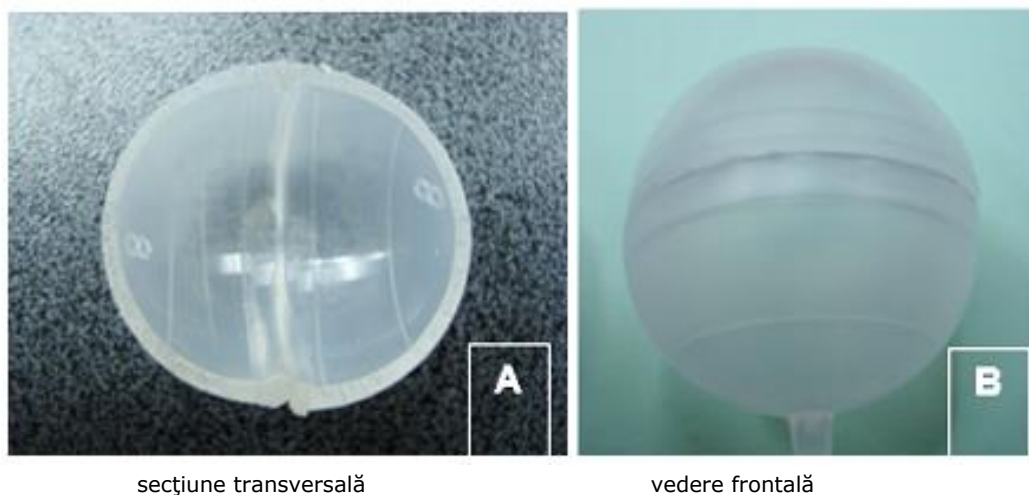


Figura 4.34. Aspectul vizual al bilelor sudate în secțiune și în vedere (Set 2).

Au fost efectuate noi măsurări ale diametrelor la ecuator ( $D_e$ ), respectiv la poli ( $D_p$ ), care se regăsesc în Tabelul 4.12.

Tabelul 4.12. Măsurări ale diametrelor bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 2).

Nr. piesă	Diametru la ecuator $D_e$ [mm]	Diametru la poli $D_p$ [mm]
	$25,7\pm 0,1$	$25,7\pm 0,1$
1	25,64	25,73
2	25,61	25,69
3	25,64	25,72
4	25,63	25,74
5	25,62	25,68
6	25,57	25,61
7	25,60	25,66
8	25,64	25,63
9	25,62	25,72
10	25,62	25,66

Capabilitățile de proces pentru diametrele măsurate la ecuator ( $D_e$ ) sunt redade în Figura 4.35.

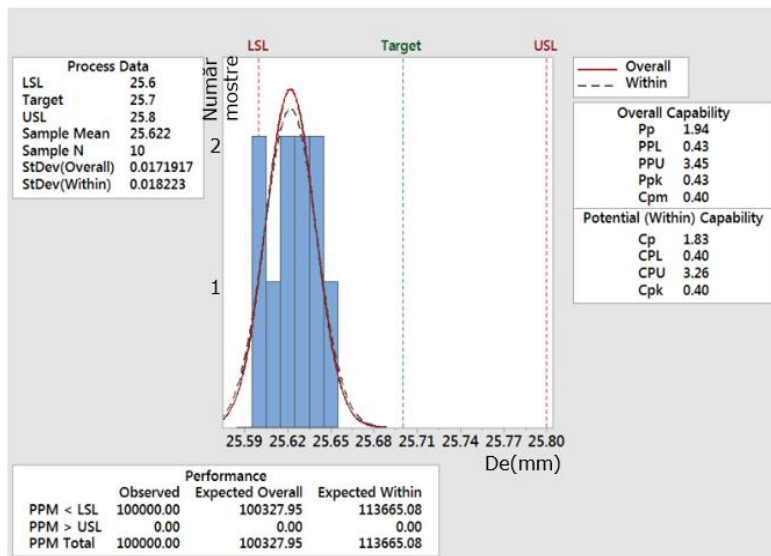


Figura 4.35. Capabilitățile de proces pentru diametrele la ecuator ( $D_e$ ) ale bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 2).

Din Figura 4.35 se observă că:

- există o valoare măsurată a diametrelor situată la limita prevăzută în specificația dimensională;

- capabilitatea potențială de proces are o valoare pozitivă (0,40), dar sub valoarea minimă (1);
  - valorile diametrelor măsurate la ecuator sunt grupate.
- Capabilitățile de proces pentru diametrele măsurate la poli sunt redată în Figura 4.36.

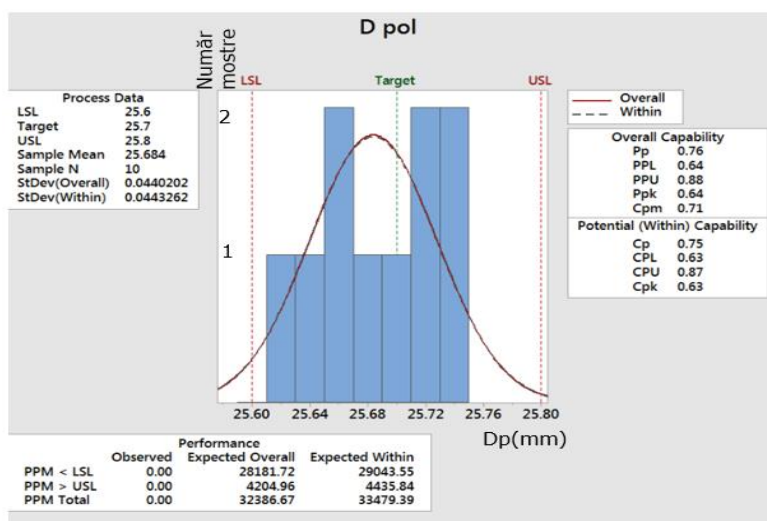


Figura 4.36. Capabilitățile de proces pentru diametrele la poli ( $D_p$ ) ale bilelor sudate cu radiații infraroșii (Set 2).

Din Figura 4.36 se observă că:

- toate valorile diametrelor exterioare măsurate la poli sunt situate în specificația dimensională (între LSL și USL);
- capabilitatea potențială de proces are o valoare pozitivă (0,63), dar încă sub valoarea minimă (1);
- valorile măsurate sunt dispersate, iar acest lucru indică o variabilitate mare a procesului de sudare.

Elementele de caracterizare a procedurii de sudare cu sursă radiantă în infraroșu a bilelor de deo roll sunt redată în Tabelul 4.13.

Tabelul 4.13. Elementele de caracterizare a procedurii de sudare cu sursă radiantă în infraroșu a bilelor de deo roll.

Procedeu (tip) de sudare	Sudare cu radiații infraroșii
Timp de sudare	Mare
Fortă de sudare	Mică
Tip repere	Identice
Calitatea sudurii	Bună, fără defecte vizuale
Productivitate	Medie, aproximativ 6.000-8.000 bile sudate/oră

#### 4.4 Sudarea materialelor polimerice cu gaze fierbinți

Procedeul de sudare cu gaze fierbinți constă în încălzirea suprafețelor pieselor de sudat, până la atingerea stării vâscoase, prin intermediul unui jet de gaz încălzit [38]. Sudarea se poate realiza cu sau fără aport de material de adaos. În Figura 4.37 este prezentată varianta de sudare cu material de adaos.

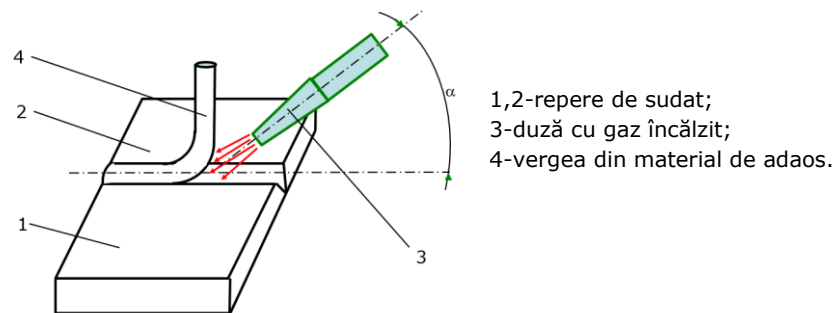


Figura 4.37. Sudarea cu gaz încălzit cu material de adaos.

Ca și agent termic se pot utiliza: aerul, azotul, oxigenul, argonul sau bioxidul de carbon. Agentul termic uzual este aerul încălzit. În situația în care este necesară reducerea oxidării, în zona îmbinării sudate, se utilizează drept agent termic azotul sau gazele inerte (argonul).

Sudarea cu gaz încălzit își găsește o aplicabilitate bună la sudarea plăcilor având grosimea cuprinsă între 2-30 mm. Materialele polimerice care se pot suda prin acest procedeu sunt: PVC, PE, PP, POM, PMMA, PA, PIB și PC.

Materialul de adaos sub formă de vergea poate avea aceeași compoziție ca și materialul de sudat sau o compoziție foarte apropiată. De obicei, vergelele au o secțiune transversală rotundă, dar sunt disponibile și în secțiuni transversale ovale, triunghiulare și rectangulare. Ca și la sudarea metalelor, pentru îmbinări de dimensiuni mari, sunt utilizate mai multe treceri pentru a umple complet rostul (cordonul) de sudură. În unele cazuri, pentru a asigura penetrarea completă a sudurii, la prima trecere se utilizează o vergea de dimensiuni mici, urmând ca la următoarele treceri să se utilizeze vergele de dimensiuni mai mari.

Sudarea cu gaze fierbinți poate fi efectuată manual sau automat. La operarea manuală, presiunea este aplicată prin împingerea manuală a țigii de sudură în zona de îmbinare. Sudarea automată se realizează utilizând echipamente personalizate pentru fiecare aplicație în parte.

Principalii parametri tehnologici care caracterizează procedeul de sudare cu gaz încălzit sunt:

- temperatura gazului la ieșirea din încălzitor

Temperatura gazului la ieșirea din încălzitor este stabilită în funcție de materialul care urmează a fi sudat. Această temperatură trebuie să fie mai mare cu aproximativ 50-100°C față de temperatura stării vâscoase a materialului polimeric pentru a putea compensa pierderile de căldură care apar pe traseul dintre încălzitor și suprafața pieselor de sudat.

În Tabelul 4.14 sunt indicate valori orientative ale temperaturilor gazului încălzitor și temperaturile necesare a fi atinse de suprafețele pieselor înainte de sudare.

Tabelul 4.14. Temperaturile gazului încălzitor și temperaturile la suprafața pieselor.

Material	Temperatura gazului încălzitor (°C)	Temperatura minimă la suprafața de contact a pieselor (°C)
PVC dur	300-350	160
PVC moale	250-300	150
PP	240-280	175
PE	200-280	150
PMMA	250-300	180
PIB	250-300	150

- presiunea gazului la ieșirea din duza încălzitorului  
Presiunea la ieșirea din duza încălzitorului se alege, în mod uzual, între 3,5-8 N/cm<sup>2</sup>. Alegerea incorectă a presiunii gazului poate avea drept consecință încălzirea insuficientă a pieselor și a vergelei sau o expulzare a materialului de adaos încălzit în zona sudurii.
- viteza de sudare  
Temperatura gazului, ca și agent purtător de căldură și viteza de sudare sunt parametrii intrinseci ai procesului de sudare cu gaze fierbinți. Fiecărei temperaturi îi corespunde o viteză optimă de sudare, legătura dintre viteza de sudare și temperatura gazului încălzit, determinată experimental, este dată de relația (4.5):

$$V_s = V_0 \cdot e^{-Q/RT_s} \quad (4.5)$$

unde:

- $V_s$  - viteza de sudare [cm/s]
- $T_s$  - temperatura gazului încălzit [K]
- R - constanta universală a gazelor [kcal/mol·K]
- $V_0, Q$  - parametri determinați experimental;  
 $V_0$  are valori cuprinse în intervalul: 0,50 - 1,24 [cm/s]  
 $Q$  are valori cuprinse în intervalul: 5,8 - 6,24 [kcal/mol].

- presiunea aplicată materialului de adaos  
Presiunea aplicată materialului de adaos se alege în funcție de echipamentul de sudare și de materialul care urmează a fi sudat. O presiune scăzută poate duce la o pătrundere insuficientă a materialului de adaos, în timp ce o presiune prea ridicată poate duce la expulzarea nedorită a materialului încălzit din cordonul de sudură. Valorile uzuale ale acestei presiuni se situează în intervalul 5-50 N/cm<sup>2</sup>.

- unghiul dintre duza încălzitoare și suprafața cusăturii  
Distribuția corectă a căldurii la sudare se realizează prin menținerea unui unghi corespunzător al înclinării duzei încălzitoare față de suprafața cusăturii (Figura 4.37). Acest unghi depinde de grosimea pieselor de sudat și are valorile:

- $\alpha = 20^\circ \div 25^\circ$  - la o grosime a pieselor < 5mm;
- $\alpha = 30^\circ \div 45^\circ$  - la o grosime a pieselor > 5mm.

La sudarea materialelor polimerice se definește coeficientul de calitate ca raport între rezistența îmbinării sudate și rezistența materialului de bază.

Calitatea îmbinării la sudarea cu gaze fierbinți depinde de: viteza de sudare, presiunea și temperatura gazului [18, 70]. Balkan & al. au comparat îmbinările cap la cap prin sudare cu gaze fierbinți la: PP, PE și PVC [49]. În urma experimentelor ei au constatat că îmbinările PVC-PVC au fost mai slabe decât îmbinările PE-PE sau PP-PP. Rezistența îmbinărilor de tip PVC-PVC s-a situat în intervalul 45-77% față de rezistența materialului de bază, în comparație cu valori de 77-90% și 63-80% în cazul îmbinărilor PE-PE, respectiv PP-PP (Tabelul 4.15) [18]. Coeficienții de calitate mai slabi în cazul îmbinărilor PVC-PVC au fost atribuiți structurii amorfe specifice acestui material, în timp ce structura materialelor de tip PE și PP este caracterizată de un grad înalt de cristalinitate. Niciuna dintre îmbinările obținute prin acele experimente nu a egalat performanțele materialului de bază și toate au cedat pe linia de sudură.

Tabelul 4.15. Coeficienți de calitate ai sudurilor pentru diferite materiale polimerice [18].

Material	Coeficient de calitate (%)
PVC -PVC	45-77
PE-PE	77-90
PP-PP	63-80

În concordanță cu studiile lui Balkan, Marcisz & al. [71] au comparat rezistențele îmbinărilor la câteva materiale termoplastice și au obținut valori inferioare la materialele amorfe. Ei au atribuit aceste valori unei rate mici de curgere a topiturii în zona îmbinării, ceea ce a condus la descompuneri chimice și la degradări termice rapide ale materialului cu structură amorfă.

Sudarea cu gaze fierbinți este o tehnică care necesită operatori cu multă experiență și înaltă calificare, ceea ce face ca aceasta tehnică să fie puțin fezabilă în cazul producției de serie mare sau în cazul în care este necesară o precizie dimensională mare.

#### 4.4.1 Sudarea bilelor de deo roll cu gaze fierbinți

Programul experimental a constatat în sudarea semisferelor fără material de adaos (Figura 4.38), prin intermediul unui pistol cu aer cald (1). Semisferele (2), fixate în dispozitivele purtătoare (3), execută o mișcare de rotație. Aerul încălzit la 250-260°C este suflat printr-o duză spre zona de îmbinare a semisferelor. În momentul în care începe topirea materialului, duza de aer cald este retrasă și începe faza de sudare prin exercitarea forței de sudare (F) asupra semisferelor. În final, dispozitivele de fixare sunt retrase și bila de deo roll (5) este evacuată.

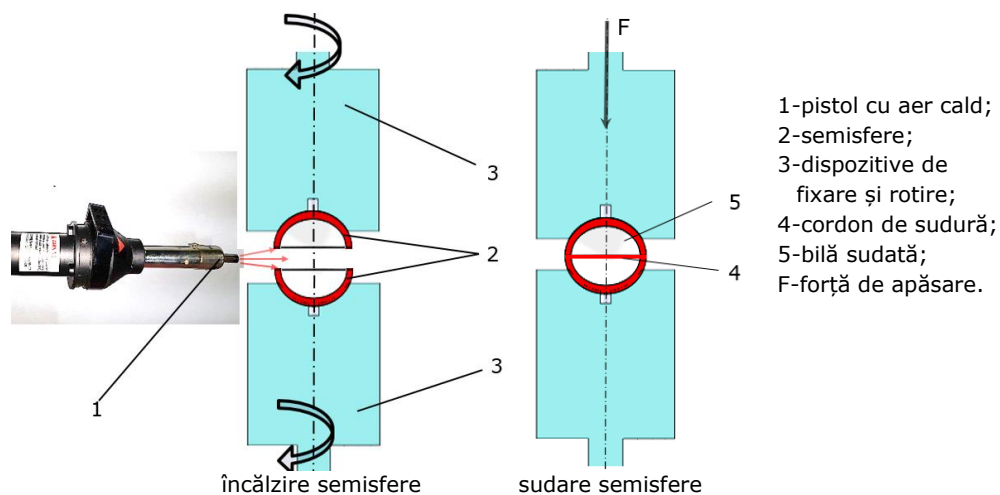


Figura 4.38. Stand experimental de sudare a bilelor de deo roll cu aer încălzit.

Parametrii utilizați la testele de sudare cu aer încălzit sunt prezentați în Tabelul 4.16.

Tabelul 4.16. Valorile principalilor parametri tehnologici utilizați la sudarea cu aer încălzit.

Forță de sudare $F_s$ (N)	Temperatură aer încălzit $T_{ai}$ (°C)	Timp de încălzire $t_i$ (s)	Timp de sudare $t_s$ (s)	Timp de menținere $t_m$ (s)
Empirică	250-260	12	2	5

Realizarea bilelor de deo roll prin sudarea cu aer încălzit are următoarele dezavantaje:

- timp de încălzire foarte lung (10-12 secunde);
- unele bilele sudate prezintă defecte: arsuri de material și bavuri în cordonul de sudură (Figura 4.39).



arsuri



bavuri în cordonul de sudură

Figura 4.39. Defecte ale bilelor sudate cu aer încălzit.

Elementele de caracterizare a procedurii de sudare cu aer încălzit a bilelor de deo roll sunt redate în Tabelul 4.17.

Tabelul 4.17. Elementele de caracterizare a procedurii de sudare a bilelor deo roll cu aer încălzit.

Procedeu (tip) de sudare	Cu aer încălzit
Timp de sudare	Mare
Forță de sudare	Mică
Tip de repere	Diferite
Calitatea sudurii	Slabă, prezintă bavuri și arsuri de material
Productivitate	Neevaluată

## 4.5 Sudarea prin extrudare cu material topit

La sudarea prin extrudare, materialul de umplere, aflat în stare topită, este extrudat direct în îmbinare [13, 38]. Presiunea de sudare este exercitată prin intermediul unei duze montate pe flanșa extruderului. Granulele polimerice care stau la baza materialului de adaos, sunt introduse în extruderul mașinii de injecție unde sunt plastificate prin intermediul unui melc (șnec) antrenat de un motor electric, după care topitura este extrudată în îmbinare.

Sunt utilizate două categorii importante de echipamente de sudare prin extrudare. Pentru rate de extrudare mari (la sudarea plăcilor de grosimi mari), se utilizează un echipament staționar cu un sabot de sudură mobil. Pentru volume mai mici de extrudare (la sudarea plăcilor subțiri) se utilizează un echipament de extrudare acționat manual. Principalele dezavantaje ale echipamentelor manuale constau în faptul că au dimensiuni mari, sunt grele și sunt mai dificil de manipulat.

Sudarea prin extrudare este caracterizată de existența unor variabile de sudare mai puține în comparație cu sudarea cu gaze fierbinți, motiv pentru care este mai ușor de automatizat.

Cele mai noi evoluții în domeniul sudării prin extrudare sunt legate de design-ul echipamentelor utilizate. Pentru un control mai bun al dozării de material topit se utilizează mai nou servomotoare de antrenare a melcului de injecție [72].

### 4.5.1 Sudarea bilelor de deo roll prin extrudare de material topit

Echipa de cercetători alcătuită din Schmidt, Hindle, Goede și Stoelben au brevetat o metodă inovativă de realizare a bilelor de deo roll [13], prin care semisferele sunt injectate într-o matrită complexă (cu rotire-indexare). În aceeași matrită are loc și asamblarea semisferelor prin supra-injecțarea pe circumferința ecuatorială a unui inel din material în stare topită (Figura 4.40). Prin solidificarea inelului are loc sudarea celor două semisfere.



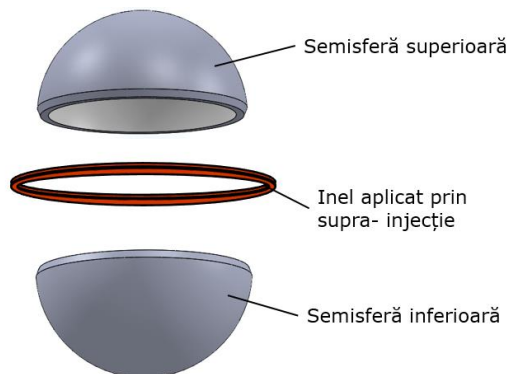


Figura 4.40. Metoda de realizare a bilelor de deo roll prin sudarea cu extrudare de material topit (supra-injectare).

Fazele de realizare a bilelor de deo roll prin supra-injecție sunt prezentate în Figura 4.41.



a) injectarea semisferelor      b) alinierea semisferelor      c) supra-injecția inelului

Figura 4.41. Fazele de realizare a bilelor de deo roll prin supra-injecție.

Avantajul acestei metode constă în realizarea bilelor de deo roll în aceeași matriță, fără a mai fi necesară o nouă operație, distinctă, de îmbinare a semisferelor.

Industrializarea acestei tehnologii are un potențial mare, chiar dacă investiția într-o linie de producție de serie mare este ridicată.

## 4.6 Sudarea materialelor polimerice cu radiații laser

Sudarea cu radiații laser datează din anii 1960 și a cunoscut o dezvoltare exponențială începând cu anii 2000, ca urmare a scăderii semnificative a costurilor cu energia laser [38, 51, 52, 54, 55,].

Procedeul de sudare cu laser constă în încălzirea componentelor de sudat cu ajutorul unui fascicul laser (Figura 4.42).

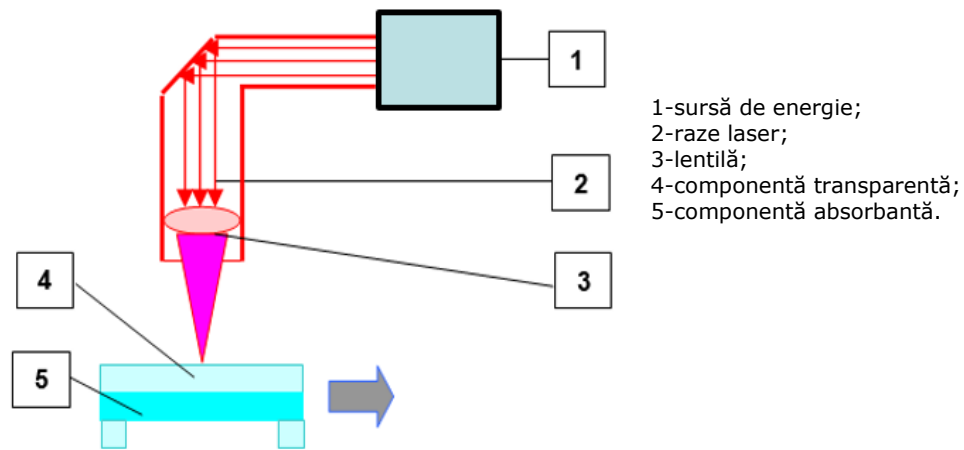


Figura 4.42. Principiul sudării cu radiații laser a materialelor polimerice.

Sursa de energie (1) generează razele laser (2), care sunt colimate cu ajutorul unei lentile într-un fascicul laser. Componenta superioară (4) trebuie să fie laser transmisibilă (transparentă), în timp ce componenta inferioară (5) trebuie să fie laser absorbantă (opacă). Astfel, pe interfața de contact a celor două componente se generează o cantitate suficientă de căldură pentru a topi materialul polimeric și a realiza sudarea acestora.

Principalele avantaje oferite de tehnologia laser la sudarea materialelor polimerice sunt:

- sudurile realizate pot fi de dimensiuni foarte mici;
- nu există contact mecanic cu materialul de sudat;
- fasciculul laser poate fi dirijat spre puncte sau zone de sudare greu accesibile prin dispunerea sistemului de oglinzi sau prin aditivarea materialelor cu pigmenți laser absorbanți.

Sudarea cu radiații laser se realizează în două moduri [38]:

- sudarea prin încălzirea suprafeței de contact;
- sudarea prin transmisie (TTIr sau TLW).

Sudarea prin încălzirea suprafeței de contact este foarte asemănătoare cu sudarea cu radiații infraroșii. Suprafețele componentelor care urmează a fi îmbinate sunt încălzite prin expunere directă la fasciculul laser o perioadă suficientă de timp (între 2 și 10 s) pentru a genera un strat de material topit [38]. După ce suprafața de sudat este topită complet, generatorul laser este retras, componentele sunt presate una față de cealaltă, iar topitura începe să se solidifice.

Pentru generarea unui strat topit uniform și consistent, sursa de încălzire trebuie să fie continuă. Această operație poate fi realizată fie prin iluminare continuă, fie prin scanarea de mare viteză a întregii suprafețe de sudat (Figura 4.43) [38].

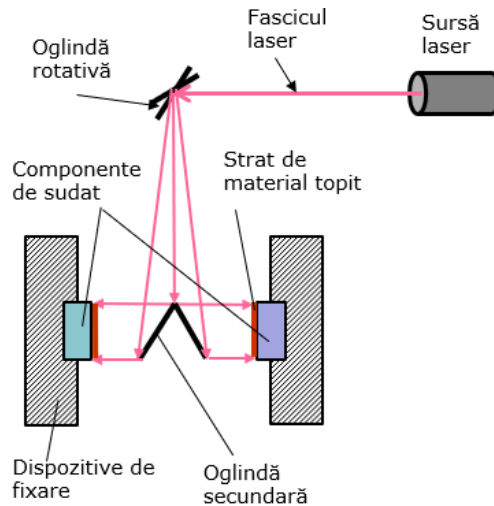


Figura 4.43. Încălzirea suprafețelor prin scanare laser de mare viteză.

În Figura 4.43 este prezentată soluția de scanare de mare viteză, prin care fasciculul laser este divizat, prin intermediul unor oglinzi, pentru a ilumina simultan mai multe suprafețe ale componentelor care urmează a fi sudate. Oglinda rotativă are rolul de a direcționa fasciculul laser, în timp ce oglinzile secundare au rolul de a mări (prin rotire) dimensiunea suprafețelor încălzite.

Sudarea prin transmisie laser (TTIr) se bazează pe conceptul de transmitere a radiațiilor laser, cu lungimi de undă ( $\lambda$ ) între 800 și 1100 nm, printr-una dintre componente, în timp ce a doua componentă absoarbe radiația pe interfața de îmbinare. Absorbția radiației laser are ca rezultat încălzirea și topirea interfeței de contact, ceea ce permite sudarea componentelor (Figura 4.44) [38].

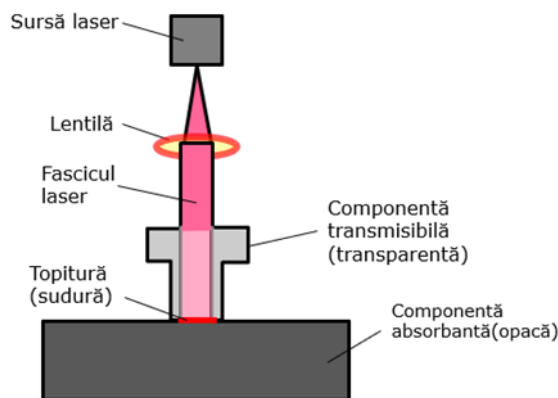


Figura 4.44. Sudarea prin transmisie laser (TTIr) a materialelor polimerice.

Sudarea TTIr este utilizată preponderent în aplicații din domeniul auto și medical. Este o metodă foarte potrivită pentru aplicații care necesită îmbinări ermetice, cu generare redusă de microparticule, rezultate în urma oricărui procedeu uzual de sudare.

Sudarea TTIr este, în prezent, cea mai utilizată tehnologie pentru sudarea laser a materialelor polimerice datorită următoarelor avantaje:

- permite ca piesele să fie plasate în echipamentul de sudare în poziția și orientarea finală;
- permite sudarea unor componente cu o geometrie complexă, care pot fi dificil de sudat prin alte procedee (cu element încălzitor, prin vibrații, etc);
- timp de ciclu redus (cuprins între 1 și 5 s), fiind similar cu sudarea prin vibrații, dar mult mai scurt decât la sudarea cu element încălzitor;
- produsele finite își păstrează calitățile estetice de dinainte de sudare datorită faptului că procesul de sudare este non-invaziv.

O limitare importantă a sudării TTIr este legată de alegerea materialelor de sudat. Dacă una dintre componente trebuie să fie transparentă, pentru a permite trecerea și transmiterea radiațiilor, cealaltă componentă trebuie să fie absorbantă. De obicei, acest lucru este realizat prin adăugarea de pigmenți pe bază de carbon sau a unui colorant absorbant de radiații laser.

La tehnologia TTIr există patru modalități de transmitere a energiei laser în componentele de sudat [38,55]:

- scanare la viteză redusă;
- scanare la viteză mare;
- iluminare continuă;
- sudare cu mască.

Metoda de sudare cu scanare laser la viteză redusă presupune fixarea pieselor într-un dispozitiv și translatarea sursei laser pe suprafața de sudat. Metoda are o limitare semnificativă din cauza faptului că focalizarea fasciculului laser este foarte concentrată (localizată), iar topirea materialului în zona de îmbinare nu are loc simultan pe întreaga suprafață de sudare (Figura 4.45) [38].

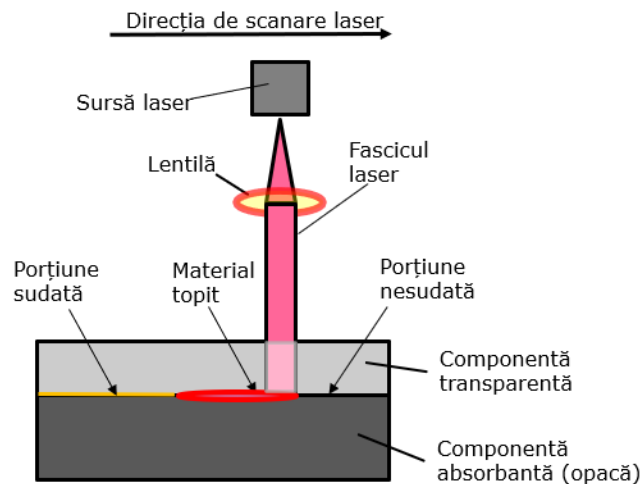


Figura 4.45. Scanarea laser la viteză redusă și apariția fenomenului de „localizare” a încălzirii.

Localizarea încălzirii poate duce la apariția unor suduri inconsistente sau la deformații necontrolate ale pieselor finite. Această tehnică de sudare se recomandă în cazul pieselor de dimensiuni mici.

La metoda de sudare prin scanare de mare viteză, sursa laser este translatată pe suprafața piesei cu o viteză suficient de mare, astfel încât fasciculul laser revine în orice punct al cordonului de sudură înainte ca materialul topit să se solidifice. Metoda permite topirea întregii suprafețe de îmbinare în timpul unui ciclu de sudură.

Metoda de sudare cu iluminare laser continuă utilizează mai multe surse care iluminează întreaga suprafață în timpul unui ciclu de sudură. Procedul este utilizat la piese cu geometrie complexă.

Sudarea cu mască utilizează o sursă continuă de iluminare laser (1), care este trecută printr-o mască (3). Măscă blochează expunerea la lumină a anumitor porțiuni ale componentelor de sudat (4 și 5), permițând ca zone predefinite să fie topite în vederea sudării. Un exemplu de utilizare a acestei metode de sudare, brevetat de firma Leister, este prezentat în Figura 4.46 [38, 55].

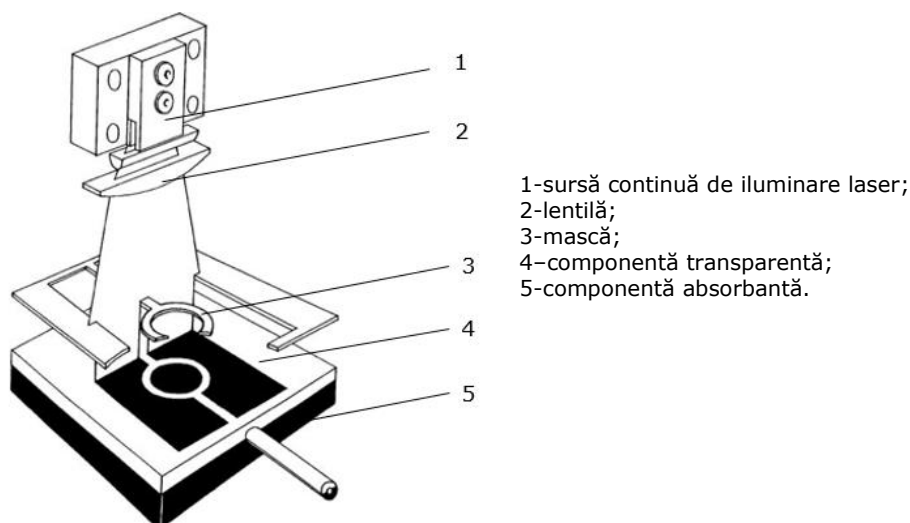


Figura 4.46. Exemplu de sudare TTIr cu mască. Copyright by Leister®

În ultimii ani au fost dezvoltate tehnologii laser care permit sudarea unor piese de complexitate tot mai ridicată [38, 55].

Una dintre tehnologii se bazează pe difracția optică, prin care un fascicul laser poate fi redimensionat și remodelat în forme complexe, în vederea realizării de microsuduri (Figura 4.47).

Prin tehnologia prezentată în Figura 4.47, forma fasciculului laser generat de sursă este modificată la trecerea prin elementul de difracție și remodelată după un anumit șablon [38].

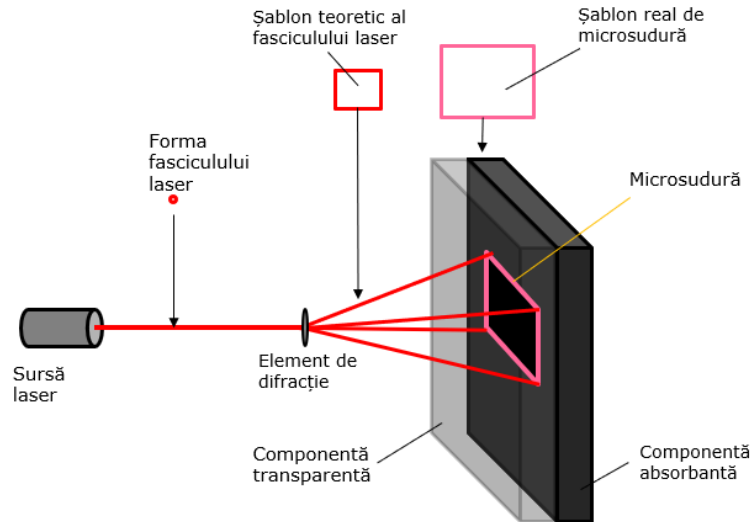


Figura 4.47. Sudarea laser cu element de difracție optică [38].

Aceeași firmă Leister a dezvoltat o tehnologie prin care capul laser (1) are un rol dublu: de scanare și de fixare a componentelor de sudat (Figura 4.48) [55].

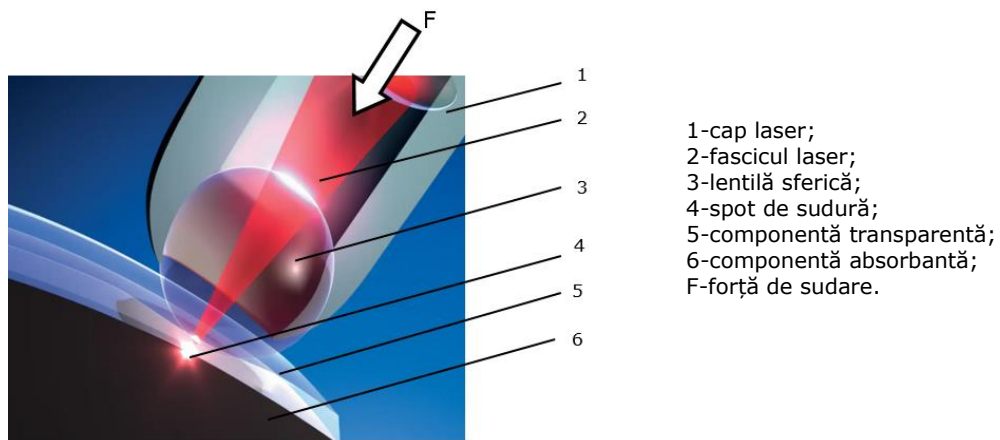


Figura 4.48. Tehnologia de sudare de tip „Globo Welding”. Copyright by Leister®

În capul laser este încorporată o sferă rotativă (3) care acționează atât ca o lentilă cât și ca un aplicator de forță. Prin utilizarea acestei tehnologii, care poartă denumirea de „Globo Welding”, fasciculul laser (2) și forța aplicată (F) sunt coaxiale, ceea ce permite realizarea unui spot de sudură (4) între componentele de sudat (5,6) cu geometrie complexă.

Dezvoltări recente legate de tehnologia de sudare cu laser se referă la coloranți și pigmenți. Utilizarea de coloranți cu absorbție ridicată permite ca subansamblele de piese de tip transparent-transparent să poată fi sudate cu succes [38, 52].

Din cauza existenței unei game largi de moduri de încălzire, nu este posibilă o definire standard a parametrilor principali de proces pentru sudarea cu laser. Cu toate acestea, există parametri comuni pentru care se pot stabili valori orientative: puterea laser, distanța de lucru, viteza de sudare, densitatea energetică a puterii laser livrate, lungimea de undă, distribuția lungimii de undă, dimensiunea și geometria spotului laser, timpul de ciclu și forța de sudare.

Acherjee et al [73] au studiat influența parametrilor principali de sudare asupra rezistenței mecanice a sudurilor în cazul sudării prin transmisie laser. Au fost sudate prin suprapunere piese din material de tip PMMA. Creșterea puterii laserului a generat o creștere a rezistenței mecanice și a lățimii sudurilor, în timp ce o creștere a vitezei de deplasare a fasciculului laser a condus la scăderea celor doi parametri. Spre exemplificare, la o putere laser de 19 W și o viteză de 420 mm/s a rezultat o rezistență a sudurii de 35 MPa, în comparație cu o rezistență de 53 MPa obținută la o putere laser de 25 W și o viteză de 300 mm/s.

Poopat, Benatar și Potente au studiat sudarea cu laser, cap la cap, în cazul materialelor pe bază de PE și PP [18, 54]. Au fost obținute rezultate foarte bune ale rezistenței sudurilor, care în multe situații au egalat rezistența materialului de bază.

Prin utilizarea tehnologiei laser se pot suda o gama largă de materiale polimerice. Pot fi îmbinate repere din același material sau din materiale diferite. În Tabelul 4.18 sunt prezentate diferite combinații de materiale polimerice din care sunt fabricate componentele transmisibile respectiv absorbante, sudate cu tehnologia laser [51].

Tabelul 4.18. Combinații posibile de materiale polimerice sudate cu tehnologii laser [51].

Transmisibil \ Absorbant	ABS	ASA	MABS	PA 12	PA 612	PA 6	PA 66	PBT	PC	PC/ABS	PE-HD	PE-LD	PEEK	PES	PMMA	POM	PP	PPS	PS	PTFE	SAN	TPE	
ABS	■	■	■			■	■	■	■		■	■		■	■	■	■		■		■	■	
ASA	■	■	■			■	■	■	■						■	■	■					■	
MABS	■	■	■			■	■	■						■	■	■	■					■	
PA 12				■	■	■	■	■			■	■		■	■	■	■						
PA 612				■	■	■	■	■							■	■	■						
PA 6				■	■	■	■	■			■	■			■	■	■			■			
PA 66				■	■	■	■	■	■		■	■			■	■	■	■	■	■			■
PBT	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■		■	■	■	■					■	■
PC	■						■	■	■		■	■			■		■	■	■		■	■	■
PC/ABS	■	■						■	■	■					■							■	■
PE-HD	■			■		■	■	■	■		■	■			■	■	■			■		■	
PE-LD	■			■		■	■	■	■		■	■			■	■	■	■		■		■	
PEEK													■										
PES	■	■	■			■	■	■						■		■	■			■		■	
PMMA	■		■			■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■		■	■
POM	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■		■	■	■	■	■	■	■		■	■
PP	■	■	■	■	■	■	■	■	■			■		■	■	■	■	■	■	■		■	■
PPS				■	■	■	■	■	■					■	■	■	■	■	■	■		■	■
PS	■	■	■			■	■	■	■					■	■	■	■	■	■	■		■	■
PTFE															■	■	■	■	■	■	■		■
SAN	■	■	■			■	■	■	■		■	■			■	■	■	■	■	■		■	■
TPE							■	■	■								■	■	■	■		■	■

■ sudură excelentă   ■ sudură bună   ■ sudură slabă   ■ nu se pot suda   ■ nu există cercetări disponibile

Calitatea sudurilor laser la îmbinarea componentelor din același material poate fi foarte bună. Pot fi obținute suduri excelente și la sudarea componentelor din materiale diferite. În toate aplicațiile însă, trebuie respectate cerințele de transmisibilitate a radiațiilor laser în componentele de sudat.

#### 4.6.1 Sudarea cu laser a bilelor deo roll

În cazul fabricării bilelor de deo roll au fost identificate două variante posibile de sudare cu laser:

A. Focalizarea fascicului laser pe interfața dintre cele două semisfere aflate în contact, sincronizată cu rotirea dispozitivului de poziționare și fixare a semisferelor pentru a asigura o încălzire uniformă a zonei de îmbinare. Fasciculus laser este direcționat perpendicular pe zona ecuatorială de contact al celor două semisfere. Ulterior, are loc faza de presare și refulare a materialului topit (Figura 4.49).

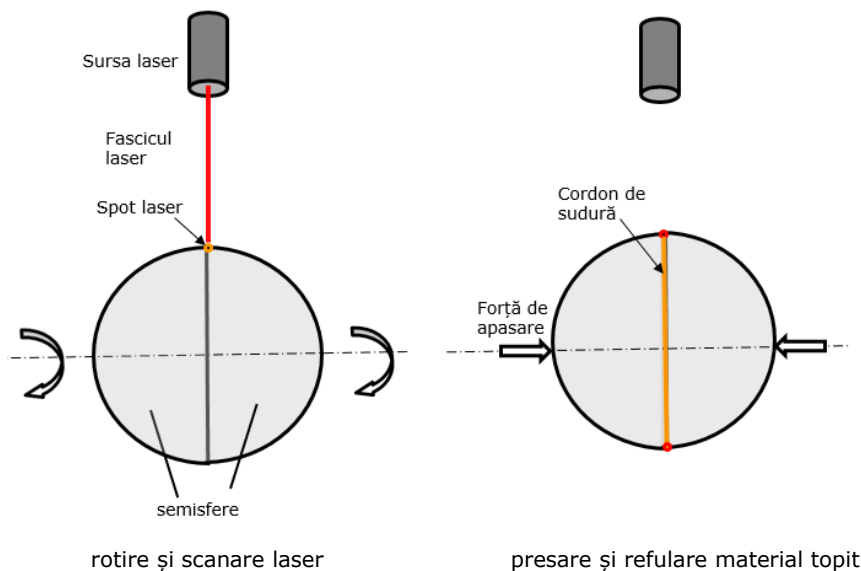


Figura 4.49. Sudarea cu fascicul laser prin rotirea semisferelor.

Această variantă de sudare este complicată întrucât necesită rotirea semisferelor, ca operație distinctă a procesului de sudare, fapt ce influențează productivitatea unei linii de fabricație în serie mare.

B. Focalizarea fascicului laser pe un cerc și încălzirea simultană de tip „blitz” a suprafețelor de îmbinare. Principiul de lucru este asemănător celui utilizat în tehnologia de sudare laser cu element de difracție.

Varianta B (Figura 4.50) presupune ca semisfera superioară (1) să fie laser transparentă, iar semisfera inferioară (2) să fie realizată dintr-un material absorbant. Fasciculus laser (4), generat de sursa (5), va încălzi preponderent zona de contact (3)



dintre cele două semisfere. După topirea zonală a materialului pe interfața de contact se aplică o presiune de sudare în vederea realizării îmbinării sudate.

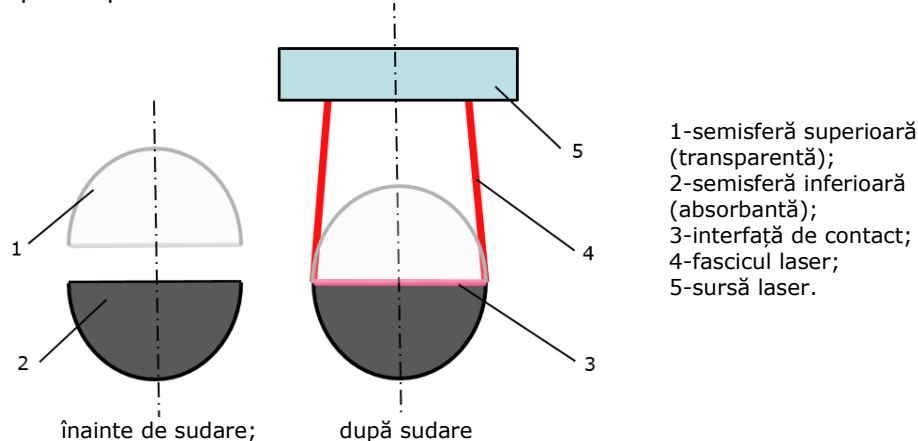


Figura 4.50. Sudarea cu laser de tip „blitz” a bilelor de deo roll.

Această metodă de sudare implică pigmentarea piesei receptoare. Utilizarea unor coloranți laser absorbanți poate duce la apariția unor diferențe de nuanță între cele două semisfere. Fiind un produs destinat industriei cosmetice, această tehnologie ar putea fi limitativă.

Un alt inconvenient poate fi generat de dispozitivele de fixare a semisferelor superioare, care pot interfera cu fasciculele laser (Figura 4.51) [51].

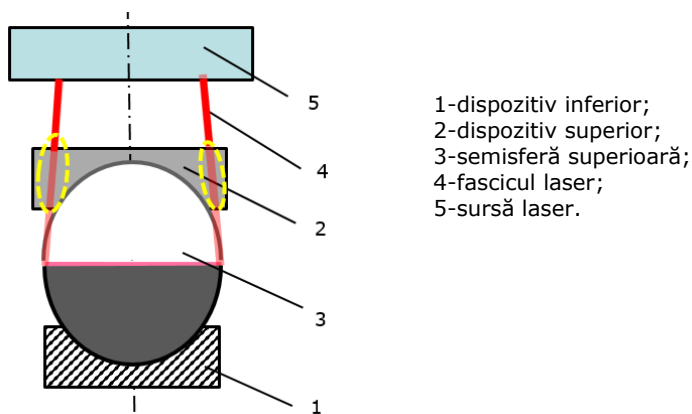


Figura 4.51. Interferența fascicului laser cu dispozitivul de fixare a semisferei superioare.

Conform Figurii 4.51, dispozitivul superior (2), în care este fixată semisfera superioară, interferează cu fasciculul laser (4). Dacă dispozitivul este fabricat din metal, acesta va diminua transmiterea fascicului laser către cordonul de sudură. O soluție de remediere presupune confecționarea dispozitivelor din sticlă sau material acrilic transparent care să permită trecerea fascicului laser. În ipoteza transpunerii în linii de fabricație de serie mare, dipozitivarea unor posturi multiple de lucru poate crea dificultăți semnificative.

#### 4.6.2 Program experimental de sudare cu laser a bilelor de deo roll

În cadrul programului experimental, derulat de Institutul de Cercetare & Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale - ISIM Timisoara, au fost efectuate teste de sudare cu laser a bilelor de deo roll, prin utilizarea celor două variante prezentate mai sus. Au rezultat multe bile cu arsuri de material sau inconsistențe ale cordonului de sudură (Figura 4.52).



crăpături pe cordonul de sudură

arsuri

Figura 4.52. Bile sudate cu tehnologie laser.

Având în vedere complexitatea aplicării tehnologiei laser la sudarea bilelor de deo roll, s-a decis întreruperea cercetărilor pentru acest procedeu.

Elementele de caracterizare a procedurii de sudare cu laser a bilelor de deo roll sunt prezentate în Tabelul 4.19.

Tabelul 4.19. Elementele de caracterizare a procedurii de sudare cu laser a bilelor deo roll.

Procedeu (tip) de sudare	Cu radiații laser
Timp de sudare	Mic
Forță de sudare	Mică
Tip de repere	Diferite
Calitatea sudurii	Slabă, necesită cercetări suplimentare
Productivitate	Neevaluată

## 4.7 Sudarea prin frecare a materialelor polimerice

Sudarea prin frecare este un procedeu de sudare mecanică, în care energia mecanică generată de frecarea reperelor este transformată în căldură [39].

Sudarea prin frecare prezintă o serie de avantaje:

- sudurile realizate sunt de bună calitate;
- procesul de sudare este mai rapid în comparație cu alte procese de sudare;
- costul pentru realizarea unui stand experimental este scăzut;
- posibilitatea automatizării complete a procesului;
- deformații mici după sudare datorită timpului scurt de sudare și datorită temperaturilor de lucru scăzute.

Cercetătorii Grewell și Benatar [38] au identificat patru variante principale de sudare prin frecare, care se diferențiază prin geometria mișcării relative:

- frecare liniară;
- frecare prin orbitare;
- frecare prin rotire;
- frecare unghiulară.

Sudarea prin frecare liniară și orbitare sunt foarte asemănătoare și se utilizează pentru o gamă largă de geometrii ale pieselor de sudat. Sudarea prin rotire și sudarea unghiulară sunt aplicabile doar pieselor cu o configurație circulară. Toate procedeele prezentate mai sus se bazează pe mișcarea relativă a pieselor care urmează a fi îmbinate și transformarea mișcării de frecare în căldură.

În Figura 4.53 este prezentat, schematizat, procedeu de sudare prin frecare liniară pe direcții diferite: longitudinală și transversală. Sursa mișcării este dată de vibrațiile induse într-unul dintre repere de sudat, al doilea reper fiind considerat fix [38].

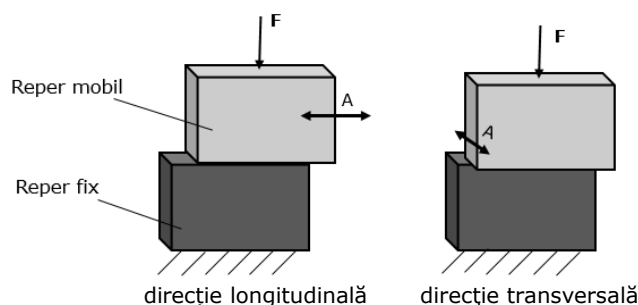


Figura 4.53. Sudarea liniară prin frecare pe direcție longitudinală și transversală.

Sudarea prin frecare liniară are anumite limite și se pretează la sudarea suprafețelor de lungime relativ mare. În cazul în care direcția vibrațiilor este perpendiculară pe direcția pieselor de sudat, există riscul obținerii unor suduri slabe calitativ. Astfel, în cazul unor piese cu pereți subțiri are loc o deviere și o scădere a intensității mișcării relative între suprafețele aflate în contact. Pentru remedierea acestei deficiențe, în pereții pieselor de sudat se prevăd nervuri de rigidizare.

La frecarea prin orbitare, mișcarea relativă între reperele de sudat are loc cu o viteză constantă [38], amplitudinile în ambele direcții ( $A_x$  și  $A_y$ ) fiind considerate egale (Figura 4.54).

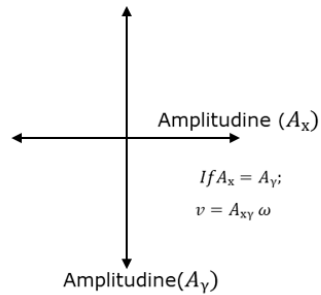


Figura 4.54. Reprezentarea amplitudinilor la sudarea prin orbitare.

Mișcarea relativă pe ambele direcții disipează o energie mult mai mare în îmbinarea sudată în comparație cu mișcarea prin vibrații liniare. Viteza în mișcarea de frecare prin orbitare este redată conform [38] cu ajutorul ecuației 4.6:

$$v_{mfo} = A_{xy} \omega \quad (4.6)$$

unde:

$v_{mfo}$  - viteză relativă în mișcarea de frecare prin orbitare  
 $A_{xy}$  - amplitudine rezultantă pe axele x și y  
 $\omega$  - viteză unghiulară

În cazul sudării prin frecare de rotire, cunoscută în literatura internațională și sub denumirea de „spin welding” [38, 61], mișcarea relativă a reperelor de sudat se realizează pe o traiectorie circulară (Figura 4.55).

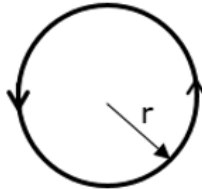


Figura 4.55. Traiectoria mișcării relative la sudarea prin rotire.

Viteza relativă a reperelor la sudarea prin frecare de rotire poate fi redată cu ajutorul relației:

$$v_{mfr} = r \omega \quad (4.7)$$

unde:

$v_{mfr}$  - viteză relativă la sudarea prin frecare de rotire  
 $r$  - rază de rotație  
 $\omega$  - viteză unghiulară

Această variantă de sudare se aplică cu succes în cazul pieselor cu geometrie circulară (piese tubulare, semisferice, conice, etc).

La sudarea prin frecare unghiulară, mișcarea relativă a celor două repere de sudat are loc pe un arc de cerc (Figura 4.56)

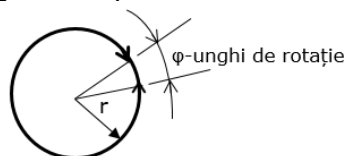


Figura 4.56. Traiectoria mișcării relative la sudarea prin frecare unghiulară.

În comparație cu sudarea de frecare prin rotire, în cazul sudării prin frecare unghiulară, viteza periferică este dependentă și de unghiul de rotație ( $\varphi$ ), conform [38]:

$$v_p = \frac{2r\omega\varphi}{\pi} \quad (4.8)$$

unde:

- $v_p$  - viteză periferică la sudarea prin frecare unghiulară
- $r$  - rază de rotație
- $\omega$  - viteză unghiulară
- $\varphi$  - unghi de rotație

Această variantă se aplică preponderent pieselor care nu au o geometrie perfect circulară și unde rotația completă a piesei nu este posibilă.

Pe baza ecuației (4.8) se poate calcula puterea disipată [38]:

$$P = F_f v \quad (4.9)$$

unde:

- $P$  - putere disipată prin frecare
- $F_f$  - forță de frecare
- $v$  - viteza relativă

Parametrii principali care definesc sudarea prin frecare sunt definiți în Tabelul 4.20 [38].

Tabelul 4.20. Parametrii principali care definesc sudarea prin frecare.

Parametru de proces	Descriere
Viteză de rotație (la sudarea prin rotire)	Numărul de rotații pe secundă al dispozitivului de sudare
Unghi de rotație (la sudarea unghiulară)	Unghiul de rotație al dispozitivului de sudare
Interpenetrare	Distanța pe care are loc întrepătrunderea reperelor de sudat ca rezultat al topirii suprafețelor aflate în contact
Timp de sudare	Durata de timp în care mișcarea relativă este activată
Timp de menținere	Durata de timp în care piesele sunt menținute sub presiune după încălzire
Forță de sudare	Mărimea forței de apăsare a pieselor în timpul sudării

Influența parametrilor de proces asupra calității sudurilor la diferite materiale termoplastice a fost evaluată de Tappe și Potente [61]. În cadrul acestor evaluări au fost sudate prin frecare de rotație piese cilindrice din materiale precum PEID, PEJD, PA, PS și ABS. A fost evaluată influența forței de sudare, a vitezei de rotație, a timpului de sudare și a timpului de menținere. Coeficienții de calitate ai sudurilor, definiți ca raport procentual între rezistența sudurii și rezistența materialului de bază, sunt prezentați în Tabelul 4.21 [18].

Tabelul 4.21. Coeficienții de calitate ai sudurilor obținute prin frecare.

Material	Simbol	Coeficienti de calitate a sudurii (%)
Polietilenă de înaltă densitate	PEID	80-100
Polietilenă de joasă densitate	PEJD	80-100
Poliamidă	PA	20-45
Polistiren	PS	20-45
Acrilonitril butadien stiren	ABS	70

Așa cum se observă din Tabelul 4.21, cei mai buni coeficienți de calitate s-au obținut la polietilene (PEID și PEJD), care sunt materiale semicristaline. Cele mai mici valori ale coeficientului de calitate s-au obținut la PA și PS, care sunt materiale amorfe.

Conform lui Stoke, sudarea prin frecare are patru faze distincte [38, 60] care pot fi reprezentate prin măsurarea cantității de material topit în funcție de timp, așa cum se poate vedea în Figura 4.57.

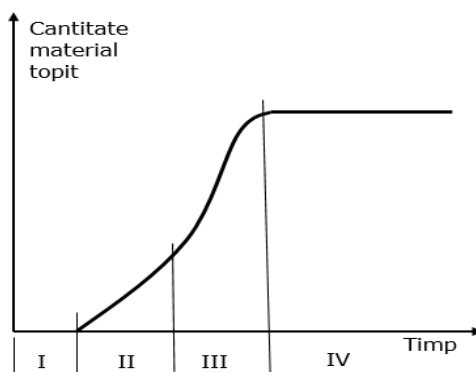


Figura 4.57. Variația cantității de material topit ca funcție de timp la sudarea prin frecare [38].

Cele patru faze ale sudării prin frecare sunt:

- în prima fază, încălzirea este generată prin frecarea suprafețelor de contact solid/solid. În cazul materialelor termoplastice cu un coeficient scăzut de frecare, sudarea este mai dificilă. Materialele polimerice, cum ar fi polietilena sau polipropilena, necesită forțe de apăsare ridicate, pentru a genera forțe de frecare mari;

- a doua fază este faza de tranziție în care încălzirea prin frecare solid/solid este înlocuită de încălzirea vâscoasă prin deformarea prin forfecare a stratului subțire de topitură care s-a format pe interfața de contact dintre piese. În timpul fazei de tranziție, grosimea stratului topit crește până la atingerea celei de-a treia faze, cunoscută și sub numele de faza de echilibru;
- faza de echilibru este considerată faza optimă pentru a opri mișcarea relativă a pieselor. În această fază, rata de generare a topiturii tinde să compenseze rata de expulzare a materialului topit. Într-un astfel de moment, generarea suplimentară de material topit nu mai contribuie la o rezistență mai mare a sudurii, ci doar la apariția unor bavuri excesive în cordonul de sudură;
- în faza finală, materialul din cordonul de sudură este lăsat să se solidifice sub efectul unei presiuni de menținere.

#### 4.7.1 Procedee tehnologice de sudare prin frecare de rotire a materialelor polimerice

Cel mai utilizat procedeu de sudare prin frecare de rotire este sudarea cap la cap. Sudarea cap la cap se poate realiza prin rotirea unui singur reper sau prin rotirea ambelor repere [39].

La sudarea prin *rotirea unui singur reper*, unul dintre repere este fix, celălalt se rotește cu viteză constantă. Concomitent cu mișcarea de rotație, cele două repere sunt presate unul față de celălalt cu o forță axială. În momentul în care are loc plastifierea materialului, rotația este oprită menținându-se constantă presiunea axială aplicată reperelor de sudat (Figura 4.58).

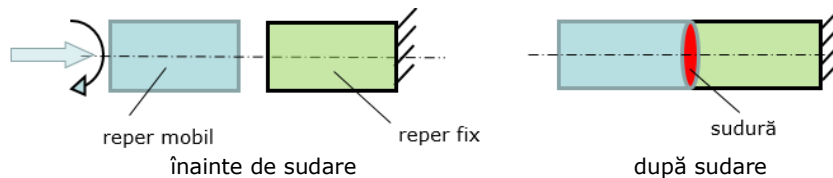


Figura 4.58. Sudarea prin frecare cap la cap prin rotirea unui singur reper.

În timpul fazei de sudare, materialul topit este împins spre exterior, sub influența presiunii axiale, formându-se astfel cordonul de sudură.

La sudarea prin *rotirea ambelor repere*, acestea se rotesc în sens invers unul față de celălalt (Figura 4.59).

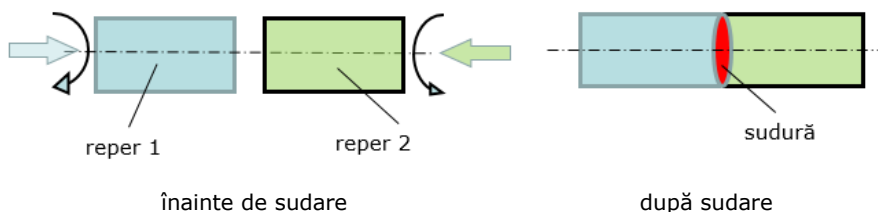


Figura 4.59. Sudarea prin frecare cap la cap prin rotirea ambelor repere.

#### 4.7.2 Tehnologii noi de sudare prin frecare

În sistemele clasice de sudare prin frecare, mișcarea de rotație este produsă de motoare electrice sau pneumatice, energia cinetică fiind stocată într-o volantă. În sistemele noi, mișcarea este produsă de servomotoare care permit accelerarea rapidă sau frânarea aproape instantanee [38]. Prin intermediul acestor sisteme se reduce semnificativ tensiunea de forfecare a topiturii în timpul solidificării, ceea ce permite obținerea unor suduri cu o rezistență mecanică mult mai bună. Aceeași tehnologie a condus la dezvoltarea sudării prin frecare unghiulară pentru situațiile în care efectuarea unor rotații complete nu este posibilă [38].

O altă tehnologie inovativă presupune dezvoltarea unor sisteme hibride care utilizează încălzitoare cu infraroșu pentru a preîncălzi suprafețele care urmează a fi puse în contact prin frecare [38]. S-a constatat că această procedură înmoaie vârfurile asperităților și le permite să se deformeze fără a genera ruperea acestora în microparticule în timpul fazei de sudare prin frecare. Această abordare reduce semnificativ și timpul de ciclu al procesului de sudură.

#### 4.7.3 Sudarea prin frecare a bilelor de deo roll

Programul experimental de sudare prin frecare a bilelor de deo roll a fost realizat în cadrul Institutului Național de Cercetare & Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale - ISIM Timișoara.

La îmbinarea prin frecare a bilelor de deo roll s-a utilizat metoda de sudare prin frecare de rotație. Procesul de sudare cuprinde următoarele faze:

- antrenarea în mișcare de rotație, cu viteza constantă a uneia dintre semisfere. A doua semisferă, centrată în raport cu prima semisferă, este antrenată în mișcare de translație înspre semisfera aflată în mișcare de rotație și presată pe aceasta cu o forță axială;
- semisferele sunt aduse în contact sub acțiunea forței axiale. Datorită frecării suprafețelor aflate în contact, are loc încălzirea și ulterior topirea locală a materialului din zona îmbinării;
- semisferele sunt menținute în contact până la formarea cordonului de sudură.

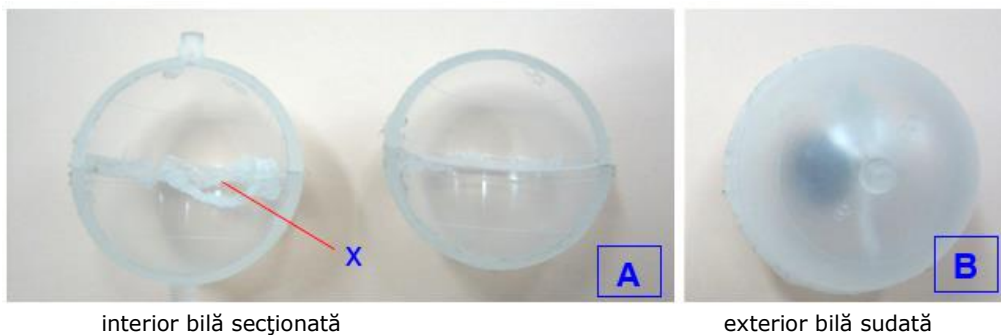
Parametrii utilizați în procesul de sudare sunt prezentați în Tabelul 4.22.

Tabelul 4.22. Parametrii tehnologici de sudare prin frecare.

Forță axială (N)	Turația (rot/min)	Timpul de sudare (s)	Timpul de menținere (s)
4,5	2500	2,5	0,5

Analiza vizuală a bilelor sudate, prezentate în imaginile din Figura 4.60, evidențiază un cordon de sudură cu refulări inestetice de material în interiorul și exteriorul bilei.





interior bilă secționată

exterior bilă sudată

Figura 4.60. Bilă de deo roll sudată prin procedeul de sudare prin frecare.

Având în vedere problemele de calitate și productivitatea redusă, s-a decis oprirea experimentelor de sudare prin acest procedeu.

Elementele de caracterizare a procedurii de sudare prin frecare a bilelor deo roll sunt prezentate în Tabelul 4.23.

Tabelul 4.23. Elementele de caracterizare a procedurii de sudare prin frecare a bilelor de deo roll.

Procedeu (tip) de sudare	Prin frecare
Timp de sudare	Mic
Forță de sudare	Mică
Tip de reper	Diferite
Calitate sudură	Slabă, cu multe defecte vizuale
Productivitate	Neevaluată

## 4.8 Sudarea cu ultrasunete a materialelor polimerice

Sudarea cu ultrasunete se bazează pe efectul termic al activării ultrasonice, manifestat prin creșterea temperaturii în zona de contact a reperelor de sudat [29,39].

Sudarea cu ultrasunete a reperelor din materiale polimerice reprezintă o soluție de îmbinare rapidă și economică. Se utilizează cu ușurință inclusiv la materiale cu structură amorfă, care sunt caracterizate de o plajă largă de temperaturi în faza de înmuiere-topire [39].

Echipamentele de sudare cu ultrasunete sunt relativ complexe și sofisticate în comparație cu echipamentele utilizate în alte procedee de sudare. Schema de principiu a unui echipament de sudare cu ultrasunete este prezentată în Figura 4.61 [74].

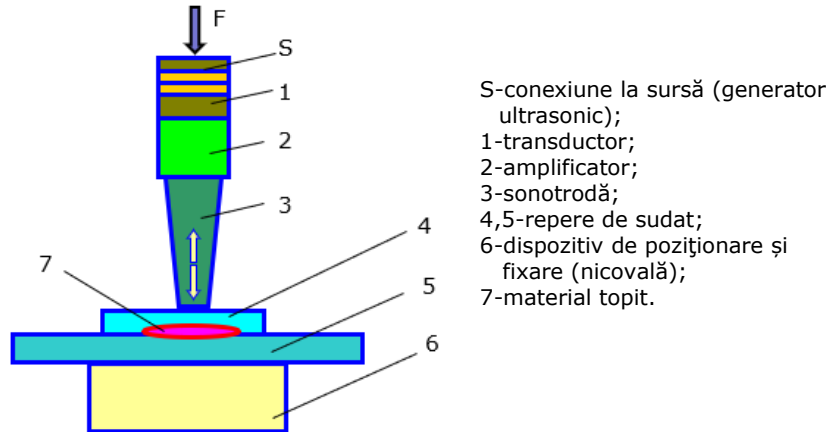


Figura 4.61. Schema de principiu a unui echipament de sudare cu ultrasunete.

Un echipament de sudare cu ultrasunete este alcătuit din următoarele componente:

- sursă;

Sursa (generatorul ultrasonic) utilizează o tensiune electrică cu frecvență standard (50-60 Hz) pe care o transformă într-un semnal electric la o anumită frecvență de lucru (20-40 KHz).

- transductor (convector);

Transductorul are, în general, la bază o ceramică piezoelectrică care convertește semnalul electric în vibrații mecanice de înaltă frecvență. Pe măsură ce cristalele oscilează, acestea se dilată și se contractă fizic, creând o mișcare mecanică măsurabilă (caracterizată prin amplitudinea vârf-vârf) în partea de ieșire a transductorului. Aceste vibrații mecanice pot fi crescute sau scăzute în funcție de configurația amplificatorului sau a sonotrodei.

- amplificator;

Amplificatorul are rolul de transfer și amplificare a oscilațiilor de la transductor către sonotrodă.

- sonotrodă;

Sonotroda este atașată la capătul de ieșire al amplificatorului și are două funcții principale:

- a) introduce vibrațiile ultrasonice în reperi de sudat;
- b) exercită presiunea necesară pentru a forma o sudură omogenă și continuă după topirea suprafețelor de îmbinare.

Materialul sonotrodei nu trebuie să disipeze energia acustică. La sudarea materialelor polimerice se recomandă sonotrode confecționate din oțel aliat, titan sau aliaje pe bază de aluminiu. Cuprul, plumbul, nichelul și fonta nu sunt materiale potrivite pentru construcția unei sonotrode.

Sonotrodele pot avea profile diferite, principalele soluții constructive sunt prezentate în Figura 4.62 [39].

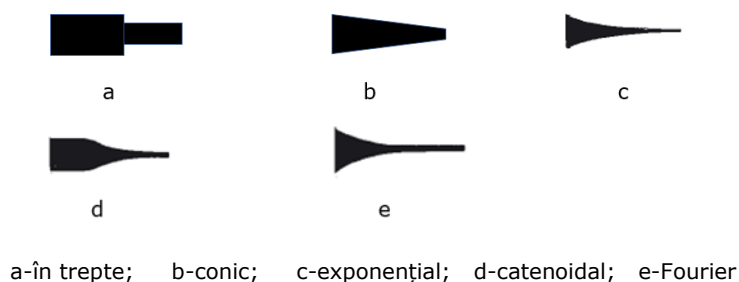


Figura 4.62. Profile uzuale de sonotrode .

Profilele de sonotrodă, prezentate în Figura 4.62, sunt adecvate pentru sudarea cu ultrasunete a pieselor de mici dimensiuni și permit amplificarea vibrațiilor preluate de la transductor. Amplificarea reprezintă un factor important în stabilirea designului sonotrodei.

- dispozitivul de poziționare și fixare (nicovala)

Dispozitivul de poziționare și fixare asigură alinierea corectă a reperelor de sudat în raport cu sonotroda, astfel încât să se mențină o presiune uniformă între reperi în timpul sudării.

În funcție de amplasarea componentelor de sudat, sudarea cu ultrasunete se poate executa în câmp apropiat sau în câmp îndepărtat (Figura 4.63) [29].

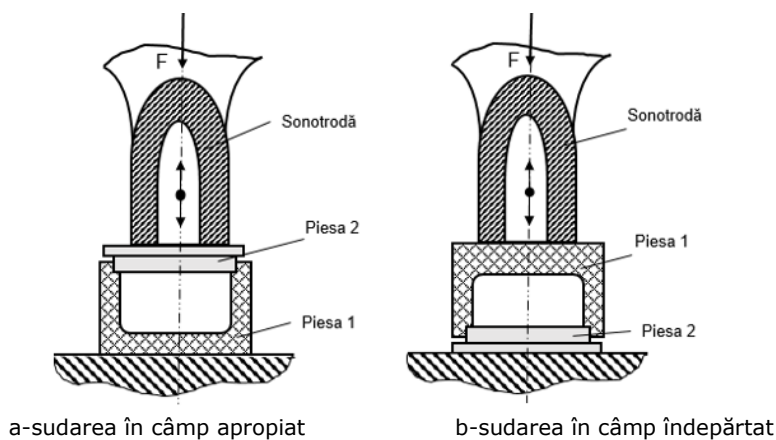


Figura 4.63. Variante de sudare cu ultrasunete [29].

La sudarea cu ultrasunete în câmp apropiat (Figura 4.63-a), distanța maximă dintre sonotrodă și interfața de îmbinare este de aproximativ 6 mm. Sudarea în câmp apropiat prezintă avantajul transmiterii eficiente a energiei în îmbinare, energia disipată fiind redusă.

La sudarea cu ultrasunete în câmp îndepărtat, transmiterea energiei înspre zona de sudare se face prin însăși structura piesei aflate în contact cu sonotroda (Figura 4.63-b). În cazul sudării reperelor din materiale diferite, sonotroda va fi în contact cu piesa din materialul mai dur. Cu cât materialul are o duritate mai mare, pierderile interioare vor fi mai mici, iar coeficientul de transmitere a energiei va fi mai bun. Polimerii semicristalini (PEID, PEJD, PP) sunt mai dificil de sudat cu ultrasunete

în câmp îndepărtat, din cauza cantității mari de energie necesare pentru topirea cristalelor și inițierea difuziei moleculare, o mare parte din energie fiind disipată în reperle de sudat [38].

Proprietățile de sudabilitate cu ultrasunete ale materialelor polimerice uzuale sunt redată în Tabelul 4.24 [29].

Tabelul 4.24. Proprietățile de sudabilitate cu ultrasunete ale materialelor polimerice uzuale.

Material	Stabilitate în		Amplit. Oscilație (μm)	Modul de elast. $E \cdot 10^{-5}$ (daN/cm)	Temp. dezvoltată (°C)	Observații
	Câmp apropiat	Câmp îndepărtat				
PS	f. bună	f. bună	15 ÷ 30	24 ÷ 34	85 ÷ 95	pierderi acustice mici; sudabilitatea scade pe măsură ce reziliența crește
ABS	f. bună	bună	20 ÷ 35	4 ÷ 20	90 ÷ 110	pierderi acustice mici
PP	bună	slabă	30 ÷ 60	8 ÷ 10	150 ÷ 180	aditivii influențează sudabilitatea materialului
PEJD	bună	slabă	25 ÷ 40	1,5 ÷ 2,5	85 ÷ 110	recomandat a se efectua în prealabil teste de sudabilitate
PEID	bună	bună	20 ÷ 40	5,5 ÷ 8	110 ÷ 130	
PVC dur	bună	slabă	20 ÷ 40	24 ÷ 28	85 ÷ 180	
PVC plastifiat	bună	nesudabil		0,1 ÷ 1,2	75 ÷ 130	
PC	f. bună	bună	25 ÷ 40	14 ÷ 22	220 ÷ 250	cerințe deosebite la proiectarea geometriei suprafețelor de îmbinat
PA	f. bună	bună	20 ÷ 35	15 ÷ 21	210 ÷ 260	material higroscopic; necesită uscare în cuptor
PMMA	f. bună	nesudabil	15 ÷ 30	22 ÷ 28	90 ÷ 115	

Sudarea cu ultrasunete a reperelor din materiale diferite se poate realiza doar dacă acestea prezintă compatibilitate la sudare. În Tabelul 4.25 sunt prezentate compatibilitățile la sudarea cu ultrasunete a principalelor materiale polimerice [75].

Tabelul 4.25. Compatibilitățile la sudarea cu ultrasunete a principalelor materiale polimerice.

Reper superior / Reper inferior	PE	PP	EPDM	COP	COC	PS	ABS	ASA	SAN	TPU	PVC	PA6	PA6.6	PC	PET	PBT	PMMA	POM	PI	PEI	PAI	PTFE	ETFE
PE-LD/HD	■	■	■																				
PP	■	■	■																				
EPDM	■	■	■																				
COP				■	■																		
COC				■	■																		
PS						■	■	■			■					■	■						
(M)ABS						■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■					
ASA						■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■					
SAN						■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■					
TPU										■													
PVC						■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■					
PA6												■	■										
PA6.6												■	■										
PC														■	■	■	■	■					
PET															■	■	■	■					
PBT						■	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■					
PMMA						■	■	■	■	■	■	■				■	■	■	■				
POM							■			■							■	■					
PI																			■				
PEI																				■			
PAI																					■		
PTFE																						■	
ETFE																							■

■ sudabilitate bună    ■ sudabilitate posibilă -necesită testare    ■ doar in cazuri excepționale

În Tabelul 4.25 sunt prezentate compatibilitățile de sudare între repere din același material sau din materiale diferite. Deasemenea sunt diferențiate cele două repere, cel superior aflat în contact cu sonotroda, respectiv cel inferior în contact cu nicovala.

#### 4.8.1 Tipuri de îmbinări la sudarea cu ultrasunete

Pentru realizarea unor îmbinări precise, etanșe și rezistente trebuie acordată o mare atenție profilului îmbinării și concentratorilor de energie. Principalele tipuri de îmbinări utilizate la sudarea cu ultrasunete sunt (Figura 4.64) [76]:

- îmbinarea cap la cap în rost I (but joint);
- îmbinarea în rost configurat în trepte (step joint);
- îmbinarea în rost tip inserție configurat în canelură (tongue in groove);
- îmbinarea în rost de formă prin forfecare (shear joint).

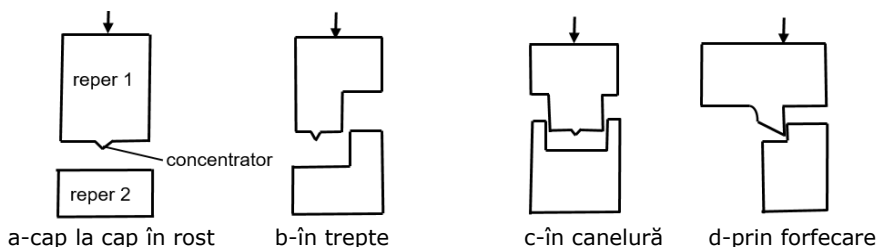


Figura 4.64. Tipuri de îmbinări utilizate la sudarea cu ultrasunete.

a) Îmbinarea cap la cap reprezintă cel mai simplu tip de îmbinare.

Reperul aflat în contact cu sontroda trebuie prevăzut cu concentratori de energie care pot fi în formă de „V” (Figura 4.64-a). Concentratorii au rolul de a limita contactul inițial pe o suprafață cât mai mică, ceea ce va favoriza încălzirea și topirea rapidă a materialului din concentratori [29, 39]. Materialul rezultat din topirea concentratorilor începe să curgă pe suprafețele care urmează să formeze îmbinarea. Pe măsură ce materialul din zona de contact începe să se înmoaie, impedanța scade, ceea ce va determina o topire mai rapidă a materialului din toată zona de îmbinare.

Sudarea polimerilor amorfi este ușor de realizat. Materialele polimerice amorfe au un domeniu de temperatură de înmuiere foarte larg și se pretează foarte bine la sudarea cu ultrasunete deoarece atunci când materialul începe să se topească, o cantitate suficientă de căldură este reținută în topitură pentru a produce o fuziune bună în întreaga zonă de îmbinare [29, 38, 39].

În cazul polimerilor cu structură cristalină sudarea se realizează în condiții mai dificile. Polimerii cu structură cristalină au un punct de topire bine definit, nu trec prin faza de înmuiere și se comportă diferit în comparație cu polimerii amorfi. Atunci când concentratorul de energie se topește și începe să curgă pe suprafața de îmbinare, topitura care este expusă mediului ambiant poate cristaliza înainte de acumularea unei cantități suficiente de căldură pentru realizarea unei îmbinări de calitate. În cazul materialelor polimerice cristaline cu temperatură înaltă de topire, expunerea la aer a topiturii poate provoca oxidarea acesteia, ceea ce va duce în final la fragilizarea sudurii [38,39].

Materialele polimerice cu structură semicristalină au un comportament relativ bun la sudarea cu ultrasunete [29, 38, 39].

Liu et al au efectuat experimente de sudare cu ultrasunete a unor materiale amorfe (PS) și semicristaline (PP) [77]. Ei au observat că timpul de sudare și amplitudinea vibrațiilor sunt parametri care influențează cel mai mult rezistența sudurilor. În cazul PP, rezistența sudurii a fost de trei ori mai mare în comparație cu PS (26 MPa față de 8 MPa), dar a necesitat un aport mai mare de energie pentru realizarea unor suduri optime.

Forma concentratorilor de energie influențează deasemenea calitatea și rezistența sudurii. Chuah [78] a observat o creștere de până la 10% a eficienței sudării în cazul concentratorilor de energie de formă semicirculară în comparație cu cei de formă triunghiulară sau rectangulară.

b) Îmbinarea în rost configurat în trepte asigură o aliniere bună a componentelor de sudat. Îmbinarea sudată prezintă o rezistență foarte bună la forfecare.

c) Îmbinarea în rost tip inserție configurat în canelură asigură o centrare foarte bună a componentelor de sudat și previne propagarea bavurilor spre exteriorul îmbinării.

d) Îmbinarea în rost de formă prin forfecare necesită un consum redus de energie și un timp relativ scurt de sudare întrucât contactul inițial dintre suprafețe este redus și sudarea se realizează progresiv și uniform.

#### **4.8.2 Considerente legate de proiectarea reperelor sudate cu ultrasunete**

Deciziile constructive, privind configurația reperelor în zona de contact, se iau în faza de proiectare, ținându-se cont de următoarele aspecte [29]:

- suprafețele de contact ale reperelor trebuie să fie cât mai reduse pentru a permite o concentrare de energie ultrasonice cât mai mare;
- între reperele de sudat trebuie să se prevadă un joc suficient de mare astfel încât unul dintre repere, de preferință cel aflat în contact cu sontroda, să aibă

posibilitatea să vibreze liber pe celălalt reper, aflat în dispozitivul de fixare. Astfel, se va favoriza degajarea de căldură prin frecare;

- zona îmbinării trebuie prevăzută cu o zonă liberă, de volum redus, care să permită curgerea materialului plastic topit în timpul procesului de sudare. Dacă se omite acest aspect, materialul topit poate migra în interiorul sau exteriorul piesei formând o bavură inestetică;

- suprafața de contact a sonotrodei cu reperul de sudat trebuie aleasă astfel încât să faciliteze introducerea unei cantități corespunzătoare de energie acustică în îmbinare. Totodată, trebuie evitată amprentarea reperului de sudat de către sonotrodă. O suprafață de contact prea mare între reper și sonotrodă generează o energie acustică ridicată care poate duce la degradarea piesei finite.

În Figura 4.65 sunt prezentate câteva forme constructive ale îmbinărilor sudate cu ultrasunete [29].

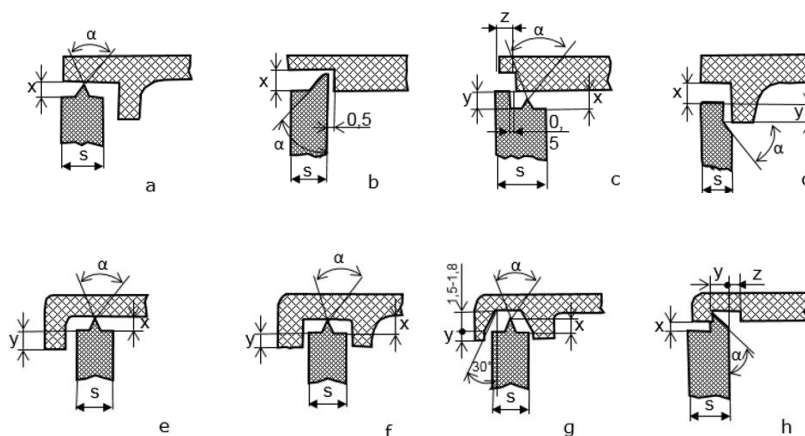


Figura 4.65. Forme constructive ale îmbinărilor sudate cu ultrasunete [29].

Dimensiunile constructive recomandate pentru îmbinările sudate cu ultrasunete sunt redată în Tabelul 4.26 [29].

Tabelul 4.26. Dimensiuni constructive recomandate pentru îmbinările sudate cu ultrasunete.

Fig.	Dimensiuni				
	s [mm]	$\alpha$ [grade °]	x [mm]	y [mm]	z [mm]
a	1 ... 3,5	60 ... 90	0,5 ... 1	....	
b	1,2 ... 3,5	45	0,2 ... 0,8	S	
c	0,8 ... 2,5	60	y - 0,1	S/3	S/3
d	1 ... 3,5	60 ... 70	1.2	1	
e	1 ... 3,5	60 ... 90	0,5 ... 1	>1	
f	1 ... 3,5	60 ... 90	0,5 ... 1	>1	
g	1 ... 3,5	60 ... 90	0,3 ... 0,5	>1	
h	2	45	S/4	S/2	S/10

### 4.8.3 Principalii parametri tehnologici la sudarea cu ultrasunete

Principalii parametri tehnologici ce caracterizează procedeul de sudare cu ultrasunete sunt [29,38]:

- frecvența

Frecvențele utilizate în mod obișnuit la sudarea materialelor polimerice sunt: 20, 30, 35 și 40 kHz. La microîmbinări se pot utiliza frecvențe cuprinse în domeniul 120-160 kHz.

- amplitudinea vibrațiilor ultrasonice

În funcție de natura materialului care se sudează și de grosimea reperelor, s-a determinat experimental că valorile uzuale ale amplitudinilor sunt cuprinse în intervalul 5-50  $\mu\text{m}$ . Limitarea amplitudinii la aceste valori este impusă de rezistența la oboseală a materialului sonotrodei.

- timpul de sudare

Timpul de sudare este dat de perioada în care sunt aplicate vibrațiile. Durata de sudare corectă pentru fiecare aplicație este determinată prin încercări. Este important să se evite suprasudarea.

- timpul de menținere

Timpul de menținere reprezintă timpul în care piesele sunt ținute în contact după faza de sudare propriu-zisă și lăsate să se solidifice fără acțiunea vibrațiilor.

- forța de sudare

Forța de sudare este forța care se exercită asupra componentelor în timpul sudării.

### 4.8.4 Sudarea cu ultrasunete a bilelor de deo roll

Fazele tehnologice ale procedurii de sudare cu ultrasunete a bilelor de deo roll, prezentate în Figura 4.66, sunt:

- poziționarea și fixarea semisferei superioare în sonotrodă și a semisferei inferioare în nicovală;
- punerea în contact a celor două semisfere prin coborârea sonotrodei;
- sudarea celor două semisfere prin activarea blocului ultrasonic;
- evacuarea bilei sudate.

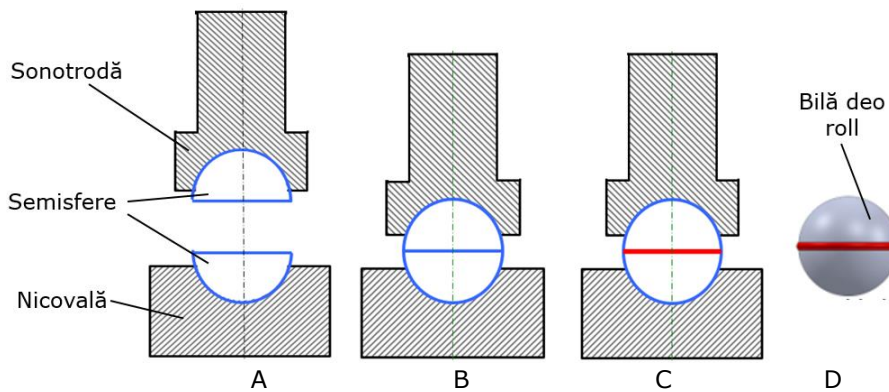


Figura 4.66. Fazele tehnologice ale procedurii de sudare cu ultrasunete a bilelor de deo roll.



#### 4.8.4.1 Experimente de sudare cu ultrasunete a bilelor de deo roll

Experimentele de sudare cu ultrasunete au fost efectuate prin utilizarea a două echipamente de sudare cu frecvențe diferite : 20 kHz, respectiv 35 kHz [79, 80, 81].

##### 4.8.4.1.1 Experimente de sudare cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz

În programul experimental de sudare cu ultrasunete a fost utilizat un echipament specializat de sudare cu ultrasunete, marca Stapla Ultraschal, echipat cu o sonotrodă adaptată pentru sudarea bilelor de deo roll la frecvența de 20 kHz (Figura 4.67).

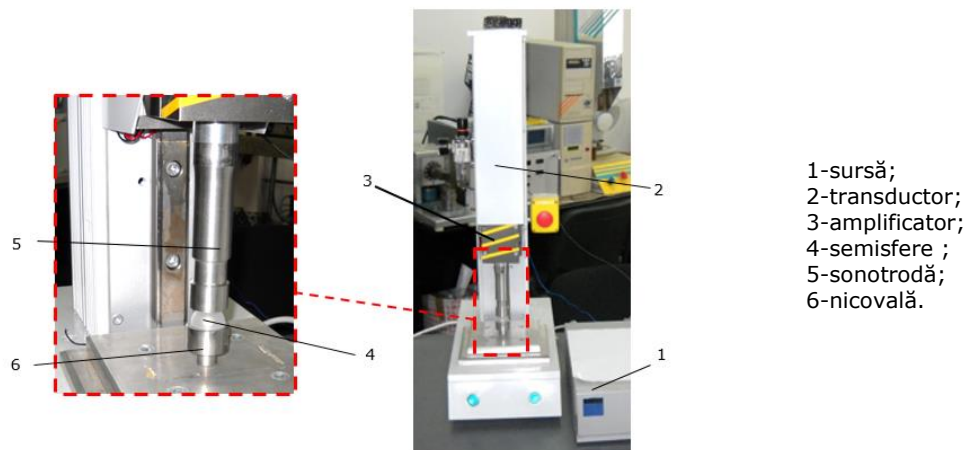


Figura 4.67. Stand experimental de sudare a bilelor de deo roll cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz.

Sursa principală de caldură o constituie energia oscilațiilor mecanice generate de blocul ultrasonic compus din: sursă (1), transductor (2) și amplificator (3). Cele două semifere (4) se sudează eficient numai în cazul în care vibrațiile sunt transmise de la sonotroda (5) înspre zona de îmbinare a semisferelor, în același sens cu forța de apăsare statică.

Semisfera inferioară este amplasată în nicovală (6), care este fixată pe batiul echipamentului de sudare (Figura 4.68).

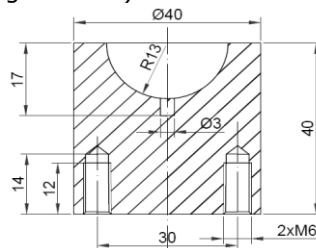


Figura 4.68. Schița dispozitivului de fixare a semisferei inferioare (nicovala).

Poziționarea și fixarea semisferelor în sonotrodă și nicovală se realizează prin intermediul unui sistem vacuumatic.

Absorbția energiei oscilațiilor mecanice se datorează impedanțelor acustice ale materialului reperelor de sudat precum și impedanței acustice a contactului existent între aceste repere. Căldura acumulată în zona cordonului de sudură este generată de trei tipuri de frecări:

- frecarea internă are ca efect încălzirea întregului volum de material polimeric din semisfere;
- frecarea externă în zona de contact dintre semisfera superioară și semisfera inferioară;
- frecarea externă dintre semisfera superioară și sonotrodă.

În zona de contact, semisferele trebuie să prezinte o configurație specifică care să permită sudarea cu ajutorul ultrasunetelor. Soluțiile constructive alese au ținut cont de următoarele aspecte:

1. Suprafețele semisferelor, în zona de contact, trebuie să fie cât mai reduse, pentru a favoriza concentrarea energiei ultrasonice în vederea topirii materialului în zona cordonului de sudură [29]. În acest sens, au fost prevăzuți concentratori de energie în formă de „V” amplasați pe semisfera superioară, aflată în contact direct cu sonotroda (Figura 4.69).

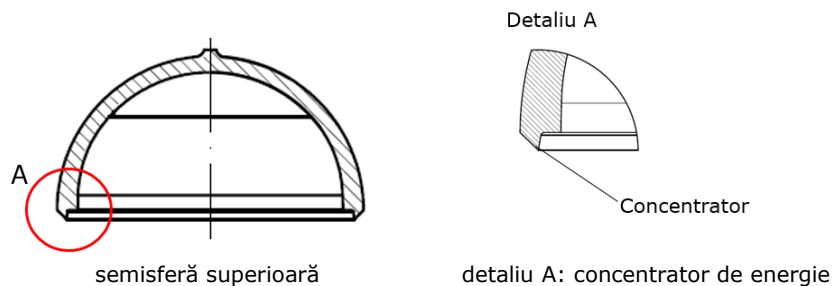


Figura 4.69.Reprezentarea în secțiune a semisferei superioare și a concentratorului de energie.

2. Între suprafețele de contact dintre semisfera superioară (în contact cu sonotroda) și semisfera inferioară (fixată în nicovală) s-a prevăzut un joc tehnologic de 0,1 mm [29]. Acest joc conferă posibilitatea semisferei superioare de a vibra liber pe semisfera inferioară, ceea ce favorizează degajarea căldurii obținute din frecare.

Caracteristicile tehnice ale echipamentului de sudare sunt:

- frecvență de lucru: 20 kHz;
- putere maximă: 2500 W;
- transductor cu generator piezoceramic;
- reglaj digital al parametrilor tehnologici;
- memorie de lucru: 10 programe tehnologice;
- ecran tactil.

Parametrii tehnologici reglabili sunt:

- forță de sudare: 50 - 500 N;
- timp de sudare: 1,5 - 2,5 s;
- amplitudine: autoreglabilă;
- timp de menținere după sudare: 1 - 1,5 s.

Calibrarea sonotrodei s-a realizat pe un stand de măsurare, format dintr-un generator de semnal și un osciloscop cu memorie. Diagrama curbei de variație a stării de solicitare internă a sonotrodei a fost obținută prin programul de simulare Krell Engineering (Figura 4.70).

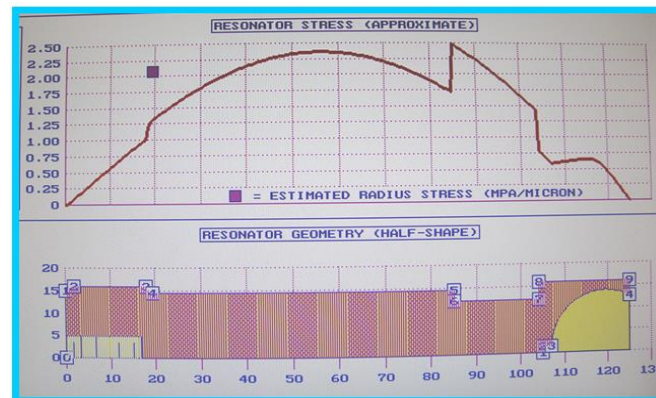


Figura 4.70. Diagrama curbei de variație a stării de solicitare internă a sonotrodei obținută prin programul de simulare Krell Engineering [79].

Din simularea prezentată în Figura 4.70, rezultă o sonotrodă în trepte, cu următoarele dimensiuni de gabarit: lungimea de 125 mm și raza de 15 mm.

Caracteristicile care definesc sonotroda, utilizată la sudarea bilelor de deo roll cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz, sunt redată în Tabelul 4.27.

Tabelul 4.27. Caracteristicile sonotrodei utilizate în programul experimental de sudare cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz.

Material	Lungime sonotrodă (mm)	Diametru sonotrodă (mm)	Factor de amplificare (-)	Solicitare maximă (Mpa)	Coordonată nod oscilație (mm)
C 45	125	30	1,56	86,8	65,00

Dacă luăm în considerare caracteristicile semisferelor de sudat, precum și prinderea sonotrodei în blocul ultrasonic, rezultă forma și dimensiunile tehnologice ale sonotrodei conform Figurii 4.71.

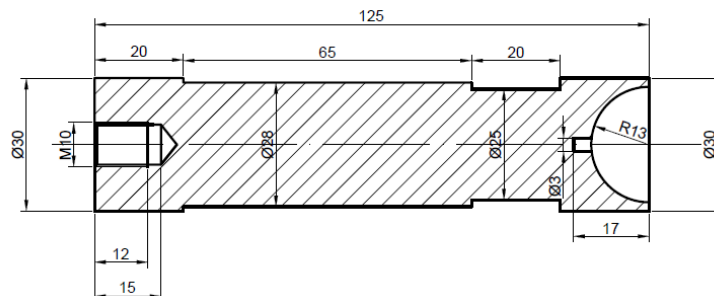


Figura 4.71. Forma și dimensiunile sonotrodei utilizate pentru sudarea cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz a bilelor de deo roll.

Forma sonotrodei în zona de contact cu semisfera superioară a fost configurată astfel încât să se evite efectul de sudare în câmp îndepărtat, motiv pentru care partea activă a sonotrodei copiază forma și dimensiunile semisferei.

În faza de sudare, semisfera intră aproape complet în sonotrodă, iar capătul sonotrodei se va poziționa la o distanță de aproximativ 1 mm față de planul de contact dintre cele două semisfere.

În cadrul programului experimental de sudare cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz a bilelor de deo roll au fost utilizați parametrii tehnologici prezentați în Tabelul 4.28.

Tabelul 4.28. Parametrii tehnologici utilizați la sudarea cu ultrasunete a bilelor de deo roll la frecvența de 20 kHz.

Forță de sudare (N)	Frecvență (kHz)	Putere sursă (W)	Timp de sudare (s)	Timp de menținere (s)
200	20	2000	1,5	1

Bilele sudate, cu parametrii din Tabelul 4.28, au prezentat deviații de la forma sferică și crăpături în cordonul de sudură (Figura 4.72).



deviații de la forma sferică



crăpături în cordonul de sudură

Figura 4.72. Defecte de calitate ale bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 KHz.

Pentru remedierea acestor defecte, s-a mărit timpul de sudare de la 1,5 s la 2 s. Numărul de bile defecte cu abateri de la forma sferică s-a diminuat semnificativ, dar au apărut în continuare crăpături în cordonul de sudură.

Prin creșterea timpului de sudare de la 2 s la 2,5 s s-au obținut rezultate mai bune și în ceea ce privește calitatea cordonului de sudură. În Figura 4.73 se observă aspectul cordonului de sudură în vedere și în secțiune.



bilă sudată în vedere



bilă sudată în secțiune

Figura 4.73. Imagini ale cordonului de sudură obținut cu timpul de sudare de 2,5 s.

Au fost măsurate și cântărite un număr de 16 bile sudate. Valorile măsurate ale diametrelor și maselor bilelor sudate cu timpul de sudare de 2,5 s sunt prezentate în Tabelul 4.29.

Tabelul 4.29. Valorile diametrelor și maselor pentru bilele sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz și timp de sudare de 2,5 s.

Număr probă	Diametru (mm)	Greutate (g)
	$25,7\pm 0,1$	$2,2\pm 0,1$
1	25,23	2,25
2	25,22	2,25
3	25,21	2,25
4	25,25	2,25
5	25,22	2,25
6	25,20	2,25
7	25,21	2,25
8	25,21	2,26
9	25,22	2,26
10	25,23	2,25
11	25,23	2,26
12	25,21	2,25
13	25,21	2,26
14	25,25	2,25
15	25,25	2,25
16	25,24	2,25

Observații preliminare:

1. Masele medii ale bilelor brute obținute prin sudarea cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz sunt cu 25% mai mici față de cele obținute prin tehnologia clasică (2,25 g, respectiv 2,81 g) (Figura 4.74).

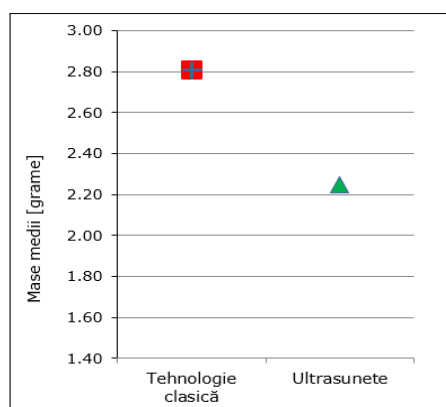


Figura 4.74. Masele medii ale bilelor brute obținute prin tehnologia clasică și prin sudare cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz.

Capabilitățile de proces referitoare la masele bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz sunt prezentate în Figura 4.75.

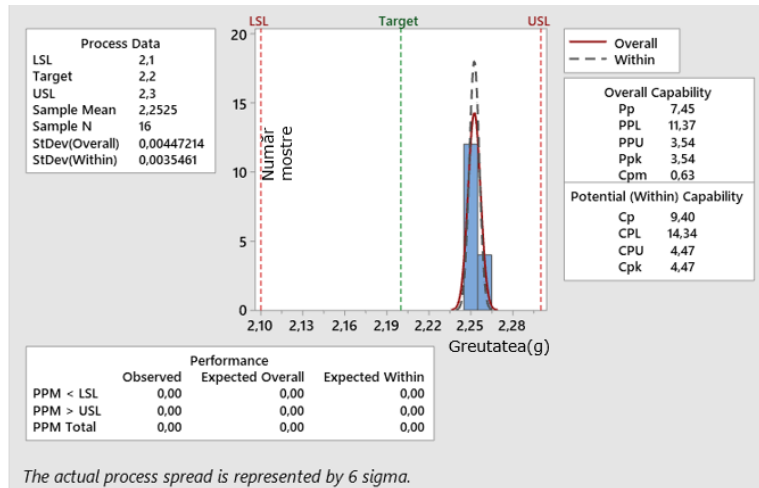


Figura 4.75. Capabilitățile de proces pentru masele bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz.

Capabilitatea generală de proces (Cpk) are valoarea de 4,47 ceea ce ne indică o capabilitate foarte bună a maselor bilelor sudate.

2. Capabilitățile dimensionale ale diametrelor au evidențiat deviații semnificative față de specificațiile impuse (Figura 4.76).

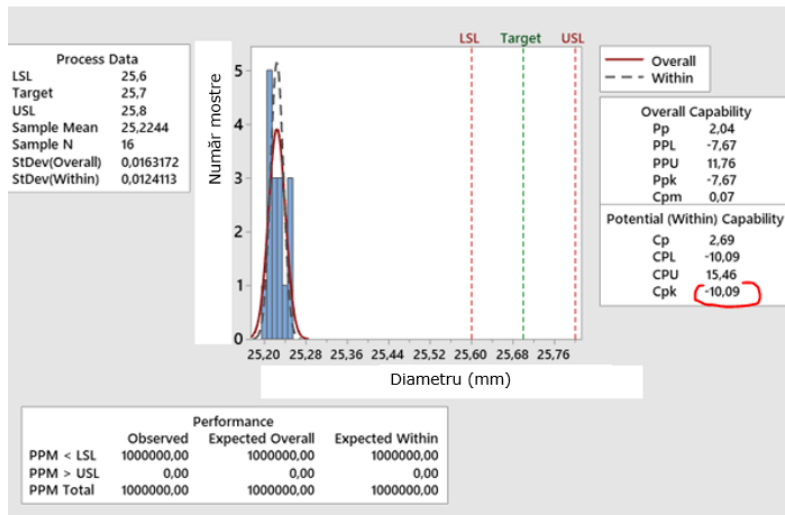


Figura 4.76. Capabilitățile diametrelor bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz.

Conform Figurii 4.76, CPL și Cpk au valori negative. Media diametrelor exterioare (Sample Mean) este de 25,22 mm față de specificația de 25,70 mm (Target). Se observă că toate diametrele bilelor sunt situate sub limita inferioară LSL, dar sunt grupate în jurul valorii medii (Sample Mean). Acest aspect indică faptul că procesul de sudare are un potențial mare de corectare.

#### Concluzii:

Este necesară optimizarea dimensională a bilelor obținute prin sudarea cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz. Soluțiile posibile de remediere sunt:

- modificarea parametrilor de sudare, în sensul realizării unei interpenetrări mai reduse a celor două semisfere în timpul procesului de sudare. Varianta aleasă implică modificarea frecvenței de lucru la 35 kHz;
- creșterea adaosului tehnologic la semisferele brute în zona cordonului de sudură cu 0,24 mm pe direcție axială. Varianta cu adaos tehnologic implică un surplus de material, costuri suplimentare cu materiile prime și poate fi aplicată doar în cazul în care prima variantă nu dă rezultate corespunzătoare.

#### 4.8.4.1.2 Experimente de sudare cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz

Experimentele de sudare a bilelor de deo roll au fost efectuate pe un stand de sudare cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz, marca Herman Ultrasonics (Figura 4.77) [80].

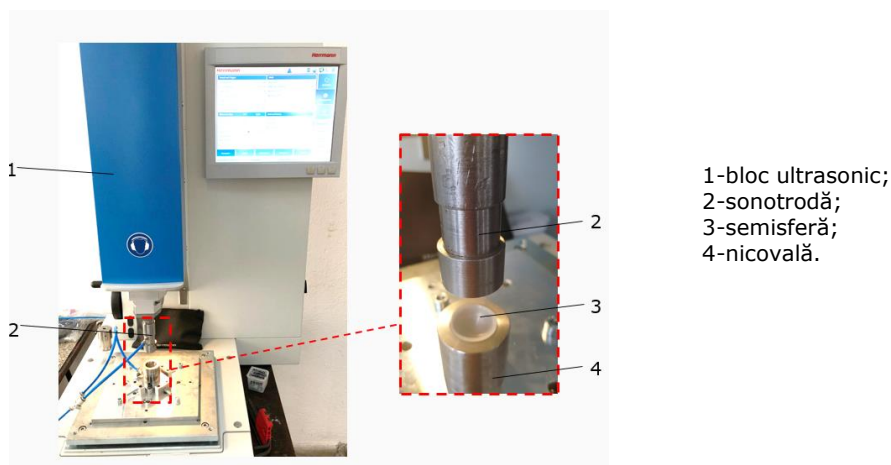


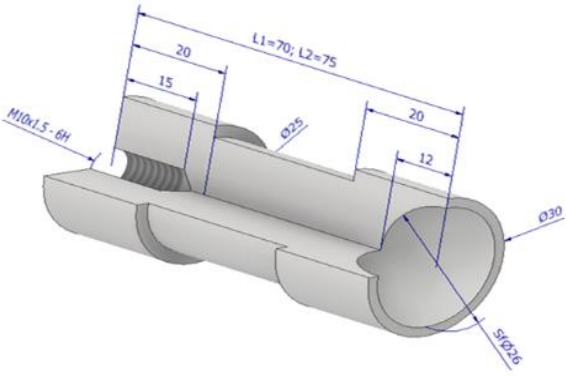
Figura 4.77. Echipament Herman Ultrasonics de sudare cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz.

Vibrațiile produse de blocul ultrasonic (1), sunt transmise sonotrodei (2). Semisfera superioară este fixată în sonotrodă, iar semisfera inferioară (3) este montată în nicovală (4).

În urma măsurărilor realizate pe un stand format dintr-un generator de semnal și un osciloscop cu memorie a rezultat o sonotrodă cu următoarele dimensiuni aproximative de gabarit: diametru 30 mm și lungime totală 70 mm.

Schița sonotrodei și proprietățile materialului utilizat sunt redată în Tabelul 4.30.

Tabelul 4.30. Schița sonotrodei și proprietățile materialului utilizat.

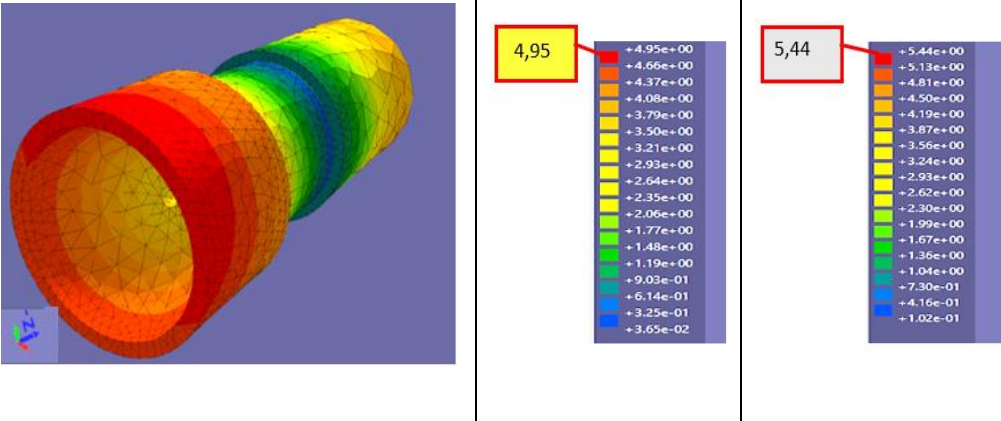
Schița sonotrodă		
Material sonotrodă	Oțel	C45
Proprietățile materialului sonotrodei	Modul de elasticitate	210 GPa
	Coeficient Poisons	0.30
	Densitate	7800 kg/m <sup>3</sup>
	Viteză de propagare a sunetului pe direcție longitudinală	5188,7 m/s
	Viteză de propagare a sunetului pe direcție radială	5439,3 m/s

Pentru definirea configurației optime a sonotrodei sunt necesare mai multe simulări [82, 83, 84]. În vederea optimizării sonotrodei pentru sudarea bilelor de deo roll la frecvența de 35 kHz, a fost utilizat un software specializat de simulare cu element finit. Au fost comparate două sonotrode în trepte, din oțel C45, cu lungimile totale de 70 mm, respectiv 75 mm.

Rezultatele simulării sunt prezentate în Tabelul 4.31 și în Tabelul 4.32. Au fost analizate deplasările totale și diagrama de stres Von Mises. În Tabelul 4.31 sunt reprezentate deplasările totale și amplitudinile pe direcția axei Z pentru cele două variante de sonotrodă.



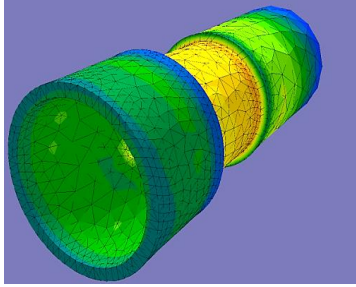
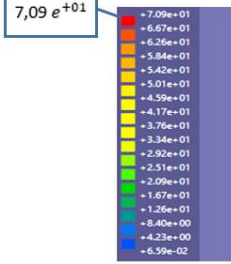
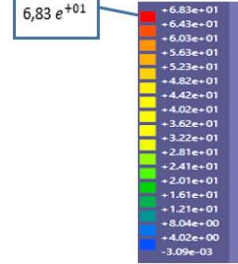
Tabelul 4.31. Harta deplasărilor totale și amplitudinile pe direcția axei Z.

<b>Harta deplasărilor totale și amplitudinile pe direcția axei Z</b>		
Lungime sonotrodă (mm)	$L_1 = 70$	$L_2 = 75$
Frecvență de rezonanță (kHz)	37.329	35.117
		
Valoarea deplasărilor totale /amplitudinilor pe direcția axei Z , la frecvența de rezonanță este:		
Amplitudine la ieșirea din convertizor	6.5 $\mu\text{m}$	
Amplitudine de intrare în amplificator/booster	6.5 $\mu\text{m}$	
Factor de amplificare al boosterului	1 : 1,5	
Amplitudine de ieșire din booster	9.75 $\mu\text{m}$	
Amplitudine de intrare în sonotrodă	9.75 $\mu\text{m}$	9.75 $\mu\text{m}$
Amplitudine/Deplasare obținută prin simulare, la ieșirea din sonotrodă	4.95 $\mu\text{m}$	5.44 $\mu\text{m}$
Factor de amplificare al sonotrodei	1 : 0.51	1 : 0.56

Creșterea lungimii sonotrodei va determina creșterea factorului de amplificare și implicit a amplitudinii în zona activă. Se observă că la sonotroda cu lungimea de 75 mm amplitudinea oscilațiilor la ieșirea din sonotrodă este mai mare.

Harta tensiunilor de oboseală Von Mises este prezentată în Tabelul 4.32.

Tabelul 4.32. Harta tensiunilor de oboseală Von Mises.

<b>Harta tensiunilor de oboseală Von Mises</b>		
Lungime sonotrodă (mm)	L1= 70	L2= 75
Frecvență de rezonanță (kHz)	37.329	35.117
		
Tensiunea Von Mises este utilizată pentru a anticipa cedarea materialelor sub sarcină complexă, pe baza rezultatelor din testele de tracțiune uniaxială		
Tensiune maximă ( MPa)	70.09	68.3
Comentarii/Concluzii preliminare	Deformațiile maxime apar în zona nodală	Deformațiile maxime apar în zona nodală
	Valoarea maximă a tensiunii în sonotrodă (70,09 MPa) este inferioară rezistenței mecanice la rupere la tracțiune ( $R_m = 580$ MPa) a materialului C45	Valoarea maximă a tensiunii în sonotrodă (68,3 MPa) este inferioară rezistenței mecanice la rupere la tracțiune ( $R_m = 580$ MPa) a materialului C45
	Valoarea maximă a tensiunii din sonotrodă este inferioară limitei de curgere aparentă ( $Re=305$ MPa)	Valoarea maximă a tensiunii din sonotrodă este inferioară limitei de curgere aparentă ( $Re=305$ MPa)

Conform simulării Von Mises, tensiunea maximă din zona nodală este semnificativ mai mică decât rezistența la tracțiune și decât rezistența la limita de curgere ale materialului C45 pentru ambele lungimi de sonotrodă.

Putem concluziona că sonotroda nu se va defecta prematur. După o perioadă mai lungă de utilizare, o defecțiune a sonotrodei ar putea însă să apară din cauza stresului de oboseală, un fenomen absolut normal în astfel de aplicații.

În urma analizării tuturor rezultatelor simulării cu element finit, s-a decis *continuarea experimentelor cu sonotroda cu lungimea de 75 mm.*

Parametrii de proces utilizați pentru sudarea bilelor de deo roll la frecvența de 35 kHz cu sonotroda de lungime 75 mm sunt prezentați în Tabelul 4.33.

Tabelul 4.33. Parametrii de proces utilizați la sudarea cu ultrasunete a bilelor de deo roll la frecvența de 35 kHz cu sonda de lungime 75 mm.

Număr ID	TP (mm)	t (s)	E (J)	Ppeak (W)	RPN (mm)	V (mm/s)	Pend (W)	f (Hz)	MCT (s)
155401	57.28	1.229	197	311	0.99	0.5	294	35271	3,27
155402	35.44	2.000	402	271	0.93	0.5	259	35206	3.11
155481	28.28	1.000	203	294	0.61	0.6	294	35337	2.33
155482	28.24	1.755	379	311	0.85	0.5	203	35302	3.18
155483	28.23	1.757	182	316	0.85	0.5	180	35299	3.16
155484	29.37	0.996	176	279	0.85	0.9	279	35322	2.94
155485	28.89	16.0	3019	85	0.65	0.1	139	35389	19.47

Legendă:

ID = număr de indentificare al testului; TP = punct de activare ultrasonică;  
t = timp de sudare; E = valoare energie ultrasonică;  
Ppeak = putere (vârf); RPN = penetrare; v = viteză de îmbinare;  
Pend = putere (finală); f = frecvență (finală);  
MCT = timp de ciclu al echipamentului.

Graficele de sudare au fost generate de un soft instalat pe echipamentul de sudare Herman Ultrasonics. Analiza graficelor de sudare pentru testul cu numărul de indentificare ID 155402 a evidențiat variații mari ale anumitor parametri critici de sudare (Figura 4.78).

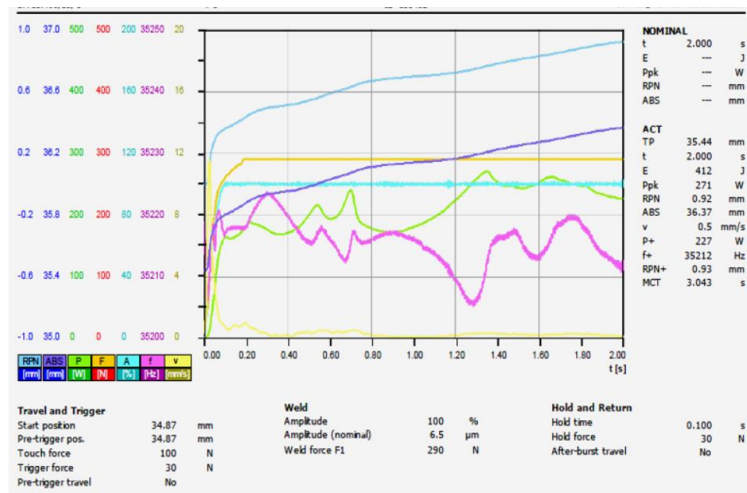


Figura 4.78. Graficul cu parametrii de sudare utilizați la măsurările cu numărul ID 155402.

În Figura 4.78 se observă variații mari ale frecvenței de lucru și ale puterii, având ca rezultat obținerea unor suduri de slabă calitate.

Cele mai bune rezultate au fost obținute la testul cu numărul de identificare ID155484. Evoluția parametrilor de sudare este redată în Figura 4.79.

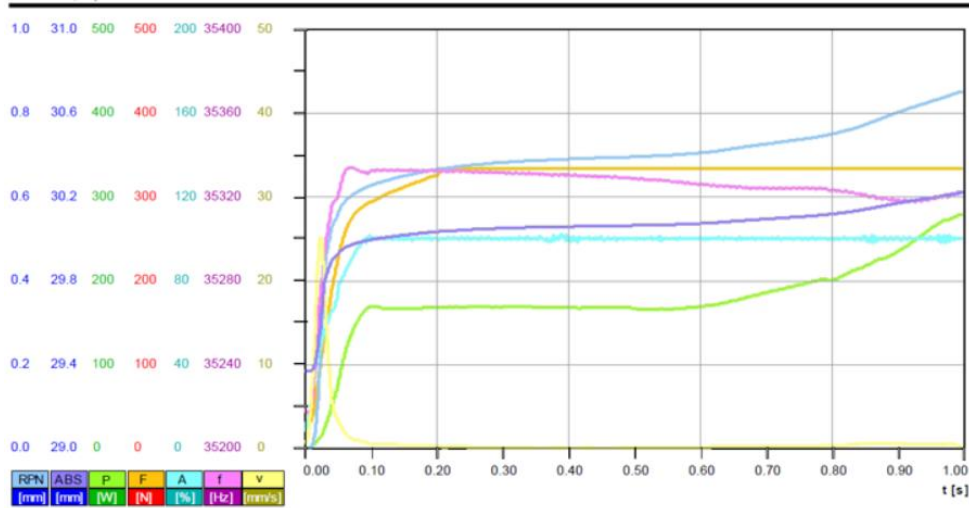


Figura 4.79. Graficul cu parametrii de sudare utilizați la măsurările cu numărul ID 155484.

Din analiza graficelor din Figura 4.79, se observă o evoluție mult mai stabilă a parametrilor de sudare. Cordonul de sudură rezultat este uniform, iar dimensiunile bilelor sudate sunt în specificație (Figura 4.80).



vedere din față



secțiune transversală

Figura 4.80. Aspectul vizual al bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 35 KHz, cu parametrii utilizați la măsurările cu numărul ID 155484.

Inspekția vizuală a bilelor a evidențiat o suprafață exterioară netedă, fără bavuri și fără fisuri. Pentru inspekția interioară a cordonului de sudură, bilele sudate au fost secționate transversal, observându-se un cordon uniform de sudură.

Timpul de sudare este mai mic de o secundă, iar timpul de ciclu la sudarea cu frecvența de 35 kHz este cu 1,5 secunde mai scurt decât cel cu frecvența de 20 kHz.

Prin utilizarea aplicației de sudare cu numărul de identificare ID 155484 au fost sudate 16 bile. Diametrele exterioare ale bilelor sudate la frecvența de 35 kHz sunt prezentate în Tabelul 4.34 și comparate cu diametrele bilelor sudate la frecvența de 20 kHz.

Tabelul 4.34. Măsurările dimensionale ale diametrelor exterioare ale bilelor sudate cu ultrasunete la frecvențele de 20 kHz, respectiv 35 kHz.

Număr mostră	Frecvență de rezonanță	
	$f_1 = 20$ kHz	$f_2 = 35$ kHz
	Diametru (mm)	Diametru (mm)
1	25,23	25,69
2	25,22	25,65
3	25,21	25,67
4	25,25	25,66
5	25,22	25,65
6	25,20	25,66
7	25,21	25,68
8	25,21	25,67
9	25,22	25,67
10	25,23	25,68
11	25,23	25,69
12	25,21	25,66
13	25,21	25,69
14	25,25	25,67
15	25,25	25,66
16	25,24	25,66

Pentru o analiză comparativă a diametrelor exterioare ale bilelor sudate cu ultrasunete la frecvențele de 20 kHz, respectiv 35 kHz, precum și conformarea cu limitele specificațiilor impuse, a fost trasat graficul din Figura 4.81.

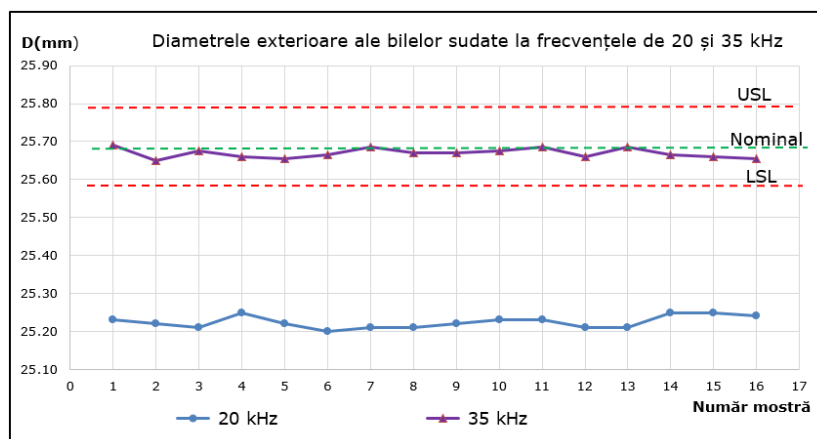


Figura 4.81. Reprezentarea diametrelor exterioare ale bilelor sudate la frecvențele de 20 kHz și 35 kHz.

Conform graficului prezentat în Figura 4.81, diametrele exterioare ale bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz se încadrează în specificațiile de produs, în timp ce diametrele bilelor sudate la frecvența de 20 kHz sunt situate sub limita inferioară impusă de specificație.

Capabilitățile dimensionale de proces ale diametrelor bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz sunt redată în Figura 4.82.

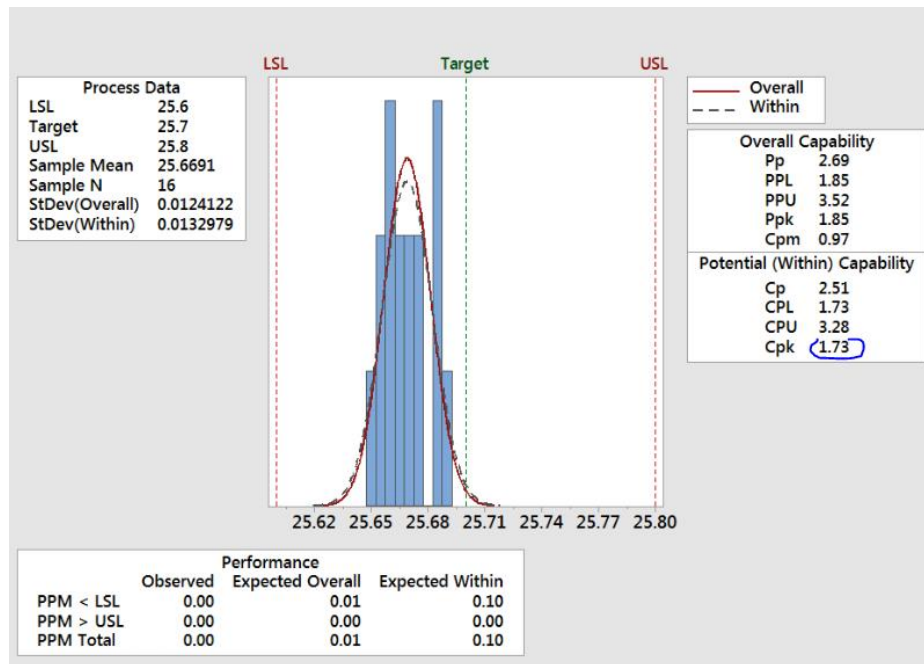


Figura 4.82. Capabilitățile dimensionale de proces ale diametrelor bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz.

Din Figura 4.82 reiese că capabilitățile dimensionale ale diametrelor bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz sunt bune ( $Cpk=1,73$ ). Media diametrelor este situată puțin sub valoare nominală prevăzută în specificație.

*Concluzii referitoare la sudarea bilelor de deo roll cu ultrasunete:*

1. Capabilitățile dimensionale pentru diametrele exterioare ale bilelor sudate cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz sunt mai bune în comparație cu cele sudate la frecvența de 20 kHz [80].
2. Sudarea cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz se poate realiza la un timp de ciclu mai scurt comparativ cu sudarea la frecvența de 20 kHz. Acest aspect are implicații majore în cazul utilizării acestei tehnologii într-o linie de producție de serie mare.

3. Optimizarea sonotrodei în funcție de materialul, forma și dimensiunile reperelor care urmează a fi sudate este foarte importantă și necesită mai multe simulări.

Elementele de caracterizare a procedului de sudare cu ultrasunete a bilelor de deo roll într-o linie de fabricație sunt prezentate în Tabelul 4.35.

Tabelul 4.35. Elementele de caracterizare a procedului de sudare cu ultrasunete a bilelor de deo roll.

Procedeu (tip) de sudare	Cu ultrasunete
Timp de sudare	Mic
Forță de sudare	Mică
Tip de repere	Diferite
Calitate sudură	Aspect vizual corespunzător, dar cu apariția aleatorie de suduri neconforme
Productivitate	Dificil de evaluat, necesită studii suplimentare

Sudarea cu ultrasunete prezintă multe avantaje, dar transpunerea într-o linie de fabricație de serie mare necesită studii suplimentare și investiții mari de capital.

#### 4.9 Sudarea materialelor polimerice prin inducție

La sudarea prin inducție [70], încălzirea suprafețelor de contact a reperelor de sudat se realizează prin curenți de medie sau înaltă frecvență induși într-o buclă de inducție din sârmă feromagnetică (Figura 4.83).

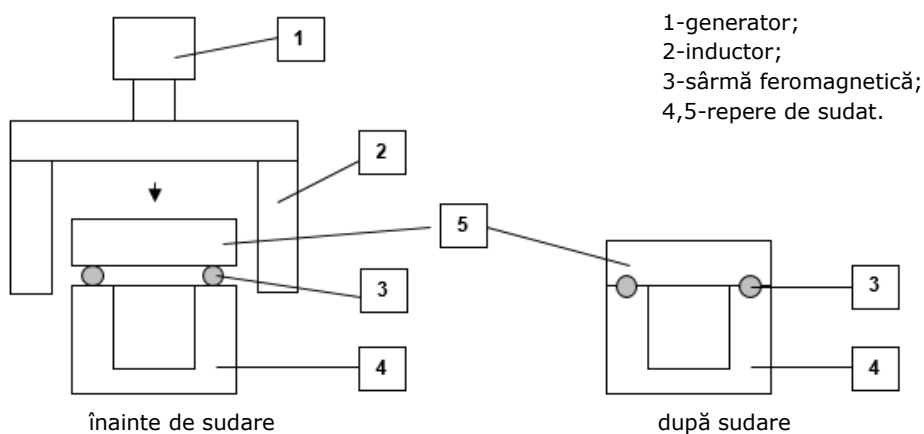


Figura 4.83. Principiul sudării prin inducție a materialelor polimerice.

Încălzirea buclei de inducție determină încălzirea suprafețelor care se află în contact. După încălzirea suprafețelor reperelor la temperatura dorită, se acționează cu o forță de apăsare prin care se va realiza sudarea acestora.

Dezavantajul principal al sudării prin inducție constă în faptul că bucla de sârmă feromagnetică rămâne încorporată în îmbinarea sudată.

Sudarea prin inducție se aplică la sudarea reperelor cu o configurație complicată și care nu pot fi sudate prin alte procedee din cauza complexității conturului în zona de îmbinare. Reperele care se pot suda prin acest procedeu pot avea grosimi cuprinse în domeniul 0,6-8,0 mm sau un diametru maxim de 500 mm.

Materialele polimerice care se pot suda prin acest procedeu sunt: PE, PP, PMMA. Sudarea prin inducție a materialelor polimerice a fost dezvoltată preponderent în aplicații cum ar fi sudarea carcaselor având contururi neregulate, cu suprafețe de îmbinare situate în mai multe planuri, la care aplicarea altor procedee de sudare este imposibilă sau nerentabilă din punct de vedere economic.

Procedeele de sudare prin inducție nu este fezabil la fabricarea bilelor de deo roll, motiv pentru care nu s-au efectuat experimente și cercetări.

#### 4.10 Fabricarea componentelor din materiale polimerice prin centrifugare (rotomulaj)

Matrițarea prin centrifugare (rotomulaj) este o metodă des utilizată în fabricarea articolelor din materiale polimerice cu forme complexe, pereți subțiri și fără linii de sudură (rezervoare, pubele, etc.) [36]. Obținerea unei calități constante necesită cunoștințe aprofundate în domeniul fizicii și chimiei polimerilor. Un aspect important este reprezentat de transferul de căldură. În timpul procesării are loc topirea pulberii polimerice însoțită de fenomene de coalescență a particulelor și densificare a topiturii [36].

Procesul de fabricație prin rotomulaj se realizează în patru etape distincte (Figura 4.84) [36].

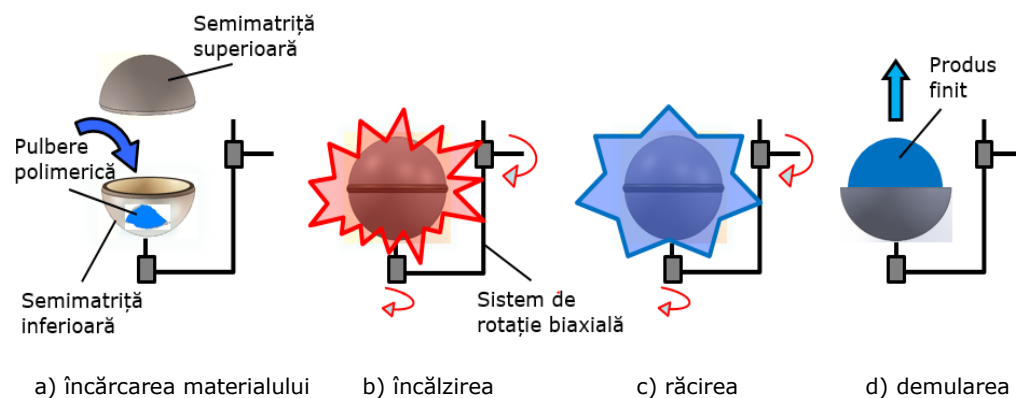


Figura 4.84. Etapele fabricării prin rotomulaj a pieselor din materiale polimerice.



Cele patru etape de fabricație prin rotomulaj sunt:

- *încărcarea materialului în matriță*

Încărcătura de pulbere polimerică este plasată în semimatrița inferioară. Această cantitate trebuie atent calculată pentru a genera dimensiunile dorite ale piesei. Materia primă poate fi livrată și sub formă de granule. După dozarea încărcăturii polimerice, matrița se închide.

- *încălzirea matriței*

Matrița este introdusă într-un cuptor unde este încălzită până la o temperatură mai mare decât temperatura de topire a polimerului. În cuptor, matrița execută mișcări de rotație, în jurul a două axe ortogonale. Astfel, sub efectul centrifugării, polimerul ajuns în stare topită capătă treptat forma interioară a matriței. Rotația matriței va continua până când materialul va fi distribuit uniform, iar grosimea piesei va deveni constantă.

- *răcirea matriței*

Pe măsură ce rotația biaxială continuă, matrița este transferată în zona de răcire. Răcirea matriței și a polimerului din interiorul acesteia se poate face cu aer sau cu apă, până când polimerul se solidifică.

- *demularea piesei finite*

După răcire, are loc deschiderea matriței și extragerea piesei finite.

Acest procedeu este utilizat cu succes la fabricarea obiectelor de formă sferică cu pereți subțiri, însă productivitatea obținută este relativ redusă.

#### 4.10.1 Fabricarea bilelor de deo roll prin rotomulaj

Cercetătorii Stoelben, Schmidt și Schawo [14] au patentat o metodă inovativă de rotomulaj în cazul fabricării bilelor de deo roll. Principiul de fabricație este prezentat în Figura 4.85.

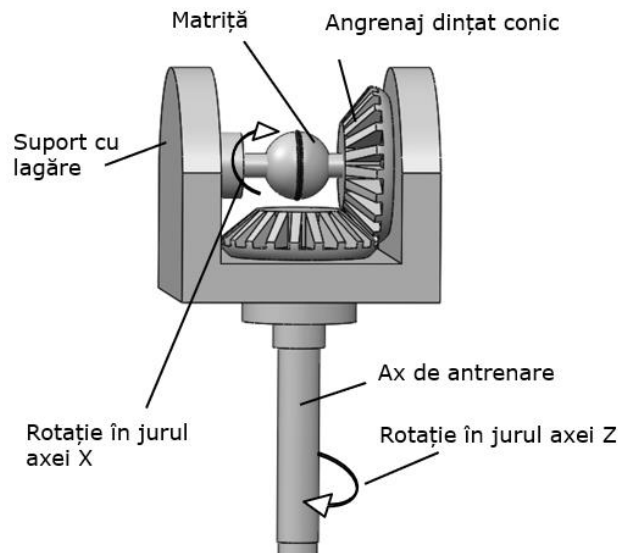


Figura 4.85. Dispozitiv experimental de fabricare a bilelor de deo roll prin rotomulaj [14].

Pulberea polimerică este introdusă în matriță, după care matrița este încălzită concomitent cu rotirea biaxială, generată de un ax de antrenare și de un angrenaj conic. După ce materialul topit ia forma matriței, are loc răcirea urmată de extragerea bilei.

Avantajul acestei metode constă în faptul că bila de deo roll se obține dintr-o singură bucată.

Cercetările efectuate în acest program nu au putut stabili costurile și configurația unei linii de fabricație de serie mare a bilelor de deo roll prin această tehnologie.

## 5. DETERMINĂRI DE CALITATE A BILELOR DE DEO ROLL

### 5.1 Proprietățile materialelor utilizate în fabricarea bilelor de deo roll

Alegerea materialelor polimerice care intră în componența bilelor de deo roll se face în funcție de tehnologia și metoda de fabricație aleasă [3, 8].

Pentru fabricarea bilelor de deo roll prin tehnologia clasică (extrudare- suflare-matrițare) trebuie aleasă o polipropilenă cu proprietăți bune de extrudare și un indice mic de curgere. În prezent se utilizează o gamă foarte largă de rețete de materiale disponibile pe piață. În cercetările prezentate în această lucrare s-a analizat o polipropilenă homopolimer de tip H 2150, proprietățile fizice, mecanice și termice fiind redate în Tabelul 5.1 [3, 8].

Tabelul 5.1. Proprietățile fizice, mecanice și termice ale materialului H 2150.

PROPRIETĂȚI	UM	METODĂ DE TESTARE	VALORI UZUALE
<b>Fizice</b>			
Densitate	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183	900
Indice de curgere în topitură (230 °C/2,16 kg)	g/10 min	ISO 1133-1	0,3
<b>Mecanice</b>			
Modul de elasticitate (1 mm/min)	MPa	ISO 527-1,2	1500
Rezistență la tracțiune, la limită de curgere (23° C, V=50 mm/min)	MPa	ISO 527-1,2	36
Alungire la curgere (23°C)	%	ISO 527-2	11
Rezistență la impact, Charpy (23° C, crestă)	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179	30
<b>Proprietăți termice</b>			
Temperatură de topire	°C	ISO 3146	160
Temperatură de înmuiere VICAT (A50)	°C	ISO 306	158
Temperatură de înmuiere VICAT (B50)	°C	ISO 306	95

Pentru injectarea semisferelor utilizate la obținerea bilelor de deo roll prin sudare cu element încălzitor și radiații infraroșii s-a ales o polipropilenă de tip homopolimer HE 125 MO cu proprietăți bune la injectare. Proprietățile fizice, mecanice și de procesare ale materialului HE 125 MO sunt redată în Tabelul 5.2 [3].

Tabelul 5.2. Proprietățile fizice, mecanice și de procesare ale materialului HE 125 MO.

PROPRIETĂȚI	UM	METODĂ DE TESTARE	VALORI UZUALE
<b>Fizice</b>			
Densitate	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183	908
Indice de curgere în topitură (230 °C/2,16 kg)	g/10 min	ISO 1133	12
<b>Mecanice</b>			
Modul de elasticitate (1 mm/min)	MPa	ISO 527-2	1550
Rezistență la tracțiune, la limită de curgere (23° C, V=50 mm/min)	MPa	ISO 527-2	34,5
Deformație la tracțiune la curgere (23° C, V=50 mm/min)	%	ISO 179/1eA	9
Rezistență la impact, Charpy (23° C, crestă)	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA	3,5
Duritate Rockwell (scala R)		ISO 2039-2	100
<b>Proprietăți de procesare</b>			
Temperatură de procesare	°C		220-260
Temperatură la duza de injectare	°C		200-240
Temperatură la matriță	°C		20-40
Presiune de menținere	MPa		200-500
Viteză de injecție	mm/sec		200-400

Pentru injectarea semisferelor utilizate la fabricarea bilelor de deo roll prin sudare cu ultrasunete s-a ales o polipropilenă de tip homopolimer HP 648 cu proprietăți bune de curgere la viteze mari de injecție (cu indice de curgere ridicat). Proprietățile fizice, mecanice și de procesare ale materialului HP 648 sunt redată în Tabelul 5.3 [3].

Tabelul 5.3. Proprietățile fizice, mecanice și de procesare ale materialului HP 648.

PROPRIETĂȚI	UM	METODĂ DE TESTARE	VALORI UZUALE
<b>Fizice</b>			
Densitate	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183	900
Indice de curgere în topitură (230 °C/2,16 Kg)	g/10 min	ISO 1133	53
<b>Mecanice</b>			
Modul de elasticitate (1 mm/min)	MPa	ISO 527-1,2	1600
Rezistență la tracțiune la curgere ( 23 °C, V=50 mm/min)	MPa	ISO 527-1,2	35
Rezistență la rupere	%	ISO 527-2	>50
Rezistență la impact, Charpy ( 23° C, crestă)	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179	2
Duritate (H 358-30)		ISO 2039-1	80
<b>Proprietăți de procesare</b>			
Temperatură de procesare	°C		220-260
Temperatură la duza de injectare	°C		200-240
Temperatură matriță	°C		15-40
Presiune de menținere	MPa		200-500
Viteză de injecție	mm/sec		200-300

## 5.2 Metode de determinare a calității sudurilor la componentele din materiale polimerice

Realizarea unor suduri de calitate este foarte importantă. Controlul calitativ al sudurilor se poate realiza prin mai multe metode.

Controlul *nedistructiv* este cel mai des utilizat în tehnologiile de sudare [85].

Controlul *nedistructiv vizual* este cel mai puțin costisitor, nu necesită o calificare înaltă a operatorului și permite obținerea unei priviri de ansamblu în legătură cu uniformitatea cordonului de sudură. Eficacitatea acestui control este însă limitată și nu permite identificarea tuturor defectelor din cordonul de sudură.

Controlul *nedistructiv cu pulbere magnetică* identifică foarte bine fisurile de suprafață. Metoda este însă limitată la materialele feromagnetice și nu se pretează la materialele polimerice.

Prin metoda de control *nedistructiv cu lichide penetrante* pot fi detectați, în afară de fisurile deschise de pe suprafața examinată, porii sau fisurile care se formează în cordonul de sudură. În cazul materialelor polimerice, acest tip de control

se utilizează la prototipări sau producții de serie mică, dar prezintă limitări la produse cu cerințe cosmetice stricte.

Metodele de control nedistructiv cu *ultrasunete* [86] și cu *radiații penetrante* permit indicarea sigură a defectelor interne și externe din îmbinarea sudată. Depistarea fisurilor și a defectelor de topire, precum și localizarea acestora se realizează mai bine cu ultrasunete. Metoda de control cu radiații penetrante oferă ca avantaj existența filmului-document care poate fi arhivat și evaluat oricând. Dezavantajul metodei cu radiații penetrante este dat de prezența radiațiilor și de necesitatea luării unor măsuri speciale de protecție a operatorului.

Metoda de testare cu *arc electric* este o metodă de control nedistructiv tot mai des întâlnită la testarea componentelor din materiale polimerice (Figura 5.1).

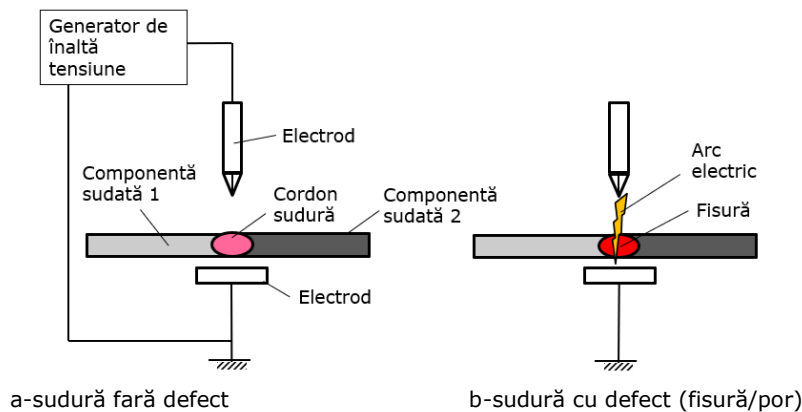


Figura 5.1. Metoda de control nedistructiv cu arc electric al îmbinărilor prin sudare a componentelor din materiale polimerice.

Metoda de testare cu arc electric constă în generarea unui curent de înaltă tensiune între doi electrozi, între care se interpune piesa sudată. Dacă piesa prezintă anumite defecte (fisuri, pori, etc), la trecerea printre cei doi electrozi se va iniția un arc electric (Figura 5.1-b). Metoda se recomandă în cazul sudării cap la cap sau prin suprapunere. Această metodă se aplică foarte bine la fabricarea produselor de serie mare, fiind des întâlnită în producția de repere de dimensiuni mici cu pereți subțiri.

### 5.3 Metode de determinare a calității sudurilor la bilele de deo roll

În cazul bilelor de deo roll se pot utiliza cele două categorii principale de determinare a calității sudurilor: prin control nedistructiv, respectiv prin control distructiv.

#### 5.3.1 Metode de control nedistructiv a bilelor de deo roll

Datorită limitărilor existente în amplasarea electrozilor, metoda de control nedistructiv cu *arc electric* nu se poate aplica la verificarea bilelor de deo roll. Cea mai

simplă metodă de control nedistructiv o reprezintă metoda de *control vizual*. Este metoda cea mai rapidă, care permite observarea imediată a defectelor [81]. Principalele defecte care pot fi detectate prin această metodă, cauzele și remediile posibile sunt redată în Tabelul 5.4.




Tabelul 5.4. Principalele defecte vizuale detectate la bilele de deo roll.

Defect	Imagine	Cauze posibile	Remediere
Bavuri exterioare		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Timp mare de sudare;</li> <li>2. Temperatură mare a materialului topit în cordonul de sudură;</li> <li>3. Presiune mare de sudare.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reducerea timpului de sudare;</li> <li>2. Reducerea timpului de menținere;</li> <li>3. Reducerea temperaturii elementului încălzitor;</li> <li>4. Reducerea timpului de sudare.</li> </ol>
Crăpături în cordonul de sudură		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Timp prea mic de sudare;</li> <li>2. Temperatură mică a materialului topit în cordonul de sudură;</li> <li>3. Presiune mică de sudare.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Creșterea timpului de sudare;</li> <li>2. Creșterea timpului de menținere;</li> <li>3. Creșterea temperaturii elementului încălzitor.</li> </ol>
Opacizarea zonei ecuatoriale		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Forță de menținere mare;</li> <li>2. Amplitudine prea mare a vibrațiilor;</li> <li>3. Timp de sudare prea mare.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reducerea forței de menținere;</li> <li>2. Reducerea amplitudinii și verificarea sonotrodei;</li> <li>3. Reducerea timpului de sudare.</li> </ol>
Cavitație		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Timp de sudare prea mare;</li> <li>2. Sonotrodă proiectată incorect.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reducerea timpului de sudare;</li> <li>2. Optimizarea sonotrodei.</li> </ol>
Excentricități		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Probleme de centrare a dispozitivelor de prindere;</li> <li>2. Forță de apăsare mare;</li> <li>3. Proiectare incorectă a zonelor de îmbinare.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Optimizarea centrării semisferelor în dispozitive;</li> <li>2. Reducerea forței de apăsare;</li> <li>3. Optimizarea designului semisferelor.</li> </ol>
Ovalități		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Proiectare incorectă a zonelor de îmbinare;</li> <li>2. Control incorect al parametrilor de sudare;</li> <li>3. Adaos de sudare ales incorect.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Optimizarea designului semisferelor;</li> <li>2. Optimizarea parametrilor de sudare.</li> </ol>

O altă metodă de control nedistructiv aplicabilă în cazul bilelor de deo roll este cea cu *lichide penetrante*. Metoda se bazează pe imersarea bilelor sudate în alcool

izopropilic pigmentat cu un colorant care pune în evidență defecte greu de detectat cu ochiul liber [81]. Cele mai frecvente defecte care se pot detecta prin această metodă sunt prezentate în Tabelul 5.5.

Tabelul 5.5. Tipuri de defecte ale bilelor de deo roll detectabile prin testarea cu lichide penetrante.

Defect	Imagine	Cauze posibile	Remediere
Crăpături în cordonul de sudură		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Parametri de sudare incorect setați;</li> <li>2. Material ales incorect;</li> <li>3. Procedeu de sudare incorect;</li> <li>4. Tensiuni mari în cordonul de sudură;</li> <li>5. Deficiențe de proiectare a concentratorilor (în cazul sudării cu ultrasunete).</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Modificarea parametrilor de sudare;</li> <li>2. Alegerea materialelor cu proprietăți adecvate de sudare;</li> <li>3. Identificarea corectă a procedurii de sudare;</li> <li>4. Ajustarea parametrilor de sudare;</li> <li>5. Reproiectarea designului concentratorilor.</li> </ol>
Crăpături pe suprafața bilei sudate		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Materialul semisferelor ales incorect;</li> <li>2. Tensiuni în pereții bilei;</li> <li>3. Forță de menținere prea mare;</li> <li>4. Alegere incorectă a dispozitivului de sudare.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alegerea corectă a materialului semisferelor</li> <li>2. Simulări cu metoda elementului finit;</li> <li>3. Reducerea forței de menținere;</li> <li>4. Reproiectarea sonotrodei (în cazul sudării cu ultrasunete).</li> </ol>
Pori în cordonul de sudură (specifică sudării cu element încălzitor)		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Temperatură prea mică a materialului topit în cordonul de sudură;</li> <li>2. Smulgeri de material la retragerea elementului încălzitor;</li> <li>3. Timp de menținere prea scurt.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Creșterea temperaturii elementului încălzitor;</li> <li>2. Curățarea suprafeței elementului încălzitor;</li> <li>3. Creșterea timpului de menținere.</li> </ol>

### 5.3.2 Metode de control distructiv a bilelor de deo roll

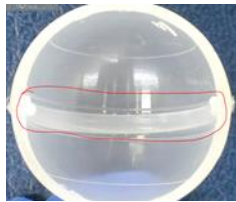


Cele mai uzuale metode de control distructiv sunt:

- prin secționarea bilelor;
- prin determinarea proprietăților mecanice (rezistență la compresiune) [8,87].

Metoda de control distructiv prin *secționarea bilelor* permite o analiză vizuală a defectelor din *interiorul* bilelor. În Tabelul 5.6 sunt prezentate cele mai frecvente defecte observate prin această metodă de control precum și cauzele și remediile posibile [81].



Tabelul 5.6. Tipuri de defecte observate la metoda de control prin secționarea bilelor de deo roll.

Defect	Imagine	Cauze posibile	Remediere
Refulare excesivă de material în interiorul cordonului de sudură		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Timp de sudare prea lung;</li> <li>2. Temperatură mare a materialului topit în cordonul de sudură;</li> <li>3. Presiune mare de sudare.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reducerea timpului de sudare;</li> <li>2. Reducerea temperaturii elementului încălzitor;</li> <li>3. Reducerea presiunii de sudare.</li> </ol>
Refulări inegale de material topit pe conturul interior al cordonului de sudură		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contact imperfect între elementul încălzitor și semisferă;</li> <li>2. Centrare defectă - oasă a semisferelor.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Îmbunătățirea contactului dintre semisferă și elementul încălzitor;</li> <li>2. Verificarea modului de fixare și centrare a semisferelor în dispozitive.</li> </ol>
Discontinuități sau crăpături în cordonul de sudură		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Timp de sudare prea scurt;</li> <li>2. Temperatură prea mică a elementului încălzitor;</li> <li>3. Material cu proprietăți slabe de sudare;</li> <li>4. Contact imperfect între elementul încălzitor și semisferă.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mărirea timpului de sudare;</li> <li>2. Creșterea temperaturii elementului încălzitor;</li> <li>3. Alegerea unor materiale cu proprietăți bune de sudare;</li> <li>4. Îmbunătățirea contactului dintre elementul încălzitor și semisferă.</li> </ol>

## 5.4 Controlul bilelor de deo roll prin testarea proprietăților mecanice

Pentru verificarea conformării bilelor de deo roll cu specificațiile de produs se impune efectuarea unor controale distructive, în care bilele sunt supuse testării proprietăților mecanice.

După finalizarea procesului de sudare a bilelor de deo roll, urmează faza de șlefuire, fază în care bilele sunt supuse unor forțe de compresiune care se exercită concomitent cu șlefuirea bilei. În urma șlefurii, grosimea pereților bilei se reduce cu aproximativ 0,15 mm. Această operație determină scăderea rezistenței bilei și apariția unor defecte la unele bile (crăpături, deformații, abateri de la formă și dimensiuni, etc). Ca urmare, determinarea rezistenței la compresiune a acestor bile este foarte importantă și a fost realizată prin studii comparative pentru fiecare tehnologie în parte, atât pentru bilele șlefuite cât și pentru cele neșlefuite.

Pentru determinarea rezistenței la compresiune, forța de compresiune se aplică pe două direcții (Figura 5.2):

- pe direcție „polară”, perpendiculară pe planul care definește cordonul de sudură;
- pe direcție „ecuatorială”, de-a lungul planului care definește cordonul de sudură.

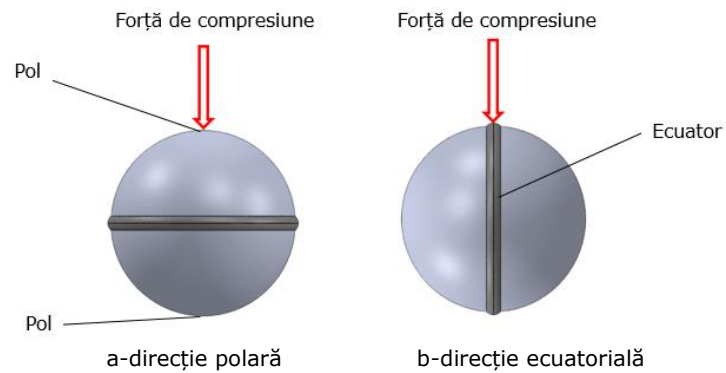


Figura 5.2. Direcții de aplicare a forței de compresiune.

Dispozitivul de determinare a rezistenței la compresiune a fost adaptat la forma și dimensiunile bilei de deo roll (Figura 5.3).

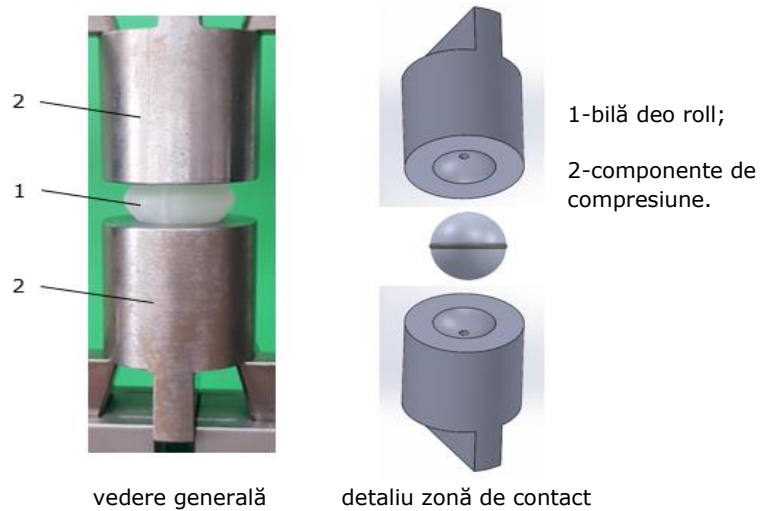


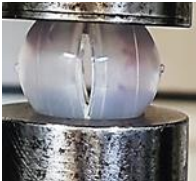



Figura 5.3. Dispozitiv pentru determinarea rezistenței la compresiune a bilelor de deo roll.

În urma solicitărilor de compresiune, bilele testate au suferit deformații, care au determinat modificarea formei și dimensiunilor sau chiar deteriorarea (ruperea) acestora.

Principalele efecte observate la bilele testate la compresiune sunt redată în Tabelul 5.7 [81].

Tabelul 5.7. Principalele efecte observate la bilele de deo roll testate la compresiune.

Direcția de aplicare a forței	Defect	Imagine	Observații
Polară	Crăpături aleatorii în pereții bilei		Specifică sudării cu ultrasunete
	Modificări în volum în zona ecuatorială		Specifică sudării cu element încălzitor sau cu radiații infraroșii
Ecuatorială	Crăpături de-a lungul cordonului de sudură		Observată la toate metodele de sudare studiate
	Crăpături multiple pe cordonul de sudură și apariția fenomenului de „bifurcare”		Observată la toate metodele de sudare studiate

Pentru o analiză detaliată a comportamentului la compresiune a bilelor de deo roll fabricate prin tehnologii diferite, s-au realizat experimente și măsurări multiple pe un stand aflat în dotarea Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Universității Politehnica Timișoara.

#### 5.4.1 Măsurări de rezistență la compresiune a bilelor de deo roll

În vederea efectuării măsurărilor au fost selectate 20 de loturi a câte 5 bile din fiecare tehnologie de fabricație:

- 5 bile neșlefuite obținute prin tehnologia clasică de extrudare-suflare-matrițare supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile neșlefuite obținute prin tehnologia clasică de extrudare-suflare-matrițare supuse la compresiune pe direcție ecuatorială;
- 5 bile șlefuite obținute prin tehnologia clasică de extrudare-suflare- matrițare supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile șlefuite obținute prin tehnologia clasică de extrudare-suflare- matrițare supuse la compresiune pe direcție ecuatorială;
- 5 bile neșlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz, supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile neșlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială;
- 5 bile șlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz, supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile șlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială;
- 5 bile neșlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz, supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile neșlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială;
- 5 bile șlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz, supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile șlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială;
- 5 bile neșlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu element încălzitor, supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile neșlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu element încălzitor, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială;
- 5 bile șlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu element încălzitor, supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile șlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu element încălzitor, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială;
- 5 bile neșlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu radiații infraroșii, supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile neșlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu radiații infraroșii, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială;
- 5 bile șlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu radiații infraroșii, supuse la compresiune pe direcție polară;
- 5 bile șlefuite obținute prin metoda de sudare a semisferelor cu radiații infraroșii, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială.

Centralizatorul cu informațiile generale, aferente loturilor de bile deo roll testate la compresiune, este prezentat în Tabelul 5.8.

Tabelul 5.8. Centralizator cu loturile de bile deo roll testate la compresiune.

Cod Test	Descriere tehnologie fabricație bile	Cod tehnologie	Bile șlefuite/ neșlefuite	Material
A1-pol	Clasică	EBM	neșlefuite	PP H2150
A1-ecu	Clasică	EBM	neșlefuite	PP H2150
A2s-pol	Clasică	EBM	șlefuite	PP H2150
A2s-ecu	Clasică	EBM	șlefuite	PP H2150
B1-US20-pol	Ultrasunete 20 kHz	US20	neșlefuite	HP648
B1-US20-ecu	Ultrasunete 20 kHz	US20	neșlefuite	HP648
B2-US35-pol	Ultrasunete 35 kHz	US35	neșlefuite	HP648
B2-US35-ecu	Ultrasunete 35 kHz	US35	neșlefuite	HP648
B4-US20-S-pol	Ultrasunete 20 kHz	US20+S	șlefuite	HP648
B4-US20-S-ecu	Ultrasunete 20 kHz	US20+S	slefuite	HP648
B3-US35-S-pol	Ultrasunete 35 kHz	US35+S	slefuite	HP648
B3-US35-S-ecu	Ultrasunete 35 kHz	US35+S	șlefuite	HP648
C1-EI-pol	Termică-element încălzitor	T-EI	neșlefuite	HE125MO
C1-EI-ecu	Termică-element încălzitor	T-EI	neșlefuite	HE125MO
C2-IR-pol	Termică-Infraroșu IR	T-IR	neșlefuite	HE125MO
C2-IR-ecu	Termică-Infraroșu IR	T-IR	neșlefuite	HE125MO
C3-EI-s-pol	Termică-element încălzitor	T-EI+S	șlefuite	HE125MO
C3-EI-s-ecu	Termică-element încălzitor	T-EI+S	șlefuite	HE125MO
C4-IR-S-pol	Termică-Infraroșu IR	T-IR+S	șlefuite	HE125MO
C4-IR-S-ecu	Termică-Infraroșu IR	T-IR+S	șlefuite	HE125MO

Bilele au fost păstrate 48 de ore înainte de testare la temperatura de 23 °C și umiditatea relativă de 51% (48/23/51), conform standardului D 168-13 [88].

Condițiile din laboratorul de încercări au fost: temperatura 23,5 °C și umiditatea relativă 48%.

În vederea realizării măsurărilor s-a utilizat un stand de măsurare marca Zwick /Roell (Figura 5.4).

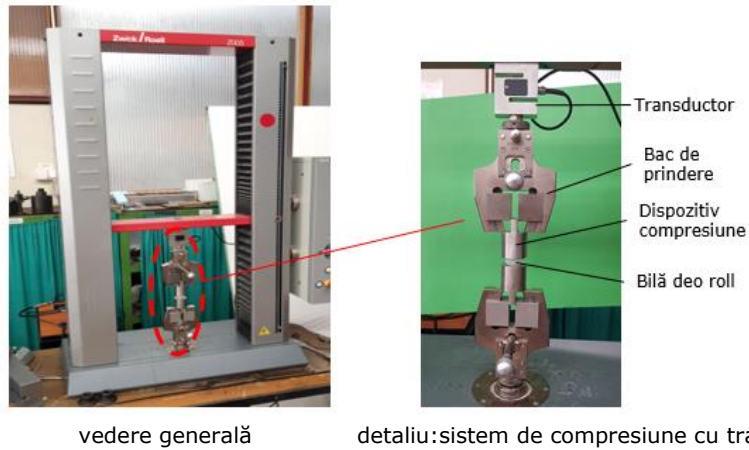


Figura 5.4. Stand de măsurare a forțelor și deformațiilor marca Zwick /Roell.

Standul a fost echipat cu un sistem de compresiune cu traductor KAP-TC/ KI 0.05/ Fnr 06 6716/ 2.0 mV/V =5Kg, marca AST Germany Dresden.

Preîncărcarea aparatului a fost reglată la 10 N și viteza de lucru la 5 mm/minut.

Măsurările au fost efectuate în conformitate cu specificațiile impuse de standardele ASTM 695-15 și ISO 527-2:2012 [89,93] și au fost prelucrate cu un software specializat Zwick/Roell de trasare a curbelor de sarcină (Figura 5.5).

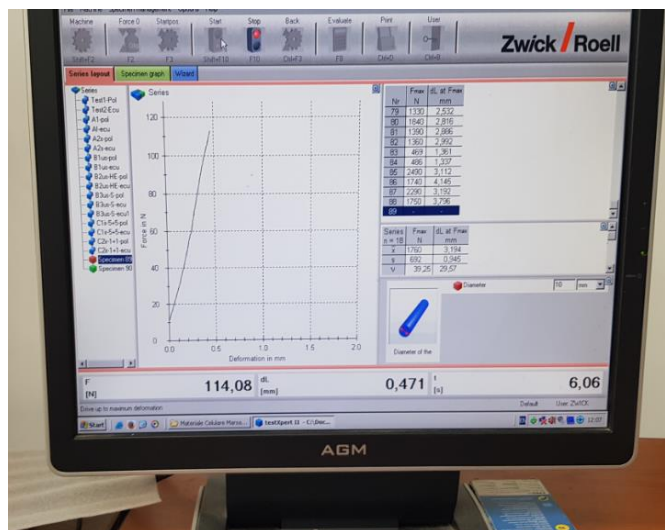


Figura 5.5. Software Zwick/Roell de trasare a curbelor de sarcină.

Forța de compresiune a fost exercitată până la deformarea completă a bilei sau până la apariția fenomenului de rupere.

Valorile forțelor maxime de compresiune la care au fost supuse bilele de deo roll șlefuite și neșlefuite obținute prin tehnologii diferite, sunt redate în Tabelul 5.9.

Tabelul 5.9. Valorile forțelor maxime de compresiune la care au fost supuse bilele de deo roll.

Lot	Direcție	Forță maximă de compresiune (N)				
		Seria de măsurări (1-5)				
		Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5
A1-Clasic	Pol	2954	3151	2890	2766	2665
	Ecu	1935	1893	1910	1754	1914
A2-Clasic șlefuite	Pol	2739	2809	2805	2912	2304
	Ecu	1841	1615	1710	2032	1635
B1-US20	Pol	2037	1758	1870	1698	1951
	Ecu	1291	1357	1331	1198	1412
B3-US20 șlefuite	Pol	1359	1178	1363	1290	1233
	Ecu	455	406	469	766	423
B2-US35	Pol	1922	1754	1840	1903	1690
	Ecu	1296	1441	1390	1493	1210
B4-US35 șlefuite	Pol	1510	1245	1355	1290	1423
	Ecu	512	439	498	608	412
C1-Element încălzitor	Pol	2634	2251	2490	2510	2641
	Ecu	1852	1657	1740	1698	1712
C3-Element încălzitor șlefuite	Pol	2123	1874	2050	2086	2185
	Ecu	986	895	1110	1185	1201
C2-Infraroșu	Pol	2145	1412	2290	2256	2448
	Ecu	1653	1987	1750	1554	1698
C4-Infraroșu șlefuite	Pol	1242	1158	1230	1254	1085
	Ecu	902	725	815	912	802

Prelucrarea și interpretarea rezultatelor din Tabelul 5.9 se poate face în mai multe moduri:

- prin reprezentarea pe *grupuri de măsurări* ale forței maxime de compresiune pentru toate loturile de bile de deo roll;
- prin utilizarea diagramelor de tip *box plot*;
- prin reprezentarea *curbelor de sarcina Forțe-Deformații* (denumite și curbe de compresiune) [87], obținute prin softul din dotarea standului de măsurare Zwick/Roell.

Reprezentarea *grupurilor de măsurări* ale forțelor maxime de compresiune pentru toate loturile de bile de deo roll este redată în graficul din Figura 5.6.

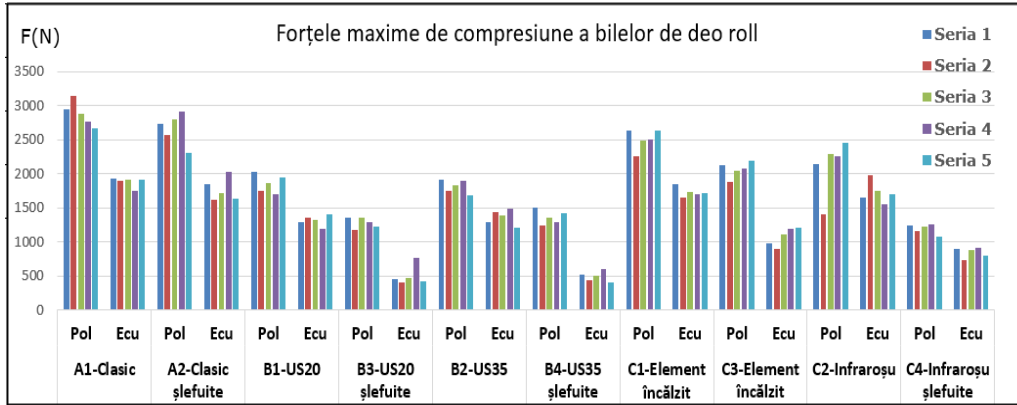


Figura 5.6. Reprezentarea grupurilor de măsurări ale forței maxime de compresiune.

Se observă o variabilitate foarte mare a valorilor forțelor de compresiune în funcție de: tehnologia utilizată, direcția de aplicare a forței de compresiune și de operația de prelucrare prin șlefuire.

Diagramele de tip *box plot* permit vizualizarea valorilor minime, maxime și medii, a cuartilelor inferioare și superioare, precum și a valorilor aberante situate mult în afara distribuției.

Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, neșlefuite, măsurate la poli, este redată în diagrama din Figura 5.7.

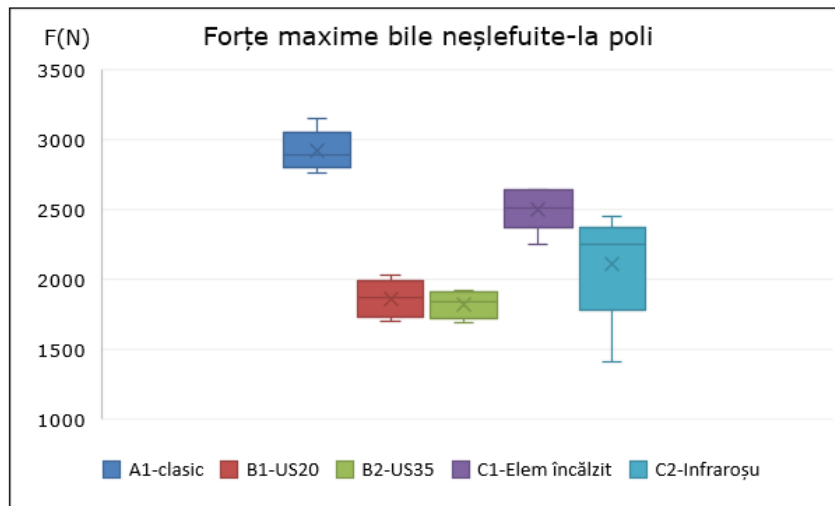


Figura 5.7. Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, neșlefuite, măsurate la poli.

Din diagrama reprezentată în Figura 5.7 rezultă următoarele:



- rezistența cea mai mare la compresiune a bilelor neșlefuite, măsurată la poli, corespunde bilelor obținute prin metoda clasică, urmată de cea cu element încălzitor;
- rezistența cea mai mică corespunde bilelor neșlefuite obținute prin sudarea cu ultrasunete, atât la frecvența de 20 kHz, cât și la frecvența de 35 kHz.

Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, neșlefuite, măsurate la ecuator, este redată în diagrama din Figura 5.8.

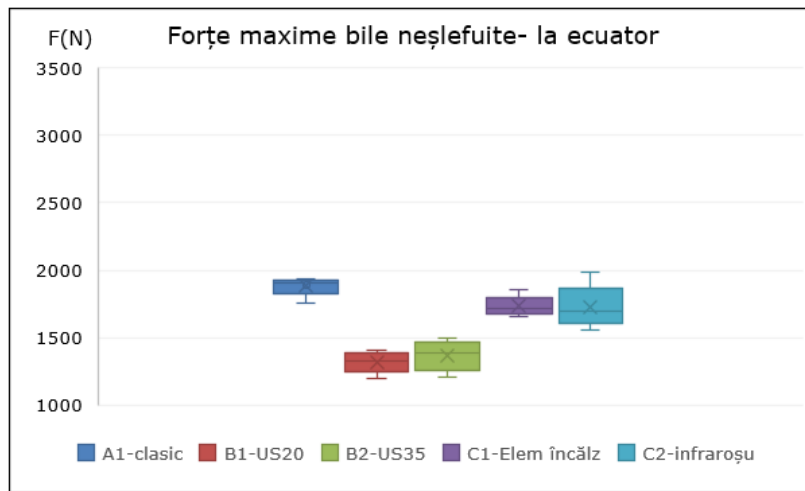


Figura 5.8. Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, neșlefuite, măsurate la ecuator.

Din diagrama reprezentată în Figura 5.8 se observă următoarele:

- dispersia valorilor forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, neșlefuite, măsurate la ecuator, este mult mai redusă în comparație cea măsurată la poli;
- rezistența cea mai mare la compresiune a bilelor neșlefuite, măsurată la ecuator, corespunde bilelor fabricate prin metoda clasică, urmată de cele cu element încălzitor și radiații infraroșii;
- rezistența cea mai mică corespunde bilelor neșlefuite obținute prin sudarea cu ultrasunete, atât la frecvența de 20 kHz cât și la frecvența de 35 kHz.

Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, șlefuite, măsurate la poli, este redată în diagrama din Figura 5.9.

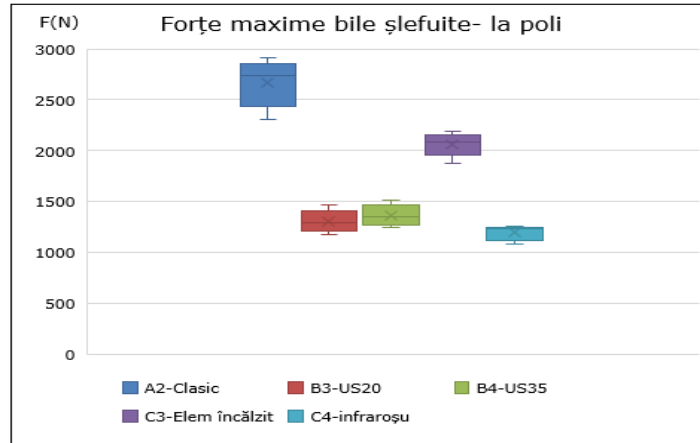


Figura 5.9. Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, șlefuite, măsurate la poli.

Din diagrama reprezentată în Figura 5.9 rezultă următoarele:

- rezistența cea mai mare la compresiune a bilelor șlefuite, măsurată la poli, corespunde bilelor obținute prin metoda clasică, urmată de cea cu element încălzitor;
- rezistența cea mai mică este cea măsurată la bilele șlefuite obținute prin sudarea cu radiații infraroșii și cu ultrasunete, atât la frecvența de 20 kHz cât și la frecvența de 35 kHz.

Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, șlefuite, măsurate la ecuator, este redată în diagrama din Figura 5.10.

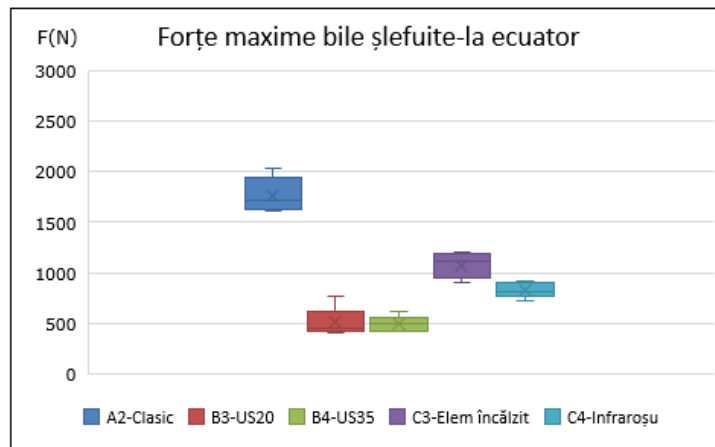


Figura 5.10. Reprezentarea forțelor maxime de compresiune a bilelor de deo roll, șlefuite, măsurate la ecuator.

Din diagrama reprezentată în Figura 5.10 se observă următoarele:

- valorile forțelor maxime măsurate la ecuator sunt semnificativ mai mici în raport cu cele măsurate la poli;
- rezistența cea mai mare la compresiune a bilelor șlefuite, măsurată la ecuator, corespunde bilelor obținute prin metoda clasică, urmată de cea cu element încălzitor și cu radiații infraroșii;
- rezistența cea mai mică corespunde bilelor șlefuite obținute prin sudarea cu ultrasunete, atât la frecvența de 20 kHz cât și la frecvența de 35 kHz.

Prin reprezentarea *curbelor caracteristice la compresiune*, obținute prin softul instalat pe controlerul standului de măsurare Zwick/Roell se pot analiza mult mai detaliat comportamentele bilelor obținute prin fiecare tehnologie în parte.

Pentru fiecare măsurare s-au efectuat aproximativ 5000 de înregistrări privind evoluția în timp a forței de compresiune și a deformației aferente bilelor de deo roll testate.

Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune [87] pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin tehnologia clasică este redată în Figura 5.11. Pentru a avea o imagine de ansamblu, cele 4 curbe au fost concatenate în același grafic.

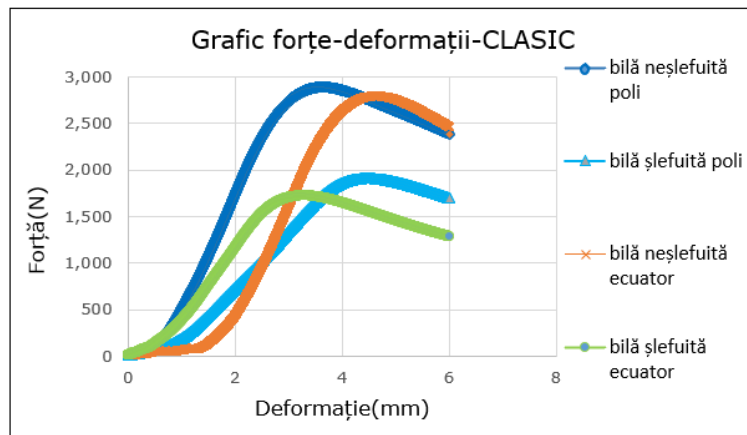


Figura 5.11. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin tehnologia clasică.

Din analizarea curbelor caracteristice la compresiune din Figura 5.11 rezultă următoarele:

- rezistența la compresiune a bilei șlefuite este întodeauna mai mică în comparație cu cea a bilei neșlefuite, atât la poli cât și la ecuator;
- rezistența la compresiune la poli este întodeauna mai mare în comparație cu cea de la ecuator;

- la bilele supuse la compresiune pe direcție polară se pot observa zone cu modificări în volum dispuse pe cercuri paralele cu ecuatorul (Figura 5.12-a). La bilele supuse la compresiune pe direcție ecuatorială se pot observa zone cu modificări în volum, dispuse pe cercuri perpendiculare pe ecuator (Figura 5.12-b).

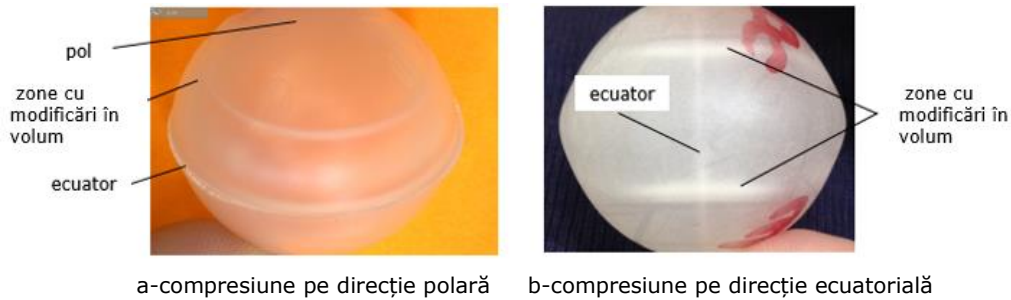


Figura 5.12. Bile de deo roll obținute cu tehnologia clasică, supuse la compresiune, cu apariția de zone cu modificări în volum.

Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz este redată în Figura 5.13.

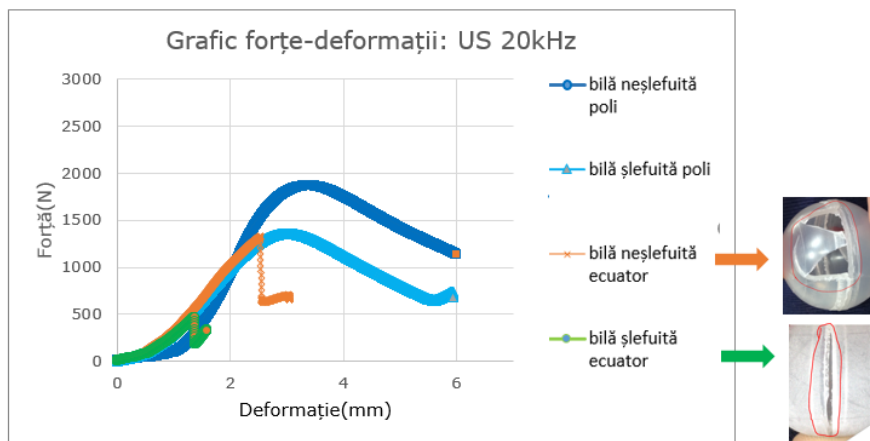


Figura 5.13. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz.

Din analiza curbelor caracteristice la compresiune din Figura 5.13 rezultă următoarele:

- rezistența la compresiune a bilelor șlefuite este întodeauna mai mică în comparație cu cea a bilelor neșlefuite, atât la poli cât și la ecuator;

- rezistența la compresiune a bilei la poli este întodeauna mai mare în comparație cu cea de la ecuator, atât la bilele șlefuite cât și la bilele neșlefuite;
- la bilele neșlefuite supuse la compresiune pe direcție polară, se pot observa zone cu modificări în volum, dispuse pe cercuri paralele cu ecuatorul (Figura 5.14). Acest fenomen se datorează disipării plastice a energiei acumulate ca urmare a exercitării forței de compresiune [93].



Figura 5.14. Bilă de deo roll neșlefuită, obținută prin sudare cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz, supusă la compresiune pe direcție polară, cu apariția de zone cu modificări în volum.

- la bilele sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 kHz, neșlefuite, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială, în majoritatea cazurilor s-a observat fenomenul de rupere fragilă care a dus la apariția unor crăpături severe în zona cordonului de sudură care s-au propagat aleator în pereții bilei (Figura 5.15).

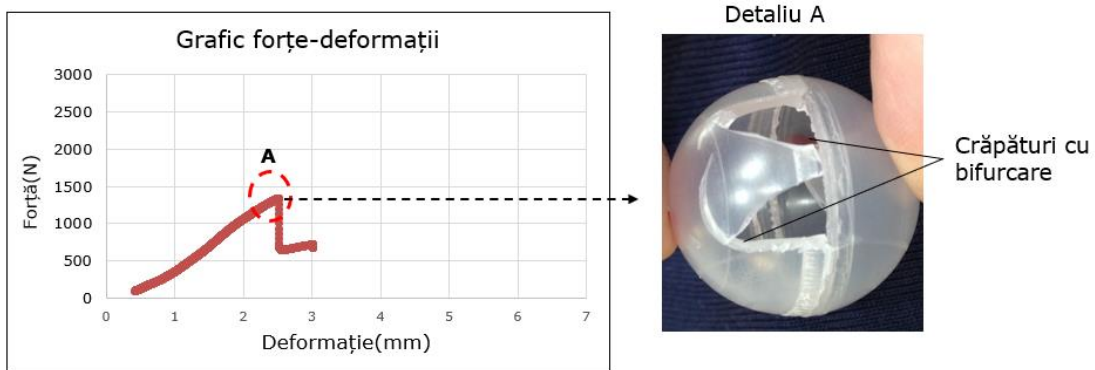


Figura 5.15. Crăpături apărute la bilele de deo roll neșlefuite, sudate cu ultrasunete la frecvența de 20 KHz, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială.

În Figura 5.15 se observă că la atingerea forței maxime (punctul A) are loc o rupere fragilă a peretelui bilei, în urma căreia crăpăturile s-au propagat pe mai multe direcții. În literatura de specialitate acest fenomen mai poartă denumirea de propagare prin „bifurcare” [90].

Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz este redată în Figura 5.16.

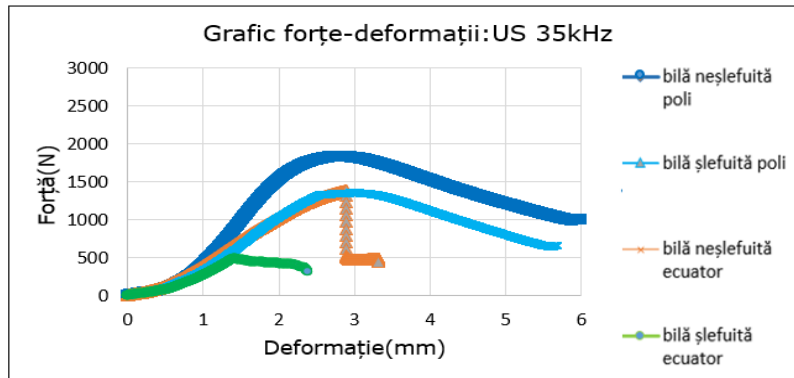


Figura 5.16. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz.

Din analiza curbelor caracteristice la compresiune din Figura 5.16 rezultă următoarele:

- comportamentul bilelor de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz este aproape similar cu cel la frecvența de 20 kHz;
- rezistența mecanică a bilelor de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu ultrasunete la frecvența de 35 kHz este comparabilă cu cea la frecvența de 20 kHz;
- în urma procesului de șlefuire se constată o scădere semnificativă a rezistenței mecanice la ecuator.

Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu element încălzitor este redată în Figura 5.17.

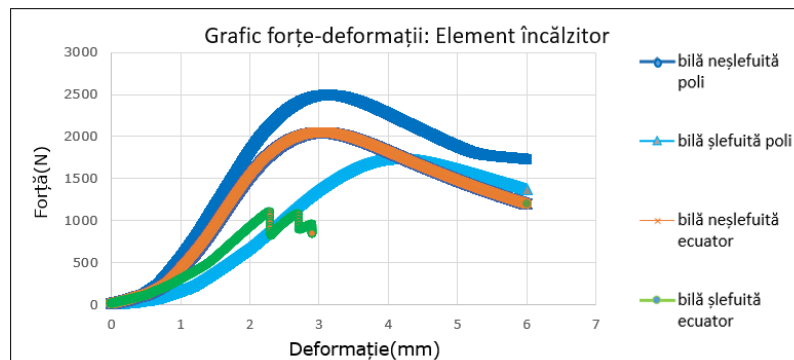


Figura 5.17. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu element încălzitor.

Din analiza curbelor caracteristice la compresiune prezentate în Figura 5.17 rezultă următoarele :

- rezistența la compresiune a bilei la poli este întodeauna mai mare în comparație cu cea de la ecuator;
- la bilele supuse la compresiune atât pe direcție polară cât și pe direcție ecuatorială se observă deformații permanente ale bilei, dar fără apariția de crăpături în cordonul de sudură sau în pereții bilei (Figura 5.18). Acest comportament certifică o calitate bună a sudurii și o rezistență, corespunzătoare a bilei șlefuite sau neșlefuite.



Figura 5.18. Deformații ale bilei șlefuite obținute prin sudare cu element încălzitor, supuse la compresiune pe direcție ecuatorială.

Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu radiații infraroșii este redată în Figura 5.19.

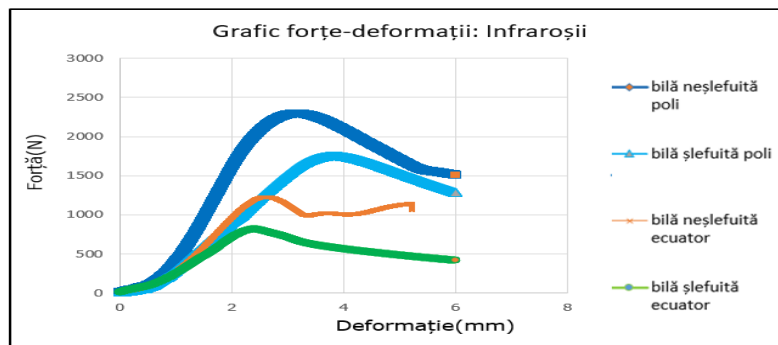


Figura 5.19. Reprezentarea curbelor caracteristice la compresiune pentru bilele de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu radiații infraroșii.

Din analiza curbelor caracteristice la compresiune din Figura 5.19 rezultă următoarele:

- comportamentul bilelor de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu radiații infraroșii este aproape similar cu cele obținute prin sudarea cu element încălzitor;
- rezistența mecanică a bilelor de deo roll, șlefuite și neșlefuite, obținute prin sudarea cu radiații infraroșii este inferioară celei cu element încălzitor;

Reprezentarea grafică a tuturor curbelor de compresiune obținute prin intermediul programului software Zwick/Roell este redată în Figura 5.20.

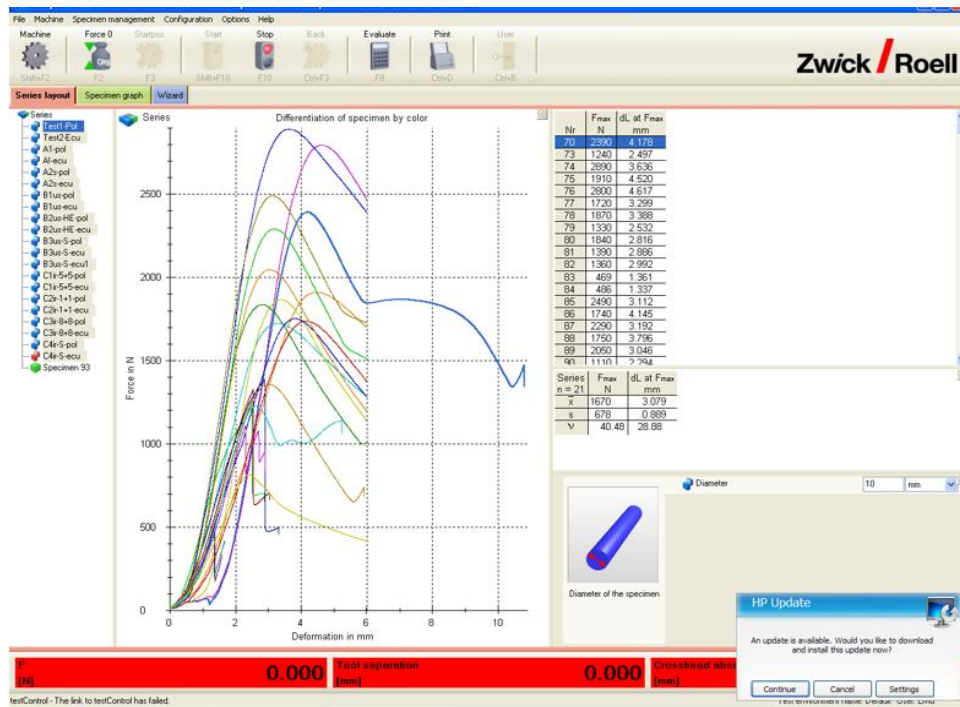


Figura 5.20.Reprezentarea grafică a curbelor de compresiune obținute cu programul de software Zwick/Roell pentru toate tehnologiile de fabricație a bilelor de deo roll.

În Figura 5.20 se observă o dispersie mare a curbelor de compresiune în funcție de metoda și tehnologia de obținere a bilelor de deo roll.

Pentru sintetizarea rezultatelor obținute la măsurările efectuate pentru toate tehnologiile studiate s-au analizat *forțele medii* de compresiune. Pentru fiecare grup de câte cinci măsurări din Tabelul 5.9 s-a calculat forța medie ca fiind media aritmetică a măsurărilor aferente lotului respectiv.

Reprezentarea forțelor medii de compresiune pentru toate loturile de bile de deo roll este redată în graficul din Figura 5.21.

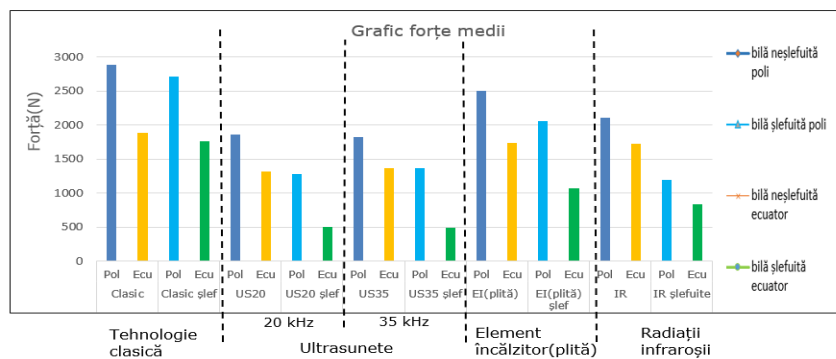


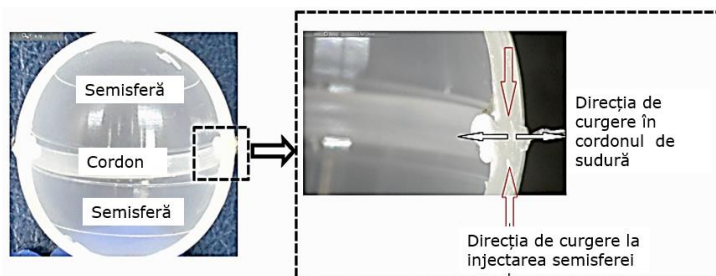
Figura 5.21. Reprezentarea forțelor medii de compresiune pentru toate loturile de bile.



## 5.5 Observații și discuții

1. Bilele de deo roll obținute prin metoda clasică rezistă la o forță de compresiune mai mare în comparație de cele obținute prin tehnologiile alternative de fabricare (prin sudarea cu ultrasunete, cu element încălzitor sau cu radiații infraroșii). Explicația principală constă în faptul că grosimea peretelui bilei obținute prin metoda clasică este cu aproximativ 20% mai mare decât al bilelor obținute prin metodele alternative studiate;
2. La toate tehnologiile evaluate, prin solicitarea la compresiune se observă un comportament anizotrop al bilelor de deo roll. S-au constatat diferențe mari între rezistența la compresiune măsurată pe direcție polară și cea măsurată pe direcție ecuatorială;
3. Determinarea rezistenței la compresiune pe direcție ecuatorială trebuie să stea la baza planului de verificare a calității bilelor șlefuite și neșlefuite;
4. Apariția unor valori mai mici ale rezistenței mecanice nu trebuie să conducă automat la restricționarea unor metode alternative de fabricație a bilelor de deo roll;
5. În prezent nu există informații clare și unitare care să impună valori minime ale rezistenței la compresiune ale bilelor de deo roll. Specificațiile impuse de fabricanții de produse cosmetice prescriu în general aspecte dimensionale, de funcționalitate și de estetică vizuală;
6. Este necesară optimizarea tehnologiei actuale de șlefuire a bilelor de deo roll;
7. Rezistența mai slabă la compresiune pe direcție ecuatorială este determinată în primul rând de calitatea sudurilor dar și de parametrii procesului tehnologic de șlefuire. Calitatea sudurilor este influențată la rândul ei de următoarele:
  - tehnologiile alese (ultrasunete, element încălzitor, infraroșii, etc);
  - proprietățile materialelor polimerice utilizate;
  - parametrii procesului de sudare;
  - modificarea *structurii* materialului din cordonul de sudură în urma procesului de sudare [8, 91].

*Structura* materialului în zona cordonului de sudură se poate observa prin secționarea bilei perpendicular pe cordonul de sudură (Figura 5.22-a). Direcția de curgere a materialului topit în pereții bilei, în timpul procesului de injectare, se realizează dinspre punctul de injecție (situat la pol) înspre extremități (ecuator). Pe de altă parte, direcția de curgere a materialului topit în cordonul de sudură este *perpendiculară* pe direcția de curgere rezultată în timpul procesului de injectare a semisferelor (Figura 5.22-b).



a) secțiune transversală prin bilă b) detaliu: direcția de curgere a materialului topit

Figura 5.22. Schimbarea structurii morfologice a materialului polimeric în cordonul de sudură.

În urma procesului de sudare în zona cordonului de sudură are loc o *extincție locală a structurii morfologice originale a materialului polimeric și apariția unei noi morfologii între componentele sudate* [91].

Acest fenomen de *reorientare* a lanțurilor moleculare poate duce la scăderea performanțelor de rezistență mecanică în cordonul de sudură [92] și poate explica un comportament mai puțin performant al bilelor sudate atunci când forța de compresiune este aplicată pe direcție ecuatorială [93].

În urma determinărilor de calitate se pot centraliza rezultatele obținute pentru fiecare tehnologie de fabricare a bilelor de deo roll (Tabelul 5.10).

Tabelul 5.10. Centralizator sintetic cu rezultatele obținute pentru fiecare tehnologie de fabricare a bilelor de deo roll.

Nr. crt.	Indicator evaluat	Tehnologie clasică	Tehnologii alternative				
			US	F	EI	IR	L
1	Timp total de ciclu de sudare (s)	16 -18	6-9	NE	10-12	13 - 15	NE
2	Consum de material pe unitatea de produs (g)	2,8	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
3	Calitate sudură	Nu necesită sudare	slabă	slabă	bună	bună	slabă
4	Productivitate (mii bile/oră)	3-5	NE	NE	10 -12	6-8	NE
5	Forță medie la compresiune a bilei neslefuite/slefuite (N)	1881 /1766	1366 /494	NE	1731 / 1075	1738 /831	NE
6	Capabilitate de proces (Cpk) referitoare la masele bilelor (capabilitate bună când Cpk>1)	0,56	4,47	NE	1,9	3,24	NE
7	Know how de proces	mare	slab	slab	slab	slab	slab

Legendă:

US - sudare cu ultrasunete;

F - sudare prin frecare;

EÎ - sudare termică cu element încălzitor;

IR- sudare termică cu radiații infraroșii;

L - sudare cu laser;

NE- neevaluat.

## 6. CONFIGURAREA UNEI LINII DE FABRICAȚIE A BILELOR DE DEO ROLL

### 6.1 Alegerea tehnologiei de fabricație

În urma analizării rezultatelor din Tabelul 5.10 se pot identifica tehnologiile care permit transpunerea acestora în linii de fabricație de serie mare. Fiecărui parametru evaluat i s-a atribuit un scor de la 0 la 3 (0- neevaluat, 1- slab, 2- mediu, 3- bun). Prin însumarea scorurilor indicatorilor evaluați a rezultat un *indicator de performanță* pentru fiecare tehnologie în parte. A fost calculat și un indicator de performanță exprimat în valori procentuale, raportat la tehnologia clasică (actuală).

Cuantificarea procedeelor de sudare sub aspectul transpunerii în linii de fabricație a bilelor deo roll este prezentată în Tabelul 6.1.

Tabelul 6.1. Cuantificarea tehnologiilor de sudare a bilelor de deo roll.

Nr. crt.	Indicator evaluat	Tehnologie clasică	Tehnologii alternative				
			US	F	EI	IR	L
1	Timp de ciclu de sudare	1	3	0	2	1	0
2	Consum de material pe unitatea de produs	1	3	3	3	3	3
3	Calitate sudură	3	1	1	2	2	1
4	Productivitate	1	0	0	2	2	0
5	Forță medie la compresiune a bilei șlefuite	3	1	0	2	1	0
6	Capabilitate de proces referitoare la masele bilelor	2	3	0	3	3	0
7	Know how (experiență în domeniul fabricării bilelor)	3	1	1	1	1	1
<b>Indicator de performanță</b>		<b>14</b>	<b>12</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>5</b>
<b>Indicator de performanță (%)</b>		<b>100</b>	<b>85</b>	<b>36</b>	<b>107</b>	<b>93</b>	<b>36</b>
<b>Estimare probabilitate de utilizare a procedurii tehnologice într-o linie de fabricație</b>		în uz	mică	mică	mare	medie	mică

0 0 puncte: neevaluat

2 2 puncte: mediu

1 1 punct: slab

3 3 puncte: mare

Tehnologiile alternative de fabricare prin sudare a bilelor de deo roll considerate ca fiind adecvate pentru producția de serie mare sunt :

- sudarea cu element încălzitor (cu sau fără contact direct);
- sudarea cu radiații infraroșii.

Din cercetările prezentate rezultă că metoda de sudare cu element încălzitor este metoda alternativă cea mai fezabilă pentru producerea în serie mare a bilelor de deo roll, urmată de sudarea cu radiații infraroșii. Metoda de sudare cu ultrasunete are un potențial ridicat de implementare, dar necesită cercetări suplimentare în vederea îmbunătățirii calității sudurilor și a creșterii productivității.

## 6.2 Configurarea unei linii de fabricație a bilelor de deo roll prin sudarea semisferelor cu element încălzitor

Rezultatele experimentale obținute permit configurarea unui sistem integrat de producere și asamblare a bilelor de deo roll din polipropilenă la o cadență de aproximativ 150-200 de repere sudate/minut. Schema de principiu a unei linii de fabricație de mare productivitate, care se bazează pe sudarea semisferelor cu element încălzitor, este redată în Figura 6.1.

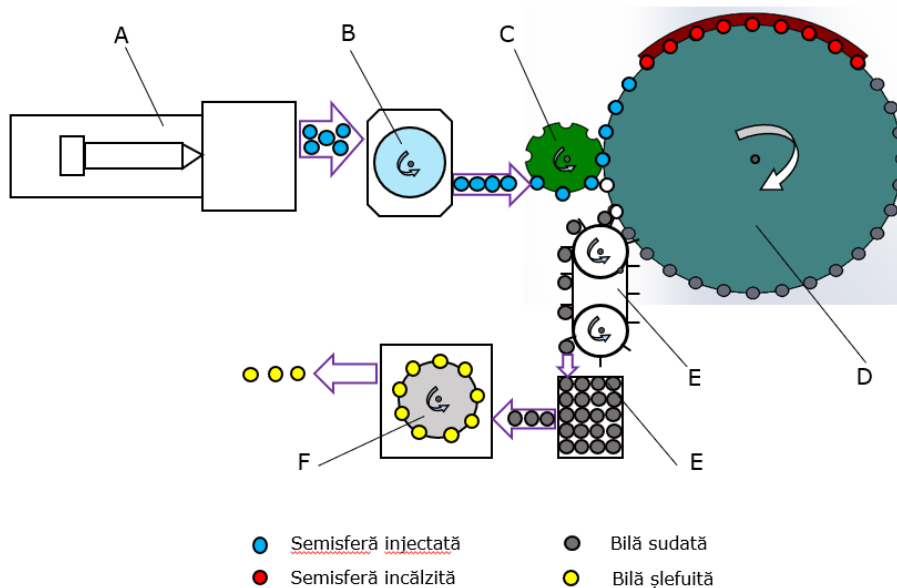


Figura 6.1. Schema de principiu a unei linii flexibile de mare productivitate pentru producerea și asamblarea bilelor de deo roll.

Linia de fabricație este alcătuită din următoarele echipamente:

- A- sistemul de producție a semisferelor de deo roll;
- B- sistemul de alimentare și orientare a semisferelor de deo roll;
- C- unitatea de inserție a semisferelor;
- D- echipamentul de asamblare prin sudare a bilelor de deo roll;
- E- sistemul de evacuare a bilelor sudate;

F- stația de acumulare a bilelor de deo roll;

G- echipamentul de șlefuire și calibrare a bilelor de deo roll.

Descrierea detaliată a fiecărui echipament care intră în componența liniei de fabricație a bilelor de deo roll este redată mai jos:

A. Sistemul de producție a semisferelor de deo roll

Sistemul este compus dintr-o mașină de injecție (Figura 6.2-a), pe care este instalată o matriță cu 24 de cavități, având un timp de ciclu de aproximativ 3-3,5 secunde (Figura 6.2-b). Ca alternativă, se poate instala o mașină de compresie cu 32 de posturi de lucru.

Pe mașina de injecție se pot instala matrițe care produc semisfere de mai multe dimensiuni (diametre exterioare de: 1" / 1,14" / 1,3" sau 1,4"). Dacă semisferele care alcătuiesc bila de deo roll sunt identice, se recomandă utilizarea unei mașini de injecție pe care se instalează o matriță de 64 de cavități.

În Figura 6.2-c se observă forma semisferică a unei cavități dintr-o matriță de injecție.

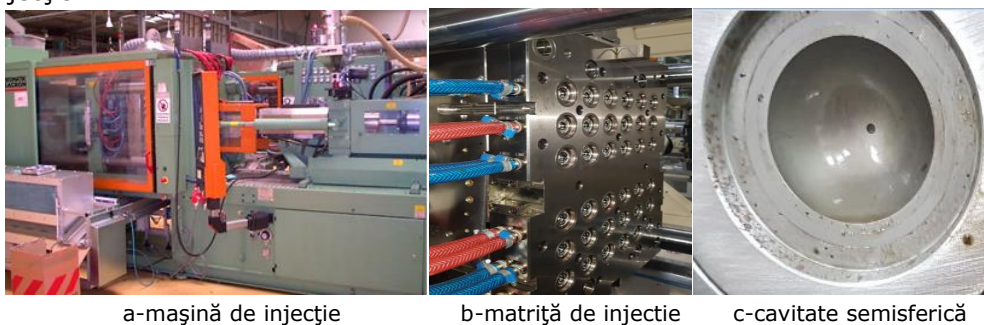


Figura 6.2. Sistemul de producție a semisferelor de deo roll.

B. Sistemul de alimentare și orientare a semisferelor de deo roll

Pentru orientarea semisferelor se pot folosi două orientatoare centrifugale cu platan rotativ (Figura 6.3). Platanul este prevăzut pe zona periferică cu alveole (buzunare) care permit trecerea semisferelor orientate în poziție corectă (Figura 6.4). Semisferele orientate incorect sunt îndepărtate prin suflare cu aer comprimat și întoarse în orientator.

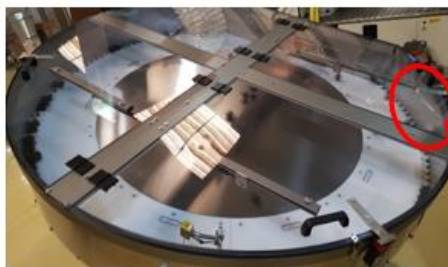


Figura 6.3. Orientator centrifugal.



Figura 6.4. Platan rotativ cu alveole.

Există și varianta de orientator vibrant compus din două unități de orientare, câte o unitate pentru fiecare flux de semisfere (Figura 6.5).



Figura 6.5. Variantă de orientator vibrant.

Prin utilizarea acestei variante, transportul și orientarea semisferelor se realizează cu ajutorul vibrațiilor mecanice. Sunt necesare două fluxuri de semisfere orientate: un flux aferent semisferelor care alimentează dispozitivele de fixare inferioare, respectiv un al doilea flux care alimentează dispozitivele de fixare superioare ale echipamentului de asamblare.

#### C. Unitatea de inserție a semisferelor

Unitatea de inserție asigură preluarea semisferelor orientate în dispozitivele purtătoare ale echipamentului de asamblare, la o cadență prestabilită. Mișcarea de rotație a unității de inserție este sincronizată cu mișcarea de rotație a echipamentului de asamblare prin transmisii mecanice cu roți dințate (Figura 6.6) [94, 95, 96, 97, 98]. Unitatea de inserție va asigura alimentarea echipamentului de asamblare în două fluxuri de semisfere, aferente dispozitivelor purtătoare superioare și inferioare.

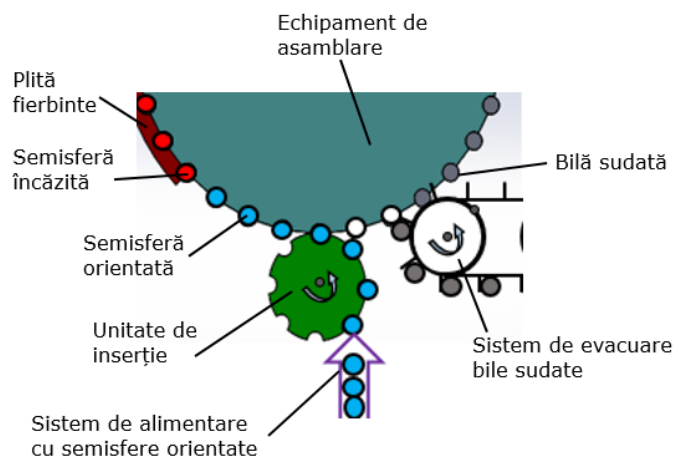


Figura 6.6. Unitatea de inserție a semisferelor de deo roll.

## D. Echipamentul de asamblare prin sudare a bilelor de deo roll

Echipamentul de asamblare prin sudare a semisferelor, cu element încălzitor, este de tip rotativ/carusel cu 32 de posturi de lucru. Componentele principale ale părților active ale echipamentului de asamblare sunt redată schematizat în Figura 6.7.

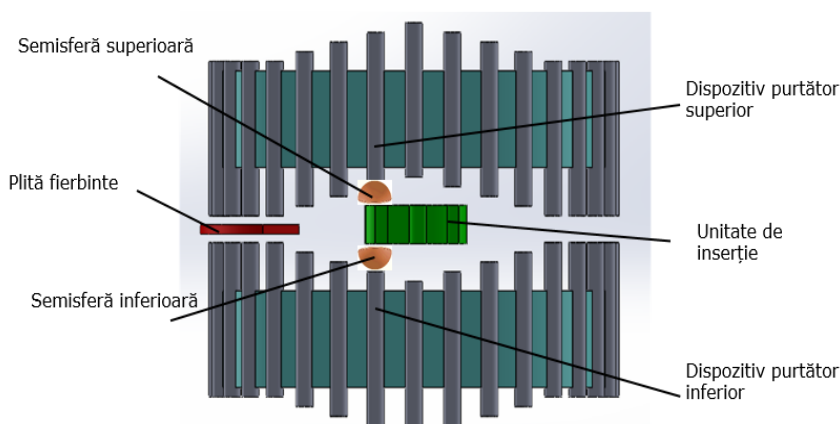


Figura 6.7. Schița echipamentului de asamblare a bilelor de deo roll.

Poziția relativă a celor două dispozitive purtătoare opuse este dată de profilul unei came spațiale cilindrice frontale, la care tijele purtătoare (superioare și inferioare) sunt și tacheți care se rotesc în jurul axei de simetrie a camei cilindrice fixe.

Fazele de asamblare prin sudare sunt prezentate în Figura 6.8. Succesiunea fazelor de sudare este următoarea:

1. În prima fază (Figura 6.8-poziția 1) se realizează preluarea semisferelor în dispozitivele purtătoare superioare și inferioare dispuse pe circumferința caruselului, în număr de 32 de perechi. După preluarea în dispozitive, semisferele ajung în contact cu o placă de centrare care are rolul de a asigura orientarea plan paralelă a acestora în zona de contact.
2. În faza a doua se realizează încălzirea controlată și uniformă a semisferelor până la atingerea temperaturii de topire a materialului în zona de îmbinare (Figura 6.8-poziția 2). Sistemul de încălzire echipat cu o plită fierbinte, din material ceramic, încălzită la 260-280°C, este poziționat pe circumferința caruselului, între dispozitivele purtătoare superioare și inferioare. Semisferele amplasate în dispozitivele purtătoare sincronizate sunt aduse în contact direct cu plita fierbinte, prin mișcări de translație precise, generate de profilul camei cilindrice. Dispozitivele purtătoare sunt răcite la 15-20°C, pentru a preîntâmpina supraîncălzirea în timp a echipamentului de asamblare, dar și „înmuirea” excesivă a materialului semisferelor în timpul procesului de sudare.

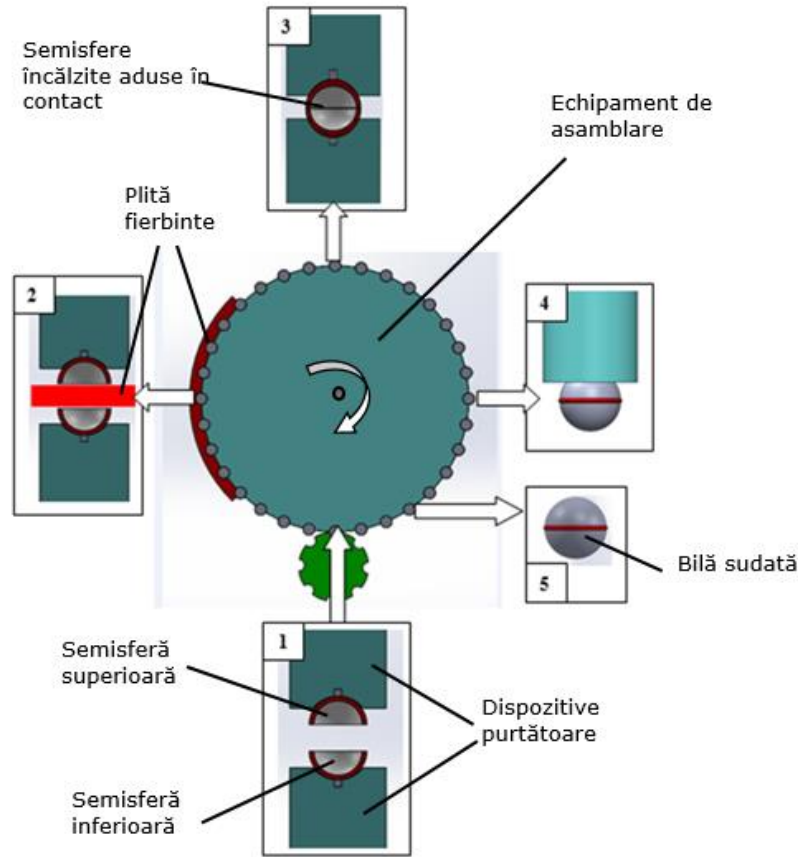


Figura 6.8. Schematizarea operațiilor de sudare cu element încălzitor.

3. După finalizarea fazei de încălzire, semisferele sunt aduse în contact (Figura 6.8–poziția 3) și presate una spre cealaltă pe distanțe determinate de profilele camelor cilindrice frontale. Se urmărește o refulare controlată de material topit în interiorul și exteriorul îmbinării în vederea obținerii unei îmbinări etanșe, cu o rezistență mecanică conformă cu specificațiile impuse în fișa de produs.
4. În faza a 4-a, premergătoare evacuării, bilele sudate rămân în dispozitivele purtătoare superioare prin tehnica vacuumării (Figura 6.8-pozitia 4). Concomitent, dispozitivele inferioare realizează o cursă de revenire (coborâre), determinată de profilul camei frontale inferioare.
5. În momentul în care bilele de deo roll sudate ajung în zona de evacuare, acțiunea vacuumului încetează și acestea sunt eliberate din dispozitivele superioare (Figura 6.8-pozitia 5).



## E. Sistemul de evacuare a bilelor sudate

După evacuare, bilele sudate sunt preluate de un sistem sincronizat cu mișcarea echipamentului de asamblare (Figura 6.9).

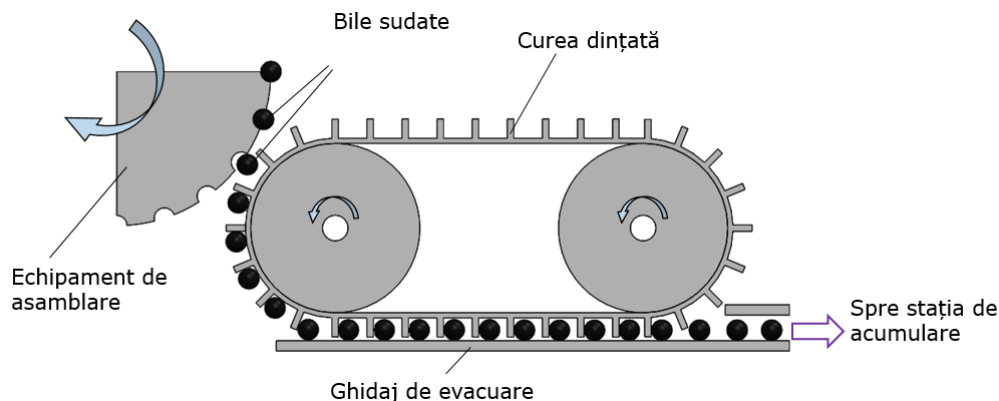


Figura 6.9. Sistem sincron de evacuare a bilelor sudate.

Sistemul de evacuare este prevăzut cu o curea dințată, care preia bilele sudate bucată cu bucată, pentru a fi transferate spre stația de acumulare.

## F. Stația de acumulare a bilelor de deo roll

În vederea asigurării unei funcționări autonome și continue a echipamentului de șlefuire și calibrare, este necesară realizarea unei zone de acumulare a unui număr minim/maxim de bile.

## G. Echipamentul de șlefuire și calibrare a bilelor de deo roll

Echipamentul realizează prelucrarea mecanică a bilelor pentru îndepărtarea bavurilor, calibrarea dimensională și obținerea unei rugozități predefinite.

## 6.3 Proiectarea mecanismelor cu camă cilindrică

Sistemul de tip carusel propus, având schema de principiu prezentată în Figura 6.10, conține două mecanisme cu camă spațială cilindrică cu canal, în varianta cu came fixe și suportți port-tachet în mișcare sincronă de rotație [95, 96, 97]. Cele două came cilindrice fixe sunt came simetrice (superioară și inferioară). Asigurarea contactului permanent dintre camă și rola tacheților se realizează prin intermediul canalului executat în camă (prin formă). Spațiul de lucru tehnologic al sistemului de tip carusel este situat între suportții port-tachet aflați în mișcare sincronă de rotație. Fiecare tachet susține un dispozitiv purtător al unei semisfere fixată vacuumatic din poziția de preluare a semisferelor și până la evacuarea bilelor sudate.

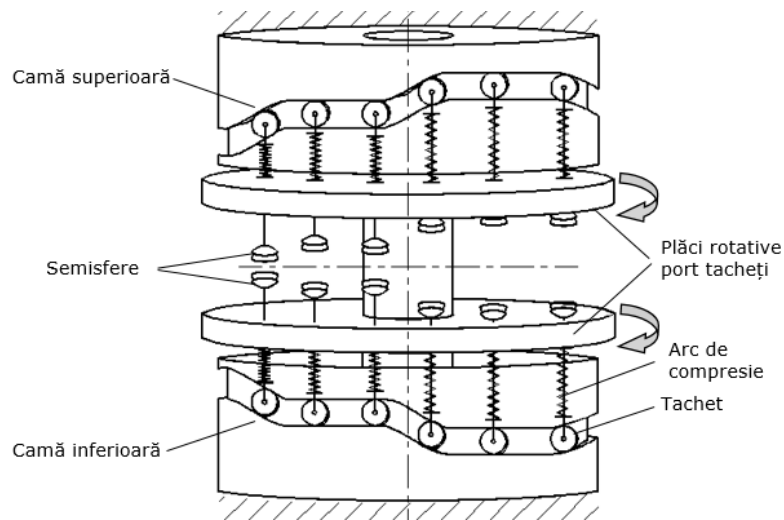


Figura 6.10. Schema cinematică a unui sistem de tip carusel pentru asamblarea bilelor de deo roll.

### 6.3.1 Planul optim de mișcare a tachelului mecanismului cu camă

În concordanță cu procesul tehnologic de sudare a semisferelor de deo roll se poate defini planul general de mișcare a tachelului mecanismului cu camă cilindrică superioară cu canal conform cu Figura 6.11. Analog, planul general de mișcare a tachelului mecanismului cu camă cilindrică inferioară cu canal este simetric față de abscisă.

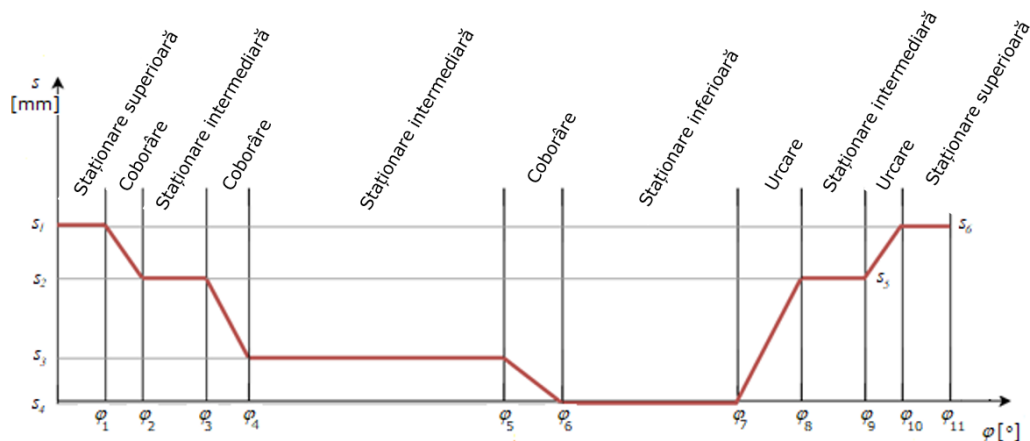


Figura 6.11. Planul general de mișcare a tachelului pentru mecanismul cu camă cilindrică cu canal (superioară).

Domeniile de valori acceptate în procesul tehnologic pentru cursele unghiulare ale suportilor port-tachet „ $\varphi$ ” și cursele tachelilor „ $s$ ” sunt evidențiate în Tabelul 6.2, urmând a fi optimizate în vederea obținerii unui timp de ciclu corespunzător.

Tabelul 6.2. Valorile curselor acceptate în procesul tehnologic de sudare a semisferelor.

Nr crt	Fază de mișcare	Fază tehnologică/ Condiții tehnologice	Poziția tachelului s [mm]	Unghiul de rotație aferent fazei $\Delta\varphi$ [°]
1	Staționare superioară 1	Preluarea semisferelor	$s_1 = 21$ mm	$\Delta\varphi_1 = 15^\circ$
2	Coborâre 1	Evitarea șocurilor moi	$s_2 = 14$ mm	$\Delta\varphi_2 = 15^\circ - 22,5^\circ$
3	Staționare intermediară 2	Alinierea semisferelor	$s_2 = 14$ mm	$\Delta\varphi_3 = 15^\circ - 20^\circ$
4	Coborâre 2	Evitarea șocurilor moi	$s_3 = 5$ mm	$\Delta\varphi_4 = 15^\circ - 22,5^\circ$
5	Staționare 3	Încălzirea semisferelor	$s_3 = 5$ mm	$\Delta\varphi_5 = 100^\circ - 78^\circ$
6	Coborâre 3	Accelerație mare ( $a=6-10$ mm/s <sup>2</sup> și Ft=10 N)	$s_4 = -0,15$ mm	$\Delta\varphi_6 = 57^\circ - 74^\circ$
7	Staționare inferioară 4	Sudarea semisferelor	$s_4 = -0,15$ mm	$\Delta\varphi_7 = 73^\circ - 48^\circ$
8	Urcare 1	Accelerație redusă	$s_5 = 14$ mm	$\Delta\varphi_8 = 15^\circ - 22,5^\circ$
9	Staționare intermediară 5	Evacuarea bilelor sudate	$s_5 = 14$ mm	$\Delta\varphi_9 = 20^\circ$
10	Urcare 2	Evitarea șocurilor moi	$s_6 = 21$ mm	$\Delta\varphi_{10} = 15^\circ - 22,5^\circ$
11	Staționare superioară 6	Preluarea semisferelor (reluare ciclu)	$s_6 = 21$ mm	$\Delta\varphi_{11} = 20^\circ - 15^\circ$

Calculul timpilor de execuție aferenți fazelor de urcare, coborâre și staționare ai tachelului se vor calcula cu relația:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta\varphi_i - \Delta\varphi_{i-1}}{\omega} [s], \quad i = 1, \dots, 11, \quad \Delta\varphi_0 = 0^\circ \quad (6.1)$$

unde:  $\Delta t_i$  – timpul aferent fazei de mișcare;  
 $\Delta\varphi_i$  – unghiul aferent fazei de mișcare;  
 $\omega$  – viteza unghiulară a suportului port-tacheți.

În vederea optimizării procesului tehnologic s-au luat în considerare valorile minime, respectiv cele maxime aferente unghiului de rotație al suportului port-tachet, cât și două valori ale turației  $n = \{5; 6,5\}$  rot/min corespunzătoare vitezelor unghiulare  $\omega = \{0,524; 0,681\}$  rad/s. Valorile timpilor aferenți fazelor de mișcare pentru cele patru variante analizate sunt prezentate în Tabelul 6.3.

Timpul aferent fazei de încălzire a semisferelor este determinat de aspecte tehnologice rezultate din experimentele de sudare și trebuie să fie cuprins în intervalul [2,5 – 3,5] s. Aceleași considerente au stat și la baza alocării timpului de sudare  $t_{s4}$  care trebuie să se încadreze în intervalul [1,5-2] s. Pentru varianta cu turația  $n=5$  rot/min, timpul de ciclu total este de 12 s și este mai mare cu aproximativ 2,5 s în comparație cu varianta cu turația  $n=6,5$  rot/min.

Tabelul 6.3. Valorile timpilor aferenți fazelor de mișcare pentru variantele analizate.

Nr crt	Fază de mișcare	Turație n=5 rot/min				Turație n=6,5 rot/min			
		Varianta 1		Varianta 2		Varianta 3		Varianta 4	
		unghi de rotație $\varphi$ [°]	timp de fază $\Delta t_i$ [s]	unghi de rotație $\varphi$ [°]	timp de fază $\Delta t_i$ [s]	unghi de rotație $\varphi$ [°]	timp de fază $\Delta t_i$ [s]	unghi de rotație $\varphi$ [°]	timp de fază $\Delta t_i$ [s]
1	Staționare superioară 1	15	0,5	15	0,5	15	0,385	15	0,385
2	Coborâre 1	30	0,5	37,5	0,75	30	0,385	37,5	0,577
3	Staționare intermediară 2	45	0,5	57,5	0,667	45	0,385	57,5	0,513
4	Coborâre 2	60	0,5	80	0,75	60	0,385	80	0,577
5	Staționare 3	160	3,333	158	2,6	160	2,564	158	2
6	Coborâre 3	217	1,9	232	2,467	217	1,462	232	1,897
7	Staționare inferioară 4	290	2,433	280	1,6	290	1,872	280	1,231
8	Urcare 1	305	0,5	302,5	0,75	305	0,385	302,5	0,577
9	Staționare intermediară 5	325	0,667	322,5	0,667	325	0,513	322,5	0,513
10	Urcare 2	340	0,5	345	0,75	340	0,385	345	0,577
11	Staționare superioară 6	360	0,667	360	0,5	360	0,513	360	0,385
<b>TOTAL</b>			<b>12</b>		<b>12</b>		<b>9,23</b>		<b>9,23</b>

În urma analizării tuturor variantelor și a condițiilor tehnologice impuse s-a stabilit că turația optimă care asigură și timpii tehnologici necesari este de  $n=5$  rot/min și corespunde variantei 1.

### 6.3.2 Alegerea legilor de mișcare a tachtului mecanismului cu camă

Pentru fazele de urcare și coborâre ale tachtului este necesară alegerea legilor de mișcare în funcție de condițiile tehnologice impuse. În vederea alegerii legilor de mișcare optime se vor analiza valorile caracteristice adimensionale ale vitezei, accelerației, șocului și a momentului dinamic pentru legile de mișcare dublu normate [95, 99, 100].

Legile de mișcare dublu normate  $f(z)$  se obțin prin raportarea parametrului geometric al elementului condus  $s$  la cursa totală a acestuia  $h$  și parametrul geometric al elementului conducător  $\varphi$  la valoarea corespunzătoare cursei de urcare  $\varphi_u$ :

$$s = h \cdot f(z), \quad f(z) \in [0,1] \quad (6.2)$$

sau de coborâre  $\varphi_c$ :

$$s = h \cdot (1 - f(z)), \quad f(z) \in [0,1], \quad (6.3)$$

unde:  $s$  - cursa curentă a tachelului;  
 $h$  - cursa totală a tachelului pentru o fază de mișcare;

Pentru legile de mișcare dublu normate sunt definite următoarele valori cinematice caracteristice adimensionale [17]:

- valoarea caracteristică adimensională a vitezei

$$c_v = |f'(z)|_{max}, \quad \text{pentru} \quad v_{max} = \frac{h}{\Delta\varphi_{u/c}} \cdot \omega \cdot c_v, \quad (6.4)$$

- valoarea caracteristică adimensională a accelerației

$$c_a = |f''(z)|_{max}, \quad \text{pentru} \quad a_{max} = \frac{h}{\Delta\varphi_{u/c}^2} \cdot \omega^2 \cdot c_a, \quad (6.5)$$

- valoarea caracteristică adimensională a șocului

$$c_j = |f'''(z)|_{max}, \quad \text{pentru} \quad j_{max} = \frac{h}{\Delta\varphi_{u/c}^3} \cdot \omega^3 \cdot c_j, \quad (6.6)$$

- valoarea caracteristică adimensională a momentelor dinamice

$$c_{Mdin} = |f'(z) \cdot f''(z)|_{max}, \quad (6.7)$$

În general, valorile caracteristice adimensionale ale legilor de mișcare, în funcție de condițiile tehnologice trebuie să fie minime. Funcție de valorile caracteristice adimensionale se vor putea enunța considerațiile prezentate în Tabelul 6.4.

Tabelul 6.4. Valorile caracteristice adimensionale ale legilor de mișcare și condițiile tehnologice aferente.

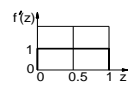
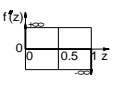
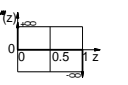
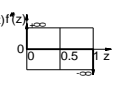
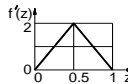
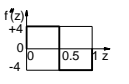
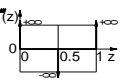
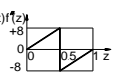
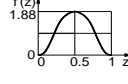
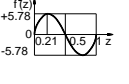
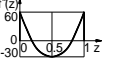
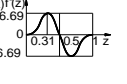
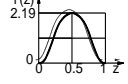
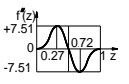
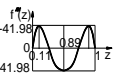
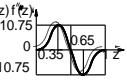
Valoare caracteristică adimensională	Condiția tehnologică
$c_v \rightarrow$ minim	momentul motor necesar învingerii forțelor statice (forțele elastice, gravitaționale, tehnologice) care acționează asupra elementului condus să fie minim
$c_a \rightarrow$ minim	forțele masice să fie minime
$c_j \rightarrow$ minim	nivelul vibrațiilor să fie minim
$c_{Mdin} \rightarrow$ minim	momentul motor necesar învingerii forțelor de inerție ale elementului condus să fie minim

Legile de mișcare dublu normate luate în considerare pentru mișcarea din staționare în staționare pot fi clasificate în trei grupe, și anume:

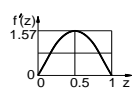
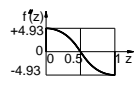
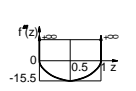
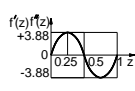
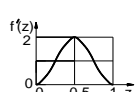
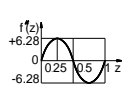
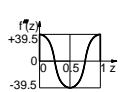
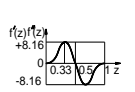
1. Legi de mișcare polinomiale (Tabelul 6.5)
  - Legea de mișcare cu viteză constantă;
  - Legea de mișcare cu accelerație constantă;
  - Legea de mișcare polinomială 3-4-5;
  - Legea de mișcare polinomială 4-5-6-7.
2. Legi de mișcare armonice (Tabelul 6.6)
  - Legea de mișcare cosinusoidală;

- Legea de mișcare sinusoidală.
- 3. Legi de mișcare modificate (Tabelul 6.7)
- Legea de mișcare trapezoidală modificată;
- Legea de mișcare sinusoidală modificată.

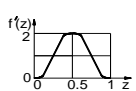
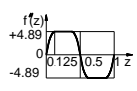
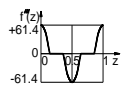
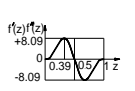
Tabelul 6.5. Legile de mișcare polinomiale [97].

Lege de mișcare	Legi de mișcare dublu normate	$f'(z)$	$f''(z)$	$f'''(z)$	$f'(z) \cdot f''(z)$
Viteză constantă	$z = 0, \dots, 1$ $f(z) = z$	 $c_v = 1$	 $c_a = +\infty$	 $c_j = +\infty$	 $c_{Mdn} = +\infty$
	mișcare cu șocuri dure, apar vibrații, nivel de zgomot ridicat și uzură pronunțată				
Accelerație constantă	$z = 0, \dots, 0.5$ $f(z) = 2 \cdot z^2$ $z = 0.5, \dots, 1$ $f(z) = 1 - 2 \cdot (1 - z)^2$	 $c_v = 2$	 $c_a = 4$	 $c_j = +\infty$	 $c_{Mdn} = 8$
	forțe masice minime, mișcare cu șocuri moi, apar vibrații și uzură				
Polinomială 3-4-5	$z = 0, \dots, 1$ $f(z) = 10z^3 - 15z^4 + 6z^5$	 $c_v = 1.88$	 $c_a = 5.78$	 $c_j = 60$	 $c_{Mdn} = 6.69$
	moment motor necesar învingerii forțelor statice redus, existența unor forțe masice reduse				
Polinomială 4-5-6-7	$z = 0, \dots, 1$ $f(z) = 35z^4 - 84z^5 + 70z^6 - 20z^7$	 $c_v = 2.19$	 $c_a = 7.51$	 $c_j = 41.98$	 $c_{Mdn} = 10.75$
	nivel de vibrații, de zgomot și de uzură reduse				

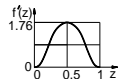
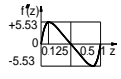
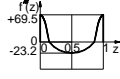
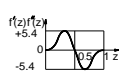
Tabel 6.6. Legile de mișcare armonice [97].

Lege de mișcare	Legi de mișcare dublu normate	$f'(z)$	$f''(z)$	$f'''(z)$	$f'(z) \cdot f''(z)$
Cosinusoidală	$z = 0, \dots, 1$ $f(z) = \frac{1}{2} [1 - \cos(\pi z)]$	 $c_v = 1.57$	 $c_a = 4.93$	 $c_j = +\infty$	 $c_{Min} = 3.88$
	mișcare cu șocuri moi, apar vibrații și uzură, forțe masice reduse, moment motor necesar învingerii forțelor statice redus				
Sinusoidală	$z = 0, \dots, 1$ $f(z) = z - \frac{1}{2\pi} \sin(2\pi z)$	 $c_v = 2$	 $c_a = 6.28$	 $c_j = 39.5$	 $c_{Min} = 8.16$
	nivel de vibrații, de zgomot și de uzură reduse				

Tabel 6.7. Legile de mișcare modificate [97].

Lege de mișcare	Legi de mișcare dublu normate	$f'(z)$	$f''(z)$	$f'''(z)$	$f'(z) \cdot f''(z)$
Trapezoidală modificată	$z = 0, \dots, \frac{1}{8}$ $f_1(z) = \frac{2}{2+\pi} \left[ z - \frac{1}{4\pi} \sin(4\pi z) \right]$ $z = \frac{1}{8}, \dots, \frac{3}{8}$ $f_2(z) = \frac{1}{2+\pi} \left[ 4\pi z^2 + (2-\pi) \cdot z + \frac{\pi^2 - 8}{16\pi} \right]$ $z = \frac{3}{8}, \dots, \frac{1}{2}$ $f_3(z) = \frac{2}{2+\pi} \left\{ (\pi+1)z - \frac{1}{4\pi} \sin \left[ 4\pi \left( z - \frac{1}{4} \right) \right] - \frac{\pi}{4} \right\}$ $z = \frac{1}{2}, \dots, 1$ $f(z) = 1 - f(1-z)$	 $c_v = 2$	 $c_a = 4.89$	 $c_j = 61.4$	 $c_{Min} = 8.09$
	nivel de vibrații, de zgomot și de uzură foarte reduse				

Tabel 6.7. Legile de mișcare modificate [continuare].

Sinusoidală modificată	$z=0, \dots, \frac{1}{8}$ $f_1(z) = \frac{\pi}{4+\pi} \left[ z - \frac{1}{4\pi} \sin(4\pi z) \right]$				
	$z = \frac{1}{8}, \dots, \frac{1}{2}$ $f_2(z) = \frac{\pi}{4+\pi} \left\{ z - \frac{9}{4\pi} \sin \left[ \frac{\pi(4z+1)}{3} \right] + \frac{2}{\pi} \right\}$ $z = \frac{1}{2}, \dots, 1$ $f(z) = 1 - f(1-z)$	$c_v = 1.76$	$c_a = 5.53$	$c_j = 69.5$	$c_{Mdn} = 5.4$
nivel de vibrații și uzură reduse, forțe masice reduse, moment motor necesar învingerii forțelor statice redus					

Pentru legile de mișcare considerate și prezentate în Tabelele 6.5, 6.6 și 6.7 au fost centralizate valorile caracteristice adimensionale în Tabelul 6.8.

Tabelul 6.8. Valorile caracteristice adimensionale ale legilor de mișcare considerate.

Nr. crt	Legi de mișcare dublu normate	$C_v$	$C_a$	$C_j$	$C_{Mdn}$
1	Viteză constantă	1	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$
2	Accelerație constantă	2	4	$+\infty$	8
3	Polinomială 3-4-5	1,88	5,78	60	6,69
4	Polinomială 4-5-6-7	2,19	7,51	41,98	10,75
5	Cosinusoidală	1,57	4,93	$+\infty$	3,88
6	Sinusoidală	2	6,28	39,5	8,16
7	Trapezoidală modificată	2	4,89	61,4	8,09
8	Sinusoidală modificată	1,76	5,53	69,5	5,4

Legile de mișcare pentru cursele de urcare și coborâre (Figura 6.12) se vor alege pe baza valorilor caracteristice adimensionale care satisfac cerințele fiecărei faze tehnologice, conform Tabelului 6.8. Legile de mișcare pentru mecanismul cu camă cilindrică cu canal inferioară se vor determina analog, acestea fiind în oglindă față de axa  $\varphi$ .

Astfel, pentru evitarea șocurilor moi a fost aleasă legea de mișcare sinusoidală care are valoarea caracteristică adimensională a vitezei  $c_v=2$ , dar și valoarea caracteristică adimensională a șocului  $c_j=39,5$  față de legea de mișcare sinusoidală modificată cu  $c_j=69,5$  dar și față de legea de mișcare cosinusoidală cu  $c_j=+\infty$ , care produce șocuri moi.



Pentru faza tehnologică care necesită accelerații mari a fost aleasă legea de mișcare polinomială 4-5-6-7 care nu produce șocuri și are valoarea caracteristică adimensională a accelerației cea mai mare  $c_a=7,51$ .

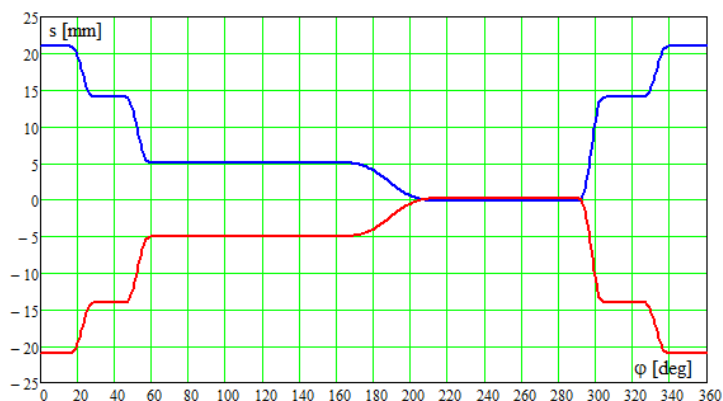


Figura 6.12. Legea de mișcare a tachelului pentru mecanismul cu camă cilindrică cu canal, superioară și inferioară.

Legea de mișcare trapezoidală modificată asigură cea mai mică accelerație, fiindcă are valoarea caracteristică adimensională a accelerației minimă  $c_a=4.89$  și nu permite apariția șocurilor.

Centralizatorul cu legile de mișcare aferente fiecărei faze tehnologice este redat în Tabelul 6.9.

Tabelul 6.9. Legile de mișcare aferente fiecărei faze tehnologice.

Faza de mișcare	Condiții tehnologice	Legea de mișcare aleasă
Coborâre 1	Evitarea șocurilor moi	Sinusoidală
Coborâre 2	Evitarea șocurilor moi	Sinusoidală
Coborâre 3	Accelerație mare	Polinomială 4-5-6-7
Urcare 1	Accelerație redusă	Trapezoidală modificată
Urcare 2	Evitarea șocurilor moi	Sinusoidală

În faza de coborâre 3 a celor două semisfere trebuie asigurată o forță tehnologică de apăsare de aproximativ 10-15 N în momentul intrării lor în contact. Forța tehnologică este dată de forța de inerție și greutatea unui dispozitiv purtător al semisferei solidarizat de tachel. Această forță este necesară pentru realizarea întrepătrunderii zonelor cu material topit (în urma contactului cu plita fierbinte) al celor două semisfere în vederea realizării cordonului de sudură.

Forța tehnologică în momentul îmbinării se va calcula cu relația:

$$F_t = F_i + G = -m \cdot \omega^2 \cdot \frac{h}{\varphi_6^2} f\left(\frac{\varphi_i}{\varphi_6}\right) + m \cdot g \quad (6.9)$$

$m$  – masa unui dispozitiv purtător al semisferei solidarizat de tachtet (0,5 kg);  
 $\omega$  – viteza unghiulară a suportului port-tachtet;  
 $\varphi_i$  – cursa unghiulară a suportului port-tachtet în faza de coborâre în momentul intrării în contact a semisferelor;  
 $g$  – accelerația gravitațională.

Cursa unghiulară a suportului port-tachtet în faza de coborâre, în momentul intrării în contact a semisferelor, se va determina din relația cursei:

$$s_4 = h \cdot \left[ 1 - 35 \cdot \left( \frac{\varphi_i}{\varphi_c} \right)^4 + 84 \cdot \left( \frac{\varphi_i}{\varphi_c} \right)^5 - 70 \cdot \left( \frac{\varphi_i}{\varphi_c} \right)^6 + 20 \cdot \left( \frac{\varphi_i}{\varphi_c} \right)^7 \right] \quad (6.10)$$

unde:

$s_4=0.15$  – poziția dispozitivului purtător al semisferei solidarizat de tachtet raportată doar la faza de coborâre în momentul intrării în contact a semisferelor;

$h=s_3+l$   $s_4$   $l=5.15$  – cursa tachtetului în faza de coborâre 3.

Prin rezolvarea numerică a ecuației (6.10) în MathCAD se obține valoarea cursei unghiulare a suportului port-tachtet în faza de coborâre în momentul intrării în contact a semisferelor:

$$\varphi_i = 46.17^\circ \quad (6.11)$$

corespunzătoare unei forțe tehnologice :

$$F_t = 11.19 \text{ N} \in [10 - 15] \text{ N} \quad (6.12)$$

Alegerea incorectă a poziției inferioare  $s_4$  poate determina o forță de apăsare prea mare care poate duce la expulzări excesive de material topit din cordonul de sudură, în timp ce o forță de apăsare prea mică poate conduce la realizarea unui cordon de sudură neomogen.

### 6.3.3. Determinarea gabaritului minim al mecanismului cu camă cilindrică

Pentru determinarea gabaritului minim al mecanismului cu camă cilindrică cu canal se va utiliza o camă plană echivalentă în mișcare de translație prevăzută cu tachtet în mișcare de translație [95, 96, 97]. Cama plană echivalentă se va obține prin desfășurarea camei cilindrice în mișcare de rotație. Parametrul care indică gabaritul minim al camei spațiale cilindrice este raza ( $r_b$ ) a cilindrului, raza fiind măsurată până la raza medie de contact dintre rolă și profilul interior sau exterior al camei cilindrice.

Valoarea razei de bază se va determina pentru fiecare fază de mișcare în parte astfel:

pentru cursa de urcare:

$$r_{bu} \geq \frac{h}{\Delta\varphi_u} \cdot c_v \cdot \tan\mu_{min} \quad (6.13)$$

pentru cursa de coborâre:

$$r_{bc} \geq \frac{h}{\Delta\varphi_c} \cdot c_v \cdot \tan\mu_{min} \quad (6.14)$$

În vederea evitării autoblocării tchetului în ghidaj la cursele de urcare și de coborâre „j”, raza de bază a cilindrului se va alege mai mare decât valoarea maximă a razelor de bază determinate pentru fiecare fază în parte (Tabelul 6.10):

$$r_b \geq \max\{r_{bu_j}, r_{bc_j}\} \quad (6.15)$$

Tabelul 6.10. Valorile razelor de bază aferente fazelor de mișcare.

Faza de mișcare	Legea de mișcare	Valoarea caracteristică adimensională a vitezei	Raza de bază aferentă calculată [mm]
Coborâre 1	Sinusoidală	$c_v = 2$	$r_{bc1} = 92.62$
Coborâre 2	Sinusoidală	$c_v = 2$	$r_{bc2} = 119.08$
Coborâre 3	Polinomială 4-5-6-7	$c_v = 2.19$	$r_{bc3} = 19.63$
Urcare 1	Trapezoidală modificată	$c_v = 2$	$r_{bc1} = 187.23$
Urcare 2	Sinusoidală	$c_v = 2$	$r_{bc1} = 92.62$

Valorile calculate ale razelor de bază aferente fazelor de mișcare pentru cama cilindrică superioară sunt redată în Tabelul 6.10 pentru unghiul de transmitere minim  $\mu_{min}=60^\circ$ , acestea fiind valabile și pentru cama cilindrică inferioară, unde fazele de coborâre devin faze de urcare și cele de urcare devin faze de coborâre.

Raza de bază aleasă și impusă din punct de vedere constructiv este:

$$r_b = 800 [mm] \quad (6.16)$$

#### 6.3.4. Determinarea profilelor camelor mecanismului cu camă cilindrică cu canal

Profilul teoretic al camelor cilindrice se va determina la scară pentru cama plană echivalentă. Pentru legea de mișcare se va alege obișnuit scara  $k_s$  pentru poziții sau curse, iar scara unghiurilor  $k_\varphi$  se va determina cu relația:

$$k_\varphi = \frac{1}{(r_b) \cdot k_s} \quad (6.17)$$

unde:  $(r_b)$  – raza de bază la scara  $k_s$ .

Profilele reale se vor obține ca înfășurătoare ale pozițiilor succesive ale rolei tchetului. Sectoarele de camă aferente curselor caracteristice ale mișcării tchetului vor avea lungimile:

$$l_j = \varphi_j \cdot r_b \quad (6.18)$$

În Figura 6.13 sunt reprezentate profilele camelor cilindrice cu canal desfășurate în pozițiile corespunzătoare impuse de condițiile tehnologice și constructive. Între profilele teoretice ale celor două came s-a impus o distanță tehnologică de  $l=200$  mm și raza rolor tacheților  $r_R=15$  mm.

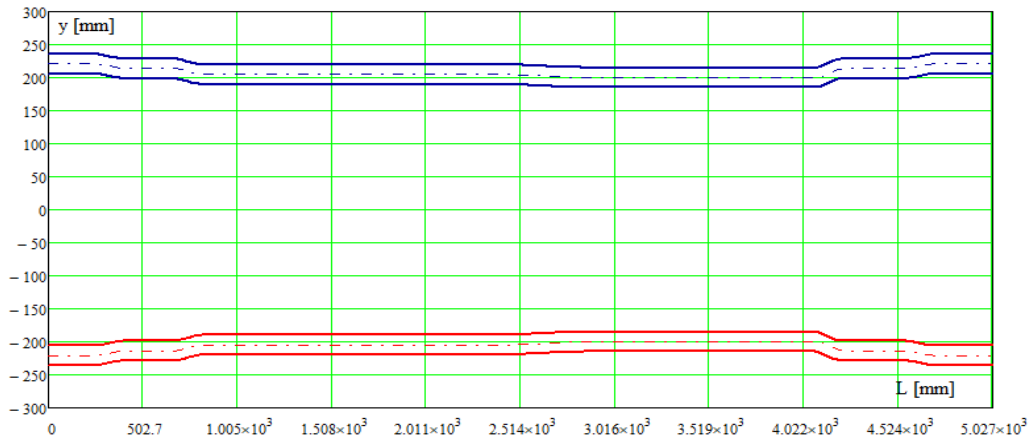


Figura 6.13. Profilele teoretice și reale ale camelor cilindrice cu canal, superioară și inferioară.

#### 6.4 Construcția CAD a camelor cilindrice cu canal

Prin intermediul aplicației de proiectare 3D, denumită CREO Parametric [101, 102, 103], s-au generat cele două came cilindrice cu canal, reprezentate în Figura 6.14.

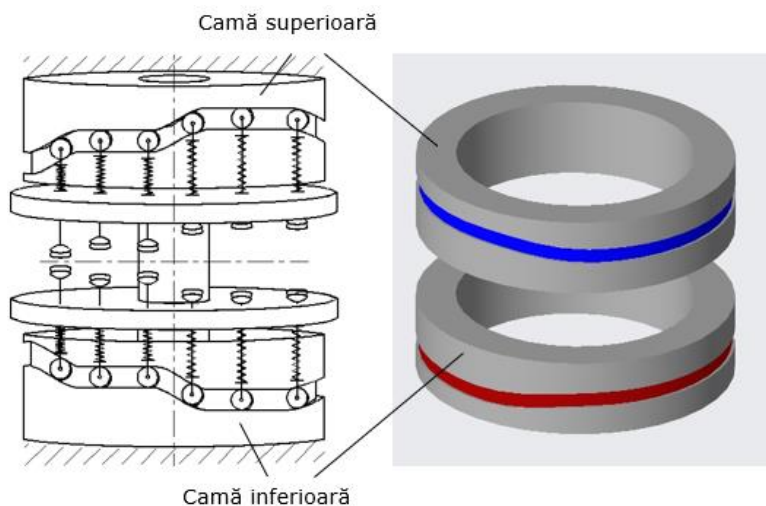


Figura 6.14. Reprezentarea 3D a camelor cilindrice cu canal.

Aplicația permite vizualizarea camelor din mai multe perspective, fiind posibilă identificarea tuturor fazelor de mișcare a tachetului (Figura 6.15).

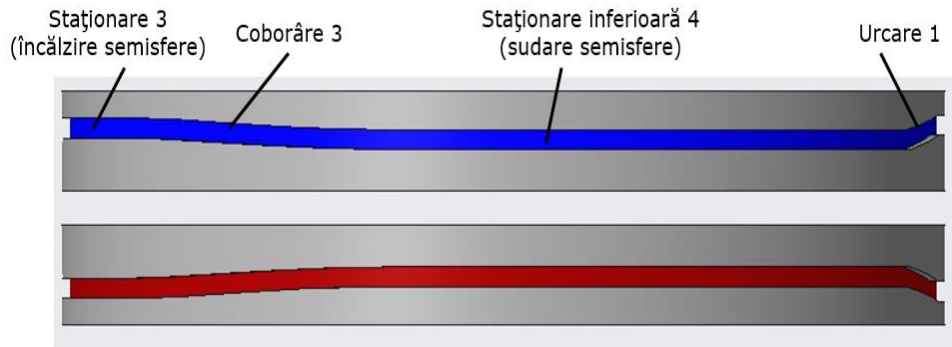


Figura 6.15. Profilele camelor pe diferite faze de mișcare a tachetului.

În Figura 6.15 se poate vizualiza profilul camei cu canal superioară pe fazele de mișcare aferente proceselor tehnologice de încălzire și sudare a semisferelor.

Definirea profilelor camelor stă la baza proiectării și execuției componentei principale a echipamentului de asamblare a bilelor de deo roll prin sudarea semisferelor.

## 7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

### 7.1 Concluzii finale

Creșterea accelerată a prețurilor la materii prime și energie, schimbările climatice pe care le observăm tot mai des, cerințele de trecere la o economie circulară și competiția de pe piața bunurilor de consum impune o adaptare rapidă a tehnologiilor de fabricație. Industria produselor cosmetice se subscrive și ea aceluiași trend, iar cercetările realizate în prezenta lucrare au scopul de a răspunde acestor provocări.

Cercetările efectuate au identificat metode și tehnologii alternative de reducere a consumurilor de materii prime și energie la fabricarea unor componente din industria produselor cosmetice, denumite generic, bile de deo roll.

Alegerea materialelor polimerice s-a realizat ținând cont de aspectele de reciclabilitate atât ale bilelor de deo roll cât și ale celorlalte repere care intră în componența produsului destinat consumatorului final.

Au fost realizate cercetări comparative ale tehnologiilor de sudare ale componentelor din materiale polimerice, fiind efectuate experimente și măsurări calitative multiple de dimensiuni, rezistență mecanică și aspect vizual. Din cercetările efectuate au fost selectate câteva tehnologii care pot asigura creșteri semnificative de productivitate în cazul fabricației bilelor de deo roll (Tabelul 7.1).

Tabelul 7.1. Cuantificarea finală a tehnologiilor de sudare a bilelor de deo roll.

Indicator evaluat	Tehnologie clasică	Tehnologii alternative				
		US	F	EI	IR	L
Indicator de performanță (%)	100	85	36	107	93	36
Estimare probabilitate de utilizare a procedurii tehnologice într-o linie de fabricație	în uz	mică	mică	mare	medie	mică

Legendă:

US - sudare cu ultrasunete;

F - sudare prin frecare;

EÎ - sudare termică cu element încălzitor;

IR - sudare termică cu radiații infraroșii;

L - sudare cu laser.

Tehnologiile alternative care pot sta la baza unor linii de fabricare a bilelor de deo roll sunt: sudarea cu element încălzitor și sudarea cu radiații infraroșii.

Sunt necesare îmbunătățiri ale capacităților de proces referitoare la diametrele bilelor brute. Aceste capacități pot fi îmbunătățite și în urma procesului de șlefuire-calibrare.

Rezultatele cercetării pot fi valorificate și la fabricarea obiectelor sferice cu pereți subțiri în diverse industrii (automotive, jucării, articole de agrement, implanturi medicale, protecția mediului, etc). În cazul fabricației de obiecte sferice care nu necesită faza de șlefuire, viabilitatea acestor tehnologii alternative devine și mai mare, inclusiv sudarea cu ultrasunete.

## 7.2 Contribuții personale

Activitățile de cercetare a metodelor alternative de fabricație a bilelor de deo roll au demarat în anii 2009-2010 prin contractul de colaborare cu nr. 35/ 1/2010, încheiat între S.C. Obrist Eastern Europe și Institutul de Cercetare & Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale – ISIM Timișoara. În primă fază aceste cercetări și experimente s-au derulat pe durata a doi ani. Ulterior, cercetările au fost reluate în anul 2018 de către autorul tezei, în cadrul școlii doctorale.

Contribuțiile personale aduse în cadrul acestei teze de doctorat sunt:

1. Contribuții la identificarea aspectelor de reciclabilitate în proiectarea produselor de tip deo roll;

Cerințele de mediu, sustenabilitate și trecere la o economie circulară sunt reglementate de organismele europene și trebuie puse în aplicare după un calendar bine stabilit. Alegerea materialelor utilizate la fabricarea bilelor de deo roll, designul produsului finit și posibilitățile de reciclare trebuie stabilite încă din faza de proiectare a semisferelor și de definire a tehnologiilor de sudare. În Capitolul 2.5.1 autorul a sintetizat combinațiile posibile de materiale pentru componentele care alcătuiesc produsul finit (deodorantul de tip deo roll) și a recomandat câteva combinații care răspund foarte bine cerințelor de reciclabilitate. Reciclarea bilelor de deo roll se poate face prin reciclare mecanică (PIR) sau chimică (PCR). În procesul de fabricare a bilelor de deo roll este foarte importantă reciclarea mecanică a deșeurilor tehnologice direct la sursă (în buclă închisă). Există și varianta reciclării mecanice cu „declasare” de produs, variantă prin care este posibilă amestecarea unor materiale diferite (PEID cu PP), în concentrații bine stabilite în vederea obținerii unor produse diferite [104]. În vederea asigurării calității produselor fabricate din material reciclat autorul recomandă proceduri de testare a proprietăților mecanice [105].

2. Contribuții la identificarea unor metode alternative de fabricație a bilelor de deo roll;

Autorul tezei a avut contribuții importante la identificarea unor metode alternative de fabricație a bilelor de deo roll (Capitolul 4). În urma unor studii aprofundate, autorul a identificat tehnologii posibile de realizarea a bilelor de deo roll prin metoda îmbinării a două semisfere. Principalele tehnologii analizate prin contribuția directă a autorului au fost:

- Sudarea bilelor de deo roll cu element încălzitor;
- Sudarea bilelor de deo roll cu radiații infraroșii;
- Sudarea bilelor de deo roll cu gaze fierbinți;

- Sudarea bilelor de deo roll cu ultrasunete.

### 3. Sudarea bilelor de deo roll cu element încălzitor;

Tehnologia de sudare a bilelor de deo roll cu element încălzitor este descrisă în Capitolul 4.2.1. Standul de testare și experimentele de sudare a fost realizate în colaborare cu Institutul de Cercetare & Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale – ISIM Timișoara. Experimente de sudare cu element încălzitor au fost realizate și la S.C. Inergy Pitești. Contribuțiile autorului tezei la dezvoltarea acestei tehnologii de sudare sunt următoarele:

- contributor la elaborarea schemei de principiu și la realizarea standului experimental de sudare cu element încălzitor a bilelor de deo roll;
- injectarea semisferelor necesare la experimentele de sudare;
- participant activ la testele de sudare efectuate la ISIM Timișoara și Inergy Pitești;
- efectuarea determinărilor de calitate a bilelor sudate;
- participant direct la testele de rezistență mecanică a bilelor sudate, efectuate pe standul din dotarea Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Universității Politehnica Timișoara;
- analiza și interpretarea rezultatelor obținute;
- cuantificarea rezultatelor obținute în vederea comparării tehnologiei de sudare cu element încălzitor cu alte tehnologii.

### 4. Sudarea bilelor de deo roll cu radiații infraroșii;

Tehnologia de sudare a bilelor de deo roll cu radiații infraroșii este descrisă în Capitolul 4.3.1. Standul experimental de sudare a fost realizat în colaborare cu Institutul de Cercetare & Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale – ISIM Timișoara. Contribuțiile autorului tezei la dezvoltarea acestei tehnologii de sudare sunt următoarele:

- elaborarea schemei de principiu și realizarea standului experimental de sudare cu radiații infraroșii a bilelor de deo roll ;
- injectarea semisferelor necesare la experimentele de sudare;
- participant la testele de sudare efectuate la Institutul ISIM Timișoara;
- efectuarea determinărilor de calitate a bilelor sudate;
- participant la testele de rezistență mecanică a bilelor sudate, efectuate pe standul din dotarea Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Universității Politehnica Timișoara;
- analiza și interpretarea rezultatelor obținute;
- cuantificarea rezultatelor obținute în vederea comparării tehnologiei de sudare cu radiații infraroșii cu alte tehnologii;
- autor principal într-o lucrare științifică prezentată într-o conferință cotate BDI [48].



#### 5. Sudarea bilelor de deo roll cu gaze fierbinți;

Tehnologia de sudare a bilelor de deo roll cu gaze fierbinți este descrisă în Capitolul 4.4.1. Standul experimental de sudare a fost instalat pe o mașină de găurit cu coloană aflată în dotarea firmei Obrist Eastern Europe. Contribuțiile autorului tezei la evaluarea acestei tehnologii de sudare sunt următoarele:

- autor al schemei de principiu și realizator al standului experimental de sudare cu gaze fierbinți a bilelor de deo roll;
- injectarea semisferelor necesare la experimentele de sudare;
- efectuarea testelor de sudare;
- efectuarea determinărilor de calitate a bilelor sudate;
- analiza și interpretarea rezultatelor obținute;
- cuantificarea rezultatelor obținute în vederea comparării tehnologiei de sudare cu gaze fierbinți cu alte tehnologii.

#### 6. Sudarea cu ultrasunete a bilelor de deo roll;

Tehnologia de sudare a bilelor de deo roll cu ultrasunete este descrisă în Capitolul 4.8.4. Experimentele de sudare cu ultrasunete au fost realizate pe două standuri de sudare aflate în dotarea Institutului de Cercetare & Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale – ISIM Timișoara: stand cu frecvența de 20kHz (Capitolul 4.8.4.1.1), respectiv 35 kHz (Capitolul 4.8.4.1.2). Contribuțiile autorului tezei la dezvoltarea acestei tehnologii de sudare sunt următoarele:

- elaborarea schemei de principiu și realizarea dispozitivelor de fixare și a sonotrodelor;
- injectarea semisferelor necesare la experimentele de sudare;
- realizarea testelor de sudare cu ultrasunete efectuate la institutul ISIM Timișoara;
- participant la activitățile de optimizare a sonotrodelor;
- efectuarea determinărilor de calitate a bilelor sudate;
- participant la testele de rezistență mecanică a bilelor sudate, efectuate pe standul din dotarea Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Universității Politehnica Timișoara;
- analiza și interpretarea rezultatelor obținute;
- cuantificarea rezultatelor obținute în vederea comparării tehnologiei de sudare cu ultrasunete cu alte tehnologii;
- autor principal în două lucrări științifice publicate în conferințe cotate BDI [79,80].

#### 7. Determinări de calitate a bilelor de deo roll sudate prin metode alternative;

Determinările de calitate au fost efectuate integral de către autorul prezentei lucrări. Aceste determinări sunt descrise în Capitolul 5.3 și în lucrarea științifică „Considerations regarding the quality of welds on hollow plastic balls obtained by joining two ball halves” publicată într-o conferință cotate BDI [81]. Controlul nedistructiv a fost realizat prin metodele de control vizual și cu ajutorul lichidelor penetrante. Controalele distructive au fost realizate prin secționarea bilelor sudate,

respectiv prin măsurări de rezistență mecanică. Măsurările de rezistență mecanică au fost efectuate pe un stand aflat în dotarea Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din cadrul Universității Politehnica Timișoara. Bilele de deo roll supuse testării au fost pregătite pe loturi, în funcție de tehnologia de fabricație, material, prelucrare finală (șlefuire) și direcția de aplicare a forței de compresiune. Analiza rezultatelor măsurărilor de rezistență mecanică permite compararea diferitelor tehnologii de fabricație a bilelor de deo roll și propune tehnologii alternative care pot oferi un avantaj competițional.

8. Configurarea unei linii de fabricație a bilelor de deo roll prin metode alternative.

Obiectivul cel mai important al tezei de doctorat constă în configurarea unei linii de fabricație de mare productivitate a bilelor de deo roll. Descrierea detaliată a liniei de fabricație este redată în Capitolul 6 al tezei și în lucrarea științifică „Study on High Productivity Manufacturing Line for Deo Roll Balls” apărută în publicația Scopus [67]. Echipamentul de sudare a bilelor de deo roll reprezintă partea inovativă cea mai importantă a tezei și poate sta la baza industrializării tehnologiei alternative de fabricație a bilelor de deo roll. Un echipament de acest tip poate fi utilizat și în alte aplicații industriale de fabricare a obiectelor din materiale polimerice, de formă sferică, cu pereți subțiri. Elementul central al echipamentului de sudare are la bază un sistem de tip carusel care conține două mecanisme cu camă spațială cilindrică cu canal, în varianta cu came fixe și suportți port-tachet în mișcare sincronă de rotație. Legile de mișcare au fost alese în funcție de condițiile tehnologice impuse. Au fost detaliate profilele teoretice și reale ale mecanismelor cu camă cilindrică cu canal. Cu ajutorul aplicației de proiectare 3D, CREO Parametric, au fost generate cele două came cilindrice cu canal.

Studiile prezentate în această teză de doctorat, coroborate cu cerințele de sustenabilitate și trecere la economia circulară dar și cu provocările legate de costurile tot mai ridicate cu materii prime și energie permit implementarea rapidă a unor astfel de tehnologii inovative. Un alt argument adus în promovarea acestor tehnologii constă în posibilitățile de finanțare din fonduri europene, granturi sau fonduri guvernamentale.

Prin publicarea acestei teze de doctorat sunt create premise ca rezultatele cercetărilor să fie preluate și valorificate de agenți economici interesați, din țară sau din străinătate, care activează în industria prelucrătoare de materiale polimerice.

### **7.3 Direcții viitoare de cercetare**

Valorificarea rezultatelor cercetărilor prezentate în teza de doctorat constituie o bază solidă în definirea direcțiilor viitoare de cercetare:

- Optimizarea tehnologiei de sudare cu ultrasunete;

Chiar dacă în cadrul programului de cercetare prezentat în lucrarea de față nu s-a reușit obținerea celor mai bune rezultate, tehnologia de sudare cu ultrasunete a bilelor de deo roll are un potențial mare de optimizare. Principalul avantaj este dat de timpii mici de sudare. Dezavantajele sunt legate de costurile ridicate ale unei linii cu posturi multiple și de rezistența mecanică mai slabă a sudurilor obținute în cadrul acestui program experimental. Autorul recomandă continuarea cercetărilor de către un agent economic specializat în fabricarea de produse polimerice obținute prin sudare cu ultrasunete în vederea optimizării procesului de sudare și îmbunătățirea calității bilelor sudate.

- Optimizarea procesului tehnologic de șlefuire a bilelor de deo roll;  
Faza de șlefuire a bilelor brute nu a fost detaliată în prezenta lucrare. Tehnologia de fabricație a bilelor de deo roll include această fază, în urma careia are loc eliminarea bavurilor rezultate după procesul de sudare precum și calibrarea bilelor la forma și dimensiunile impuse de specificațiile de produs. Faza de șlefuire are un impact major asupra productivității liniei de fabricație și asupra rezistenței mecanice a bilelor șlefuite. Implementarea unor metode alternative de fabricare a bilelor de deo roll este condiționată de optimizarea procesului tehnologic de șlefuire.
- Standardizarea specificațiilor tehnice și a procedurilor de testare a bilelor de deo roll;  
În contextual actual, constrângerile legate de cerințele de mediu și de costurile tot mai mari cu materiile prime și energia impun reduceri de consumuri specifice pe unitatea de produs. În consecință, vor trebui reanalizate și specificațiile legate de rezistența mecanică a bilelor de deo roll, pentru a evita supradimensionarea acestor produse. Stabilirea unor specificații tehnice general acceptate de către agenții economici care activează în acest sector ar constitui un pas foarte important în atingerea obiectivelor de mediu și competitivitate economică.
- Proiectarea și realizarea unei linii de fabricație de mare productivitate a bilelor de deo roll;  
Realizarea unei linii de fabricație de mare productivitate a bilelor de deo roll reprezintă obiectivul major al tezei de doctorat. Acest demers presupune însă un proces complex de punere în practică, care necesită inițierea fazei de proiectare, urmată de lansarea în fabricație a unui astfel de echipament.
- Identificarea unor produse similare, de formă sferică, cu pereți subțiri, care pot fi fabricate prin metodele alternative studiate;  
Cercetările efectuate în lucrarea de față permit extinderea gamei de produse din materiale polimerice care se pot realiza prin utilizarea tehnologiilor alternative propuse. Aceste tehnologii pot fi luate în considerare la fabricarea obiectelor de formă sferică cu pereți subțiri.
- Testarea unor materiale alternative utilizate la fabricarea bilelor de deo roll care să răspundă cerințelor de sustenabilitate și trecere la economia circulară.  
Dezvoltarea continuă a industriei materialelor polimerice, apariția biomaterialelor precum și a materialelor rezultate din schemele de reciclare vor determina tot mai frecvent schimbarea specificațiilor de produs. Producătorii din industria de profil trebuie să fie pregătiți în permanență să răspundă rapid unor astfel de cerințe prin activități de cercetare și testare de materiale noi.

## 8. LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE PUBLICATE

1. **Teușdea D.F.**, Stan D.V., Vodă M., Lovasz E.C., Study on the influence of recycled material on the tensile strength of HDPE products, Modtech international conference - modern technologies in industrial engineering VIII, in Proc. IOP Conference Series- Materials Science and Engineering, vol. 916, 2020
2. **Teușdea D.F.**, Vodă M., Romero-Toledo F.A., Speed influence on the recycled high density polyethylene/HDPE handles, tested with adapted industrial specifically method, UIS Ingenierias, vol. 20, no. 4, pp. 189-199, 2021
3. **Teușdea D.F.**, Sîrbu N-A., Vodă M., Oancă O., Lovasz E-C., TIMA 2019, Researches on Manufacturing Deo-Roll Balls by Infrared Radiation Welding, vol. 1557, pp. 21-30, Advanced Materials Research, 2020
4. **Teușdea D.F.**, Oancă O., Vodă M., Sîrbu N-A., Lovasz E-C., TIMA 2019, Researches on Manufacturing Deo-Roll Balls by Ultrasonic Welding, vol. 1557, pp. 58-72. Advanced Materials Research, 2020
5. **Teușdea D.F.**, Lovasz E-C., Vodă M., Sîrbu N-A., Maniu I., Bizet J.P., Study on High Productivity Manufacturing Line for Deo Roll Balls, New Advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics ,volume 88, MTM & Robotics 2020, pp 201-211, 2021
6. **Teușdea D.F.**, Sîrbu N-A., Vodă M., Roșu A., Iacobici R., Considerations about Hollow Polypropylene Balls Manufacturing by Ultrasonic Welding, Researches on Manufacturing Deo-Roll Balls by Ultrasonic Welding, vol. 1164, pp. 35-45, Advanced Materials Research, 2021
7. **Teușdea D.F.**, Sîrbu N-A., Vodă M., Considerations regarding the quality of welds on hollow plastic balls obtained by joining two ball halves, vol. 332, pp 143-155, Solid State Phenomena, 2022

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Șereș I., Materiale termoplastice pentru injectare, tehnologie, încercări, Imprimeria de Vest Oradea, 2002
- [2] Iclanzan T., curs Tehnologia prelucrării materialelor plastice și compozite, Editura Politehnica Timișoara, 2006
- [3] MatWeb, On line materials information,  
<http://www.matweb.com/search/MaterialGroupSearch.aspx>, accesat la data de 05.02.2022
- [4] Revista de Tehnică și Tehnologie, T&T online,  
<https://www.ttonline.ro/revista/materiale-plastice/analiza-de-piata-materialele-plastice-si-cauciucul-trend-ascendent-la-nivel-mondial> , accesat la data de 05.11.2021
- [5] Publicatia Plastics Europe, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>, accesat la data de 05.02.2022
- [6] Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerdebe F., What a waste 2.0, A global snapshot of solid waste management to 2050, World bank Group, Urban Development Series, Tokyo Development Learning Center, pag 34, 2018
- [7] Directiva Parlamentului European și a Consiliului European 2019/904,  
<http://data.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>, accesat la data de 05.02.2022
- [8] Harper C.A., Edward M.P., Plastics materials and proceses, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003
- [9] Ellen MacArthur foundation, Global Commitment 2020 Progress Report,  
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/global-commitment-progress-report>, accesat la data de 05.12.2021
- [10] Berry Global, Annual Sustainability Reports,  
<https://www.berryglobal.com/sustainability/howwepperform>, accesat la data de 10.10.2021
- [11] Green Alliance Report 2020,  
[https://green-alliance.org.uk/the\\_local\\_climate\\_challenge.php](https://green-alliance.org.uk/the_local_climate_challenge.php), accesat la data de 07.09.2021

- [12] Publicatia STATISTA, Size of the global antiperspirant and deodorant market from 2012 to 2025, <https://www.statista.com/statistics/254668/size-of-the-global-antiperspirant-and-deodorant-market/>, accesat la data de 05.02.2022
- [13] Schmidt P., Hindle D., Goede R., Stoelben P., Improvements in or relating to deodorant balls, US patent US20170079403A1, 2015
- [14] Stoelben P., Schmidt P., Schawo R., Roll on dispenser balls, US patent US20170013938A1, 2017
- [15] Berry-MH Plastics, Produse de tip roll-on, <https://mhplastics.com/product-range/50ml-roll-on-deodorant-cylindrical>, accesat la data de 11.02.2022
- [16] WP Innovative Packaging, Products: Roll-ons, <https://www.wppg.com/products/>, accesat la data de 12.02.2022
- [17] Scientific American, New Artificial Eye Mimics, <https://www.scientificamerican.com/article/new-artificial-eye-mimics-a-retinas-natural-curve>, accesat la data de 11.02.2022
- [18] Amanat N., James N.L., McKenzie D.R., Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices, Elsevier, Medical Engineering & Physics 32 pp 690–699, 2010.
- [19] Socialife Chicago, Snarkitecture-beach-art, <http://www.socialifechicago.com/snarkitecture-beach-art-installation-coming-to-chicago-navy-pier>, accesat la data de 11.02.2022
- [20] Shadow balls, <https://www.precisionplasticball.com/products/hollow-plastic-precision-balls>, accesat la adata de 12.02.2022
- [21] Mears W.G., Fuel tank vent valve, U.S. Patent 4679581, 1987
- [22] Decizia 97/129/EC-Decizia Comisiei privind stabilirea sistemului de identificare pentru materialele de ambalaj conform Directivei 94/62/CE privind ambalajele si deseurile de ambalaje, Official Journal of the European Communities, 1997
- [23] ASTM D7611 Standard practice for coding plastic manufactured articles for resin identification, ASTM International, accesat la data de 16.11.2021.
- [24] La Mantia F., Handbook of plastic recycling, Shawbury: RAPRA Technology Limited, 2002
- [25] Akkapeddi M.K., Buskirk B.V., Mason C.D., Chung S.S. and Swamikannu X., Performance blends based on recycled polymers Polymer Engineering and Science 35 pp 72-78, 1995
- [26] Strapasson R., Amico S.Cc, Pereira M.F.R. and Sydenstricker T.D.H., 2005 Tensile and impact behaviour of polypropylene/low density polyethylene blends, Elsevier, Polymer Testing 24 pp 468-473, 2005

- [27] Sathish P.G., Subrata H. and Atul T., A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling, Elsevier, Waste Management 60 pp 56-74 , 2017
- [28] Holy Grail, New plastics economy,  
<https://www.newplasticseconomy.org/assets/doc/Holy-Grail.pdf>, accesat la data de 19.09.2021
- [29] Stan D., Aplicații ale ultrasunetelor la injectarea și extrudarea materialelor polimerice, Editura Politehnica Timișoara , 2003
- [30] Rosato Domini V., Rosato Donald V., Rosato M.V., Blow Molding, Plastic Product Material and Process Selection Handbook, Elsevier, pp 282-307, 2004
- [31] Cantor K.M., Watts P., Plastics Processing, Applied Plastics Engineering Handbook, Science Direct, pp 195-203, 2012
- [32] Belcher S.L., Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition), Science Direct, 2017
- [33] Extrudarea prin suflare,  
[https://www.google.ro/search?q=injection+blow+molding&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiD38Wf4pDiAhVSEVAKHewyBz8Q\\_AUIDigB&biw=1680&bih=902#imgsrc=nxz-pJ5Ox6c5UM:&spf=1557484602364](https://www.google.ro/search?q=injection+blow+molding&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiD38Wf4pDiAhVSEVAKHewyBz8Q_AUIDigB&biw=1680&bih=902#imgsrc=nxz-pJ5Ox6c5UM:&spf=1557484602364), accesat la data de 05.02.2022
- [34] Formarea prin suflare cu extrudare intermitentă,  
[www.youtube.com/watch?v=ZErOiopq4CA](http://www.youtube.com/watch?v=ZErOiopq4CA), accesat la data de 12.02.2022
- [35] Extrusion blow molding machines,  
<https://www.youtube.com/watch?v=RLL2tkaU-7Q>, accesat la data de 19.02.2022
- [36] Perot E., Teza de doctorat, Optimisation et modélisation du procédé de rotomoulage, N° d'ordre 2006-ISAL-0060, École doctorale matériaux de Lyon, 2006
- [37] MMC Packaging - Roll-On Ball Sphere Welding,  
<https://www.youtube.com/watch?v=aEDXSnwk0jo>, accesat la data de 12.12.2021
- [38] Grewell D., Benatar A., Welding of plastics: fundamentals and new developments, International Polymer Processing (XXII), pp 43-60, 2007
- [39] DuPont Engineering Polymers, General design principles for DuPont engineering polymers, Assembly techniques, Category II welding, pp 77-122, E.I. du Pont de Nemours and Company, 2000
- [40] Watson M.N., Murch M.G., Recent developments in hot plate welding of thermoplastics, Polymer Engineering and Science (29), pp 1382-6, 1989
- [41] Nonhof C.J., Optimization of hot plate welding for series and mass production, Polymer Engineering and Science (36), pp 1184-95, 1996

- [42] Nieh J.Y., Lee L.J., Hot plate welding of polypropylene, Part I: crystallization kinetics, *Polymer Engineering and Science* (38), pp 1121–32, 1998
- [43] Nieh J.Y., Ni J., Lee L.J., Hot plate welding of polypropylene, Part II: process simulation, *Polymer Engineering and Science* (38), pp 1133–41, 1998
- [44] Poopat B., Benatar A., Park J.B., Comparative study of contact and non-contact hot plate welding of HDPE, The 58th annual technical conference of the society of plastics engineers-plastics the magical solution (ANTEC 2000), pp 1117–21, 2000
- [45] Chen Y.S., Benatar A., Infrared welding of polypropylene, the 53<sup>rd</sup> annual technical conference of the society of plastics engineers-the plastics challenger : a revolution in education (ANTEC 95), pp 1235–8, 1995.
- [46] Potente H., Michel P., Heil M., Infrared radiation welding-a method for welding high-temperature resistant thermoplastics , the 49<sup>th</sup> annual technical conference of the society of plastics engineers-plastics: rendez-vous with excellence (ANTEC 91), pp 2502–4, 1991
- [47] Grimm R.A., Yeh H., Infrared welding of thermoplastics, Colored pigments and carbon black levels on transmission of infrared radiation, the 56<sup>th</sup> annual technical conference of the society of plastics engineers-plastics on my mind (ANTEC 98), pp. 1026–9, 1998
- [48] Teuşdea D.F., Sîrbu N-A., Vodă M., Oancă O., Lovasz E-C., TIMA 2019, Researches on Manufacturing Deo-Roll Balls by Infrared Radiation Welding, vol. 1557, pp. 21-30, *Advanced Materials Research*, 2020
- [49] Balkan O., Demirer H., Ezdesir A., Yildirim H., Effects of welding procedures on mechanical and morphological properties of hot gas butt welded PE, PP, and PVC sheets, *Polymer Engineering and Science*(48), pp 732–46, 2008
- [50] Haque S., Siddiqui M.A., Plastic Welding: Important Facts and Developments, *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*,1(2), pp 15-19, 2016
- [51] Brown J., Marketing Development Representative LPKF Laser & Electronics, 12555 SW Leveton Drive, Tualatin, OR 97062, [https://www.lpkfusa.com/articles/lq/LPW\\_GL\\_Hybrid\\_Laser\\_Wedling\\_Design\\_Guidelines](https://www.lpkfusa.com/articles/lq/LPW_GL_Hybrid_Laser_Wedling_Design_Guidelines), 2011, accesat la data de 26.02.2022
- [52] LPKF, Laser-Welding Medical Devices[https://www.lpkf.com/en/news-press/pressreleases/detail?tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Bnews%5D=449&cHash=db4608f96b0ff1b54acf3021460e423b#data-fancybox-37546](https://www.lpkf.com/en/news-press/pressreleases/detail?tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=449&cHash=db4608f96b0ff1b54acf3021460e423b#data-fancybox-37546), accesat la data de 25.02.2022
- [53] Chung Y.M., Kamal M.R., Morphology of PA-6 vibration welded joints and its effects on weld strength, *Polymer Engineering and Science*(48), pp 240–8, 2008
- [54] Potente H., Becker F., Fiegler G., Korte J., Investigations towards application of a new technique on laser transmission welding, *Welding in the World* (45), pp 15–20, 2001



- [55] Leister group, Laser welding, <https://www.leister-group.com/en>, accesat la data de 12.02.2022
- [56] Benatar A., Eswaran R.V., Nayar S.K., Ultrasonic welding of thermoplastics in the near-field, *Polymer Engineering and Science*(29), pp 689–98, 1989
- [57] Benatar A., Cheng Z., Ultrasonic welding of thermoplastics in the far-field, *Polymer Engineering and Science* (29), pp 1699–704, 1989
- [58] Rani M.R., Prakasan K., Rudramoorthy R., Study of different joints for ultrasonic welding of semicrystalline polymers, *Experimental Techniques* (33), pp 36–42, 2009
- [59] Vilegas I.F., In situ monitoring of ultrasonic welding of thermoplastic composites through power and displacement data, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2015
- [60] Stokes V.K., Vibration welding of thermoplastics, Analysis of the welding process, *Polymer Engineering and Science* (28), pp 728–39, 1988
- [61] Tappe P., Potente H., New results on the spin welding of plastics, *Polymer Engineering and Science*(29), pp 1655–60, 1989
- [62] Cojocaru R., Verbițchi V., Dașcău H.F., Boțila L.N., Ciucă C., Friction Stir Soldering, BID Nr.2 -ISIM-Welding and Material Testing, 2017.
- [63] DeGennes P.G., Reptation of a polimer chain in the presence of fixed obstacles, *Journal of Chemical Physics* (55), pp 572, 1971
- [64] Wool R., Polymer interfaces, Structure and Strength, Hanser Publishers, Munich, 1995
- [65] Park J.B., Benatar A., Thermal and Residual Stress Formation during Plastic Welding, Annual Technical Conference for the Society of Plastic Engineers Proceedings, Society of Plastic Engineers, Brookfield, CT, 1991
- [66] Shim M.J., Kim S.W., Characteristics of polymer welding by healing process, *Materials Chemistry and Physics*(48), 90-3, 1997
- [67] Teușdea D.F., Lovasz E-C., Vodă M., Sîrbu N-A., Maniu I., Bizet J.P., Study on High Productivity Manufacturing Line for Deo Roll Balls, *New Advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics*, volume 88, MTM & Robotics 2020, pp 201-211, 2021
- [68] Minitab 18, Overall Capability for Normal Capability Analysis for Multiple Variables, <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18>, accesat la data de 05.01.2022
- [69] Ryan B.F., Minitab Handbook, Baker & Taylor, Duxbury, United Kingdom, 2012.

- [70] Troughton M.J., Handbook of plastic joining: a practical guide. 2nd ed. UK: The Welding Institute, Cambridge, UK, 2008
- [71] Marczis B., Czigany T., Polymer joints, Periodica Polytechnica Series Mechanical Engineering, 46, 117-26, Budapest, Hu, 2002
- [72] Ziegler D., Introduction to thermoplastics welding in industrial fabrication, International Association of Plastics Distributors Journal, Feb/March, pp 13, 2006
- [73] Acherjee B., Misra D., Bose D., Venkadeshwaran K., Prediction of weld strength and seam laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology. Optics and Laser Technology(41), pp 956-57, 2009
- [74] Dukane, <https://www.dukane.com/blog/2010/09/13/the-6-quick-steps-to-a-successful-ultrasonic-assembly>, accesat la data de 15.12.2021
- [75] Probylas, materials weldability, <https://probylas.com/en/technology/plastics/compatibility>, accesat la data de 13.01.2022
- [76] RP Technologies, ultrasonic welding, <https://www.rptechnologies.co.uk/knowledge-hub-item/Ultrasonic+Welding>, accesat la data de 14.01.2022
- [77] Liu S.J., Lin W.F., Chang B.C., Wu G.M., Hung S.W., Optimizing the joint strength of ultrasonically welded thermoplastics, Advances in Polymer Technology (18), pp 125-35, 1989
- [78] Chuah Y.K., Chien L.H., Chang B.C., Liu S.J., Effects of the shape of the energy director on far-field ultrasonic welding of thermoplastics, Polymer Engineering and Science (40), pp 157-67, 2000
- [79] Teuşdea D.F., Oancă O., Vodă M., Sîrbu N-A., Lovasz E-C., TIMA 2019, Researches on Manufacturing Deo-Roll Balls by Ultrasonic Welding, vol. 1557, pp 58-72, Advanced Materials Research, 2020
- [80] Teuşdea D.F., Sîrbu N-A., Vodă M., Roşu A., Iacobici R., Considerations about Hollow Polypropylene Balls Manufacturing by Ultrasonic Welding, Researches on Manufacturing Deo-Roll Balls by Ultrasonic Welding, vol. 1164, pp 35-45, Advanced Materials Research, 2021
- [81] Teuşdea D.F., Sîrbu N-A., Vodă M., TIMA 2021, Considerations regarding the quality of welds on hollow plastic balls obtained by joining two ball halves, vol. 332, pp 143-155, Solid State Phenomena, 2022
- [82] Suresh K.S., Rani A.R., Prakasan K., Rudramoorthy R., Modeling of temperature distribution in ultrasonic welding of thermoplastics for various joint designs, Journal of Materials Processing Technology (186) , pp 138-46, 2007

- [83] Raza S.R., Khan S.A., Mughal M.P., Optimizing the weld factors affecting ultrasonic welding of thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019
- [84] Lin J., Lin S., Study on a Large-Scale Three-Dimensional Ultrasonic Plastic Welding Vibration System Based on a Quasi-Periodic Phononic Crystal Structure. *Crystals*, 10(1), 2020
- [85] Baudrit B., Horlemann S., Kraus E., CT for non-destructive testing of plastic joints. *German-Austrian-Danish Workshop on Industrial CT Scanning*, Munich, 2013
- [86] High quality ultrasonic testing solutions for complete inspections [https://www.zetec.com/products/ultrasound/?gclid=Cj0KCQjwrJOMBhCZARIsAGEd4VFydHko\\_onkDAUf6RIzMYU0Se8\\_ry3SPI58oBOb2E8wmCWuRjPB8ZkaArCGEALw\\_wcB](https://www.zetec.com/products/ultrasound/?gclid=Cj0KCQjwrJOMBhCZARIsAGEd4VFydHko_onkDAUf6RIzMYU0Se8_ry3SPI58oBOb2E8wmCWuRjPB8ZkaArCGEALw_wcB), accesat la data de 01.02.2022
- [87] Tripa P., *Rezistența materialelor*, Editura Mirton, Timișoara, 1999
- [88] ASTM D638-14:2014. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2014
- [89] ISO 527-2, *Plastics-Determination of Tensile Properties-Part 2: Test Conditions for Molding and Extrusion Plastics*, Geneva, Switzerland, 2012
- [90] Borja R.I., *Plasticity -Modeling & Computation*, Springer, Springer Heidelberg New York Dordrecht London, pp 208, 2013
- [91] Damodaran S., Schuster T, Rode K., Sanoria A., Brüll R., Stohr N., Measuring the orientation of chains in polypropylene welds by infrared microscopy- A tool to understand the impact of thermo-mechanical treatment and processing, *Polymer* 60, pp 125-136, 2015
- [92] Varga J., Ehrenstein G.W., Schlarb A.K., Vibration welding of alpha and beta isotactic polypropylenes: Mechanical properties and structure, *Express Polymer Letters* Vol.2, No.3, pp 148-156, 2003
- [93] Brown R., *Handbook of polymer testing*, Rapra Technology, Shawbury, United Kingdom, 2002
- [94] Luck, K., Modler K.-H., *Getriebetechnik - Analyse, Synthese, Optimierung*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest, 2. Auflage, 1995
- [95] Lovasz E.C., Cărăbaș I., *Principii de sinteză a mecanismelor cu roți dințate și came*; Editura Politehnica, Timișoara, 2006
- [96] Manolescu N., Kovacs F., Orănescu A., *Teoria mecanismelor și a mașinilor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1972
- [97] Perju D., *Mecanisme de mecanică fină*, vol.1-2, Litografia I.P.T.V.T a Universității Tehnice din Timișoara, 1986/1990

- [98] Volmer J., Getriebetechnik Lehrbuch. VEB Verlag Technik, Berlin, 1968
- [99] \*\*\*, VDI Richtlinien 2143-1. Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe, Deutschland, 1980
- [100] \*\*\*, VDI Richtlinien 2143-2. Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe Praktische Anwendung, Deutschland, 1987
- [101] Tickoo S., ProEngineer - Wilfire 3.0 for Designers, CADCIM Tehnologies, ISBN1-932709-19-3, Purdue University Calumet, USA, 2007
- [102] Rider M.J., Ohio Northern University, designing with @CREO parametric 5.0, SDC publications, ISBN-13: 978-1-63057-209-9, 2018
- [103] Three Pillars of Success for Industrial Digital Transformation, [www.ptc.com](http://www.ptc.com), accesat la data de 20.04.2022
- [104] Teuşdea D.F., Stan D.V., Vodă M., Lovasz E.C., Study on the influence of recycled material on the tensile strength of HDPE products, Modtech international conference - modern technologies in industrial engineering VIII, in Proc. IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, vol. 916, 2020
- [105] Teuşdea D.F., Vodă M., Romero-Toledo F.A., Speed influence on the recycled high density polyethylene/HDPE handles, tested with adapted industrial specifically method, UIS Ingenierias, vol. 20, no. 4, pp 189-199, 2021