

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI**

Cu titlu de manuscris

CZU: 621.621.9

**PAVEL COSOVSKI**

**Sporirea durabilității formelor de turnare prin procedee  
tehnologice și metode constructive**

242.05 – Tehnologii, procedee și utilaje de prelucrare

Teză de doctor în științe tehnice

Conducător științific

**Sergiu MAZURU**

conf., univ., dr. în tehnică

Autorul:

**Pavel COSOVSKI**

**CHIȘINĂU 2019**

**© Cosovschi Pavel, 2019**

# CUPRINS

<b>CUPRINS</b>	3
<b>ADNOTĂRI</b>	6
<b>LISTA ABREVIERLOR</b>	9
<b>INTRODUCERE</b>	
<b>1. ANALIZA PROCEDEELOR DE DURIFICARE ȘI DE NETEZIRE A SUPRAFEȚELOR ORGANELOR DE MAȘINI ȘI A SCULELOR, ANALIZA METODELOR CONSTRUCTIVE ȘI DE ACOPERIRE CU PELICULE DE PROTECȚIE</b>	19
1.1. Generalități și metode cunoscute aplicate	19
1.2. Durificarea prin deformare plastică superficială	21
1.2.1. Fizica procesului de durificare prin DPS	21
1.2.2. Metode statice DPS	25
1.3. Analiza metodelor constructive privind sporirea durabilității formelor de turnare	35
1.4. Analiza metodelor tehnologice de acoperire sau de protecție privind sporirea durabilității formelor de turnare	37
1.4.1. Acoperirea suprafețelor de lucru ale formelor de fasonare a sticlelor cu strat de protecție	37
1.4.2. Acoperirea suprafețelor de lucru ale formelor de fasonare a sticlelor cu strat de metal	38
1.5. Scopul și obiectivele lucrării	38
1.6. Concluzii la capitolul 1	40
<b>2. STABILIREA METODOLOGIEI PRIVIND REALIZAREA SIMULĂRILOR NUMERICE ALE PROCESELOR TEHNOLOGICE DE PRELUCRARE PRIN DEFORMARE PLASTICĂ ȘI A CONDIȚIILOR TERMICE DE LUCRU AL FORMELOR DE FASONARE A STICLEI</b>	41
2.1. Introducere. Obiectivele simulării numerice	41
2.2. Procedura generală aplicată simulărilor numerice	42
2.3. Modelul fizic	46
2.3.1. Proprietățile fizice de bază ale metalelor în procesul de deformare plastică la rece	de 46
2.3.2. Plasticitatea. Ecuțiile constitutive incrementale	49
2.3.3. Analiza ipotezei de distrugere a materialelor la deformarea plastică	54
2.3.4. Structura modelului fizic	55
2.3.5. Modelele de material	58
2.3.5.1. Identificarea și caracterizarea materialelor supuse procedeuului tehnologic de prelucrare prin deformare plastică la rece folosite pe liniile de fabricație a recipientilor din sticlă	58
2.3.5.2. Prelucrarea datelor primare și încercarea de încadrare a materilului analizat într-o categorie standardizată	60
2.3.5.3. Determinarea durtății și unele concluzii privind analiza metalografică	69
2.3.5.4. Concluzii privind diagramele caracteristice la compresiune ale materialelor folosite la realizarea pieselor din structura formelor pentru turnarea sticlei	70
2.3.5.5. Elaborarea modelelor de material	71
2.3.6. Alegerea, verificarea și validarea modelului de material folosit în operațiunile de simulare a procesului tehnologic de deformare plastică la rece de netezire cu	81

ecruisare a pieselor de fonta, din structura agregatelor de turnare a sticlei	
2.4 . Obiectivele de formare a peliculelor de grafit pe suprafețele lor active cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls	87
2.4.1. Conceptul de eroziune a grafitului	88
2.4.2. Aplicarea practică a ipotezei	90
2.5 . Condițiile termice de lucru al formelor	92
2.6 Concluzii la capitolul 2	94
Anexa 2.1 și Anexa 2.2	96
<b>3. SIMULAREA NUMERICĂ A PROCEDEELOR DE NETEZIRE ȘI DE DURIFICARE A SUPRAFEȚELOR ACTIVE ALE SCULELOR DIN COMPONENTA UTILAJELOR DE TURNARE A STICLEI ÎN FORME ȘI TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ÎN FORMĂ</b>	<b>98</b>
3.1. Pregătirea completă a modelului supus simulării numerice	98
3.2. Simularea testului Brinell	103
3.3. Rezultatele simulărilor numerice pentru variantele tehnologice ale procesului de netezire și durificare prin deformare plastică cu sculă cu cap sferic	105
3.3.1. Analiza efectului intensității forței de apăsare asupra calității suprafeței prelucrate	105
3.3.2. Analiza influenței adâncimii de pătrundere asupra calității suprafețelor prelucrate prin metoda cu sculă rigidă	109
3.4. Analiza stratului deformat plastic prin operația de netezire	110
3.4.1. Completarea modelului simulat	110
3.4.2. Producerea și dezvoltarea în profunzime, în stratul de control, a stării plastice	114
3.4.3. Tensiunile remanente în semifabricatele cilindrice după operația de netezire	119
3.4.4. Analiza locală a tensiunilor	121
3.4.5. Îmbunătățirea calității suprafeței prelucrate prin operația de netezire	123
3.5. Analiza transferului de căldură în interiorul formei	126
3.5.1. Transferul de căldură de la forma în mediul ambiant	127
3.5.2. Lărgirea capacităților tehnologice ale procesului de fabricație prin metode constructive	129
3.5.3. Pregătirea completă a modelului supus simulării numerice	138
3.5.4. Simularea regimului de răcire-încălzire a formei pentru două variante	138
3.6. Concluzii la capitolul 3	139
<b>4. EXPERIMENTAREA PROCESELOR DE DURIFICARE ȘI DE NETEZIRE PRIN PRESARE CU SCULE CU CAP SFERIC</b>	<b>141</b>
4.1. Prezentarea mașinilor unelte, dispozitivelor și aparaturii de măsurare	141
4.1.1. Strung universal KART E-2H	141
4.1.2. Sculă pentru deformarea plastică la rece cu bilă de rulment	141
4.1.3. Dinamometru KISTLER tip 9257B	142
4.1.4. Amplificator electronic de semnal ”Charge Amplifier type 5070”	143
4.1.5. Termocameră în infraroșu FLIR P660	144
4.2. Descrierea procesului de deformare plastică la rece prin netezire cu bila de rulment	145
4.3. Reprezentarea în formă grafică a forțelor care se dezvoltă pe parcursul derulării procesului de netezire prin deformare plastică la rece	149
4.4. Prezentarea rezultatelor rugozității obținute la aplicarea procesului de netezire și durificare prin DPS	150
4.5. Descrierea procesului de aplicare a peliculelor de grafit	151
4.6. Prezentarea rezultatelor și analiza lor	153
4.7. Concluzii la capitolul 4	157



<b>5. VALIDAREA EXPERIMENTALĂ A METODOLOGIEI DE SIMULARE NUMERICĂ PROPUȘI ȘI APLICATĂ ÎN CADRUL TEZEI DE DOCTORAT</b>	158
5.1. Necesitatea și scopul validării experimentale a metodologiei de numerică	simulare 158
5.2. Validarea experimentală bazată pe încercarea de duritate Brinell	159
5.3. Validarea experimentală bazată pe datele obținute în timpul aplicării procedeului tehnologic de netezire și durificare pe modele simple	163
5.4. Concluzii la capitolul 5	165
Contribuții originale și concluzii generale	166
Contribuții originale	167
Concluzii generale	169
BIBLIOGRAFIE	170
ANEXE	176
Declarația privind asumarea răspunderii	213
CV autorului	214

## ADNOTARE

**Titlul** - Sporirea durabilității formelor de turnare prin procedee tehnologice și metode constructive.

**Lucrarea este compusa** din introducere, cinci capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 117 titluri, 2 anexe, 169 pagini (până la bibliografie), 103 figuri, 15 tabele. Rezultatele obținute sînt publicate în 7 lucrări științifice.

**Cuvinte cheie:** durabilitatea formelor, netezire cu diamante, ecrusare stratului superficial, acoperire cu pelicolile nanometrice.

**Domeniul de studiu** se referă la metode de durificare prin DPS, acoperire suprafețelor active cu straturi de protecție și de proiectare a elementelor de răcire.

**Scopul tezei** este aprofundarea teoretică și experimentală a proceselor care apar în timpul aplicării tehnologiei de netezire și durificare superficială prin deformare plastică, de concepere a unei metodologii de simulare numerică cu validarea experimentală.

**Obiectivele lucrării:** Studiul proceselor de durificare și de netezire a suprafețelor organelor de mașini, cunoscute și aplicate în procesele industriale; stabilirea unei metodologii pentru realizarea simulărilor numerice ale proceselor tehnologice de prelucrare prin deformare plastică; Formularea modelelor de material; Validarea modelului de material folosit în operațiunile de simulare a procesului tehnologic de deformare plastică la rece și de netezire cu ecrusare; Experimentarea proceselor de durificare și de netezire prin presare cu scule dure; Validarea experimentală a metodologiei de simulare numerică propusă și aplicată în teza

**Noutatea și originalitatea științifică a lucrării constă în:** elaborarea unui proces DPS pentru fonta cu grafit lamelar și stabilirea procedurii generale de aplicare PC-urilor în procesul de prognozare a DPS cu aprecierea ecrusării materialului în stratul exterior totodată cu îmbunătățirea calității suprafeței.

**Semnificația teoretică** constă în lărgirea domeniului de aplicare a procedurii de DPS și elaborarea metodologiei de cercetare și elaborarea asistate de calculator a procedurii de DPS, proiectarea elementelor de răcire și acoperirea suprafețelor de contact cu straturile de protecție.

**Problema științifică importantă soluționată** constă în stabilirea procedurii generale pentru realizarea simulărilor numerice ale proceselor tehnologice de prelucrare prin deformare plastic, metodei de realizarea acoperirii suprafețelor de lucru și condițiilor termice de lucru a formelor de fasonare a sticlei.

**Valoare aplicativă** constă în mărirea rezistenței materialului formelor de fasonare a sticlei prin toate trei metode elaborate în acesta teza.

**Implementarea rezultatelor științifice** constă în aplicarea la formele de fasonare a sticlei ce este confirmat prin actele de implementare anexate la teza.

## АННОТАЦИЯ

**Название** Повышение долговечности формокомплектов технологическими и конструктивными методами.

**Работа состоит** из введения, пяти глав, общих выводов и рекомендаций, литературы из 117 названий, 2 приложений, 169 страниц (до литературы), 103 рисунков и 15 таблиц. Полученные результаты опубликованы в 7 научных работах.

**Ключевые слова:** долговечность форм, алмазное выглаживание, упрочнение поверхностного слоя, покрытие нанометрические плёнки.

**Область исследования:** относится к методам упрочнения ППД, покрытие рабочих поверхностей защитными слоями и проектирование элементов охлаждения.

**Цель работы** состоит в теоретическом и практическом углублении понимания процессов, возникающих при применении технологии поверхностного выглаживания и упрочнения с помощью пластической деформации, в закладке методики компьютерного моделирования и экспериментальной валидации.

**Задачи работы** исследование процессов упрочнения и выглаживания поверхностей деталей машин, известные и применяемые в промышленных процессах, разработка методики для проведения программного моделирования технологических процессов обработки пластическим деформированием, определение свойств материала, валидация использованных свойств материала для моделирования технологического процесса холодного пластического деформирования и выглаживания с упрочнением. Экспериментирование процессов упрочнения и выглаживания посредством сжатия твёрдым инструментом. Экспериментальная валидация методики моделирования предложенной и применённой в работе.

**Научная новизна работа** заключается в разработке процессов ППД для чугуна с пластическим графитом и определении базовой процедуры применения ПК в процессах моделирования ППД с оценкой упрочнения материала в поверхностных слоях и одновременным повышением чистоты поверхности.

**Теоретическая значимость** заключается в расширении области применения ППД и разработки методики компьютерного исследования и разработки процессов ППД, проектирование элементов охлаждения и покрытия рабочих поверхностей защитными слоями.

**Решение важной научной задачи** заключается в определении базовой процедуры для выполнения компьютерного моделирования технологических процессов обработки ППД, метода нанесения покрытий рабочих поверхностей и термических условий работы формокомплектов стекольной промышленности.

**Применительная ценность** состоит в повышении сопротивления материала для формования стекла посредством всех трех методов, разработанных в этой диссертации.

**Реализация научных результатов** заключается в применении к формокомплексам, что подтверждается актами о внедрении, прилагаемыми к диссертации.

## ANNOTATION

**Title** – Increasing durability of casting moulds by technological processes and constructive methods.

**The thesis consists of** introduction, five chapters, general conclusions and recommendations, references with 117 titles, 2 annexes, 169 pages (before the references), 103 figures, 15 tables. The obtained results have been published in 7 scientific articles.

**Key words:** durability of moulds, diamond smoothing, superficial layer hardening, covering with nanometrical films.

**The field of study** refers hardening methods by SPD, covering of the active surfaces with protective layers and design of the cooling elements.

**The purpose of thesis** is to deepen theoretically and experimentally the processes that appear with applying of the technology of superficial smoothening and hardening by plastic deformation. Developing a method of numerical simulation with experimental validation.

**Objections of the thesis:** studying the process of hardening and smoothening of the surfaces of machine parts, known and applied in industrial processes, developing a method for making a numerical simulation of the technological processes of treatment by plastic deformation, determination of the material's properties, validation of the applied properties of the material for modeling the technological process of cold plastic deformation and smoothening with hardening. Experimenting the processes of hardening and smoothening by compressing with a hard tool. Experimental validation of the numerical simulating method proposed and applied in thesis.

**Scientific novelty and original value of the work** consists in elaborating a SPD process for cast iron with lamellar graphites and determinating general procedure to apply PC forecasting process of SPD with appreciating of hardening of the material in superficial layer with improving the surface's quality.

**Theoretical significance** is in extension of the field of application of the SPD process and elaborating a method of study and developing a PC assisted procedure of SPD, design of the cooling elements and covering of the contact surfaces with protective layers.

**The important scientific problem solved** consists in determination of the general procedure for numerical simulation of the technological processes of treatment by plastic deformation, method of covering of the working surfaces and thermal conditions of work of glass moulds.

**Application value** consists in increasing the resistance of the glass molding material through all three methods elaborated in this thesis.

**The implementation of the scientific results** consists in the application to the glass molds which is confirmed by the implementing documents attached to the thesis.

## Lista abrevierilor

1. DPS - deformarea plastică de suprafață;
2. RCM - rezistența constructivă al materialului
3. CIF - curent de înaltă frecvență
4. FEC - fluxurile de energie concentrată
5. ZD - zonă de deformare
6. ELE - Ecrusarea prin lovitură – inerție
7. DP - deformate plastic
8. DEI - descărcarea inergiei în impuls
9.  $\sigma_s$  - diferența de duritate
10.  $\delta$  - gradul durității deformaționale
11. H - duritatea metalului (microduritatea) tratat
12.  $H_{in}$  - duritatea metalului (microduritatea) în stare inițială
13.  $\sigma_v$  - tensiunile de contact
14.  $K_0$  - limita de curgere a materialului
15. P - forța radială de deformare
16. S - avansul
17.  $D_p$  - diametrul rolei (bilei)
18.  $R_{red}$  - raza de profil a dispozitivului
19.  $R_z$  - rugozitatea suprafeței piesei de prelucrat
20. Z - numărul de piese pentru deformare
21.  $\sigma_y$  - tensiunea medie în contact
22. V - viteza
23. i - valoarea forței de strângere a periei de suprafață

24.  $\sigma_p$  - limită de proporționalitate
25.  $\sigma_e$  - limită de elasticitate
26.  $\sigma_c$  - limită de curgere aparentă
27.  $E_t$  - modulul de plasticitate tangent
28.  $\eta$  - vâscozitatea plastică
29.  $\varepsilon$  – deformația
30.  $B^e$  - matricea de complianță elastică a materialului
31.  $d\lambda$  – factorul infinitesimal
32.  $C$  - rigiditate elastoplastică
33.  $E$  – modulul de elasticitate
34.  $K$  – coeficientul complianței
35.  $T$  - temperatura
36.  $\Delta$  – direcția
37.  $Q$  – cantitatea de căldură
38.  $\lambda$  –capacitatea de căldură a materialului formeii
39.  $\tau$  – durata totală a ciclului de formare
40.  $a$  – coeficientul transferului de căldură

# INTRODUCERE

Procedeele de durificare și de netezire a suprafețelor organelor de mașini includ un număr mare de metode de lucru. Aceste metode conduc la îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență ale organelor de mașini, precum și a calității suprafețelor de lucru ale acestora.

Teza de doctorat tratează problema deformărilor plastice de suprafață prin care se obține ecruisarea materialului în stratul exterior și totodată, se obține un profil cu rugozitate îmbunătățită. În teză, de asemenea, sunt tratate problemele elementelor constructive de răcire privind sporirea durabilității formelor de turnare și metodele de acoperire cu pelicule de protecție a elementelor seturilor de forme supraîncărcate termic.

## SCOPUL TEZEI.

Scopul tezei de doctorat îl constituie aprofundarea teoretică și experimentală a proceselor care apar în timpul aplicării tehnologiei de netezire și durificare superficială prin deformare plastică a fontei cu grafit lamelar a formelor de fasonare a sticlei, de concepere a unei metodologii de simulare numerică, fiind confirmate experimental.

Elaborarea elementelor constructive de răcire a formelor de fasonare a sticlelor și studiul eficienței lor. Elaborarea metodelor de acoperire cu peliculă de protecție a zonelor supraîncărcate termic a elementelor seturilor de forme.

## OBIECTIVE PROPUSE:

- studiul proceselor de durificare și de netezire a suprafețelor organelor de mașini cunoscute și aplicate în procesele industriale;
- determinarea unei metodologii privind realizarea simulărilor numerice ale proceselor tehnologice de prelucrare prin deformare plastică;
- elaborarea modelelor de material;
- validarea modelului de material folosit în operațiunile de simulare a procesului tehnologic de deformare plastică la rece și de netezire prin ecruisare;
- simularea numerică a procedeelelor de netezire și de durificare a suprafețelor sculelor;
- experimentarea proceselor de durificare și de netezire prin presare cu scule dure;
- validarea experimentală a metodologiei de simulare numerică propusă și aplicată în teză;
- argumentarea formei și locurilor de aplicare a elementelor de răcire;
- modelarea asistată de calculator a parametrilor care influențează temperatura în formă;
- stabilirea procedeelelor de acoperire cu pelicule de protecție din grafit.

Elucidarea obiectivelor tezei de doctorat a fost posibilă prin structurarea lucrării în forma actuală, concretizată în cinci capitole. Raționamentul abordat și conexiunile dintre capitole sunt expuse în continuare detaliat, explicit și fundamentat.

În **capitolul 1**, intitulat “**Analiza procedeeleor de durificare și de netezire a suprafețelor organelor de mașini și a sculelor, analiza metodelor constructive și de acoperire cu pelicule de protecție**”, am efectuat un studiu privind analiza principalelor procedee de acest tip care se aplică industrial. Astfel, se analizează critic metodele aplicate pentru netezirea și durificarea superficială a suprafețelor de lucru ale organelor de mașini.

Spre deosebire de *îmbunătățirile volumice*, care asigură o creștere aproximativ uniformă a caracteristicilor de rezistență ale materialelor pe toată secțiunea acestora, *îmbunătățirile de suprafață* asigură acest lucru doar în stratul superficial.

După analiza prin metodele cunoscute, legate de obiectul de studiu al tezei, am prezentat date doar privind procedeul care va fi analizat în cadrul tezei, și anume, de netezire și durificare cu o sculă dură (carburi metalice, diamant, oțel de rulmenți etc.) cu cap sferic.

Datele privind schemele de lucru, materialele utilizate, vitezele de lucru, avansul, gradul de deformare, gradul de durificare, tensiunile de contact, regimurile de netezire au fost expuse în capitolele următoare, toate acestea fiind folosite ca o bază de date pentru studiile efectuate.

Am efectuat studiul privind analiza metodelor constructive de sporire a durabilității formelor de fasonare a sticlei.

Am efectuat studiul privind analiza metodelor de acoperire cu pelicule de protecție.

Capitolul se încheie cu unele concluzii.

În **capitolul 2**, “**Stabilirea metodologiei pentru realizarea simulărilor numerice ale proceselor tehnologice de prelucrare prin deformare plastică, obiectivele de formare a peliculelor de grafit pe suprafețele lor active și condițiilor termice de lucru al formelor de fasonare a sticlei**”, este descris avantajul lucrului cu calculatoarele electronice, cu ajutorul programelor de simulare numerică privind fenomenele complexe din domeniul general al fizicii, cu interpretarea evoluției dinamice a acestora.

Abordarea proceselor tehnologice de deformare plastică, utilizând metodele de simulare numerică, oferă largi posibilități de înțelegere în detaliu a fenomenelor, de analiză și de optimizare a proceselor.

Simularea numerică transformă aspectele importante ale problemelor fizice în forme discrete de descriere matematică, recrează și rezolvă problemele pe calculator și, în final, evidențiază aspectele fenomenelor solicitate de către analiza efectuată.

În cadrul tezei de doctorat, modelele de simulare numerică s-au utilizat pentru analiza unor procese și fenomene care se produc în timpul deformării plastice la rece a metalelor.



În simulările numerice dezvoltate în teză se utilizează metoda elementelor finite cu rețea Lagrange adaptată la problemele de mecanică a solidelor. Pentru lucru s-a utilizat în principal codul numeric LS-DYNA. Simulările numerice sunt eficiente numai fiind aplicate în strânsă legătură cu fundamentele teoretice și cu practica experimentală.

Procedura generală aplicată simulărilor numerice este reprezentată în figura 2.1 și cuprinde: *modelul fizic, modelul matematic, modelul discretizat, codificarea, soluționarea.*

În secțiunile ce urmează se descriu și se particularizează etapele simulărilor numerice în condițiile delimitate ale procesului de deformare plastică la rece a metalelor.

În general, a fost concepută o metodologie de simulare numerică bazată pe metoda elementelor finite, aplicată proceselor de prelucrare prin deformare plastică. S-a insistat asupra realizării unui model fizic fidel în care sunt incluse corpurile principale implicate în proces și a cărui funcționare corespunde tehnologiei aplicate.

Având în vedere că proprietățile materialelor, date importante de intrare, joacă un rol hotărâtor asupra acurateței soluției, au fost studiate mai multe modele de material, toate elaborate pe baza datelor experimentale. Au fost analizate trei loturi de eșantioane, extrase din șarje de fabricație diferite, toate din fontă cenușie cu grafit lamelar.

Prelucrarea datelor experimentale a constituit un obiectiv important în realizarea modelului corect de material.

Sunt prezentate, pas cu pas, toate operațiile prin care datele experimentale au fost corectate, transformate în diagrame caracteristice convenționale, apoi în cele reale. La sfârșitul lanțului de transformări, datele determinate experimental se regăsesc în forma diagramelor de plasticitate, pe baza cărora se exprimă modelele de material.

Toate operațiile de transformare au la bază o metodologie determinată de autor, justificată în anexele nr. 2.1 și nr. 2.2 și prin simularea numerică a probei de compresiune.

În urma analizei rezultatelor simulării numerice a probei de compresiune și a epruvetelor distruse se evidențiază concluzia prin care se constată o capacitate de rezistență a materialului la compresiune superioară celei determinate experimental.

În consecință, modelele de material concepute pentru fonta cenușie cu grafit lamelar nu au fost limitate la deformația de cedare la proba de compresiune. În capitolul următor, pe baza simulării de duritate Brinell, unde tipul de solicitare se apropie de cel care are loc în timpul procesului de deformare plastică cu sculă cu cap sferic, limita de cedare urmează a fi crescută corespunzător.

Comportarea fontei cenușii cu grafit lamelar la deformări plastice a fost încadrată în mai multe tipuri de modele de material. Dintre acestea, două realizează o aproximare foarte bună: *modelul poliliniar și modelul experimental.* Pentru probleme în care viteza de deformare influențează starea de curgere a materialului, modelele de material se completează cu noi parametri care iau în seamă aceste

influențe. Deoarece în regim de funcționare cu lubrificație și răcire, în procesul de deformare plastică încălzirea este redusă, influența temperaturii asupra stării plastice a materialului a fost rezolvată.

Modelele fizice, în care sunt încorporate și cele de material, vor fi utilizate, eventual, cu modificări minore, în simulările numerice ale procesului de netezire și de durificare a pieselor prin deformare plastică cu scula cu cap sferic.

Atenția și insistența cu care s-au pregătit și elaborate modelele de material reprezintă garanția necesară corectitudinii abordărilor numerice ulterioare.

Acoperirea suprafețelor cu pelicule de grafit reprezintă un mare interes practic, deoarece lubrifianții speciali folosiți după tehnologia fasonării sticlelor conțin un procentaj mare de grafit, fiind destinați pentru protejarea contra temperaturilor ridicate a suprafețelor elementelor de forme.

În cazul tezei de doctorat, peliculele de grafit au fost aplicate pentru piesele cel mai mult solicitate termic în timpul producerii sticlelor.

Totodată, un interes mare reprezintă fenomenul termic ce se desfășoară în procesul de fabricație. Această informație oferă largi posibilități de înțelegere a fenomenului de încărcare termică, de analiză și optimizare a elementelor constructive.

În **capitolul 3**, intitulat „**Simularea numerică a procedeeleor de netezire și de durificare a suprafețelor active ale sculelor din componența utilajelor de turnare a sticlei în forme**” se procedează la simularea numerică a procedeeleor de netezire și de durificare a suprafețelor active ale sculelor conform procedurilor stabilite în capitolul 2.

Codul numeric folosit pentru simulare, LS-DYNA, este un program de analiză a proceselor și fenomenelor fizice, cu largi posibilități de utilizare în domeniul mecanicii corpurilor deformabile. Acest cod este cumpărat pe bază de licență și se află în proprietatea SC UPS PILOT ARM SRL. Ca metodă de analiză s-a optat pentru o metodă cu rețea – metoda elementelor finite - care asigură o foarte bună reprezentare discretă a corpurilor implicate în proces. Soluția explicită a programului LS-DYNA, ales pentru integrarea ecuațiilor, are avantajul unei mai bune reprezentări în timp a soluțiilor față de soluția implicită. Alegerea este justificată de faptul că procesele analizate sunt procese mecanice de durată, continue și se produc cu o anumită viteză. Pentru o soluție corectă și completă este necesar ca incrementul de calcul să fie în concordanță cu pasul rețelei și cu viteza relativă dintre semifabricat și sculă.

Conform metodologiei stabilite în capitolul 2, pentru realizarea simulării numerice a proceselor de netezire și durificare a sculelor prin deformare plastică superficială este necesară elaborarea unui model discretizat cu elemente finite în concordanță cu scopul urmărit.

Discretizarea modelului fizic descris în capitolul 2 și reprezentat în figura 2.7, ca o esențializare a procesului impus analizei, a fost realizată cu densități foarte diferite de elemente finite, în funcție de

locul și importanța corpului în proces. Modelul procedurii de netezire și durificare a sculelor prin deformare plastică prin contact de alunecare este reprezentat în figura 3.1.

Procedura de netezire presupune că suprafața de prelucrat are o rugozitate rezultată din procesul tehnologic de fabricație, cel mai frecvent prin aşchiere.

Modelele analizate încercate conform realității, au pe suprafața de prelucrat o rugozitate simulată, similară celei rezultate în procesul de strunjire normală, cu avansul compatibil cu rețeaua de elemente finite de 0.5 mm/rot.

Generarea rugozității virtuale s-a realizat printr-o metodă de calcul aleator.

După prelucrare, rugozitatea va fi recalculată în aceleași noduri de control și comparată cu cea inițială. Din considerentele expuse mai sus, derivă justificarea utilizării sculei cu capul de netezire sferic cu rază mare  $R_{sf} = 4$  mm, la limita celor uzuale.

Controlul forțelor aplicate de sculă asupra piesei în procesul de prelucrare simulat este realizat de sistemul de senzori dispuși pe corpul sculei.

Al doilea pas important în faza de pre procesare se referă la elaborarea modelului de material. Analiza insistentă a materialelor asociate modelelor simulate efectuată în capitolul 2 își dovedește acum utilitatea. Modelul de plasticitate Johnson-Cook (2.20) în formă simplificată este dat de relația (3.2). Termenul termic din relația (2.20), din motive justificate – încălzire ne semnificativă, dovedită experimental – a fost exclus.

Pentru fonta cenușie cu grafit lamelar, folosită în simulare, valorile coeficienților A, B și n sunt cele determinate experimental în capitolul 2. Coeficientul C a fost preluat de la materialul similar cu valoarea  $C = 0.06$ , conform pct. 2.3.5 din lucrare.

Celelalte corpuri sunt modelate cu materiale elastice (oțeluri) sau rigide.

Condițiile pe frontiere și funcționale simulate au fost stabilite în concordanță cu parametrii proceselor tehnologice de netezire și de durificare.

Prinderea piesei în mandrină este simplă, prin contact între bacuri și prelungirea tehnologică a piesei.

Contactul dintre capul sferic al sculei și semifabricat se realizează fie elastic, cu controlul forței, fie rigid, cu controlul deplasării. Un asemenea stand de testare pe care l-am utilizat se găsește în laboratoarele Facultății Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice din cadrul Universității “POLITEHNICA” București.

Necesitatea confruntării soluțiilor simulate cu datele experimentale a condiționat alegerea vitezei periferice corespunzătoare acestei turații ( $\approx 42$  m/min). Turația mică a arborelui utilajului este un dezavantaj, deoarece mărește durata calculului unui ciclu tehnologic complet.

E de notat că dispozitivul tehnologic simulat este complet izolat și nu interacționează cu alte corpuri, fiind o idealizare a unui agregat experimental, care în întregime, prin deformări elastice, jocuri și vibrații, influențează calitatea produsului.

Confirmarea alegerii juste a modelului de material plastic (Johnson-Cook) se bazează pe o simulare numerică a testului de duritate Brinell, pe modelul fizic din figura 2.9.

Compararea durităților simulate cu cele măsurate experimental se constituie în criteriul de validare a modelelor de material.

Rezultatele testului de duritate Brinell simulate sunt completate cu cele măsurate experimental pe cele două loturi de materiale reținute pentru aplicații și expuse în tabelul 3.1.

Rezultatele simulărilor sunt prezentate concis, în formă grafică, prin câmpuri de culoare și diagrame. Se insistă mai mult asupra câmpului tensiunilor echivalente von Mises și cel al deformației plastice efective și asupra diagramelor forțelor de prelucrare. Se mai urmărește calitatea suprafeței prelucrate prin netezire, comparând rugozitatea finală cu cea imprimată prin generare aleatoare înainte de aplicarea procedurii.

Piesa cilindrică cu diametrul de 35 mm cu rugozitatea simulată aproximativă  $R_a$  5.0  $\mu\text{m}$  a fost supusă prelucrării simulate prin trei regimuri de forță. S-au folosit forțe de apăsare radială de 500 N, 750 N, 1500N.

În abordarea problemei de răcire corectă a formei cu scopul obținerii articolelor din sticlă calitative este necesară înțelegerea corectă a necesităților tehnologice.

Generarea profilului elementelor de răcire s-a efectuat pe baza suprafeței maxime de contact cu mediul ambiant. Totodată, s-a efectuat simularea transferului de căldură pe modelul (configurației) simplu în programul ANSYS.

**În capitolul 4, „Experimentarea proceselor de durificare și de netezire prin presare cu scule cu cap sferic”,** este expus modul de realizare a experimentelor precum și rezultatele acestora. Experimentările s-au realizat pe un stand din laboratoarele Facultății Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice din cadrul Universității “POLITEHNICA” București.

Procesul tehnologic de deformare plastică la rece a fost realizat pe un strung universal KART E-2H în care semifabricatul (piesa de lucru) de formă cilindrică a fost fixat în universal prin intermediul bacurilor de fixare. Pentru realizarea unei coaxialități mai bune, între piesa de lucru și axul strungului aceasta a fost supusă unei strunjiri de centrare. După realizarea operației de strunjire, de centrare, a fost scos dispozitivul port-cuțit de pe căruciorul strungului și a fost fixat dinamometrul KISTLER 9257. Pe partea superioară a dinamometrului a fost prinsă solidar cu ajutorul unor bride și șuruburi M8 scula de deformare plastică cu bilă. În timpul desfășurării procesului de deformare plastică la rece, la contactul dintre bilă și suprafața activă a piesei de lucru se dezvoltă forțe și momente pe cele trei direcții. Scula de deformare plastică, fiind legată rigid de dinamometru, face

posibilă transmiterea eforturilor la senzorii care sunt încorporați în acesta. Prin urmare, aceștia generează semnale electrice, care prin intermediul unor cabluri cu conectori, sunt captate de un amplificator de semnal "Charge amplifier type 5070" care filtrează și amplifică semnalele primite de la dinamometru. Mai departe, aceste semnale sunt preluate de placa de achiziție montată într-unul din slot-urile desktopului computerului. După prelucrarea informațiilor cu ajutorul plăcii de achiziție, pentru fiecare test rezultă câte un fișier Excel cu print screen-ul. Acesta înregistrează, în timpul desfășurării procesului de deformare plastică, evoluția grafică a forțelor pe cele trei direcții (un fișier "Notepad" arată evoluția în timp a acelorași forțe). Pentru testul din lucrare au fost păstrate pentru studiu doar forțele de pe cele trei direcții, momentele neprezentând interes. Parametrii regimului de lucru sunt: turația arborelui principal al strungului; avansul radial (adâncimea); avansul longitudinal.

Pentru un semifabricat au fost încercate mai multe regimuri de lucru obținute prin variația celor trei parametri până a fost obținut un regim de lucru optim (turația [rot/min]: 380; avans longitudinal [mm/rot]: 0.09; avans radial (adâncime) [mm]: 0.2 (pe rază)). Pentru micșorarea efortului de deformare a fost utilizat și ulei de tip Shell Omala F.

În urma testelor efectuate pe standul de testare menționat mai sus au fost achiziționate date referitoare la forțele (de pe cele trei direcții x, y și z) care apar în timpul procesului de netezire prin deformare plastică la rece cu bilă de rulment. Au fost selectate datele de achiziție pentru câteva probe reprezentative (probele 6, 7, 9 și 12). După prelucrarea acestor date s-au construit graficele forțelor ce se dezvoltă în timpul prelucrării prin deformare a pieselor respective după cele trei direcții reprezentate în figura 4.06 a, b, c și d.

Totodată, au fost efectuate testele pentru determinarea parametrilor calitativi, și anume, a rugozității în funcție de regimurile de lucru. După prelucrarea datelor obținute și măsurate a fost elaborat tabelul cu aceste caracteristici.

La finele capitolului sunt expuse nouă concluzii referitoare la experimentele efectuate.

**În capitolul 5, „Validarea experimentală a metodologiei de simulare numerică propusă și aplicată în cadrul tezei de doctorat”** sunt tratate pe rând atât necesitatea și scopul validării experimentale a metodologiei de simulare numerică, cât și validarea experimentală bazată pe încercarea de duritate Brinell, precum și validarea experimentală bazată pe datele obținute în timpul aplicării procedurii tehnologice de netezire și durificare pe modele simple. Capitolul se încheie cu șase concluzii.

**Contribuții originale și concluzii generale.** Se face o sinteză a contribuțiilor originale proprii, precum și a concluziilor privind posibilitățile de efectuare a netezirii și durificării superficiale a suprafețelor realizate din fontă cenușie cu grafit lamelar.

**În Bibliografie** sunt încadrate 119 referințe bibliografice, la două dintre acestea fiind coautor.

Teza de doctorat se încheie cu ... ANEXE în care sunt expuse rezultatele obținute în urma experimentelor efectuate în cadrul acesteia.

\*

\* \*

Elaborarea tezei de doctorat a fost posibilă datorită sprijinului și îndrumărilor permanente oferite de conducătorul științific conferențiar, dr. ing., Sergiu MAZURU, căruia îi mulțumesc în mod deosebit și față de care îmi exprim deplina recunoștință. De asemenea, aduc mulțumiri catedrei de profil pentru ajutorul acordat pe parcursul elaborării tezei.

Sincere mulțumiri aduc, în aceeași măsură, profesorilor universitari Paul LIXANDRU, Tudor CHERECHEȘ și cercetătorului, doctor ing. Daniel DRAGNEA din cadrul SC UPS PILOT ARM SRL pentru îndrumările și aportul substanțial la efectuarea cercetărilor. În cadrul acestei societăți am avut acces la tehnică de calcul performantă, precum și îndrumări eficiente în problema simulărilor numerice, utilizând programul profesional LS-DYNA, care a fost achiziționat de către societate pe bază de licență.

De asemenea, aduc mulțumiri colectivelor de la Universitatea "POLITEHNICA" din București, Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare Turbomotoare – COMOTI, București, și Universității Tehnice „GHEORGHE ASACHI” din Iași pentru sprijinul acordat la efectuarea numeroaselor probe, în mai multe laboratoare.

# 1. ANALIZA PROCEDEELOR DE DURIFICARE ȘI DE NETEZIRE A SUPRAFETELOR ORGANELOR DE MAȘINI

## 1.1. Generalități și metode cunoscute aplicate

În funcție de condițiile de exploatare, piesele au un mod diferit de uzură sau distrugere și ca urmare rezistența lor constructivă va fi determinată prin diferite caracteristici ale rezistenței constructive a materialului (RCM).

Caracteristicile RCM pot fi împărțite în două grupe: de scurtă durată (limita de curgere, rezistența temporară) și cu o durată mare de timp (tensiuni de contact, uzură, rezistență la coroziune). RCM poate fi mărită prin metode constructive, metalurgice, tehnologice și de exploatare.

Tehnologiile contemporane includ un număr mare de metode de durificare a suprafețelor, care permit îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență a materialelor.

Se deosebesc îmbunătățirile *volumice*, care asigură o îmbunătățire aproximativ uniformă a caracteristicilor de rezistență a materialelor pe toată secțiunea semifabricatului, și de *suprafață*, la care această îmbunătățire se realizează doar în stratul superficial [1, 2, 30, 34, 36, 70, 76].

Îmbunătățirile volumice sunt utilizate pentru a mări rezistența statică a pieselor, la care tensiunile de lucru sunt repartizate uniform pe toată secțiunea. Îmbunătățirea volumică se realizează de regulă prin tratament termic de volum [40, 51, 63, 83, 103, 114]. Obținerea proprietăților necesare de exploatare a piesei prin tratamentul termic se asigură prin alegerea corectă a materialului, vitezei și temperaturii de încălzire, timpului de menținere, vitezei de răcire și adâncimii de tratare, de asemenea, prin combinarea diferitelor metode de tratament termic.

Majoritatea organelor de mașini lucrează în condiții la care sarcina de exploatare (presiunea, încălzirea, influența mediului etc.) se preia în general doar de stratul exterior al acestora. De aceea, durata de funcționare la astfel de piese este în funcție de proprietățile fizico-mecanice ale stratului exterior.

Pentru astfel de piese se folosesc metode de ecrisare a stratului exterior. Ecrisarea stratului exterior al metalului poate fi realizată prin două metode: modificarea stării stratului exterior sau prin acoperiri de suprafață [7, 10, 14, 19, 23, 33, 61, 89].

Din punct de vedere fizic, ecrisarea conduce și la accentuarea defectelor de structură. Un rol deosebit îl are mecanismul dislocației de întărire. Sporirea defectelor structurii cristaline favorizează frânarea dislocațiilor mobile și ca urmare sporește rezistența la alunecare.

Pe de altă parte, o sporire nejustificată a defectelor rețelei cristaline a metalelor poate servi ca sursă a concentrării locale a tensiunilor în material și apariției fisurilor și crăpăturilor care micșorează RCM. De aceea, procesul de ecrisare a materialului trebuie să fie controlat tehnologic [5, 8, 6, 14, 22, 60, 74].

Durificarea, în acest caz, se realizează prin: tratament termic, îmbogățirea stratului exterior cu elemente de aliere, deformare plastică sau cu câmpuri fizice.

O metodă foarte des utilizată de îmbunătățire a stratului exterior este tratamentul termic de suprafață cu curenți de înaltă frecvență (CIF), care permite obținerea unei durități înalte a suprafeței și un miez moale.

O altă direcție cu posibilități foarte largi de aplicare este asigurată de metodele de utilizare a **fluxurilor de energie concentrată** (FEC): flux de plasmă; flux ioni; arc electric; scânteie electrică; raze laser sau electroni la care densitatea puterii este mai mare de  $10^2 \text{ W/cm}^2$ . Variind densitatea fluxului de căldură, se poate prelucra termic suprafața, obținând astfel structuri cu proprietăți fizico-mecanice ridicate.

**Îmbogățirea** stratului exterior cu metale și nemetale sporește proprietățile de exploatare prin faptul că se mărește duritatea și rezistența la uzură (carbon, azot), rezistența la temperaturi ridicate (aluminiu, crom, siliciu) și alte proprietăți. Viteza de implementare a atomilor elementelor de aliere în rețeaua cristalină a metalului de bază se mărește cu creșterea temperaturii și a presiunii.

**Deformarea plastică de suprafață** (DPS) se utilizează în scopul de a ecruisa metalul prin deformare plastică, formându-se în stratul exterior tensiuni remanente de compresiune, totodată, obținându-se un profil cu o rugozitate îmbunătățită. DPS este eficientă pentru a spori rezistența la oboseală, mai ales pentru piese executate din materiale cu proprietăți ridicate, care sunt foarte sensibile la concentratorii de tensiune. Existența în stratul ecruisat a tensiunilor remanente de compresiune micșorează viteza de răspândire a fisurilor. Creșterea rezistenței la uzură a pieselor prelucrate prin DPS este dată și de faptul că se formează un profil optim al rugozității, care implică un contact mai bun între cuplele cinematice, precum și de utilizare a lubrifiantului pe această suprafață.

Aplicarea **acoperirilor de suprafață** are ca scop formarea unui strat exterior, cu un material care are o bună rezistență la uzură, coroziune și altele în raport cu materialul suport. Folosind acoperirile de suprafață, se pot dirija proprietățile de exploatare a stratului exterior, folosind piese din materiale ieftine. Deoarece acoperirile pot majora dimensiunile, ele pot fi folosite și la reparația pieselor [44, 52, 82, 100].

Paralel cu metodele tradiționale de acoperire - chimice și galvanice - o răspândire tot mai largă au metodele bazate pe (FEC), deoarece în baza lor se pot obține acoperiri cu o grosime de la  $10 \mu\text{m}$  până la ordinul milimetrilor și mai mult [39, 47, 89, 109, 110, 111].

Durificarea materialelor se poate realiza folosind și metodele combinate.

Mărirea posibilităților tehnologice de durificare a stratului exterior se poate realiza prin tehnologii combinate, bazate pe utilizarea diferitelor procedee de durificare. La cele combinate durificarea se realizează prin prelucrarea mecanică și termică, aplicarea de acoperire, DPS și altele.



Alegerea unei sau altei metode de durificare trebuie să fie justificată, pe de o parte, de condițiile de exploatare, iar pe de altă parte, din punct de vedere economic.

## **1.2. Durificarea prin deformare plastică superficială**

Deformarea plastică superficială (DPS) este metoda de prelucrare a piesei fără așchiere, în care se deformează plastic doar stratul superficial al piesei. Astfel, în cazul DPS are loc micșorarea rugozității suprafeței, creșterea durității (microduritatea) materialului, în stratul superficial al piesei apărând tensiuni remanente de compresiune. Acest lucru îmbunătățește indicatorii de utilizare a piesei DPS – crește resursa piesei de 1,5-2,3 ori, rezistența la prindere, rezistența la contact ș.a. Se aplică cu preponderență la durificarea pieselor cu concentratori de tensiune constructivi și tehnologici (canale și racordări). Avantajul DPS este universalitatea tehnologică și economicitatea metodei. După caracterul de interacțiune a instrumentului cu piesa, metodele DPS se împart în metode statice și metode de percuție.

DPS statice se realizează prin mișcarea sculei pe suprafața prelucrată cu o forță de deformare,  $P$ , constantă sau variabilă după o legitate specifică sau adâncimea de penetrare,  $h_d$ . În zona de contact a sculei cu piesa se formează un sector de curgere plastică – sursa de deformare, dimensiunea căruia depinde de factorii tehnologici. La mișcarea sculei se deformează stratul superficial al piesei.

DPS de percuție se realizează prin aplicarea șocurilor cu un dispozitiv care acționează prin repartiție aleatoare sau șocuri periodice. Dimensiunea sursei de deformare depinde de energia cinetică transmisă dispozitivului. Prelucrarea se realizează astfel, încât amprentele plastice să acopere suprafața cu un grad mare de suprapunere a amprentelor [11, 17, 21, 49, 73, 78].

### **1.2.1. Fizica procesului de durificare prin DPS**

Mecanismul deformației plastice la rece a metalelor și aliajelor se datorează alunecării în interiorul rețelei a unor părți de cristal față de altele. Odată cu acumularea deformațiilor, dislocațiile se multiplică, interacționează între ele și cu alte defecte ale cristalelor, iar ca rezultat mișcarea lor se îngreunează, tensiunea curgerii plastice  $\sigma_s$  și duritatea metalului cresc. Creșterea rezistenței de deformare plastică se numește durificare deformațională (ecruisare). Dependența  $\sigma_s$  de gradul de deformație a deplasării  $\Gamma$  se determină prin încercări la întindere și compresiune etc. Această dependență este adevărată și pentru DPS.

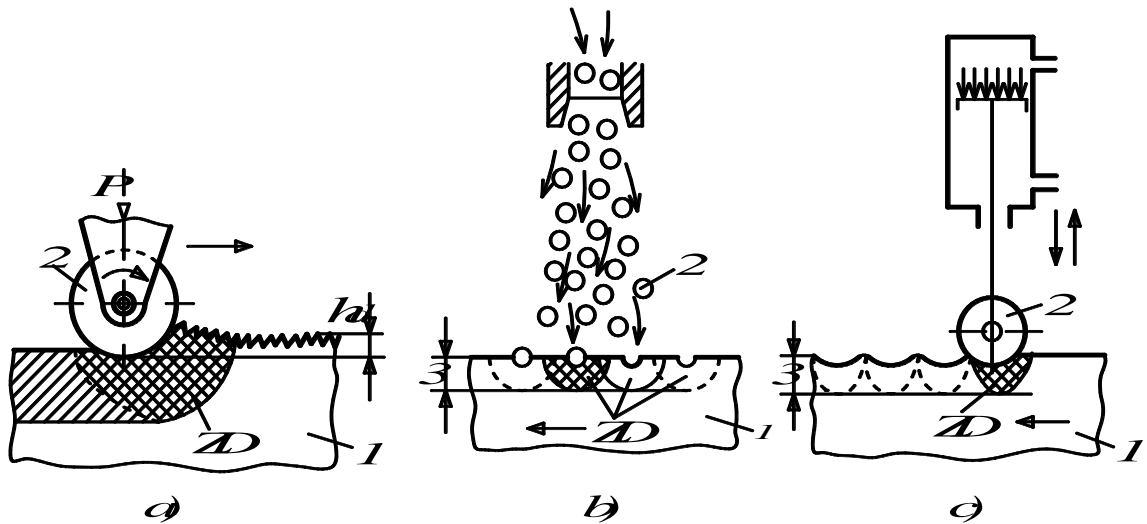


Fig. 1.1. Schema statică (a) prin lovituri (b) și (c) deformare plastică de suprafață (DPS):  
 1 – piesa; 2 – scula; 3 – stratul ecruisat.

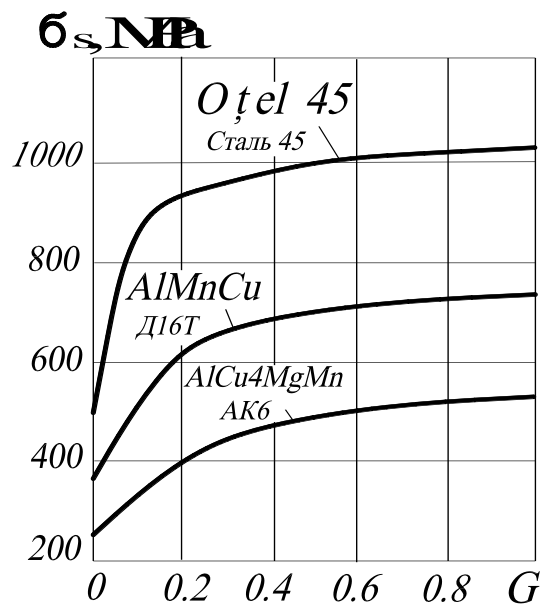


Fig. 1.2. Curbele de ecruisare

Viteza de deformare în intervalul  $10^{-4} - 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$  influențează puțin forma dependenței

$$\sigma_s = \sigma_s(G), \quad (1.1)$$

însă la viteze mari  $\sigma_s$  crește, fapt ce trebuie luat în considerație mai ales în cazul metodelor de percuție a DPS.

După atingerea valorilor specifice a lui  $G$ , creșterea  $\sigma_s$  practic se oprește. Pentru fiecare material există o limită a deformației acumulate, după care creșterea acesteia nu duce la durificarea metalului. În cazul creșterii exagerate a lui  $G$  are loc scăderea bruscă a resursei de plasticitate a metalului și ca rezultat se obține o micșorare a caracteristicilor de exploatare a piesei.

Gradul durității deformaționale  $\delta$  a metalului se determină prin diferența de duritate ( $\sigma_s$ )

$$\delta = \frac{[H-H_{in}]}{100} \%, \quad (1.2)$$

unde:  $H$  și  $H_{in}$  – duritatea metalului (microduritatea) tratat și în stare inițială.

Parametrii de stare ai stratului superficial al piesei, care influențează semnificativ durabilitatea (rugozitatea, gradul și adâncimea tratării, tensiuni remanente, gradul de epuizare a resursei de plasticitate etc.), depind de dimensiunile și starea de tensionare **ZD** (zonă de deformare), deformarea acumulată, fiind în funcție de materialul piesei și tehnologia DPS.

Ca rezultat al efectuării experimentelor tehnologice se stabilesc dependențe matematice care leagă parametrii de stare ai stratului superficial cu regimurile DPS, pe de o parte, și cu caracteristica de rezistență a materialului, pe de altă parte.

La o mai profundă înțelegere a acestor relații contribuie efectuarea experimentelor în combinație cu utilizarea metodelor de calcul ale mecanicii mediului continuu și teoriei de prelucrare a metalului prin presare.

Drept exemplu, în figura 1.3 se dau rezultatele cercetărilor, prin metoda „plaselor în coordonate”, a procesului de rostogolire a arborelui cu role, care indică variația în dreptul deformației ABCDE (după linia a-b), viteza alungirilor relative  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  și deplasărilor  $\gamma_{xy}$ , intensitatea vitezei de deformare a deplasării  $G'$ , deformației acumulate a deplasării  $G$ , gradul de epuizare a resursei de plasticitate  $\psi$ , la fel, a parametrilor stării de tensionare și a indicatorului de tensionare  $I$ .

Astfel de rezultate permit determinarea legităților tehnologice de durificare și reprezintă baza pentru stabilirea modelului de calcul tehnologic adecvat, care la rândul său reprezintă baza de modelare a procesului DPS cu ajutorul programelor profesionale de calcul și optimizarea soluțiilor tehnologice.

În general, problema de modelare a DPS presupune soluționarea acesteia prin câteva etape: determinarea dimensiunilor și formei YD; calcularea câmpului de tensiuni și vitezei de deformare în ZD; determinarea traiectoriilor de deplasare a particulelor metalului în ZD; calculul  $\sigma_s$ ,  $G$ ,  $\delta$ , a gradului de epuizare a resursei de plasticitate a metalului  $\psi$ , tensiuni remanente etc.

Prelucrarea rezultatelor de modelare permite formularea unor concluzii importante, adecvate și pentru alte metode DPS, care sunt baza calculului tehnologic:

- gradul de deformare a deplasării (deformația acumulată) stratului superficial și adâncimea tratării depind de dimensiunea sursei de deformație, în general, de dimensiunea amprenteii plastice  $d$  și de curbura  $R_{red}$ , unde  $d$  este parametrul sursei de deformație;  $R_{red}$  – raza de profil a instrumentului;
- gradul de durificare deformațională a metalului și tensiunile de contact depind de deformația acumulată și de curba de durificare a metalului dat;

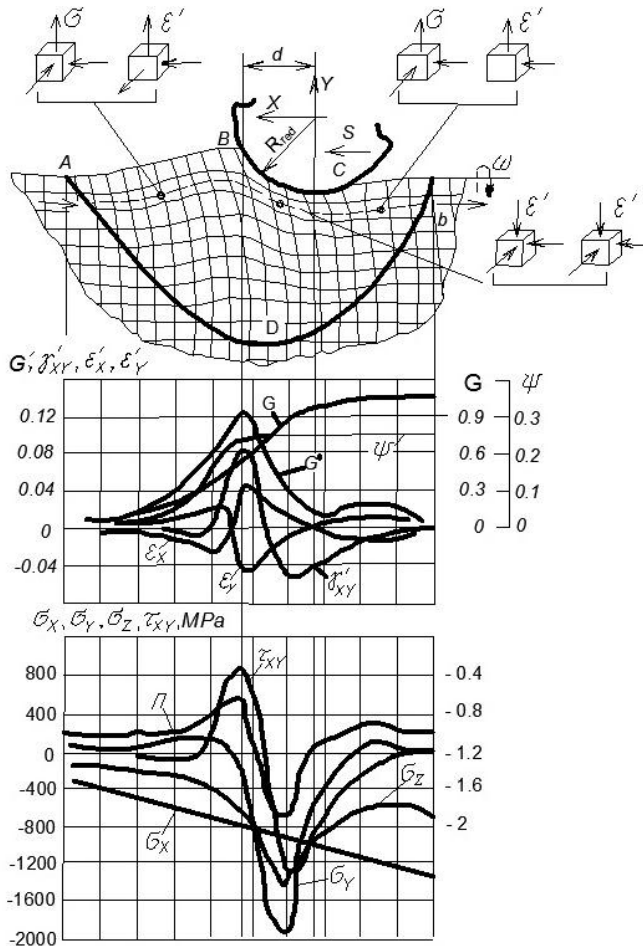


Fig. 1.3. Mecanismul de ecrusare a stratului exterior la rulare, [42, 46, 65]

- tensiunile de contact în raport cu curba de durificare a metalului după atingerea valorilor date a gradului de deformare se stabilizează și se apropie de duritatea metalului HB;
- gradul optim de deformare a forfecării stratului superficial  $G = 0,5 \dots 0,8$  (gradul de deformație  $\varepsilon = G/\sqrt{3}$ ).

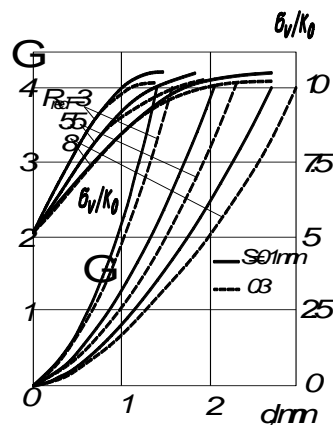


Fig. 1.4. Dependenta valorii deformării de deplasare  $G$  și a tensiunilor de contact  $\sigma_v$ , raportate la limita de curgere a materialului necruisat  $K_0$  de  $d$ ,  $R_{red}$  și avans  $S$

### 1.2.2. Metode statice DPS

În categoria metodelor statice DPS intră: rularea, netezirea, lărgirea prin deformare. Rularea se împarte în rulare exterioară și interioară (figura 1.5). Pentru rulare se folosesc bile standard și role de construcție și profil diferit, executate din aliaje de oțel IX 15, 18XBГ, 8X4B9Φ2, P18, P6M5, și altele cu duritatea 60...62 HRC.

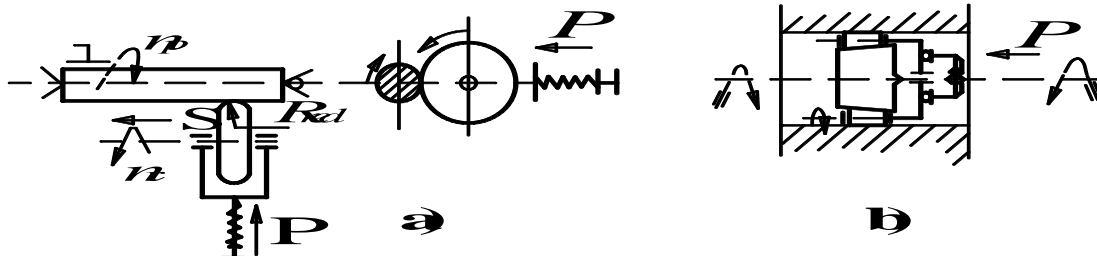


Figura 1.5. Schema de netezire: a) netezirea arborelui cu role; b) netezirea găurii cu o sculă de rulat.

Prelucrarea prealabilă cuprinde: așchierea, frezarea, rectificarea cu duritatea piesei până la 45 HRC.

Cele mai simple dispozitive cu bilă sau rolă au un element elastic ce asigură forța constantă de acționare. Aceste dispozitive se fixează în portcuțitul strungului de prelucrare a metalului.

Pentru sporirea productivității, la prelucrare se folosesc dispozitive poliinstrumentale și strunguri speciale, pentru rulare fără vârfuri, în care forța de prelucrare este asigurată hidraulic.

La prelucrarea finală a producției de masă sau de serie se utilizează pe larg scule cu multe role, în care rolele sau bilele sunt așezate în separator. Dimensiunea reglajului rolor, care se determină prin strângere, deci și gradul de deformare a stratului superficial, poate fi obținut prin mișcarea elementelor conice de bază. Suprafețele cu dimensiuni mici și cele fasonate se rulează cu avans radial al rolei cu profilul corespunzător profilului piesei. La utilizarea rolor cu striere acestea imprimă pe profilul piesei forma zimțată a rolei.

Rularea roților dințate și a filetelor se execută cu ajutorul unui dispozitiv special, fiind aplicată de regulă pe mașini speciale.

După destinație rularea se împarte în: netezire, durificare, formarea unui relief regulat.

Procedeele de netezire DPS se folosesc pentru a obține o rugozitate mică a suprafeței, ecrusare – în vederea obținerii grosimii suficiente a stratului superficial cu nivel mare de durificare deformațională și tensiuni remanente de compresie.

Prelucrările de netezire și durificare se deosebesc în general prin forma părții de lucru a rolei. Pentru prelucrarea de ecrusare se folosesc role cu profil circular cu rază mică 3...8 mm. Pentru

prelucrarea de finisare se folosesc role cu profil de rază mare, dar cu diametrul mic (6...20 mm). Bilele, datorită simplității și accesibilității, se folosesc în cazul fabricației de unicate și de serie mică.

Netezirea – metoda DPS presupune alunecarea sculei pe suprafața materialului deformat (figura 1.6). În calitate de sculă, în acest scop sunt folosite vârfuri de formă diferită. Materialul vârfului poate fi de diamant sau materiale sintetice supradure.

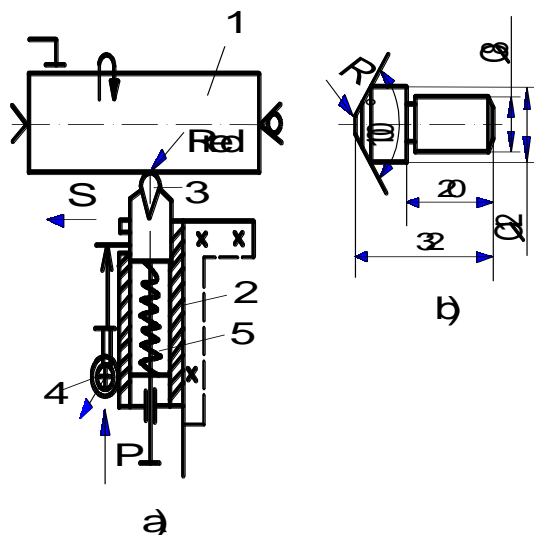


Fig. 1.6. Schema procedurii și scula pentru netezirea cu diamant:  
1 – piesa; 2 – bara; 3 – diamantul; 4 – indicatorul; 5 – arcul.

Cel mai frecvent, în industria constructoare de mașini, se folosește procedeul de netezire cu diamant.

Deosebirea dintre netezirea cu diamant și rulare constă în duritatea sporită și raza mică a profilului sculei de deformare (0,5...4 mm). Aceasta permite efectuarea deformării locale a stratului superficial cu efort mic. În această ordine de idei, domeniul de utilizare a netezirii cu diamant este prelucrarea pieselor călite, a suprafețelor superdure sau a pieselor cu rigiditate mică. Pentru netezirea cu diamant se folosește scula amplasată flexibil în strungul normal sau specializat.

Precizia de prelucrare în cazul netezirii și rulării cu dispozitiv elastic rămâne cea inițială. La utilizarea dispozitivului rigid precizia sporește cu 10-15% datorită micșorării rugozității.

Factorii tehnologici care influențează netezirea și rularea asupra rugozității și durității sunt: forța radială de deformare,  $P$  (sau preîncărcarea dată  $h_3$ , dacă prelucrarea se face cu dispozitiv rigid), avansul,  $S$ , diametrul rolei (bilei),  $D_p$ , raza de profil a dispozitivului,  $R_{red}$  (în planul de avans), (figura 1.7), viteza,  $v$ , rugozitatea suprafeței piesei de prelucrat,  $R_z$ , numărul de piese pentru deformare,  $Z$ , numărul de treceri ale sculei etc.

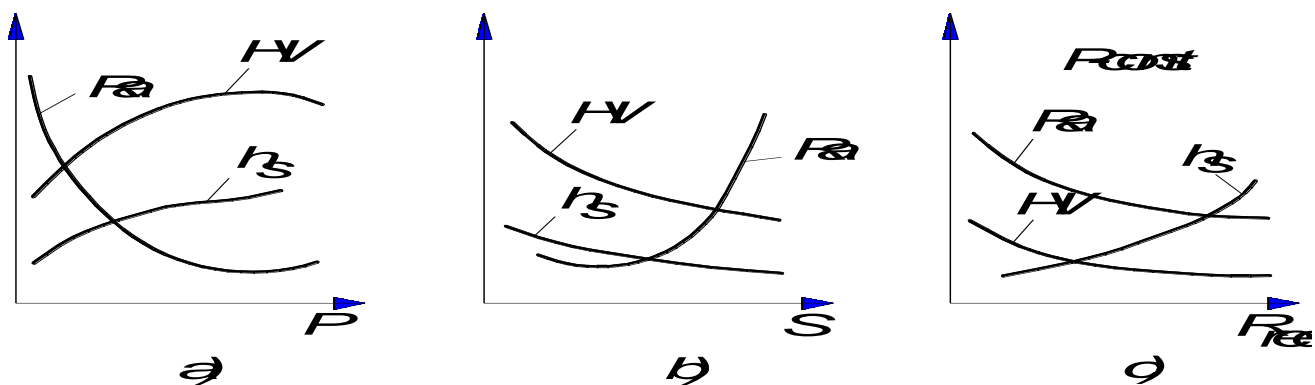


Figura 1.7. Influența forței P (a), avansului S (b), razei sculei  $R_{red}$ , asupra parametrilor stratului exterior

Factorii tehnologici de bază (rulare și netezire) sunt forța de deformare (P), avansul (S) și raza de profil a sculei ( $R_{red}$ ).

Se utilizează două modalități de calcul al durificării: cu utilizarea relațiilor empirice și după parametrii sursei de deformare. În cazul al doilea, forța P se alege din condiția de asigurare a gradului de deformare a deplasării ( $G_{opt} = 0,5 \dots 0,8$ ) și adâncimea de durificare în intervalul ( $h_s = 0,02 \dots 0,1$  din raza piesei).

Calculul forței P în cazul durificării rulării cu rolă cu avans și (netezire) se face după algoritmul următor:

- se determină parametrul d ZD necesar pentru asigurarea valorii respective  $h_s$ :  $d = h_s / 2,25$ ;
- se determină  $R_{red}$  din condiția de asigurare a valorii necesare d și G: -  $R_{red} = (4 \dots 5) d / G$ ;
- se determină suprafața de contact a instrumentului cu piesa:

$$F = 1.05d \sqrt{\frac{2l_{max}R_pR_d}{R_p+R_d} \left(1 + 0.35 \sqrt{\frac{R_p+R_d}{R_d}}\right)} \quad (1.3)$$

unde:  $R_d$  – raza piesei;

$$l_{max} = \sqrt{R_p^2 - (d - S)^2} - \sqrt{R_p^2 - d^2} \text{ sau prin aproximație } l_{max} \cong \frac{5d}{R_p} \quad (1.4)$$

Se determină forța de rulare  $P = \sigma_y F$  unde  $\sigma_y$  – tensiunea medie în contact, care se determină din curba de durificare sau prin aproximare ca să fie egală cu duritatea HB.

Verificarea alegerii corecte a forței se face la reglarea procesului sau prin măsurarea microdurității stratului superficial sau profilografierea sursei de deformare și măsurarea pe profilograma d. În cazul rulării cu instrumente rigide, preîncarcarea dată  $h_s$  se alege în intervalul  $0,03 \dots 0,3$  mm, în funcție de rugozitatea inițială, precizia piesei de prelucrat și rigiditatea sculei.

Avansul influențează pe de o parte asupra productivității procesului de prelucrare, iar pe altă parte, asupra rugozității suprafeței. Avansul se alege din raportul  $d/S$  pentru o rolă, egală cu  $2 \dots 6$ . La utilizarea dispozitivelor multirole avansul crește de  $Z$  ori, unde  $Z$  este numărul de role.

Avansul recomandat pentru rulare de finisare și regimurile de netezire cu diamant sunt incluse în tabelele 1,1, 1,2.

Viteza rulării și netezirii influențează puțin parametrii de durificare, fiind în intervalul 30-150 m/min.

Vitezele mici micșorează productivitatea de prelucrare, însă cele mari sporesc temperatura stratului superficial și deci, duc la micșorarea durificării.

Rularea și netezirea trebuie realizate dintr-o singură trecere.

Mediu tehnologic de ungere – răcire se asigură cu ulei tehnic, sulfofrezol. DPS a fontei se face fără răcire.

**Tabelul 1.1**

**Avansul la o turație (mm) la rularea cu role**

Raza rolei, mm	După rulare, $\mu\text{m}$						
	0,63		0,32			0,16	
	Până la rulare, $\mu\text{m}$						
	5,0	2,5	1,25	2,5	1,25	1,25	0,63
5	0,07	0,15	0,3	0,07	0,15	0,07	0,15
6,3	0,09	0,18	0,36	0,09	0,18	0,09	0,17
8	0,12	0,23	0,46	0,12	0,23	0,12	0,19
10	0,15	0,29	0,56	0,15	0,29	0,15	0,21
12,5	0,18	0,37	0,64	0,18	0,34	0,18	0,24
16	0,23	0,49	0,72	0,23	0,39	0,23	0,27
20	0,29	0,58	0,80	0,29	0,42	0,29	0,30
25	0,37	0,83	0,88	0,37	0,48	0,35	0,35
32	0,47	0,94	1,0	0,47	0,54	0,39	0,39
40	0,58	1,12	1,12	0,58	0,60	0,43	0,43
50	0,74	1,24	1,24	0,74	0,66	0,48	0,48

Vibronetezirea este prelucrarea generatoare de profil care se efectuează cu ajutorul bilelor călite de oțel cu suprapunerea pe dispozitiv a mișcărilor oscilatorii suplimentare pentru obținerea pe suprafața prelucrată a microprofilurilor. În raport de traiectoria de mișcare a dispozitivului pe suprafața piesei se formează urme de formă diferită (figura 1.8).

Procesul de utilizare în calitate de sculă a netezitorului cu diamant se numește vibronetezire.



**Tabelul 1.2**
**Regimurile optime la netezire cu diamant**

Duritatea materialului prelucrat	Rugozitatea inițială Ra, μm	Raza diamantului mm	Regimurile de prelucrare			Rugozitatea suprafeței prelucrate Ra, μm
			forța, N	avans la o rotație, mm	viteza m/min	
50–65 HRC	0,32	1,3–2	200–250	0,02–0,04	50–100	0,08
	0,16		150–200			0,08
	0,08		120–150			0,04
30–50 HRC	0,63	1,5–2	120–150	0,03–0,05	50–100	0,16
	0,32		120–150			0,04–0,08
	0,16		100–120			0,02–0,04
20–25 HRC	2,5	2–2,5	120–150	0,03–0,08	50–200	0,32 – 0,63
	1,25		100–120			0,16
	0,63		80–100			0,08 – 0,16
300 HB	1,25	2,5 – 3,5	120 – 150	0,06 – 0,10	50 – 200	0,32 – 0,63
	0,63		100 – 120			0,16
	0,32		80 – 100			0,08 – 0,16
	0,16		80 – 100			0,04 – 0,08
	0,08		60 – 80			0,02 – 0,04

Destinația principală a vibrorulării este sporirea rezistenței și gripării, îmbunătățirea rodajului, micșorarea momentului de pornire, aplicarea profilului decorativ, sporirea rigidității materialelor din tablă etc.

Vibrorularea se execută pe strunguri de prelucrare a metalului, preponderent pe cele de așchiere. Mișcarea oscilatorie se produce cu dispozitive de tipuri diferite.

Există numeroase tipuri de dispozitive pentru vibrorulare, care se deosebesc prin traiectoria mișcării sculei (rotație excentrică, mișcare compusă etc.) și caracterul de antrenare a vibratorului (mecanic, electromagnetic, hidraulic etc.).

Aplicarea microprofilului se poate face și prin alte metode: rularea cu role fasonate; șocuri periodice etc. Parametrii generali de vibrorulare sunt: forța P, amplitudinea oscilațiilor sculei, frecvența trecerilor duble a sculei N, raza bilei sau raza netezitorului cu diamant  $R_{red}$ , turația piesei n, și avansul S se impun în funcție de caracteristicile microprofilului necesar: tipul profilului, lățimea b și adâncimea h a rizurilor, suprafața relativă totală a rizurilor (cutelor) F.

Forța de prelucrare se alege în raport cu adâncimea cutelor, dată pentru raza specifică a dispozitivului. Dependența adâncimii cutelor în funcție de forța de prelucrare este arătată în figura 1.9. Raza sculei (1...15 mm) se alege în raport cu lățimea și adâncimea cutelor, rigiditatea piesei și duritatea materialului de prelucrat. Suprafața optimă a cutelor  $F = 35... 45\%$  de la cea nominală.

Amplitudinea oscilațiilor instrumentului se alege din intervalul  $a = 0...4$ , mm iar frecvența oscilațiilor în intervalul  $N = 900...3000$  min<sup>-1</sup>. Mărimile n și S se impun în raport cu desenul microreliefului necesar și posibilitățile strungului.

Rularea și netezirea sporesc substanțial duritatea constructivă a piesei.

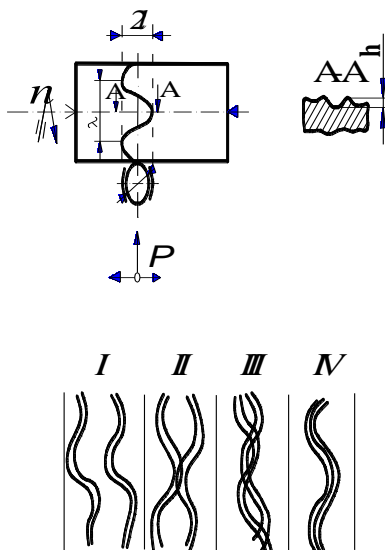


Fig. 1.8. Schema de vibronetezire și tipurile de microrelief:

- 1 – microrelief care nu se intersectează;
- 2 – microrelief care are puncte de contact;
- 3 – microrelief care se intersectează;
- 4 – microrelief care se suprapune unul pe altul

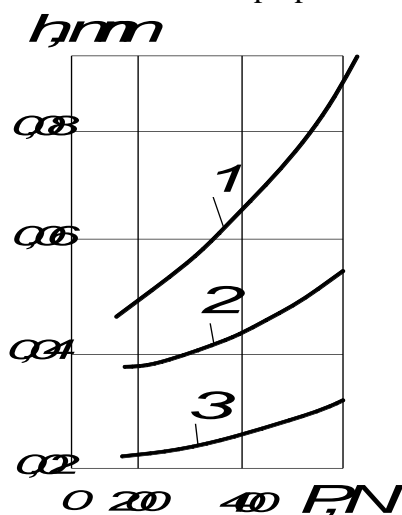


Fig. 1.9. Dependenta adâncimii reliefului de forță de vibronetezire:

- 1 - aliaje pe bază de aluminiu;
- 2 - oțel 45;
- 3 - oțeluri care se supun nitrării 38XH10A;

$CR_{red}=2,5 \text{ mm}$ ,  $n=1400 \text{ min}^{-1}$ ,  $S_o=0,09 \text{ mm}$

**Tabelul 1.3**

**Rezistența la oboseală a probelor tăiate din arborele (fontă) diesel 2D la încovoiere**

Metoda de durificare	Limita de rezistență la oboseală în baza a 2 milioane de cicluri	
	MPa	%
Simple	40	100
Azotare în mediu gazos 96 ore	50	125

Rulare/netezire	71	178
Azotare și rulare	89	222

**Tabelul 1.4**

**Sporirea limitei de rezistență  $\sigma_{-1}$  a pieselor (probelor) (MPa) sau  
a duratei de funcționare N (în cicluri/ore) după DV**

Denumirea piesei probei	Materialul (prelucrarea termică)	$\sigma_{-1}$ , N	Fără durificare	După	DV
				până	după
Probe, plate sudate	Oțel 10	$\sigma_{-1}$	100	185	–
		$\sigma_{-1}$	132(O)	–	–
		$\sigma_{-1}$	200	–	380
Arcuri (din foi)	55C2	$\sigma_{-1}$	520	720	920
				1160	–
Arcuri spirale	Oțel 60C2Г (42...44HRC)	$N \cdot 10^{-6}$ cicluri	0,1	0,35	1,5
Roți dințate	Oțel 35X(ЦН) 30XГТ(ЦН) 12X2H4A(Ц)	N, ore	9,6	52,4	–
			N, ore	103	–
			$\sigma_{-1}$	720	850
Paletele turbinelor compresorului	ВД17 BT3-1 12X12H2BMΦ	$N \cdot 10^{-6}$ cicluri	0,3–3,5	–	4...20
			$\sigma_{-1}$	400	480
			$\sigma_{-1}$	300	400
Lacăte de turbină	XH73MБТЮ (la T=700°C)	$\sigma_{-1}$	100%		(115...145)% durificare cu microbule
Plăci	Д16Г	$N \cdot 10^{-6}$ cicluri	0,18	0,27	1,4
Țăvi/conducte	X18H12Г	$\sigma_{-1}$	170	–	240
Manivelă	18X2H4BA (38...40HRC)	$\sigma_{-1}$	500	520	575

**Tabelul 1.5**

**Piese durificate, ștemuite**

Obiectul durificat	Rezultatele durificării
Razele de trecere ale arborilor cotiți (oțel)	Sporirea limitei de rezistență cu 77%
Razele de trecere ale arborilor cotiți (fontă)	Sporirea limitei de rezistență cu 67%
Raza de trecere ale cilindrului presei hidraulice	Sporirea duratei de funcționare de 4 ori
Îmbinările prin sudură	Sporirea limitei la rezistență de 1,3÷3,5 ori

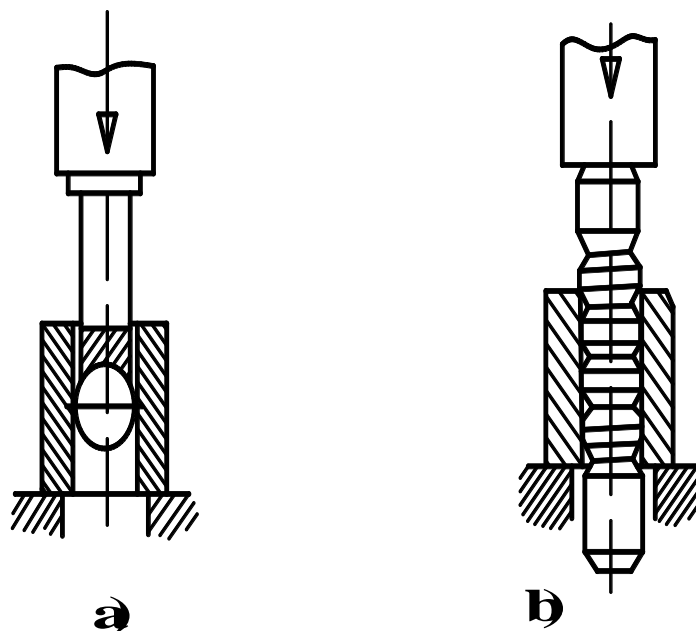


Fig. 1.10. Schema de lărgire:  
a) cu bule; b) cu broșe

*Ștemuirea* este o metodă DPS efectuată prin mișcări du-te-vino ale sculei, perpendiculară pe suprafața care se cere a fi ecruisată. Ștemuirea este utilizată pentru întărirea zonelor organelor de mașini de dimensiuni mari care au proprietatea de concentratoare de tensiuni: racordări tehnologice (figura 1.11), baza piciorului dintelui la roțile dințate de dimensiuni mari, adâncituri, unghiuri ale canalelor de pană, golurile dintre caneluri, cusăturile prin sudură etc.

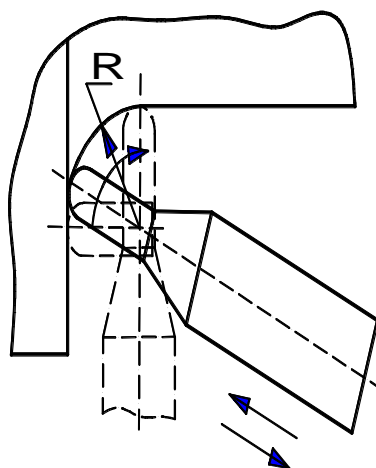


Fig. 1.11. Schema durificării prin ștemuire a razelor mari

Pentru ștemuire se folosesc dispozitive cu acționare mecanică sau pneumatică, care pot fi instalate la mașini de strunjit normale, frezare ori mașini-unelte speciale.

Cea mai mare răspândire au ciocanele pneumatice cu număr de mișcări între 1500...3500 pe minut și energie de 6...20 J. Profilul sculei trebuie să corespundă profilului piesei prelucrate. Pentru întărirea cusăturilor sudate paralel cu utilajul cu un singur element de acționare deseori se folosesc

dispozitive cu mai multe elemente de acționare, care alcătuiesc 25...30 bucăți de sârmă împreună cu diametrul 2..3 mm și lungimea 150...180 mm.

În funcție de grosimea „a” a gradului de deformare „ε”, poate fi calculat diametrul amprentei de contact „d”, energia loviturii „E” și diametrul pistonului „D”.

Ecrusarea prin ștemuire  $E_1$  a oțelurilor de construcție va fi în limitele de  $0,7 \leq e \leq 0,3$ .

Pentru ecrusarea uniformă, mărimea avansului de prelucrare (pasul) a ștemuirii nu trebuie să depășească  $(0,1 \dots 0,12) d$ .

Grosimea stratului ecrusat după prelucrare poate atinge 15...30 mm, obținându-se o creștere a durității superficiale a semifabricatului cu 30%. În stratul întărit apar tensiunile remanente de strângere până la 1000 MPa și mai mari. Rugozitatea suprafeței prelucrate poate varia în limitele de 40...160  $\mu\text{m}$ . La grosimile mari de întărire se permite rectificarea (cu regimuri ușoare) stratului superficial la o adâncime până la 0,5 mm, ceea ce practic nu influențează asupra efectului de întărire.

Întărirea prin ștemuire este deosebit de eficientă pentru razele mici ( $R/d=0,2$ ; unde: R - mărimea razei; d - diametrul arborelui). În acest caz, ștemuirea se efectuează fără avans.

Ecrusarea cu *perii rotative* are loc ca rezultat al loviturii și alunecării periei pe suprafața semifabricatului. Sunt utilizate mai des perii întregi în forma de disc, perii cu goluri și cu elemente de lovitură. Pentru executarea periilor se folosește sârma din oțelurile 65, 65G, U8A etc.

Ecrusarea cu perii fără avansul longitudinal se folosește pentru piese scurte și profilate. La prelucrarea cusăturilor de sudură peria trebuie să contacteze cu materialul sudurii și cu materialul zonei apropiate.

Prelucrarea cu perii este utilă la curățarea semifabricatelor de zgură, oxizi, rotunjirea muchiilor ascuțite, curățarea sudurii.

Factorii tehnologici principali sunt: diametrul (**D**); lungimea sârmelor (**l**), viteza de rotire a periei (**V**), valoarea forței de strângere a periei de suprafață (**i**). Acestea și alți parametri la prelucrarea cu perii pot fi aleși în următoarele limite:

viteza de rotire V, m/s	10...15;
diametrul exterior al periei D, mm	200 – 400;
diametrul sârmelor d, mm	0,2 - 0,6;
lungimea sârmelor l, mm	40 -120;
timpul de prelucrare (la întărire fără avans) t, s	15 – 40;
timpul de contact cu fiecare zonă a suprafeței prelucrate t (la întărire cu avans longitudinal), s	10 – 60.

Acești parametri trebuie verificați în funcție de proprietățile materialului, construcția periei și scopul prelucrării.

La prelucrarea cu perii a oțelurilor cu un conținut redus de carbon, duritatea suprafeței sporește de 2-3 ori, a oțelurilor cu duritate medie până la 2 ori, iar a aliajelor pe bază de aluminiu de 4-6 ori.

La prelucrarea oțelurilor aliate (56...64 HRC) duritatea superficială crește cu 10...20%, iar adâncimea de ecruisare este cuprinsă în intervalul 0,02...0,08 mm. O mai mare adâncime de ecruisare asigură periile secționare și periile cu elemente de lovitură.

Tensiunile remanente de compresiune apărute în stratul superficial au valori la suprafață (400-1200MPa), în funcție de duritatea piesei.

Viteza periei se recomandă a fi aleasă în intervalul de 20-30 m/s, prelucrarea făcându-se cu folosirea lichidului de răcire-ungere (ulei industrial, emulsie).

Rugozitatea inițială trebuie să fie cel mult  $R_a=2,5 \mu\text{m}$  pentru materialele fără tratament termic și  $R_a=1,25 \mu\text{m}$  pentru materialele tratate termic. După prelucrarea suprafeței, rugozitatea scade respectiv de 2-3 și 1,2-1,5 ori.

La această prelucrare nu se cere un adaos de prelucrare special, deoarece prelucrarea nu modifică practic dimensiunile piesei (0,002...0,006 mm).

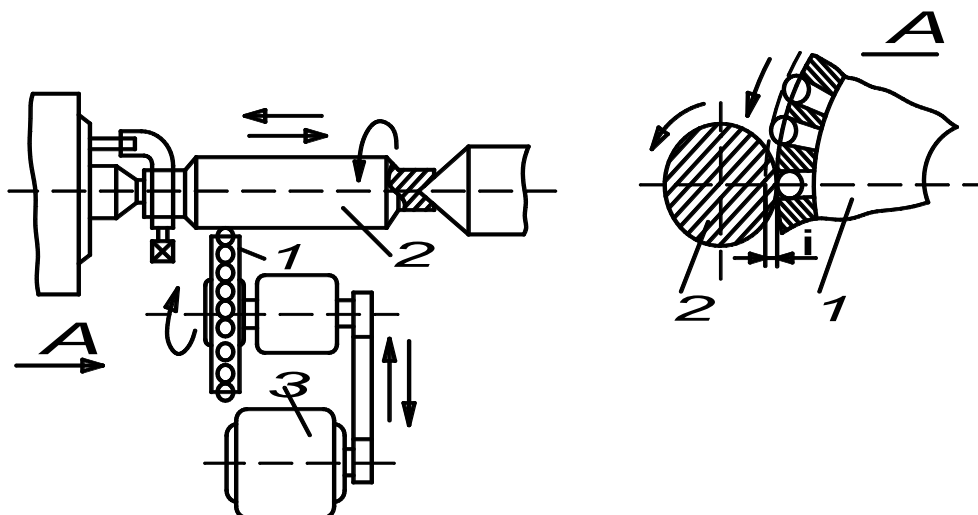


Fig. 1.12. Schema prelucrării suprafețelor cilindrice exterioare cu o sculă la care lovitură se efectuează prin forța de inerție:

1 – sculă; 2 – semifabricat; 3 – motor; i – strângere

*Ecruisarea prin lovitură - inerție (ELE)* – prelucrarea cu bile (role) care se deplasează liber în găurile unui disc aflat în mișcare de rotație (figura 1.12).

Diametrul semifabricatului la prelucrarea ELE se modifică foarte puțin (0,001...0,002 mm).

Răcirea cu ulei micșorează uzura separatorului și al elementelor de deformare.

În funcție de starea inițială a suprafeței și a proprietăților materialului semifabricatului rugozitatea după prelucrare poate avea valori  $R_a=0,8...0,16 \mu\text{m}$ , grosimea stratului ecruisat ale materialelor poate să ia valori de 0,8...3,0 mm, ale celor cu duritate medie de 0,3...0,8 mm. Tensiunile remanente de compresiune pe suprafață pot fi de 400...800 MPa.

Limita de rezistență a probelor netede din oțel 18HNNA ca rezultat al ecruisării sporește cu cca 18...20%, iar a probelor cu concentratori de tensiuni în formă de canale și altele pot spori cu 50% (24 MPa până la 37 MPa). Sporirea limitei de rezistență a probelor din oțel 40, 45 și 40H este de la 20% până la 50%.

Rezistența la uzură a suprafețelor ecruisate sporește de exemplu la fontă cu cca 3-4 ori.

Prelucrarea prin ELE poate fi realizată cu succes pentru ecruisarea arborilor cotiți, roți dințate, cămașelor de cilindru, cuzineților lagărilor de alunecare, ghidajelor mașinilor unelte etc.

De exemplu, ecruisarea prin metoda ELE a arborelui de torsiune (oțel 30HGSA) la o motocicletă, în loc de lustruire, a sporit productivitatea de 7 ori și a crescut rezistența la oboseală de la 2,0 la 2,5 ori [12, 28, 41, 54, 91].

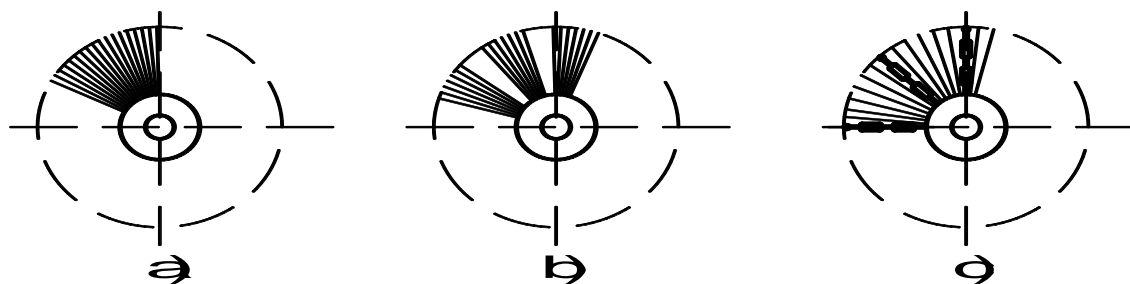


Fig. 1.13. Schema periilor-disc:

a) cu fir continuu; b) cu fir parțial; c) fir și elemente de lovitură.

### 1.3. Analiza metodelor constructive privind sporirea durabilității formelor de turnare

În funcție de condițiile de exploatare, piesele se uzează sau se distrug cu viteză diferită, ceea ce determină durabilitatea lor. Pentru a micșora uzura și distrugerea prematură este necesar un calcul de rezistență corect și precis.

Metodele de calcul moderne includ un număr mare de parametri constructivi ce trebuie respectați.

Cel mai important parametru ce urmează a fi calculat este grosimea peretelui. Acest parametru se calculează independent de forma și rezistența materialului după formula cunoscută [din 1]:

$$h = a \left( \sqrt{\frac{[\sigma]}{[\sigma] - 2p}} - 1 \right), \quad (1.5)$$

unde:  $p$  – presiunea;  $a$  – dimensiunea.

În acest calcul se cuprind un număr mare de parametri:

- materialul (în cazul dat fonta);
- presiunea materialului fasonat (0,2 \_\_\_\_\_ 0,5 MPa);

- componența termică;
- fluctuațiile termice.

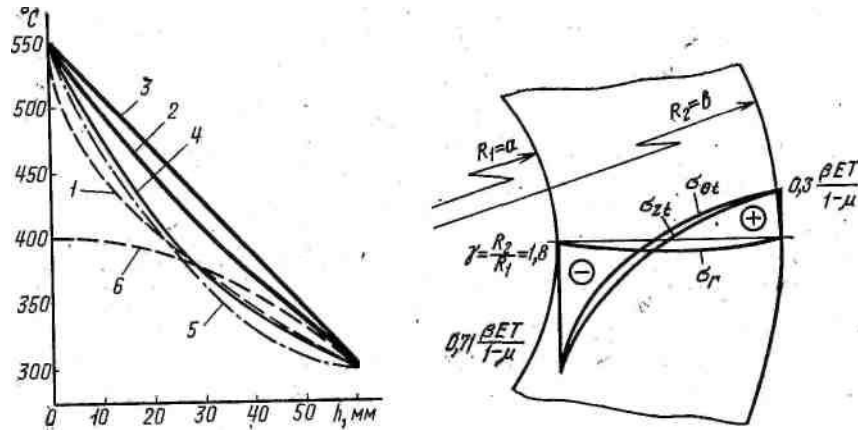


Fig. 1.14. Schema influenței câmpului termic

Cu o precizie satisfăcătoare, influența câmpului termic este aproximată după figurii 1.14, curba 1. Reieșind din datele practice, este posibil a folosi și alte curbe din figura 1,14.

În afară de grosimea peretelui sunt periculoase și tensiunile ce apar la sarcinile exterioare care sunt comparativ mici față de cele termice și sunt de întindere. În calcule se pot folosi numai tensiunile termice:

$$\sigma_e = \frac{4m}{D15} \frac{\beta ET}{1-\mu} \left( \frac{3\gamma+2}{\gamma+1} \right) \leq [\sigma_p]. \quad (1.6)$$

Din formulă se observă condițiile de (rezistență) ce se pot asigura datorită elementelor constructive ( $\beta$ ,  $E$ ,  $\mu$ ,  $\delta$ ). Folosirea materialelor pentru aceste piese cu parametrii mai mici  $E$ ,  $\beta$ ,  $\mu$  conduce la micșorarea tensiunilor termice.

Fluctuațiile de temperatură depind și de conductivitatea termică a materialului. Analizând aceste aspecte (grosimea peretelui și proprietățile materialului), obținem:

$$q = \frac{1}{b-a} \int_a^b \frac{\lambda T}{2\sqrt{b-a}\sqrt{r-a}} dr = \frac{\lambda T}{b-a}. \quad (1.7)$$

Prin această formulă se descrie valoarea medie a fluxului termic specific în funcție de grosimea peretelui.



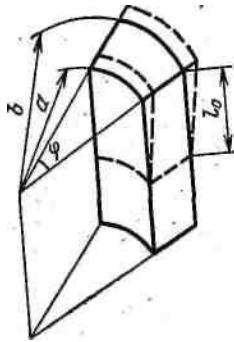


Fig. 1.15. Schema deformării în lungul cilindrului

Pentru determinarea grosimii optime a peretelui la formele de presare trebuie studiate deformările în lungul cilindrului. În majoritatea zonelor, determinarea deformațiilor se execută după relațiile pentru cilindrii cu pereți groși. Curbura în orice punct la înălțimea formei este:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{D} \eta_z, \quad (1.8)$$

iar după un număr de modificări matematice obținem:

$$f = f_p + f_t = \left( \frac{pl^4}{8EI} + \frac{Ml^2}{2EI} \right). \quad (1.9)$$

De unde rezultă că deformările frontale (de capăt) sunt în principiu caracterizate de variația de temperatură în adâncimea peretelui [31, 55, 57, 66, 72, 105, 112].

#### 1.4. Analiza metodelor tehnologice de acoperire sau de protecție privind sporirea durabilității formelor de turnare

##### 1.4.1. Acoperirea suprafețelor de lucru ale formelor de fasonare a sticlelor cu strat de protecție

Metalizarea care se folosește mai des pentru prelucrarea finală a suprafeței de lucru a formelor constă în acoperirea acesteia cu pelicule din alt material (metal) ce are proprietăți corespunzătoare condițiilor de lucru. Aceste pelicule pot fi folosite pentru protecție anticoroziune, mărirea rezistenței la temperatură, îmbunătățirea reflectării termice și luminii. Pentru protecția metalului de bază cu ajutorul peliculei de acoperire acesta trebuie să aibă grosimea corespunzătoare. Metalizarea prin difuzie: la acoperirea prin această metoda trebuie luat în considerație faptul că piesa se încălzește până la 900°C. Acoperirile din aliaje de ferocrom cu siliciu nu sunt atât de dure ca acoperirile din crom, efectuate prin metoda de galvanizare, dar sunt rezistente la temperatura de până la 1100-1150°C. Pentru formarea stratului de 0,03-0,04 mm de crom prin metoda difuziei sunt necesare 4 ore. Metalizarea folosind curentul electric: acoperirea galvanică se folosește pentru mărirea durității suprafeței. În acest caz, cromul este mai dur decât sticla. Duritatea cromului după Rocwell este 65-70 unități. Dar acoperirea cu crom nu exclude călirea, deoarece duritatea joasă a materialului de bază produce difuzia stratului subțire de crom în baza obiectului. Pentru acoperirea cu crom prin metode galvanice se potrivesc toate tipurile de oțel în afară de oțelurile complet aliate.

În cazul fontelor nu toate tipurile pot fi acoperite cu crom. Acoperirea cu crom se aplică bine numai în cazul fontei omogene cu concentrație mică de grafit și siliciu. Acoperirea cu crom dur mărește rezistența la uzură a pieselor. Sunt rezistente la temperaturi înalte, însă doar la temperatura de 500°C nu se formează recoacerea metalului. La temperatura 360-370°C, duritatea scade puțin. Neajunsurile tratamentelor termice constau în faptul că cromul trebuie stropit cu lichide tehnologice. Acest neajuns poate fi diminuat prin acoperirea cu crom poros, ce se poate asigura prin schimbarea conectărilor polarității. Acoperirea cu crom dur mărește timpul de funcționare a formelor de fasonare a sticlelor de 3-5 ori în comparație cu formele din fontă fără acoperire [32, 48, 85, 88, 99].

#### ***1.4.2. Acoperirea suprafețelor de lucru ale formelor de fasonare a sticlelor cu strat de metal***

Cea mai răspândită metodă de reparație a muchiiilor distruse ale formelor de fasonare a sticlelor este prelucrarea suprafețelor prin adaos de material pe bază de nichel în mediul de flacără. Această metodă este simplă și accesibilă, ceea ce a dat posibilitate de răspândire largă a metodei în diferite ramuri industriale. Metoda dată se folosește nu numai în cazul reparației pieselor uzate, dar și în cazuri de sporire a durității pieselor noi. Avantajul metodei de adaos în mediul de flacără față de metoda adaosului de material în mediul de descărcare electrică constă în permiterea restabilirii precise a dimensiunilor inițiale fără provocarea modificărilor structurale ale materialului de bază. La baza tuturor proceselor de adaos stă plasticizarea prafului metalic într-o sursă de căldură (flacăra acetilenoxygenală) și spălarea lor cu gaze ce se mișcă cu viteze mari. Toate acoperirile cu adaos au efect de contracție ca rezultat al influenței temperaturii. Pentru diferite materiale, această mărime se schimbă în limite mari. Efectul de contracție crește, iar durabilitatea scade la creșterea stratului de material. Ca rezultat pot apărea fisurile în grosimea stratului. De aceea, materialul trebuie să aibă proprietăți de durabilitate, contracție redusă și adeziune corespunzătoare.

Materialele pentru care se folosește adaosul au la baza structuri Ni-Cr-B-Si; Ni-B-Si și proprietăți de rezistență termică, rezistență la uzură și coroziune înaltă.

Pentru reparația formelor se recomandă folosirea prafului cu duritatea HB 190-230 în calitate de adaos [101, 102].

#### **1.5. Scopul și obiectivele lucrării**

În baza analizei realizate s-a stabilit că sarcina portantă a organelor de mașini în mare măsură este determinată de tehnologia lor de execuție, mai ales de procedeele tehnologice în baza cărora sunt în final formate caracteristicile geometrice și fizico-mecanice ale stratului exterior.

Multiplele cercetări și rezultatele încercărilor de exploatare ale mașinilor arată că folosirea materialelor deformate plastic DP, utilizate pentru formarea și pentru ecruisarea stratului exterior al

organelor de mașini conduce la o substanțială sporire a capacității lor portante. Metodele de prelucrare a organelor de mașini cu scule abrazive și cu muchie așchietoare nu pot asigura o calitate stabilă a suprafeței ca urmare a neajunsurilor caracteristice acestor metode.

Este cunoscut că prelucrarea bazată pe deformare plastică a stratului exterior, are o serie de avantaje în comparație cu muchia așchietoare și cea abrazivă cum ar fi:

- se păstrează fibrajul metalului și se formează o structură mai fină cu proprietăți sporite fizico-mecanice;
- se realizează o formă a suprafeței de bază mai convenabilă a microneregularităților care au „buzunare” de menținere a lubrifianțului;
- se asigură un strat exterior cu tensiuni de compresiune care măresc rezistența la oboseală;
- lipsesc particulele abrazive de la scula abrazivă, mai ales în agregatele cu sisteme hidraulice.

Ca urmare a celor expuse, o utilizare mai amplă a metodelor DSP se aplică la piesele din inox solicitate la mișcarea de rotație, care funcționează cu sarcini variabile, viteze și presiuni mari. Astfel de piese sunt arborii de torsiune și arborii de distribuție ai motoarelor de automobil.

Pentru a efectua o analiză prin metodele cunoscute de sporire a duratei de funcționare a formelor de turnare a sticlei se au în vedere următoarele:

- formarea stratului exterior se supune legilor deformării plastice locale;
- procesele care au loc la suprafața de contact la frecare se supun legilor interacțiunii de contact pe suprafață și sunt utile pentru rezolvarea majorității obiectivelor concrete;
- starea tensiune–deformare a stratului exterior se află în raport cu acțiunea de ecrusare, care nu se distruge sub influența factorului de temperatură;
- deducerea relațiilor analitice, în cazurile simple posibile sau modelarea numerică în cazurile complicate, care permite determinarea parametrilor tehnologici de prelucrare a formelor de turnare a sticlelor prin procedee de netezire cu diamant;
- proiectarea sculelor pentru procedee de netezire și a regimurilor necesare pentru netezirea formei care ar permite asigurarea parametrilor funcționali de calitate (rugozitatea, ondulația și microduritatea);
- cercetarea influenței prelucrării combinate asupra structurii și proprietăților fizico-mecanice asupra pieselor;
- determinarea influenței prelucrării combinate asupra duratei de funcționare a formelor de turnare;

Partea constructivă:

- stabilirea influenței temperaturii ce apare în momentul de exploatare a formelor de turnare;
- determinarea metodelor de răcire a acestor elemente pentru sporirea durabilității lor.

## CONCLUZII LA CAPITOLUL 1

- S-a stabilit că durata de funcționare a formelor de tunare în mare măsură este determinată de metodele de prelucrare, mai ales de operațiile în care se formează stratul exterior al suprafețelor de contact.
  - Utilizarea metodelor optime ale tehnologiilor de ecrusare este o cale de sporire a duratei de funcționare a formelor de turnare a sticlelor.
  - Procedeele de deformare plastică permit, în majoritatea cazurilor, să înlocuiască procedeele puțin productive care provoacă rebuturi în procesul de rectificare a pieselor de bază ale formelor de turnare.
  - Formele de turnare sunt subansambluri cu funcționare foarte rapidă, cu un plan de separare, în care semiformele sunt în contact într-un plan. Ca urmare, asigurarea tehnologică a parametrilor stratului exterior sporește durata de funcționare a formelor de turnare.
  - Sunt stabilite obiectivele și direcțiile pentru elaborarea metodei combinate de prelucrare prin acoperiri cu pelicule de carbon, care permit mărirea duratei de funcționare a formelor de turnare.
  - Pentru sporirea duratei de funcționare a formelor de turnare și excluderea deteriorării premature a suprafeței sunt determinate direcțiile de bază pentru elaborarea tehnologiilor de prelucrare a canalelor, racordărilor, locurilor de intersecție și de contact al suprafețelor formelor.
  - Trebuie determinate valorile presiunilor optime în zona de contact pentru materialul formelor de turnare.
  - Se impune cercetarea influenței stării tensiune-deformare și a structurii stratului exterior al materialului asupra proceselor de contact frecare-uzare în timpul funcționării formelor.
- Partea constructivă:
- Pentru sporirea duratei de funcționare a formelor de turnare și excluderea neajunsurilor tehnologice în momentul exploatării sunt determinate direcții de îmbunătățire a răcirii lor cu scopul excluderii fluctuațiilor termice.

## **2. STABILIREA METODOLOGIEI PRIVIND REALIZAREA SIMULĂRILOR NUMERICE ALE PROCESELOR TEHNOLOGICE DE PRELUCRARE PRIN DEFORMARE PLASTICĂ ȘI A CONDIȚIILOR TERMICE DE LUCRU AL FORMELOR DE FASONARE A STICLEI**

### **2.1. Introducere. Obiectivele simulării numerice**

În prezent, simularea numerică cu ajutorul calculatoarelor a devenit o posibilitate importantă de abordare a problemelor ingineresti și din domeniul științelor. Metodele de simulare numerică permit examinarea cantitativă a celor mai complexe procese și fenomene din domeniul general al fizicii, asigură interpretarea evoluției dinamice a acestora și chiar, pot deveni instrumente importante pentru descoperirea de noi fenomene.

În esență, simularea numerică transformă aspectele importante ale problemelor fizice în forme discrete de descriere matematică, recrează și rezolvă problemele pe calculator și, în final, evidențiază aspectele fenomenelor solicitate de analist. Această metoda de abordare numerică modernă elaborează problemele originale, în toate detaliile lor, de pe o platformă mult mai largă, cu un număr mult mai mic de ipoteze și aproximări în comparație cu metodele tradiționale.

Pe lângă marile avantaje ale aplicării directe la rezolvarea problemelor de inginerie, simularea numerică asigură un instrument alternativ pentru investigarea științifică, substituind experimentele costisitoare, consumatoare de timp și uneori periculoase din laboratoare sau din teren. Instrumentele numerice sunt adesea mai utile decât metodele experimentale tradiționale, acolo unde nu se pot obține informații complete prin observare, măsurare sau există dificultăți de achiziționare a datelor prin alte mijloace.

Simularea numerică joacă un rol important în validarea unor ipoteze și teorii, permițând o mai bună înțelegere a rezultatelor experimentale, o interpretare mai corectă a lor și chiar contribuind la formularea unor noi teorii și la descoperirea unor noi fenomene.

Transpunerea problemelor fizicii în domeniul virtual, guvernate de forța computerelor, prin simulare numerică – ca un mod de abordare științifică – devine din ce în ce mai interesantă pentru foarte multe domenii de cercetări umane. Practic, sunt abordate prin metode de simulare numerică domenii dintre cele mai diverse, precum, mecanica solidelor deformabile, mecanica fluidelor, aerodinamica, biomecanica, astrofizica etc.

În cadrul tezei de doctorat, metodele de simulare numerică vor fi utilizate pentru analiza unor procese și fenomene care se produc în timpul deformării plastice la rece a metalelor.

Metodele numerice bazate pe rețele, printre care metodele cu diferențe finite și metodele cu elemente sau volume finite, sunt pe larg aplicate în domenii variate ale dinamicii computaționale a fluidelor și ale mecanicii computaționale a solidelor. Metodele cu elemente finite sunt în prezent dominante în simulările numerice ale problemelor ingineresti și științifice.

Cu tot succesul lor enorm, metodele bazate pe rețele suferă din cauza câtorva aspecte care limitează aplicarea lor în multe probleme complexe. Majoritatea dificultăților sunt inerent legate de folosirea rețelelor. Din cauza că întreaga formulare se bazează pe rețeaua spațială, este necesar un proces scump și consumator de timp pentru generarea-regenerarea unei rețele de calitate. Folosirea rețelei poate conduce la dificultăți în problemele cu suprafața liberă, cu frontiere deformabile, cu interfețe mobile și în cazul deformațiilor mari dacă sunt aplicate metodele cu elemente finite.

Un interes puternic este focalizat pe următoarea generație de metode computaționale – metodele fără rețea care se întrevăd superioare celor cu rețele în multe aplicații.

Un număr mare de metode fără rețea au fost propuse pentru diverse aplicații. Aceste metode fără rețea au multe trăsături comune, dar sunt diferite sub aspectul aproximării câmpurilor, a modalităților de discretizare a sistemului de ecuații și a proceselor de implementare.

Cele mai utilizate metode fără rețea care sunt implementate în unele softuri comerciale sunt:

- metoda hidrodinamicii particulelor distribuite;
- metoda Galerkin fără elemente.

Având în vedere caracteristicile proceselor de deformare plastică la rece a metalelor, simulările numerice dezvoltate în teza de doctorat se limitează la utilizarea metodei elementelor finite cu rețea Lagrange, adaptată foarte bine problemelor de mecanică a solidelor.

Cele mai utilizate coduri numerice bazate pe metoda elementelor finite sunt: ABAQUS, ANSYS, COSMOSM, LS-DYNA, NASTRAN.

Simulările numerice sunt eficiente, fiind aplicate numai, așa cum se va arăta în acest capitol, în strânsă legătură cu fundamentele teoretice și cu practica experimentală.

## **2.2. Procedura generală aplicată simulărilor numerice**

Simulările numerice urmează o procedură similară tuturor abordărilor științifice, care constă în parcurgerea etapelor principale reprezentate în figura 2.1.

**Etapa I. Modelul fizic.** Fenomenului analizat i se construiește un model fizic în care sunt evidențiate legile principale care îl guvernează. Formularea modelului fizic se face în baza unor ipoteze cu caracter aproximat, bine acceptate de practica curentă, reținându-se trăsăturile principale care definesc fenomenul analizat.

Pentru simulările în domeniul mecanicii mediului continuu, un moment important, în dezvoltarea etapei de construire a modelului fizic, se referă la formularea modelului de material. Un model de material formulat corect asigură, din start, succesul simulării numerice. În practica inginerescă,

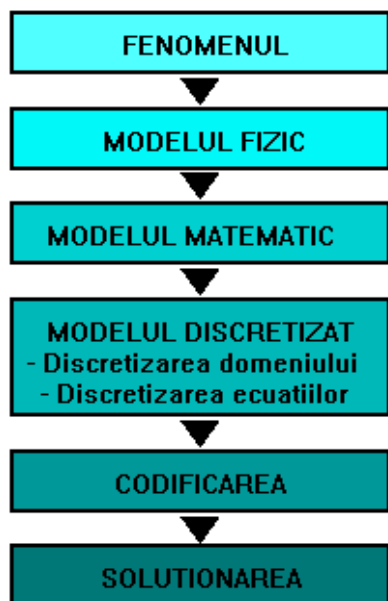


Fig. 2.1. Procedura generală aplicată simulărilor numerice

modelele fizice sunt, în majoritatea situațiilor, prestabilite, analistul urmând să încadreze problema studiată într-o clasă de modele fizice. De exemplu, modelul fizic al problemelor abordate prin simulări numerice în cadrul tezei de doctorat este cel al mediului solid elasto-plastic, uneori cu componentă vâscoasă. Dificultățile în fața analistului, privind formularea modelului fizic al problemei constă în reproducerea formei corpurilor – modelarea geometriei, stabilirea modelului de material și stabilirea interacțiunilor dintre corpurile modelului și dintre acestea și mediul exterior. În prezent, modelarea geometrică se face cu modulele disponibile în pachetele de programe de simulare sau se poate importa din mediile de programare specializate.

Diversitatea de materiale utilizate în inginerie, apariția continuă de noi materiale cu proprietăți încă necunoscute în totalitate, fac ca realizarea modelului de material să se facă cu o oarecare dificultate. Crearea unui model de material corect impune desfășurarea unei activități experimentale pentru evidențierea proprietăților fizice implicate în proces și pentru determinarea unor coeficienți prin care se evaluează cantitativ acele proprietăți.

Modelul de material se exprimă prin ecuațiile constitutive specifice. Ele se mai numesc și ecuații fizice tocmai fiindcă reflectă proprietățile fizice ale materialului.

**Etapa a II-a. Modelul matematic.** Modelul matematic se stabilește pe baza legităților care guvernează modelul fizic, folosind unele simplificări și ipoteze. Modelul matematic este exprimat, în general, în forma ecuațiilor de guvernare și a condițiilor pe frontiere și inițiale. Ecuațiile de guvernare pot fi seturi de ecuații diferențiale ordinare sau cu derivate parțiale, ecuații integrale sau alte forme de ecuații care reflectă legile ce au stat la baza formulării modelului fizic. Condițiile la limită și cele inițiale sunt necesare pentru particularizarea soluțiilor generale în spațiu și în timp.

În prezent, ecuațiile fizicii matematice modelează, suficient de exact, majoritatea fenomenelor fizice cunoscute. În consecință, în fața analistului, în cele mai multe dintre situații, nu stă sarcina modelării matematice a unui anumit fenomen ci, mai degrabă, încadrarea problemei analizate în unul dintre modelele existente sau cuplarea modelelor în cazul problemelor complexe, multidisciplinare.

Primele două etape în care se realizează modele fizice și matematice ale fenomenelor sunt comune tuturor abordărilor. Există însă căi diferite pentru rezolvarea ecuațiilor modelelor matematice. Se cunosc trei modalități de abordare a ecuațiilor:

- soluționarea analitică;
- simularea experimentală;
- simularea numerică.

Abordarea analitică conduce la soluții exacte, dar numai pentru un număr limitat de probleme, dintre cele mai simple. Chiar în cazurile simple, soluția analitică este utilă pentru validarea metodologiilor de rezolvare, aplicate pentru simularea experimentală și numerică.

Simularea experimentală, pe modele, în care legile similitudinii joacă un rol determinant, poate oferi soluții satisfăcătoare pentru o clasă largă de probleme. Totuși, simularea experimentală devine costisitoare atunci când se încearcă rezolvarea unor probleme complexe, în condiții de exigență maxime.

Este foarte utilă, la rândul ei, pentru validarea metodologiei de simulare numerică.

Cea de-a treia cale de rezolvare – simularea numerică – este în plină fază de dezvoltare. Posibilitatea utilizării calculatoarelor de mare capacitate reprezintă motivul dezvoltării acestei metode. Pe măsura creșterii capacității de calcul a crescut și complexitatea problemelor abordate prin simulare numerică, pe de o parte, și acuratețea soluțiilor, pe de altă parte.

Indiferent de metoda utilizată pentru rezolvarea numerică a unei probleme, algoritmul de lucru constă în transformarea funcțiilor continue ale câmpurilor (deplasări, viteze, tensiuni, temperaturi etc.) specifice problemei analizate în funcții discrete, adică în seturi de valori asociate unor puncte din domeniul de definiție a problemei. În aceste condiții, în calculator sunt manipulate în locul funcțiilor continue colecții de valori numerice, pentru care acesta este foarte bine adaptat. În etapa care urmează – pasul cel mai important al simulării numerice – se descrie modul în care se produce această transformare.

### **Etapa a III-a. Realizarea modelului discretizat**

Discretizarea, sub ambele ei aspecte, geometric și matematic, se referă la transformarea domeniului continuu de definiție a problemei într-un domeniu discret și a ecuațiilor de guvernare diferențiale sau integrale în ecuații algebrice.

Un model geometric discret, cu sau fără rețea, se reduce la o distribuție de puncte dispuse după anumite reguli, atât în domeniul de definiție, cât și pe frontiera acestuia. Acestor puncte, care poartă denumirea de noduri, li se asociază funcțiile de interpolare, în cazul metodelor cu rețea, sau funcțiile de pondere pentru metodele fără rețea. Dacă se folosesc metode cu rețea, domeniul de definiție se împarte în subdomenii de forme simple, poligonale sau poliedrice, cu laturile drepte sau curbe, astfel, încât nodurile să ocupe vârfurile sau să fie dispuse pe laturile, pe fețele sau în interiorul acestor



subdomenii. Un astfel de subdomeniu, în funcție de tipul rețelelor, poartă denumirea de element finit sau volum finit. În cazul rețelelor materiale (Lagrange) se vorbește de elemente finite, iar în cazul rețelelor spațiale (Euler) termenul folosit este de volum finit.

Consecința discretizării geometrice a domeniului continuu este realizarea unei structuri de calcul pentru aproximare numerică. Componentele principale ale modelului discret – nodurile – sunt dispuse în locații în care variabilele de câmp sunt evaluate și au legăturile între ele definite prin conectivitatea nodală. Precizia aproximării numerice este strâns legată, printre altele, de dispunerea nodurilor și de distanțele dintre acestea.

Discretizarea ecuațiilor de guvernare și a condițiilor la limită asigură mijloacele de schimbare a operațiilor de derivare și integrare cu reprezentări discrete. Discretizarea matematică este strâns legată de discretizarea domeniului. Discretizarea numerică a ecuațiilor este fundamentată pe teoria aproximării funcțiilor.

În modelul discretizat, ecuațiile originale de guvernare sunt înlocuite cu un set de ecuații diferențiale ordinare care se soluționează cu rutinele de calcul existente. Pentru problemele statice și staționare, ecuațiile discrete sunt, pur și simplu, ecuații algebrice.

#### **Etapa a IV-a. Codificarea**

Codificarea simulării numerice constă în trecerea modelului discretizat și a algoritmilor de calcul în codul calculatorului, folosind un limbaj de programare.

Atunci când se folosesc pachete de programe de simulare existente, codificarea iese din sarcina analistului. Uneori, însă, analistul poate interveni cu subrutine proprii pentru extinderea domeniului de aplicare a programelor.

#### **Etapa a V-a. Rezolvarea numerică**

Soluția numerică se obține în modulul de rezolvare – SOLVER – prin setul de date de ieșire. În setul de date de ieșire se găsesc valorile necunoscutelor primare ale problemei reprezentate de valorile nodale ale câmpurilor asociate. Dacă este nevoie, datele de ieșire se pot postprocesa pentru depistarea necunoscutelor secundare. Pe lângă setul de date de ieșire, soluția problemei se mai poate prezenta și în formă grafică, în câmpuri (hărți) de culoare, sau în forma unor diagrame.

Simularea numerică a proceselor de deformare plastică la rece a metalelor utilizează, în cele mai multe dintre cazuri, metodele cu elemente finite. Acestor metode le este caracteristică rețeaua materială de tip Lagrange, adică o rețea legată corpurilor și care se deformează împreună cu acestea.

În secțiunile care urmează se vor descrie și particulariza etapele simulării numerice în condițiile delimitate ale procesului de deformare plastică la rece a metalelor.

## 2.3. Modelul fizic

### 2.3.1. Proprietățile fizice de bază a metalelor, în procesul de deformare plastică la rece

În procesul de deformare plastică a metalelor sunt implicate, pe lângă proprietățile mecanice și unele proprietăți termice, deoarece, chiar dacă procedeul se aplică materialului în starea inițială rece, pe parcurs se produc modificări ale stării termice din cauza frecărilor dintre material și sculă și a transformării lucrului mecanic plastic în căldură.

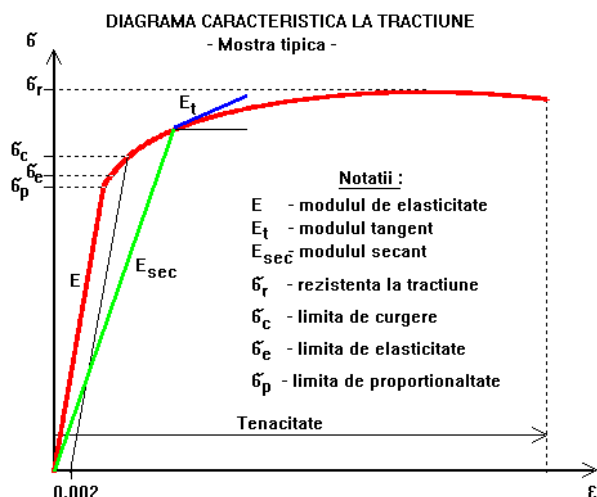


Fig. 2.2. Diagrama caracteristică la tracțiune

modulul lui Young, este diferit de la material la material. Proprietățile mecanice de bază ale materialelor se pun în evidență cu ajutorul diagramelor caracteristice ale materialelor ridicate în testele simple de tracțiune și compresiune. În figura 2.2 este reprezentată o diagramă caracteristică convențională tipică a unui material obținută în testul monoaxial de tracțiune.

Cele mai multe dintre metalele existente respectă până la o anumită limită legea liniară a lui Hooke. La testele monotone de tracțiune și compresiune această limită se numește limită de proporționalitate,  $\sigma_p$ . Uneori, în scopul obținerii unor simplificări matematice, legea lui Hooke se prelungește până la limita deformațiilor reversibile, care este limita de elasticitate, notată cu  $\sigma_e$ . Pentru materialele care se folosesc în procesele tehnologice de deformare plastică a metalelor, legea lui Hooke acoperă domeniul până la limita de curgere aparentă,  $\sigma_c$ , sau definită convențional  $\sigma_{0.2}$ .

Indiferent dacă deformația este elastică sau plastică, pe ramurile neliniare ale curbei caracteristice se pot defini modulele tangent, secant și mediu ca în figura 2.2.

La unele materiale, printre care se găsește și fonta cenușie, de tipul celei utilizate în aplicația analizată în teză, domeniul elastic este neliniar. În aceste cazuri, pentru simplificări, diagrama pe domeniul elastic se liniarizează și se adoptă un modul de elasticitate mediu. Pentru materialele cu deformații plastice, în regiunea plasticizată a diagramei caracteristice se pot utiliza modulele de

În general, proprietățile mecanice ale materialelor sunt formulate calitativ, de exemplu, elasticitate, plasticitate, reziliență, vâscozitate etc. Proprietățile mecanice sunt exprimate matematic prin legi cantitative, ecuații asociate cu seturi de valori specifice fiecărui material în parte. Astfel, legea de bază a elasticității liniare, legea lui Hooke, sunt exprimate matematic prin ecuația care leagă tensiunile  $\sigma$  de deformațiile  $\epsilon$ , în cazul sollicitării monoaxiale,  $\sigma = E\epsilon$ . Coeficientul de proporționalitate, denumit modul de elasticitate sau

plasticitate tangent,  $E_t$ , definit local ca pantă a curbei caracteristice ( $d\sigma/d\varepsilon$ ). Modulul de plasticitate tangent este o mărime frecvent folosită în analiza deformațiilor plastice. Apare în multe modele de materiale elastoplastice. Modulul de plasticitate secant este mai puțin folosit pentru calcule exacte.

În cazul corpurilor care suportă deformații plastice mari, pentru exactitate se folosește o diagramă caracteristică reală obținută prin transformarea diagramei caracteristice convenționale. Procedura de prelucrare și transformare a curbelor înregistrate în testele monoaxiale va fi descrisă și aplicată în paragraful în care se vor elabora modelele de material în cadrul procesului de simulare

MODELUL VASCOPLASTIC IDEAL  
- influența ratei deformației asupra tensiunii de curgere -

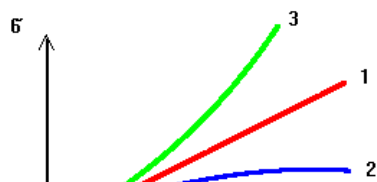


Fig. 2.3. Modelul vâscoplastic ideal – influența ratei deformației asupra tensiunii de curgere

evidenția cu ajutorul unui test de încărcare-descărcare cu funcții treaptă. În figura 2.3 este trasată o curbă a deformației, care reprezintă răspunsul întârziat față de tensiune. Deformația remanentă  $\varepsilon_{rem}$

RASPUNSUL MATERIALULUI VASCOELASTOPLASTIC  
LA INCARCAREA-DESCARCAREA TREAPTĂ

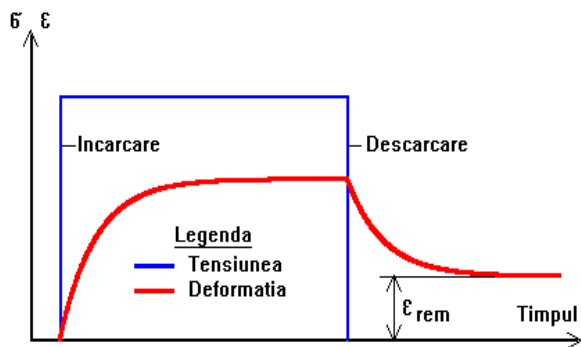


Fig. 2.4. Răspunsul materialului vâscoelastoplastic la încărcarea-descărcarea cu funcții treaptă

arată ca încărcarea s-a făcut până în domeniul plastic. Sub aspect fizic, vâscozitatea reprezintă proprietatea materialelor (solide, lichide, gazoase) de a se opune mișcării prin forțe dependente de vitezele de deformare  $\partial\varepsilon/\partial t$ . Pentru materialele vâscoelastoplastice sunt funcții de deformații, cât și de vitezele de deformare – rata deformațiilor date de relația:

$$\sigma = f(\varepsilon, \partial\varepsilon/\partial t) \quad (2.1)$$

Influența vâscozității asupra stării de astic cu plasticitate ideală. La viteze foarte mici de

deformare (nule) un astfel de material se deformează la tensiune constantă – limita de curgere. În figura 2.4 este reprezentată variația tensiunii de curgere,  $\sigma_y$ , în funcție de rata deformației pentru modelul vâsco plastic ideal. Reprezentarea 1 este valabilă pentru modelul cu vâscozitate liniară (Bingham). Pentru acest caz, expresia tensiunii de curgere se poate scrie în forma:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + \eta \partial\varepsilon/\partial t. \quad (2.2)$$

Celelalte două reprezentari din figura 2.4 sunt tipice pentru comportarea vâscoasă neliniară: 2 – vâscozitate slabă; 3 – vâscozitate tare. În ecuația (2.2) efectele sunt decuplate, ultimul termen exprimând influența vitezei de deformare asupra tensiunii de curgere. Coeficientul  $\eta$  reprezintă vâscozitatea plastică, asociată curgerii plastice.

Ecuația (2.1) se concretizează, pentru un material dat, prin teste simple de tracțiune, compresiune, torsiune și mixte, pe tuburi cu pereți subțiri cu rate ale deformațiilor constante pe toată durata probelor. Datele obținute în urma testelor sunt reprezentate în grafice, așa cum este cel din

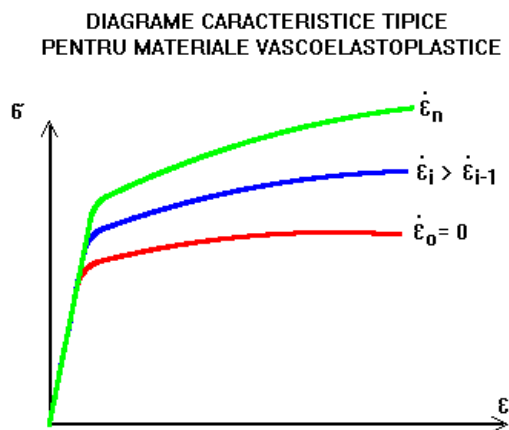


Fig. 2.5 Diagrame caracteristice tipice pentru materiale vâsco elasto plastice

figura 2.5, realizat pentru un material vâsco elasto plastic tipic. În unele instalații de testare mai simple nu se mai impun condiții severe de menținere constantă a ratei de deformație, în schimb, se fac măsurători simultane ale mărimilor  $\sigma$ ,  $\epsilon$  și  $\partial\epsilon/\partial t$ , achiziționând datele cu o frecvență convenabilă. O simulare numerică a testului pe baza unor modele de material face posibilă particularizarea ecuației (2.1) pe materialul supus testului. Problema construirii ecuației caracteristice a materialului de forma (1) va fi reluată detaliat și concret în paragraful în care se vor formula

modelele de material folosite la simularea numerică a proceselor de deformare a metalelor.

În privința efectului vâscozității asupra răspunsului materialului se impune concluzia că, pe măsură ce viteza de deformare crește, crește și rezistența materialului la deformare (fig. 2.5).

Proprietățile mecanice nu sunt singurele proprietăți fizice care intervin în procesele de deformare vâsco elasto plastică a metalelor. În timpul procesului de deformare se modifică și starea termică a materialelor.

Au loc încălziri în regiunile deformate plastic din cauza transformării lucrului mecanic plastic în căldură și în zonele din vecinătatea suprafețelor în contact, cu mișcări relative, produse prin frecare. Vâscozitatea materialului este, de asemenea, o sursă de încălzire. La viteze mari de deformare, aportul termic al vâscozității devine important. De remarcat că, odată cu modificarea temperaturii, se modifică și proprietățile fizice ale materialelor prelucrate. Prelucrarea metalelor prin deformare plastică la rece, cu viteze mici de deformare, aduce un aport termic care nu conduce la creșteri semnificative de căldură. Acesta este motivul pentru care toți coeficienții care caracterizează proprietățile fizice ale materialelor prelucrate vor fi considerați independenți de temperatură.

Proprietatea de bază a materialelor care intervine în procesele tehnologice de deformare – plasticitatea, datorită importanței ei, se va analiza separat, în paragraful următor. Totodată, se vor pune

în evidență fundamentele teoretice, ipotezele și legile teoriei plasticității care permit formularea modelului fizic al corpurilor plastic-deformabile.

### **2.3.2. Plasticitatea. Ecuațiile constitutive incrementale**

Proprietățile plastice ale materialelor sunt studiate de teoria plasticității. Teoria plasticității este parte a mecanicii solidului deformabil în care sunt abordate deformațiile și tensiunile induse în corpuri prin deformare. Multe dintre conceptele fundamentale ale teoriei elasticității sunt transformate în teoria plasticității. Obiectivul teoriei plasticității este reprezentat de studiul matematic al stărilor de tensiune și de deformație în stare plastică și a legăturii dintre cele două stări.

Legile de bază ale plasticității sunt stabilite pe baza datelor experimentale, folosind un șir de considerații de natură fizică. Aceste legi cu caracter fenomenologic natural sunt folosite pentru constituirea unui sistem de ecuații cu caracter general. Soluțiile acestui sistem de ecuații, atunci când sunt posibile, dau imaginea deformării plastice a corpurilor în diverse cazuri de încărcare.

O caracteristică importantă a teoriei plasticității este neliniaritatea ecuațiilor de bază. Soluționarea acestor ecuații implică mari dificultăți matematice și, din această cauză, exceptând unele cazuri simple, metodele analitice ale fizicii matematice devin inutilizabile.

În prezent, ca urmare a dezvoltării explozive a tehnicilor computaționale, simularea numerică a proceselor de deformare plastică acoperă, în mare măsură, nevoile de calcul din teoria plasticității.

Pentru a fi în concordanță cu algoritmi de calcul ai computerelor, exprimarea matriceală a mărimilor, relațiilor și ecuațiilor din lucrare, este nu numai necesară ci și foarte utilă pentru o prezentare compactă. Mai mult, necesitatea folosirii formelor matriceale este impusă și de baza de calcul tradițional, matriceal al metodelor (metoda elementelor finite) folosite în cadrul simulărilor numerice. Se vor folosi următoarele simboluri:

$[ \ ]$  – matrice  $m \times n$  sau vector linie;  $\{ \ }$  – vector coloană;

$[ \ ]^T$  – matricea transpusă ;  $[ \ ]^{-1}$  – matricea inversă.

Exceptând scalării, toate mărimile care sunt legate de starea deformată se exprimă ca funcții finite sau incrementale, astfel:

$\{ \mathbf{u} \} = [ u_x \ u_y \ u_z ]^T$  - vectorul deplasărilor;

$\{ \boldsymbol{\varepsilon} \} = [ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx} ]^T$  - vectorul deformațiilor;

$\{ \boldsymbol{\sigma} \} = [ \sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx} ]^T$  - vectorul tensiunilor.

Teoria plasticității este știința care stă la baza tehnologiilor de prelucrare la cald și la rece a metalelor (laminare, rulare, forjare, extrudare, aschiere etc.).

Procesele de deformare plastică sunt ireversibile, cea mai mare parte a lucrului mecanic de deformare transformându-se în căldură. Starea de tensiune finală depinde de calea parcursă. În

consecință, ecuațiile care guvernează deformările plastice nu pot include, în principiu, relații finite între tensiuni și deformații, similare legii lui Hooke în teoria elasticității. În plasticitate, relațiile de acest tip sunt diferențiale, dar neintegrabile.

Abordarea incrementală a plasticității se face în cadrul teoriei curgerii plastice, în care sunt stabilite relații între creșterile infinitezimale ale deformațiilor și tensiunilor și tensiunile finite și un număr de parametri ai stării plastice.

Fiind concepută incremental, teoria curgerii plastice urmărește pas cu pas evoluția procesului de deformare, până la starea finală.

Teoria curgerii plastice este fundamentală pe ipoteze care generalizează rezultatele testelor cu sarcini complexe, în care direcțiile principale de tensiune, precum și relațiile dintre tensiunile principale se modifică.

Ipotezele teoriei curgerii plastice sunt prezentate mai jos.

1 - corpurile deformabile sunt considerate continue și izotrope.

2 – deformația volumică  $\varepsilon_v$  este strict elastică și este proporțională cu tensiuna medie  $\sigma_m$ .

În termeni finiți, relația de proporționalitate are forma cunoscută din teora elasticității:

$$\varepsilon_v = \sigma_m / K. \quad (2.3)$$

Exprimarea diferențială a acestei ipoteze este:

$$d\varepsilon_v = d\sigma_m / K. \quad (2.4)$$

În relațiile (2.3) și (2.4):

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \quad \sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3, \text{ iar } K$$

reprezintă modulul de elasticitate volumic.

3 - incrementele totale ale deformațiilor,  $\{d\varepsilon\}$ , constau din incrementele deformațiilor elastice,  $\{d\varepsilon^e\}$ , și incrementele deformațiilor plastice,  $\{d\varepsilon^p\}$ . Cele două categorii de deformații incrementale se analizează separat, și apoi se assemblează cu relația:

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\}. \quad (2.5)$$

Deformațiile incrementale elastice se calculează cu ajutorul legii generalizate a lui Hooke sub forma:

$$\{d\varepsilon^e\} = [B^e] \{d\sigma\}, \quad (2.6)$$

unde  $[B^e]$  reprezintă matricea de complianță elastică a materialului.

4 - Ipoteza următoare este ipoteza de bază a teoriei curgerii plastice, care permite să se stabilească o legătură incrementală între deformațiile plastice și tensiuni și are următoarea formulare.

Deformațiile plastice incrementale sunt proporționale cu componentele deviatorului tensiunilor și se exprimă matematic sub forma:

$$\{d\varepsilon^p\} = d\lambda \{s\}, \quad (2.7)$$

în care  $d\lambda$  este un factor scalar infinitesimal, iar  $\{S\}$  reprezintă vectorul deviator al tensiunilor, care derivă din vectorul tensiunilor prin relația:

$$\{S\} = \{\sigma\} + \{I\}\sigma_m, \quad (2.8)$$

în care:  $\{I\} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ .

Ecuatia (2.7) incrementală joacă în plasticitate rolul ecuațiilor constitutive din elasticitate (2.6).

Ultima ipoteză (4) se poate formula concis astfel: “Starea de tensiune determină deformațiile plastice incrementale instantanee”.

Aspectul energetic al deformării plastice este cuantificat prin lucrul mecanic plastic,  $dL^P$ , pus sub forma incrementală, astfel:

$$dL^P = [\sigma]\{d\varepsilon^P\}, \quad (2.9)$$

în care  $[\sigma] = \{\sigma\}^T$ . După înlocuirea deformațiilor plastice incrementale din (2.9) cu ajutorul relației (2.7), apoi eliminând deviatorul tensiunilor folosind relația (2.8), se obține lucrul mecanic plastic incremental, în funcție de tensiunea efectivă,  $\sigma_{ef}$ , exprimat de relația:

$$dL^P = (2/3) d\lambda \sigma_{ef}^2. \quad (2.10)$$

Tensiunea efectivă sau intensitatea tensiunilor sau, folosind termenul utilizat frecvent în teoria plasticității, tensiunea echivalentă von Mises are expresia:

$$\sigma_{ef} = (((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2))/2)^{1/2}. \quad (2.11)$$

Factorul infinitesimal,  $d\lambda$ , se determină, pentru orice moment al deformării plastice, pe baza constatării experimentale referitoare la faptul că lucrul mecanic plastic depinde numai de intensitatea

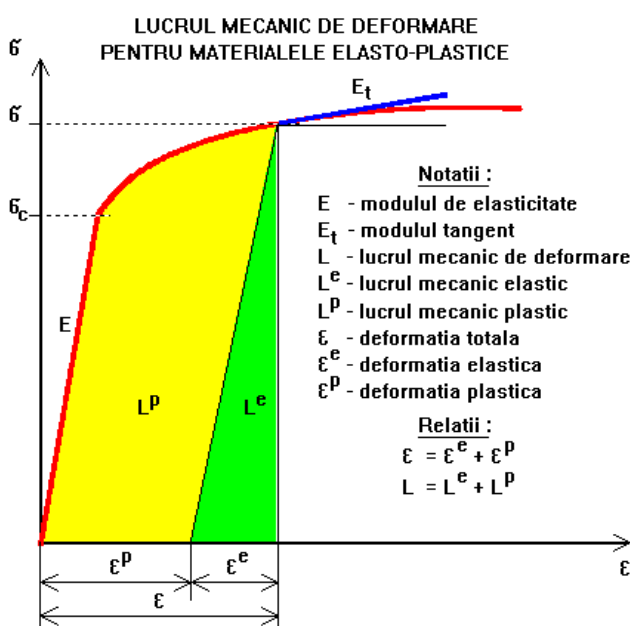


Fig. 2.6. Lucrul mecanic de deformare pentru materialele elastoplastice

tensiunilor corespunzătoare stării de tensiune realizate în corp. Se poate trage concluzia că aceeași cantitate de energie se disipă prin deformare plastică în procese de deformare diferite, în care, indiferent de starea de tensiune atinsă, intensitatea tensiunilor are aceeași valoare. Această constatare permite raportarea stării de tensiune generalizată la starea de tensiune monoaxială, pentru care lucrul mecanic plastic se evaluează cu ușurință, pe diagramele caracteristice ale materialului, similare cu cea reprezentată în figura 2.6, utilizând relația:

$$L^p = \int \sigma d\varepsilon - \sigma^2/2E, \quad (2.12)$$

care prin diferențiere ia forma:

$$dL^p = \sigma d\varepsilon - \sigma d\sigma/2E, \quad (2.13)$$

în care  $\sigma$  și  $\varepsilon$  sunt tensiunea și deformația dezvoltate în epruvetele supuse la teste monoaxiale. Componenta elastică a lucrului mecanic s-a calculat considerând, în concordanță cu observațiile experimentale, că descarcarea se face liniar elastic pe dreapta care are panta egală cu modulul de elasticitate al materialului.

În teoria plasticității, una dintre mărimile care definesc starea de curgere plastică a materialului este modulul de plasticitate tangent,  $E_t$ , definit ca pantă locală a curbei caracteristice (fig. 2.6), cu ajutorul relației:

$$E_t = d\sigma/d\varepsilon. \quad (2.14)$$

Eliminând  $d\varepsilon$  din relația (2.13), folosind (2.14), se obține expresia lucrului mecanic elementar la solicitarea monoaxială:

$$dL^p = (1/E_t - 1/E)\sigma d\sigma. \quad (2.15)$$

Deoarece la starea de tensiune monoaxială tensiunea efectivă este chiar tensiunea dezvoltată în epruvetă, în relația (2.15) tensiunea  $\sigma$  se înlocuiește cu tensiunea efectivă,  $\sigma_{ef}$ .

Comparând lucrul mecanic plastic elementar de la starea generală de tensiune (2.10) cu lucrul mecanic plastic elementar de la proba monoaxială (2.15), în condițiile egalității tensiunilor efective, se găsește expresia factorului infinitesimal de proporționalitate,  $d\lambda$ , sub forma:

$$d\lambda = (3/2)(1/E_t - 1/E)d\sigma_{ef}/\sigma_{ef}. \quad (2.16)$$

După această ultimă determinare, se poate conchide că ecuațiile incrementale constitutive ale plasticității sunt complet definite dacă se cunosc starea de tensiune atinsă și proprietățile materialului, exprimate prin modulul constant de elasticitate (Young) și modulul de plasticitate tangent, variabil în funcție de tensiunea efectivă. Folosind relația (2.16), prin înlocuirea factorului infinitesimal  $d\lambda$  în expresia (2.7), se găsesc deformațiile plastice incrementale, dependente de starea de tensiune și de proprietățile materialului sub noua formă:

$$\{d\varepsilon^p\} = (3/2)(1/E_t - 1/E) \{s\} d\sigma_{ef}/\sigma_{ef}^2. \quad (2.17)$$

Aplicând operația de diferențiere relației (2.11), se găsește expresia incrementului tensiunii efective:

$$d\sigma_{ef} = (3/2 \sigma_{ef})[s] \{d\sigma\}, \quad (2.18)$$

care, înlocuită în (2.17), conduce la o nouă expresie pentru vectorul deformațiilor plastice incrementale:

$$\{d\varepsilon^p\} = (9/4)(1/E_t - 1/E) (\{s\}[s]/\sigma_{ef}^2) \{d\sigma\}. \quad (2.19)$$



Dacă se introduce matricea complianțelor plastice, o matrice simetrică 6x6, pusă sub formă:

$$[B^P] = (9/4)(1/E_t - 1/E) \{s\}[s]/\sigma_{ef}^2, \quad (2.20)$$

în ecuațiile (2.19) se obține forma finală a ecuațiilor constitutive ale teoriei plasticității:

$$\{d\varepsilon^P\} = [B^P]\{d\sigma\}. \quad (2.21)$$

Analizând ecuațiile constitutive incrementale ale plasticității (2.21), se constată, cu ușurință, caracterul neliniar al acestora determinat de faptul că elementele matricei  $[B^P]$  sunt variabile, dependente, în orice moment, de starea de tensiune realizată în corpul deformat. Aceste ecuații constitutive conduc la neliniaritățile fizice ale problemelor de plasticitate. În unele aplicații, în care amploarea câmpului deformațiilor este mai redusă sau în probleme de mai mică importanță, se pot face unele liniarizări ale ecuațiilor constitutive ale plasticității, însă, întotdeauna, cu reducerea acurateții soluțiilor.

Prin cuplarea ecuațiilor constitutive ale elasticității (2.6) cu cele ale plasticității (2.21) se obțin ecuațiile constitutive incrementale ale materialelor elastoplastice sub formă matriceală:

$$\{d\varepsilon\} = [B]\{d\sigma\}, \quad (2.22)$$

în care:

$$[B] = [B^e] + [B^P]$$

reprezintă matricea complianțelor elastoplastice. Inversarea ecuațiilor (2.22) conduce la o nouă formă, la fel de utilă în mecanică neliniară a solidului deformabil:

$$\{d\sigma\} = [C]\{d\varepsilon\}, \quad (2.23)$$

unde matricea de rigiditate elastoplastică  $[C]$  este inversă matricii  $[B]$ :

$$[C] = [B]^{-1}. \quad (2.24)$$

Trebuie subliniat faptul că ecuațiile diferențiale constitutive s-au stabilit folosind criteriul lucrului mecanic plastic, care este foarte bine verificat în cazul solicitărilor cu sarcini monotone. La solicitări plastice repetate sau la încărcări în zig zag, apar unele diferențe între soluțiile calculate și cele experimentale.

Ecuațiile diferențiale constitutive ale teoriei curgerii plastice și criteriul lucrului mecanic plastic sunt implementate în modelul matematic al procesului de deformare elasto plastică, unde, împreună cu alte ecuații caracteristice solidelor deformabile, formează un sistem complet de ecuații diferențiale, care, rezolvat prin diferite metode, dă soluții problemelor analizate.

Prezentarea pe larg a metodei de stabilire a ecuațiilor incrementale constitutive s-a făcut, mai sus, cu scopul de a evidenția locul acestora în modelul fizic și, mai mult, a puncta importanța formulării unui model corect de material pe baze experimentale.

În construcția modelelor fizice ale deformațiilor plastice este obligatorie, după cum s-a observat, utilizarea diagramei caracteristice și a bazelor experimentale de date ale materialelor folosite.

Simulările numerice conduc la rezultate corecte numai dacă modelele fizice sunt formulate corect pe baza datelor experimentale.

### 2.3.3. Analiza ipotezei de distrugere a materialelor la deformarea plastică

Această ipoteză este foarte bine descrisă în lucrarea lui Kolmogorov. Este cunoscut faptul că deformarea plastică a metalelor este însoțită de apariția permanentă și dezvoltarea submicro- și microfisurilor. Procesul de apariție a fisurilor ori surselor de distrugere este legat de mișcarea dislocațiilor în urma deformațiilor plastice și interacțiunii câmpurilor de tensiuni ale dislocațiilor vecine.

Conform datelor descrise de I.Oding, sursele de fisuri apar în micro- sau submicrovolum dată de concentrația dislocațiilor, unde energia elastică a deformației a ajuns la nivelul critic, ceea ce corespunde cu temperatura topirii. Oding este de părerea că saturarea energetică provoacă distrugerea metalului. Dar la capătul ascuțit apar dislocațiile liniare ce interacționează cu dislocațiile vecine. Aceasta conduce la creșterea treptată a focarului.

G.G.Gilman subliniază că unul din cele mai importante mecanisme din cauza cărora apar fisurile în corpurile solide este curgerea plastică localizată. Autorul descrie trei mecanisme diferite de formare a fisurilor.

În literatura pentru fizica metalelor există un număr mare de materiale experimentale ce confirmă că deformarea plastică este însoțită de apariția și dezvoltarea fisurilor. Acest fapt este pus la baza teoriei distrugerii metalelor la prelucrarea lor prin deformare.

În lucrarea lui Kolmogorov este introdusă o mărime scalară  $\psi$  – gradul de fisurare; ce caracterizează defectarea volumului elementar, care înconjoară această particulă de metal cu microdefecte. Această categorie va constitui ipoteza de bază în construirea aparatului matematic.

Este dată formula de bază:

$$d\Psi_1 = c_1 \frac{H}{\Lambda_p [k(\tau)]} d\tau,$$

unde:  $k = \frac{\sigma}{T}$  - starea de tensiuni;

$\Lambda_p$ - plasticitatea materialului;

$c_1$ - coeficient;

$d\tau$ - timpul.

Folosirea acestui concept nu este nouă în elaborarea teoriei de distrugere. Definiția de defectare a materialului este cunoscută din teoria distrugerii la oboseală. Definiția analogică este cunoscută în teoria lui L.Caceanov.

În baza teoriei distrugerii este folosit faptul că procesul acumulării microfisurilor reprezintă marea majoritate a timpului din existența epruvetei. Procesul de apariție a microfisurii de oboseală este comparativ rapid.

Lucrarea lui Kolmogorov descrie două etape ale procesului de distrugere la deformații plastice mari. La dezvoltarea deformațiilor cresc focarele fisurilor și efectele concentrației tensiunilor cu o influență mai mare. Până la un anumit moment, fisura rămâne echilibrată și pentru dezvoltarea ei sunt necesare deformații plastice adăugătoare. Al doilea stadiu începe din momentul când fisura capătă dimensiunea critică și își pierde echilibrul. După atingerea dimensiunii critice este suficientă o mică deformație plastică pentru creșterea bruscă a fisurii, iar după ce câteva fisuri se unesc, se formează distrugerea suprafeței.

Paralel cu procesul de apariție și creștere a microdefectelor-fisurilor în corpul deformat plastic apar și procesele de „tratare” a focarelor, alterarea integrității și încetinirea dezvoltării lor. Contactarea suprafețelor fisurii în condițiile de comprimare și deplasare relativă din cauza deformațiilor plastice pot provoca fenomenul de sudare.

Efectul tratării a fost foarte bine descris în lucrarea colaboratorilor Institutului de Fizică a Metalelor al AȘ URSS. Prin tracțiune plastică a epruvetelor, din Cu a fost obținut materialul, structura căruia a fost tratată cu microfisuri și micropurități.

Plasticitatea materialului în mare măsură a fost epuizată, după ce aceleași epruvete au fost deformat plastic în condițiile comprimării multilaterale. Ca rezultat s-a observat tratarea completă a microfisurilor, iar plasticitatea a fost ridicată până la caracteristici inițiale. Autorii au arătat că comprimarea multilaterală a epruvetelor fără deformarea plastică nu a condus la micșorarea numărului și mărimii microdefectelor.

Totodată tratarea microdefectelor se datorează procesului de recristalizare și proceselor difuzionale ce decurg la temperaturi înalte.

#### **2.3.4. Structura modelului fizic**

Procesul tehnologic de deformare plastică la rece, analizat în teza de doctorat, se realizează pe mașini cu dispozitive și scule speciale. Pentru simularea numerică a unui astfel de proces este necesară realizarea unui model complet, care pe lângă materialele de prelucrat, încorporează și modele ale dispozitivelor și sculelor active ce vin în contact cu semifabricatul. Complexitatea problemei realizării modelului fizic este determinată de formele și dimensiunile corpurilor care intervin în proces, de proprietățile materialelor, ale semifabricatelor în special, și de regimurile de lucru.

În figura 2.07 este reprezentat un model fizic pentru procedeul tehnologic, de deformare plastică la rece, aplicat pentru îmbunătățirea calității suprafețelor de revoluție ale corpurilor. Acest procedeu, așa cum a fost descris în capitolele anterioare, se realizează pe o mașină care poate fi chiar o mașină universală – strung, dotată cu dispozitive și scule adecvate. Modelul fizic (fig. 2.07) conține următoarele părți:

- mandrina (universalul) cu trei bacuri de fixare;

- scula a carei parte activă este sferică, fiind exicutată din materiale dure, carburi metalice;
- scula a cărui parte activă este sferică, fiind exicutată din materiale dure, carburi metalice, diamant etc.;
- semifabricatul-model.

Semifabricatul – piesa de revoluție – este fixat coaxial în mandrină (în universal dacă se lucrează pe strung) cu ajutorul celor trei bacuri.

Scula, considerată fixată în dispozitivul de antrenare (port-cuțit la strung) are posibilitatea de mișcare pe două direcții în plan orizontal. Poziția suprafeței active a sculei pe verticală, în raport cu piesa, este fixată și se reglează înainte de începerea operațiunii la nivelul axei semifabricatului.

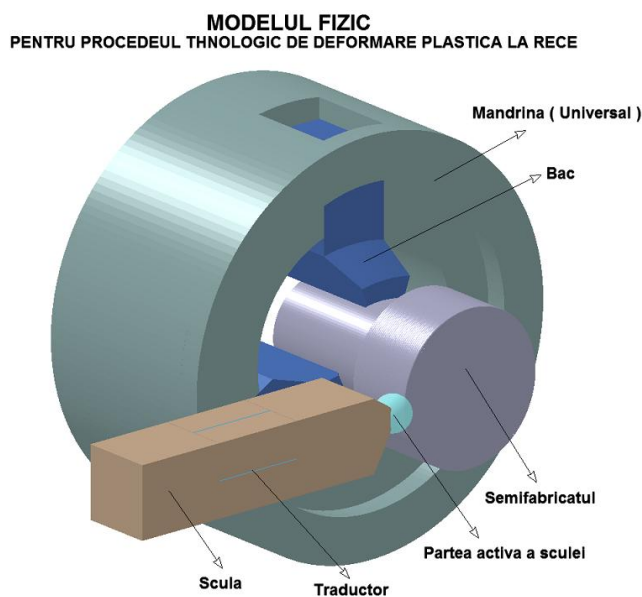


Fig. 2.7. Modelul fizic pentru procedeul tehnologic de deformare plastică la rece

Pe durata aplicării procedurii, mandrina antrenează semifabricatul în mișcare de rotație cu viteza unghiulară constantă. Scula, în funcție de complexitatea mașinii, poate efectua deplasări pe două direcții față de piesă: radială și longitudinală. În model, în funcție de profilul piesei, mișcarea sculei este controlată, simultan, pe ambele direcții.

După necesități, poziția sculei în dispozitivul de prindere poate fi înclinată sub un unghi oarecare față de axa mașinii, păstrând însă poziția părții active sferice.

Pe corpul sculei sunt dispuși traductori tensometrici simulați, cu ajutorul cărora se pot determina forțele de contact dintre piesă și sculă. Ideal este ca modelul blocului de măsurare să reproducă dispozitivul experimental pentru determinarea forțelor.

Parametrii regimului de lucru simulat sunt:

- turația la arborele principal al mașinii;
- avansul radial;
- avansul longitudinal.

Pe toată durata simulării procesului de deformare plastică la rece, turația se menține constantă.

Cele două mișcări de avans se pot corela pentru a se obține profilul dorit – în practica numai dacă se lucrează pe o mașină computerizată.

Chiar dacă mișcarea sculei este complexă, în modelul fizic, avansul longitudinal (axial) se păstrează constant, urmând ca avansul radial să fie reglat în concordanță cu profilul urmărit.

Se pot evita complicațiile de programare și de executare a mișcării radiale a sculei, dacă pe direcția radială se aplică controlul în forță, renunțându-se la controlul în deplasări. În practică, controlul în forță (presiune în cilindrii de acționare) presupune o bună programare și calități ale sistemului care să-l facă capabil de reproductibilitate. Chiar în această situație, calitatea pieselor executate cu control în forță este inferioară față de cele prelucrate cu control în deplasări. La acest dezavantaj contribuie, pe lângă alți factori, variația proprietăților de material de la piesă la piesă.

Simularea numerică își propune să analizeze ambele procedee de control pentru mișcarea sculei, să compare rezultatele și să evidențieze avantajele și dezavantajele.

Pentru a atinge obiectivele majore ale simulării numerice a procedurii tehnologice de deformare plastică la rece, vor fi încorporate în modelul fizic corpuri cu trei tipuri de suprafețe: cilindrică, conică și profilată. Dimensiunile semifabricatelor-model figura 2.8 au fost stabilite în concordanță cu dimensiunile de bază ale produselor prelucrate prin acest procedeu.

Pentru delimitarea suprafețelor ce urmează a fi prelucrate, adaosul de prindere (coada piesei) are diametrul redus. Modelele geometrice ale semifabricatelor asigură rezistența și rigiditatea necesare aplicării, în condiții de siguranță și precizie, a tehnologiei de prelucrare prin deformare plastică la rece.

Componentele dispozitivului de prindere și ale sculei se consideră confecționate din materiale cu rezistență corespunzătoare și sunt dimensionate astfel, încât deformațiile elastice în timpul lucrului să fie reduse pentru a nu influența negativ precizia de execuție a operației.

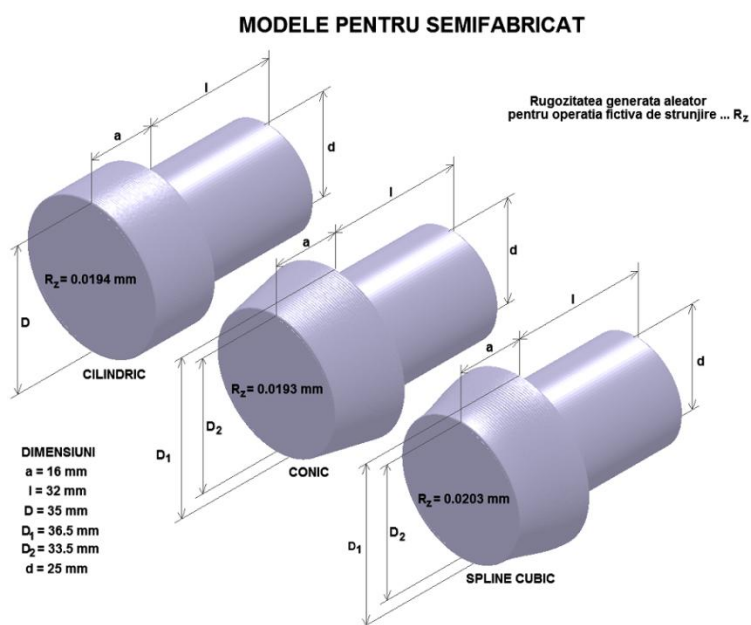


Fig. 2.8. Modele pentru semifabricat

materialului.

În același scop, în model, ca și în practică, bacurile se strâng aproape de atingerea stării plastice în adaosul de prindere.

Pentru toate materialele implicate în modelul fizic, altele decât ale semifabricatelor, se adoptă modelul de material liniar-elastic, guvernat de legea generalizată a lui Hooke, scrisă sub forma compactă:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\sigma\} \quad (2.22)$$

în care  $\{\varepsilon\}$  și  $\{\sigma\}$  sunt vectorul deformațiilor, respectiv al tensiunilor, iar  $[B]$  reprezintă matricea de complianță a

Uneori, în aplicații în care semifabricatul suportă deformații mari, unele componente (de exemplu corpul mandrinei) se pot considera confecționate din materiale perfect rigide.

Modele de material pentru piesele prelucrate, datorită importanței pe care o au proprietățile acestor materiale în modelul fizic, vor fi formulate într-o secțiune separată, pe baza datelor experimentale.

În programul de simulare au fost prevăzute trei forme pentru suprafețele de prelucrat figura 2.8: cilindrică, conică și o formă generată de curba spline cubice.

În scopul punerii în concordanță a calității suprafețelor modelelor cu cea a pieselor reale, s-a realizat o simulare a unor operații de strunjire fictive. Astfel, pe suprafețele active a fost generată aleator o rugozitate prin care se imită urmele produse de sculă în procesul de aschiere. Ca măsură a rugozității se folosește mărimea  $R_z$ . Programul de simulare poate genera, în concordanță cu rețeaua de elemente, suprafețe cu rugozități diferite. Valorile rugozităților din figura 2.8 sunt obținute prin măsurări simulate, în conformitate cu normele standardizate, și reprezintă medii pe câte cinci determinări.

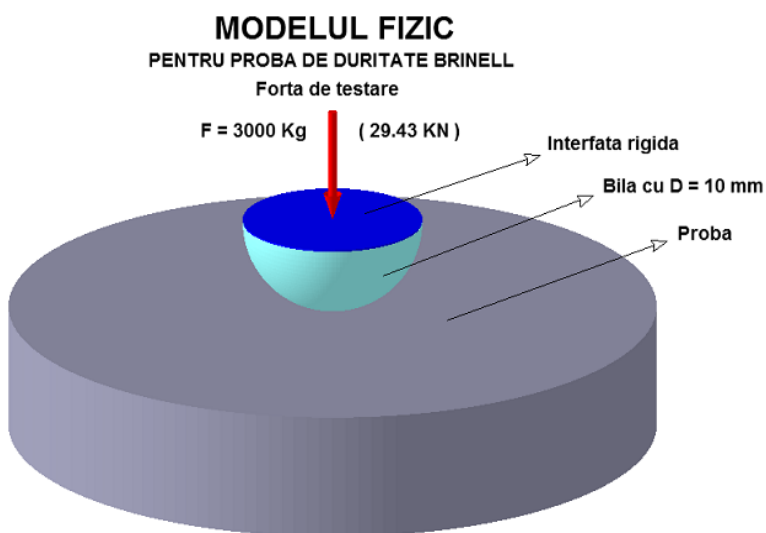


Fig. 2.9. Modelul fizic pentru proba de duritate Brinell

Brinell: HB10/3000.

Dimensiunile piesei respectă condițiile minimale necesare asigurării preciziei de măsurare, diametrul fiind  $D=36\text{mm}$  și înălțimea  $h=7\text{mm}$ .

### 2.3.5. Modelele de material

2.3.5.1. Identificarea și caracterizarea materialelor supuse procedurii tehnologice de prelucrare prin deformare plastică la rece folosite pe liniile de fabricație a recipientelor din sticlă

Pentru validarea modelelor de material pe baza valorilor obținute la probele de duritate Brinell a fost conceput modelul simplu reprezentat în figura 2.9. Acest model auxiliar include trei componente:

- piesa confecționată din materialul vâsco elasto plastic de testat;
- bila elastică cu diametrul  $D=10\text{mm}$ , reprezentată pe jumătate;

interfața rigidă prin care se transmite forța aplicată și este pregătit să lucreze în condițiile testului principal de duritate

Din investigațiile în teren a rezultat concluzia că piesele supuse procesului de deformare plastică la rece sunt realizate din fontă cenușie cu grafit lamelar.

Proprietățile mecanice principale ale fontelor cenușii cu grafit lamelar sunt date în tabelul 2.1.

**Tabelul 2.1** Caracteristicile mecanice ale fontelor cenușii cu grafit lamelar

Marca fontei	Modelul de elasticitate GPa	Rezistența la tracțiune (min) MPa	Rezistența la compresiune MPa	Duritatea Brinell	Coefficientul de amortizare pentru decrementul logaritmic
F <sub>c</sub> 10	70-90	160	400-500	120-187	0.0150
F <sub>c</sub> 15	80-105	250	550-750	143-229	0.0100
F <sub>c</sub> 20	90-115	280	600-830	156-285	0.0060
F <sub>c</sub> 25	105-120	330	700-1000	170-302	0.0050
F <sub>c</sub> 30	110-140	350	820-1200	187-321	0.0040
F <sub>c</sub> 35	150-145	380	950-1400	207-321	0.0030
F <sub>c</sub> 40	125-155	400	1100-1400	207-363	0.0025

Densitatea fontelor cenușii 6900...7350Kg/m<sup>3</sup>

Valori standardizate (STAS 568-67 și STAS 8 541-70). Plasticitatea fontelor cenușii cu grafit lamelar în stări de tensiune în care predomină solicitări la tracțiune este foarte redusă. Se pot obține unele deformări plastice în procese în care se produc stări de tensiune dominate de solicitări la compresiune. În general, se evită aplicarea procedurilor de deformare plastică intensă pe semifabricate realizate din fontă cenușie cu grafit lamelar. În acest sens, procesul tehnologic studiat în teza de doctorat are aplicabilitate limitată la operații care se realizează cu grade reduse de deformare.

În aceste condiții, cunoașterea cât mai precisă a proprietăților mecanice ale materialelor implicate în simularea numerică este esențială, deoarece rezultatele simulării numerice sunt direct influențate de calitatea datelor de intrare.

În scopul formării unei baze de date referitoare la proprietățile mecanice ale materialelor luate în studiu s-au efectuat mai multe serii de încercări mecanice. În total au fost încercate trei loturi de epruvete, prelevate din șarje diferite de turnare.

Datele și locul unde s-au efectuat testele, tipul încercărilor, mărimea loturilor și locul unde sunt dispuse rezultatele sunt date în tabelul 2.2.

**Tabelul 2.2.** Date despre teste

Nr. lot	Data testelor	Locul unde s-au efectuat testele	Tipul încercării	Numărul de epruvete
1	19.03.2011	1	Compresiune	6 (șase)
2	29.01.2012	U.P.Buc	Compresiune	10 (zece)
3	15.07.2013	COMOTI	Tracțiune	6 (șase)
			Compresiune	6 (șase)
			Probe HB	6 (șase)
	19.07.2013		Analiza metalografică	

Documentele originale în care sunt înregistrate datele primare obținute de la mașinile de încercat și de la aparatele folosite se găsesc în ANEXE.

Pentru aducerea datelor primare la forma proprietăților mecanice, utilizabile în procesul de simulare numerică, a fost necesară prelucrarea, iar uneori, ajustarea lor.

### 2.3.5.2. Prelucrarea datelor primare și încercarea de încadrare a materilului analizat într-o categorie standardizată

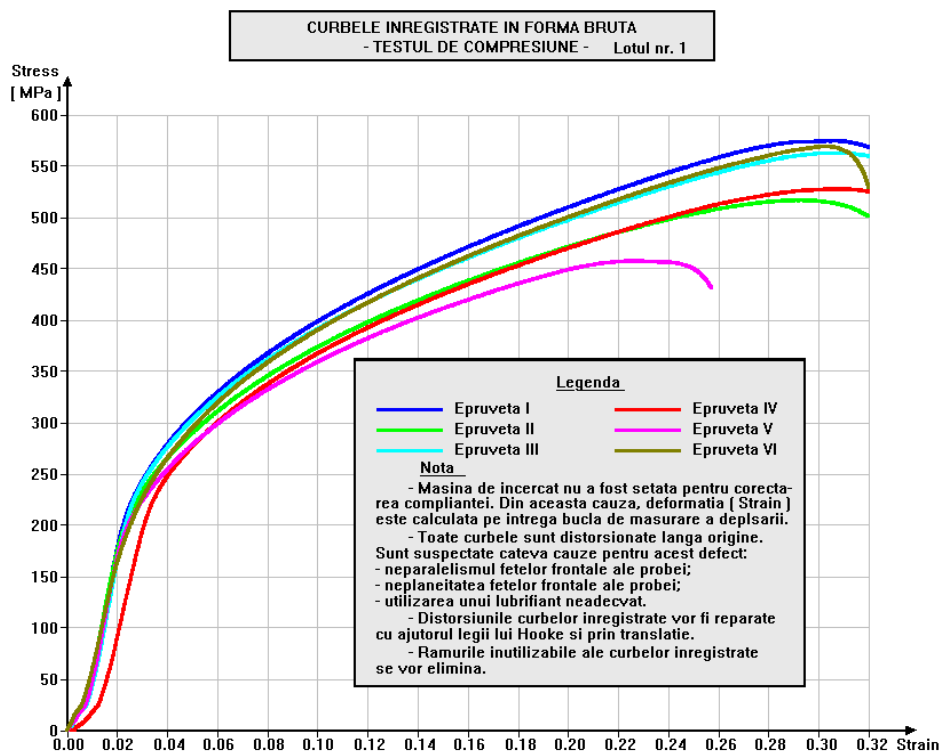


Fig. 2.10. Curbele înregistrate în formă brută la testul de compresiune. Lotul nr. 1

## 1. Loturile încercate la compresiune

Încercările la compresiune au fost făcute pe epruvete standardizate cu diametrul  $d=10\text{mm}$  și înălțimea  $h=20\text{mm}$ . Observația comună, pentru toate probele de compresiune, se referă la faptul că datele primare înregistrate sunt alterate din cauza complianței mașinilor de încercat și a unor distorsiuni în vecinătatea originii. O

copie a curbelor înregistrate în formă brută la probele de compresiune pe lotul nr.1 este reprezentată în figura 2.10. În general, din cauza dimensiunilor mici ale epruvetelor încercate la compresiune, nu se poate utiliza un extensometru cu care să se măsoare nemijlocit deformația axială. În această situație, măsurarea deplasării relative a celor două platane între care este dispusă epruveta se face cu un dispozitiv plasat pe părțile mașinii care execută mișcarea relativă. Astfel, valorile măsurate includ pe lângă deformarea epruvetei și deformarea părților de mașină (complianță) incluse în bucla de măsurare. La cele mai multe dintre mașinile de încercat efectul complianței în valoarea măsurată, depășește deformația elastică a materialului. Încercările de compensare automată a complianței nu duc întotdeauna la rezultate, curbele înregistrate rămânând distorsionate. Pentru niciuna dintre probe, mașina de încercat, din diverse motive, nu a fost setată pentru compensarea complianței.

Distorsiunile din vecinătatea originii ale curbelor înregistrate pot avea următoarele cauze:

- neperalelismul fetelor frontale ale probei;



- neplaneitatea fețelor frontale ale probei;
- defecte de poziționare a platanelor masinii;
- folosirea unui lubrifiant neadecvat.

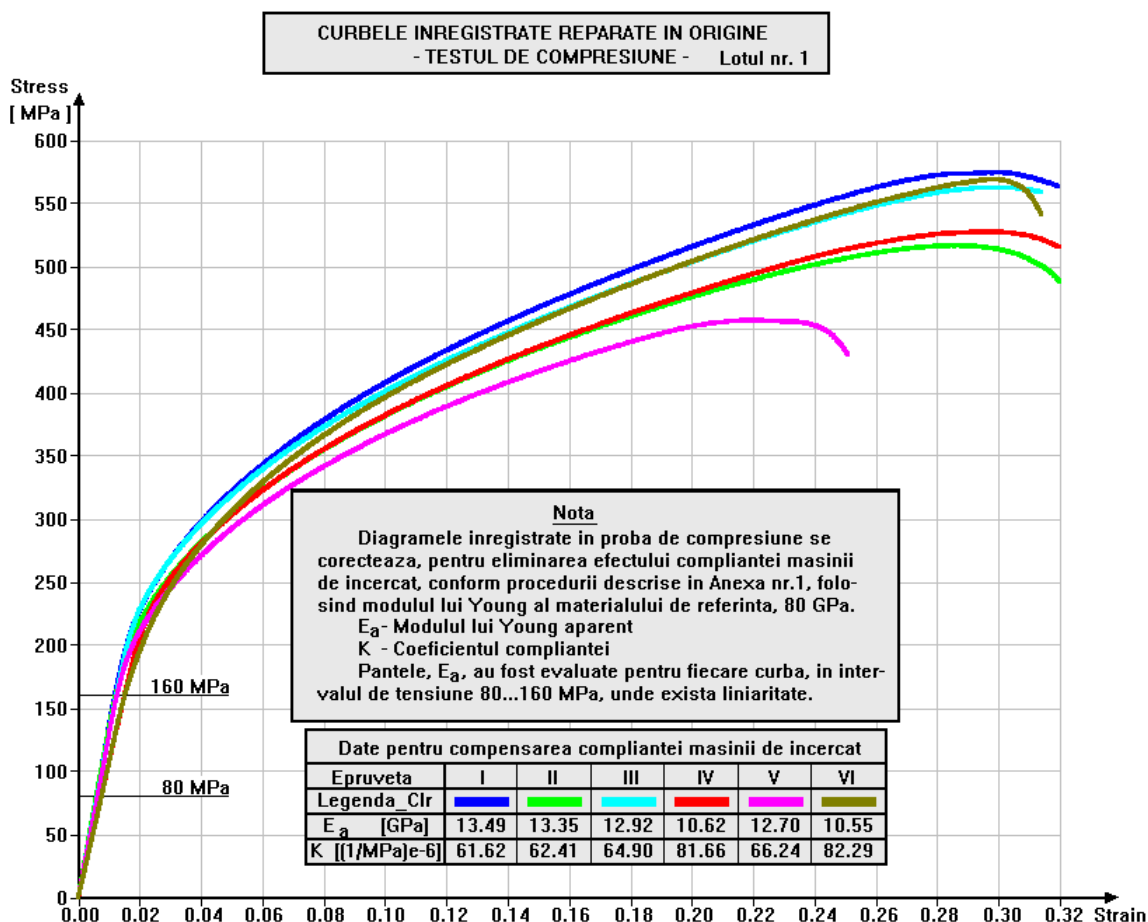


Fig. 2.11. Curbele înregistrate la testul de compresiune reparate în origine. Lotul nr. 1

Distorsiunile din origine ale curbelor înregistrate au fost reparate prin liniarizare cu ajutorul legii lui Hooke, apoi, prin translație. Aceste operațiuni au fost necesare și s-au efectuat pentru toate cele trei loturi de testate la compresiune. Rezultatele acestor operații se reprezintă în figurile 2.11, 2.12, 2.13. În toate reprezentările grafice ale curbelor tensiune-deformație, pentru economie de spațiu, denumirea axelor s-a dat în termeni corespunzători, preluați din limba engleză. În lucrare, sub foarte multe dintre reprezentările grafice, au fost incluse legende, note explicative, scurte comentarii și tabele cu valori, cu scopul realizării unor surse compacte de informații.

În continuare, diagramele înregistrate, reparate în origine, reprezentate pentru cele trei loturi de epruvete încercate la compresiune, în figurile 2.11-2.13, se corectează cu scopul eliminării efectului complianței mașinii de încercat, folosind procedura descrisă în anexa nr 2.1 referitoare la acest capitol.

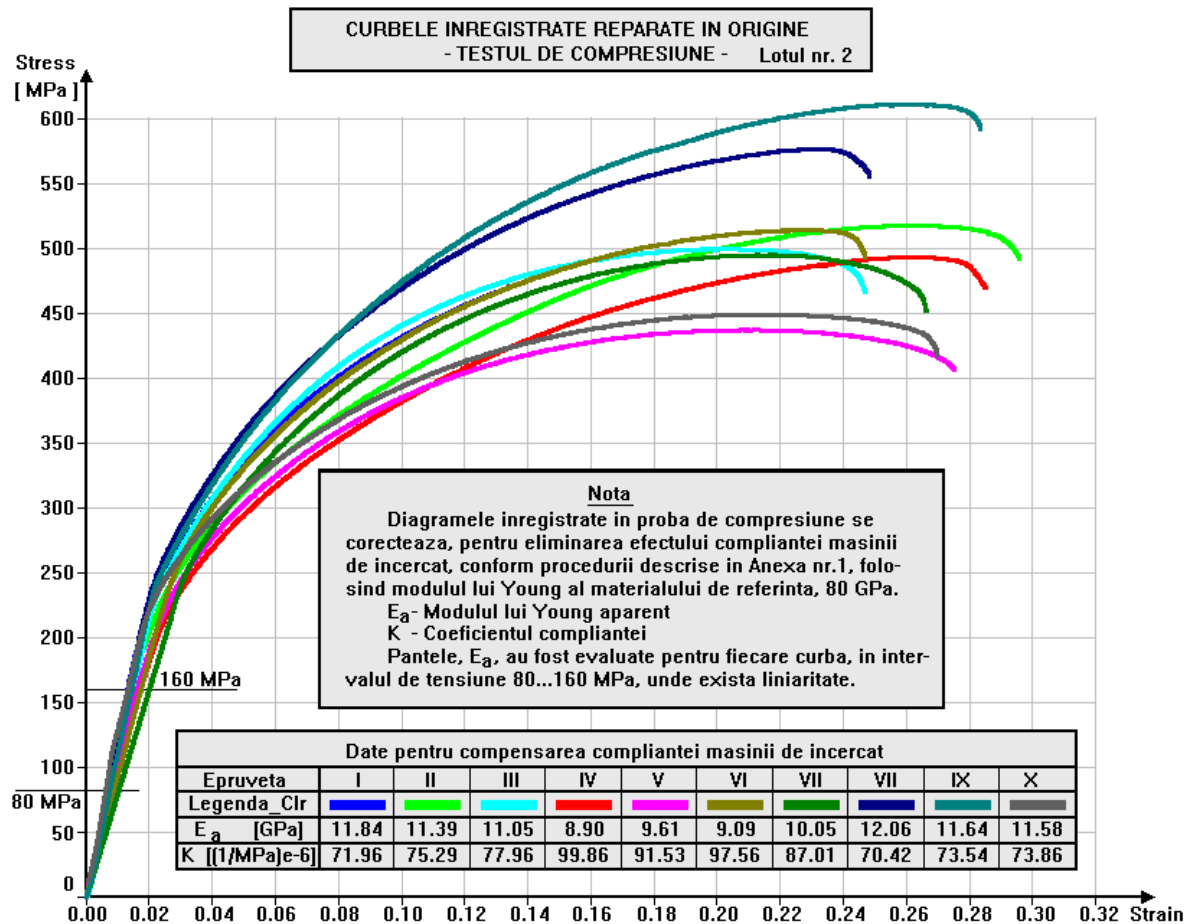


Fig. 2.12. Curbele înregistrate la testul de compresiune reparate în origine. Lotul nr. 2.

Procedul de compensare a complianței din anexa nr 2.1 se bazează pe ipoteza că elementele mașinii de încercat cuprinse în bucla de măsurare a deplasării se deformează numai în regim elastic, proporțional cu sarcina aplicată. Influența complianței constă în deplasarea punctelor diagramei înregistrate spre dreapta, în sensul creșterii deformației, cu valori proporționale cu tensiunile. Deoarece, componenta artificială a deformației, corespunzătoare complianței este strict elastică, în baza ipotezei de mai sus, corecția se poate evalua prin distanța dintre dreptele definite de cele două module de elasticitate:

E<sub>a</sub> – modulul de elasticitate aparent;

E – modulul de elasticitate real al materialului încercat, la nivelul tensiunii luate în calcul.

Practic, eliminarea influenței negative a complianței constă în tragerea spre stânga a punctelor de pe curba înregistrată, cu valoarea corecției calculate.

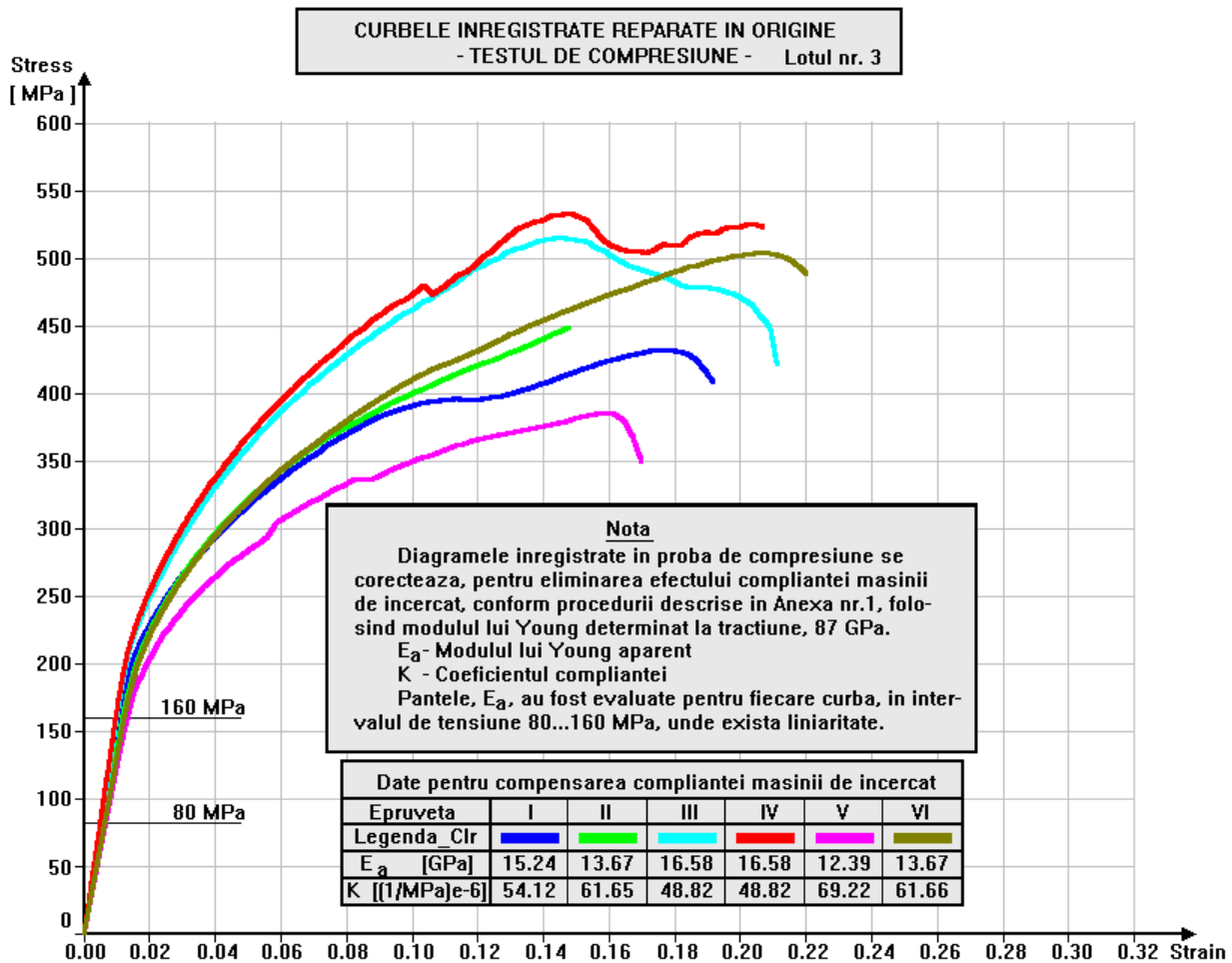


Fig. 2.13. Curbele înregistrate la testul de compresiune reparate în origine. Lotul nr. 3.

Deoarece atunci când s-au încercat primele două loturi de epruvete nu se cunoștea cu exactitate natura materialului folosit, s-a determinat, pe baza primelor informații obținute în timpul probelor, rezistența minimă la compresiune, fiind un indicator decisiv, deoarece acesta se apropie cel mai mult de fonta cenușie cu grafit lamelar  $F_c10$ . În felul acesta s-a admis că modulul de elasticitate la compresiune al materialului încercat are valoarea celui care corespunde fontei  $F_c10$ ,  $E=70...90$  GPa cu media  $E=80$  GPa.

Reprezentările grafice din anexa nr 2.1 corespund primei epruvete încercate din lotul nr. 1, pentru care s-a făcut corecția. Coeficientul complianței, K, s-a determinat pentru valorile-limită ale modulului de elasticitate preconizat, dar pentru corecție a fost folosită o valoare medie.

Calculul arată că la o eroare a modulului de elasticitate preconizat de 6.25% se generează o eroare a corecției de maximum 2.5%. Aceasta constatare conduce la concluzia că aprecierea aproximativă a modulului de elasticitate, E, al materialului analizat nu are influență prea mare asupra corecției, și, în consecință, diagrama corectată va fi influențată și mai puțin.

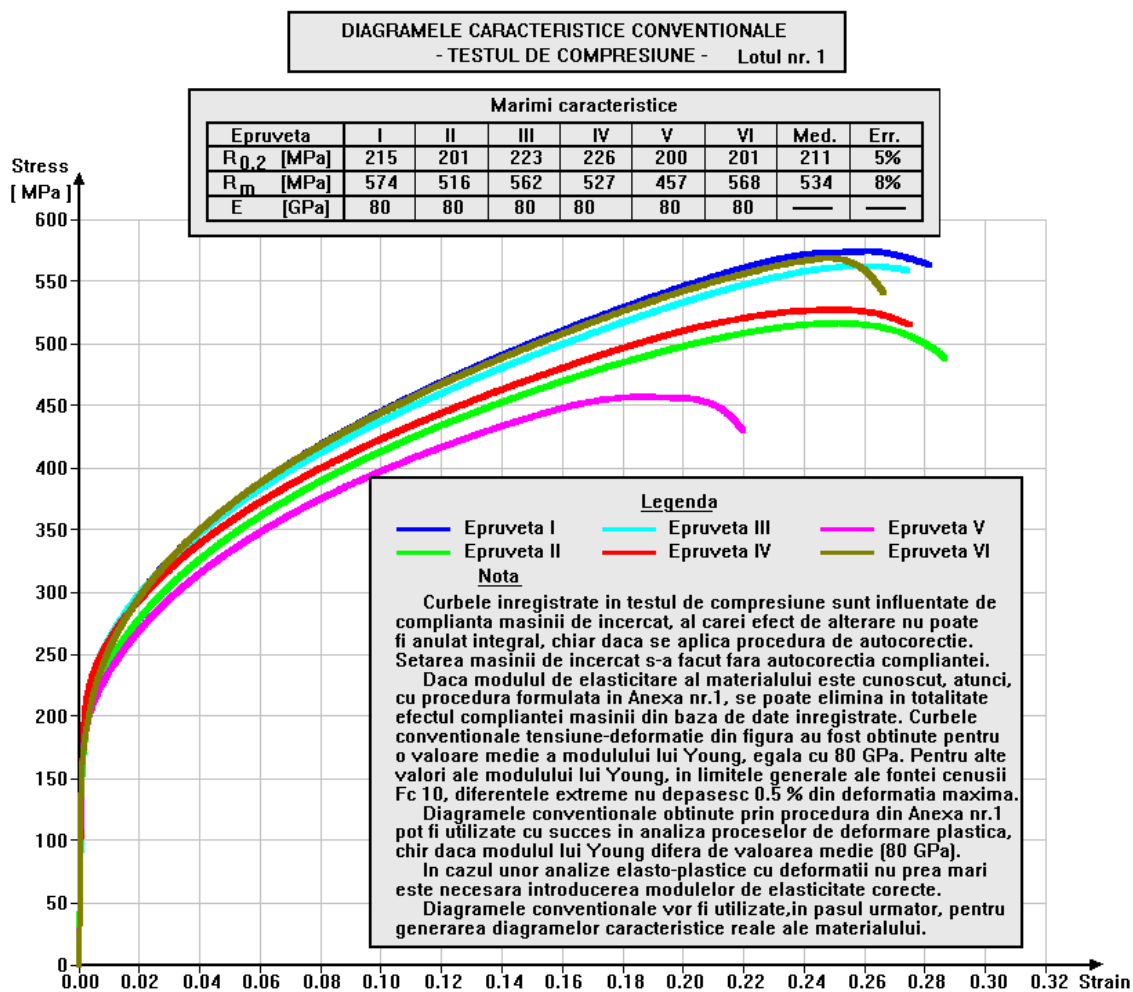


Fig. 2.14. Diagramele caracteristice convenționale la compresiune.  
Lotul nr.1.

Diagramele caracteristice, corectate cu ajutorul procedurii din anexa nr.2.1, pot fi considerate, cu suficientă precizie, diagrame caracteristice convenționale ale materialului probelor din lotul supus încercării.

În figurile 2.14, 2.15 și 2.16 sunt reprezentate diagramele caracteristice convenționale ale materialelor din lotul nr. 1, 2, respectiv 3, încercate la compresiune. Pe fiecare figură, care corespunde unui lot încercat, pe lângă curbele caracteristice convenționale, sunt date, sub formă de tabel, valorile mărimilor caracteristice ale materialelor epruvetelor încercate. Fiecare tabel conține și o coloană cu valoarea medie și una cu eroarea pătratică medie.

**DIAGramele caracteristice convenționale**  
- TESTUL DE COMPRESIUNE - Lotul nr. 2

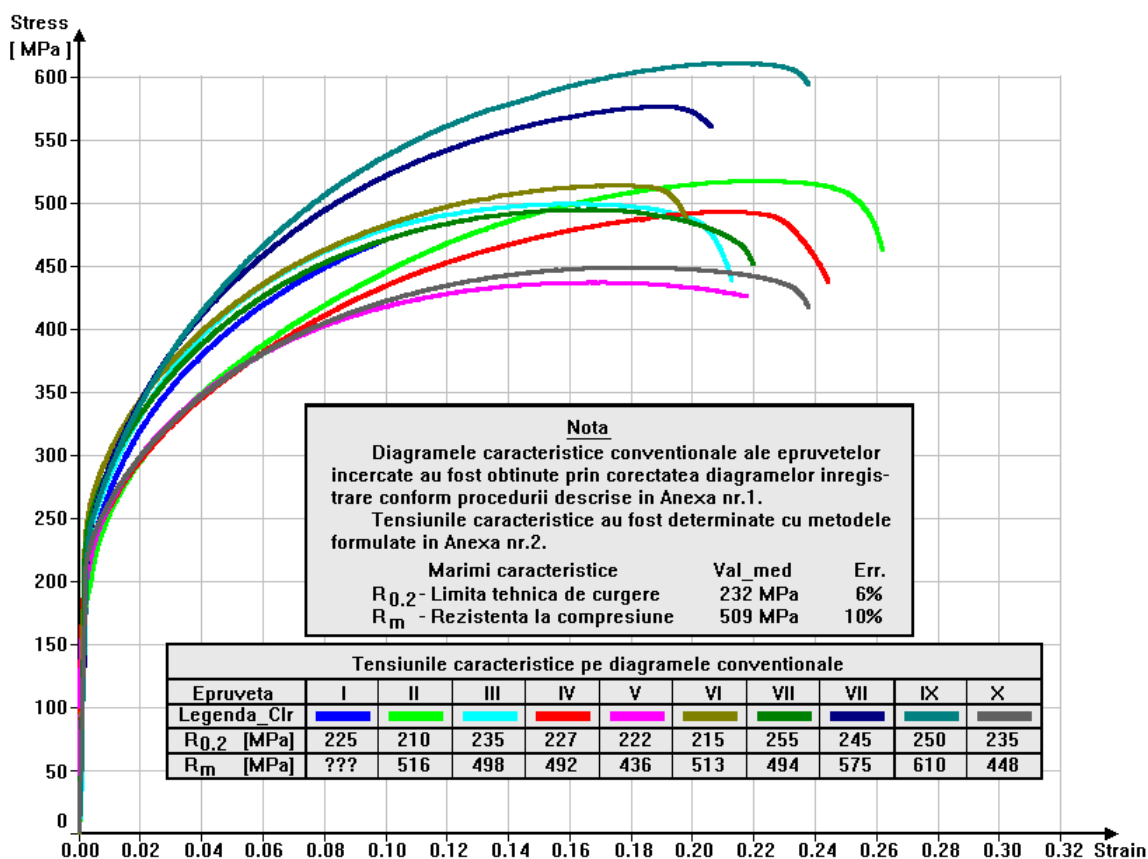


Fig. 2.15. Diagramele caracteristice convenționale la compresiune. Lotul 2.

Deoarece lotul de epruvete nr.3 a fost supus unui set mai complet de teste, între care și o probă de tracțiune, în special pentru evaluarea modului de elasticitate în calculul corecției, după procedura din anexa nr.2.1, a fost utilizată în locul valorii approximate, valoarea măsurată a modului de elasticitate, E. Testul de tracțiune pe fonta utilizată, validează, încă o dată presupunerea că materialul încercat este o fontă cenușie inferioară cu grafit lamelar. Formațiunile segregate de grafit reduc aproape la zero plasticitatea acestui material. Din aceasta cauză, deformația la rupere la tracțiune este, pentru toate epruvetele, mult sub 1%.

Pentru acest lot, rezistența la rupere și tracțiune, figura 2.17 este sub nivelul celei corespunzătoare materialului de referință. Valorile din tabelul care însoțește figura 2.17 au caracter informativ. Din tabelul de valori s-a reținut modulul de elasticitate mediu la tracțiune E=87GPa, determinat cu o eroare pătratică medie de 12%. Pentru lotul nr.3 corecția complianței s-a făcut cu valoarea modului experimental de elasticitate, reflectat simetric pentru compresiune. Diagramele convenționale, obținute în condițiile de aproximare folosite la eliminarea efectului complianței, se pot utiliza cu succes în analiza proceselor tehnologice de deformare plastică aplicate corpurilor cu scopul măririi durabilității în funcționare. Însă, în cazul unor aplicații cu deformații elastoplastice nu prea

mari sunt necesare determinări mai exacte ale diagramelor caracteristice, respectiv ale proprietăților materialului.

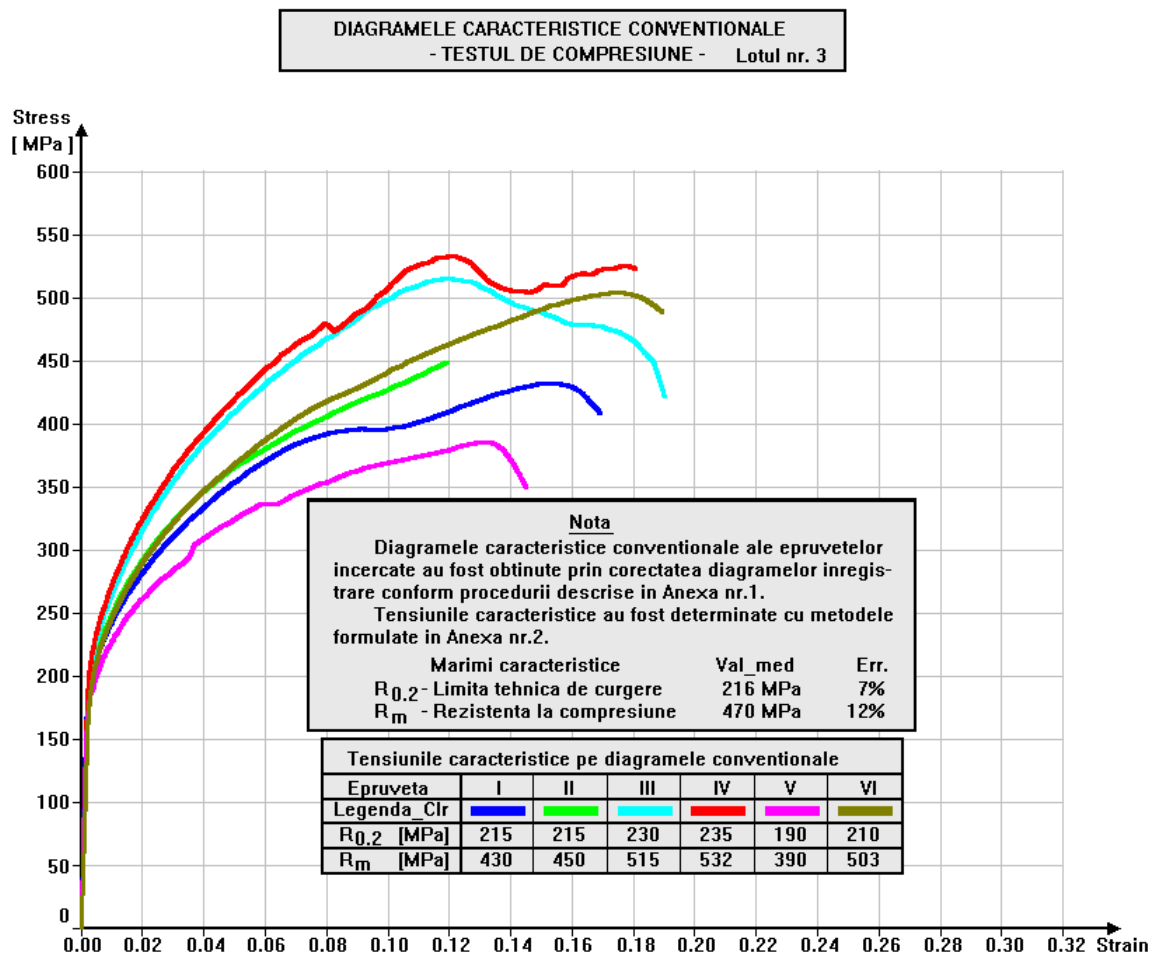


Fig. 2.16. Diagramele caracteristice convenționale la compresiune. Lotul nr.3.

## 2. Încercări la tracțiune

Deși era de așteptat că fonta cenușie cu grafit lamelar să prezinte caracteristici slabe de rezistență la tracțiune, a fost realizat un număr de 6 teste pe eşantioane extrase din lotul de material nr. 3.

Rezultatele acestor teste sunt reprezentate pe diagramele convenționale în figura 2.17, unde se constată că într-adevăr, deformația la rupere a fontei cenușii cu grafit lamelar este foarte redusă.

Scopul principal al testului de tracțiune a fost determinarea experimentală a modului de elasticitate, care în probele de compresiune nu poate fi evaluat. Valorile modului de elasticitate sunt centralizate în tabelul din figura 2.17. S-a calculat valoarea medie a modului de elasticitate la tracțiune, cu o eroare pătratică medie 12%. Valoarea medie calculată pentru modulul de elasticitate a fost însoțită ca valoare comună a ambelor tipuri de solicitări. Aspectul epruvetelor rupte prin tracțiune este pus în evidență în figura 2.30, b), pe care se constată ruperea fragilă a materialului.

**DIAGramele CARACTERISTICE CONVENTIONALE**  
- TESTUL DE TRACTIUNE - Lotul nr. 3

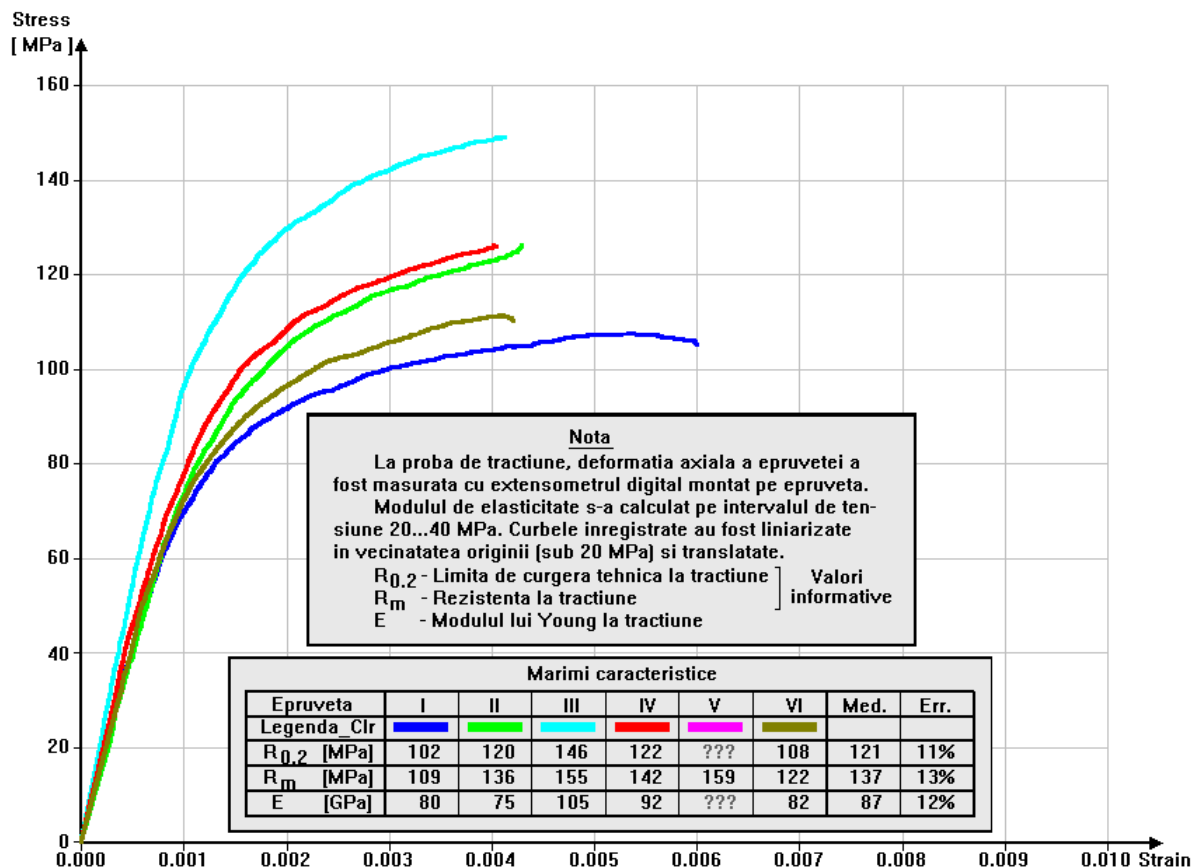


Fig 2.17. Diagramele caracteristice conventiōnale la tractiune. Lotul nr. 3.

2.3.5.3. Determinarea durității și unele concluzii privind analiza metalografică

Determinarea durității materialului s-a efectuat cu scopul edificării asupra calității materialului folosit. La proba de duritate au fost supuse numai eșantioane aparținând lotului nr.3. Proba de duritate a fost făcută cu un durimetru Vickers, disponibil la data la care a fost încercat lotul nr.3. Sarcina de testare a fost de 1Kgf. Pentru fiecare probă, din cele șase, s-au efectuat câte cinci încercari. Valorile medii ale testelor de duritate sunt date în tabelul 2.3.

**Tabelul 2.03 Teste de duritate**

Proba	1	2	3	4	5	6
Duritatea HV 1	121.6	112.1	125.4	130.7	116.7	144.4
Duritatea HB	115.3	106.7	119.4	124.5	110.3	137.4

Densitatea măsurată ... 7.1 Kg/dm<sup>3</sup>

Pentru nevoile de comparare a densităților simulate sau experimentale, în tabelul 2.3 s-a făcut conversia durităților Vickers în unitați de duritate Brinell. Conversia unităților de duritate a avut la bază normele EN ISO 6506, 6507 și 6508.

Analiza metalografică a materialului din probele din lotul nr.3 s-a efectuat la microscopul electronic cu baleaj, cu emisie în câmp, marca FEI Inspect F50, dotat cu sisteme de microanaliză cu raze X, dispersiv în energie (EDS), de tip EDAX.

Probele din fontă cenușie turnată au fost pregătite metalografic prin șlefuire, lustruire și atac chimic cu reactivul Nital 2%.

#### *Aspecte microstructurale și compoziționale*

Microstructura, sub aspect general, este tipică pentru o fontă cenușie cu grafit lamelar, turnată, având matricea feritică cu mici cantități de perlită (sub 5%).

Lamelele de grafit sunt distribuite aproximativ uniform și au dimensiuni cuprinse între 100μm și 400μm (fig. 2.18 a,b).

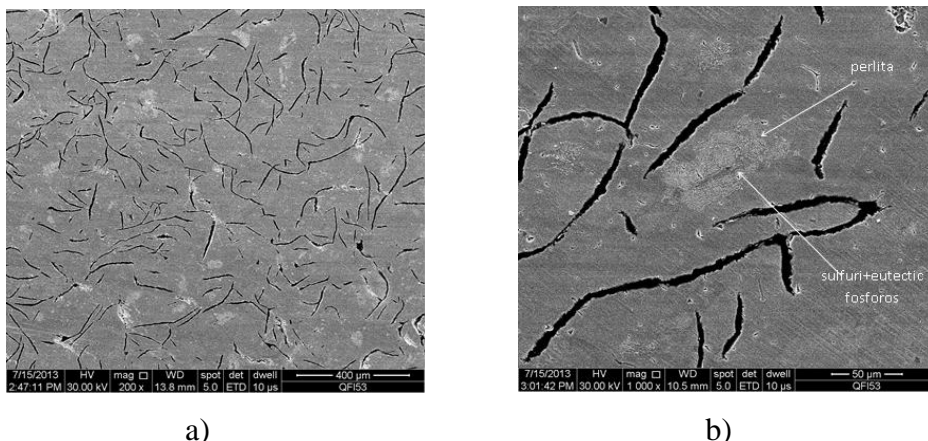


Fig. 2.18. Aspecte ale microstructurii: a) grafit lamelar în matricea ferito-perlitică (95% - 5%); b) detaliu (x1000) pe o insulă de perlită lamelară cu conținut de sulfuri și eutectic fosforos.

Examinarea microscopică a evidențiat prezența a numeroase incluziuni de silicați, sulfuri și numeroase insule de eutectic fosforos, identificate prin microanaliza calitativă cu raze X (fig 2.19). Pe lângă sulfura de mangan, frecvent întâlnită în fontele cenușii, apar numeroase sulfuri atipice din punct de vedere compozițional, așa cum se poate observa în spectrul din figura 2.19 și în imaginile din figura 2.20, unde sulfurul este însoțit de titan și pe alocuri de fier. Au mai fost depistate elemente precum cromul și molibdenul.



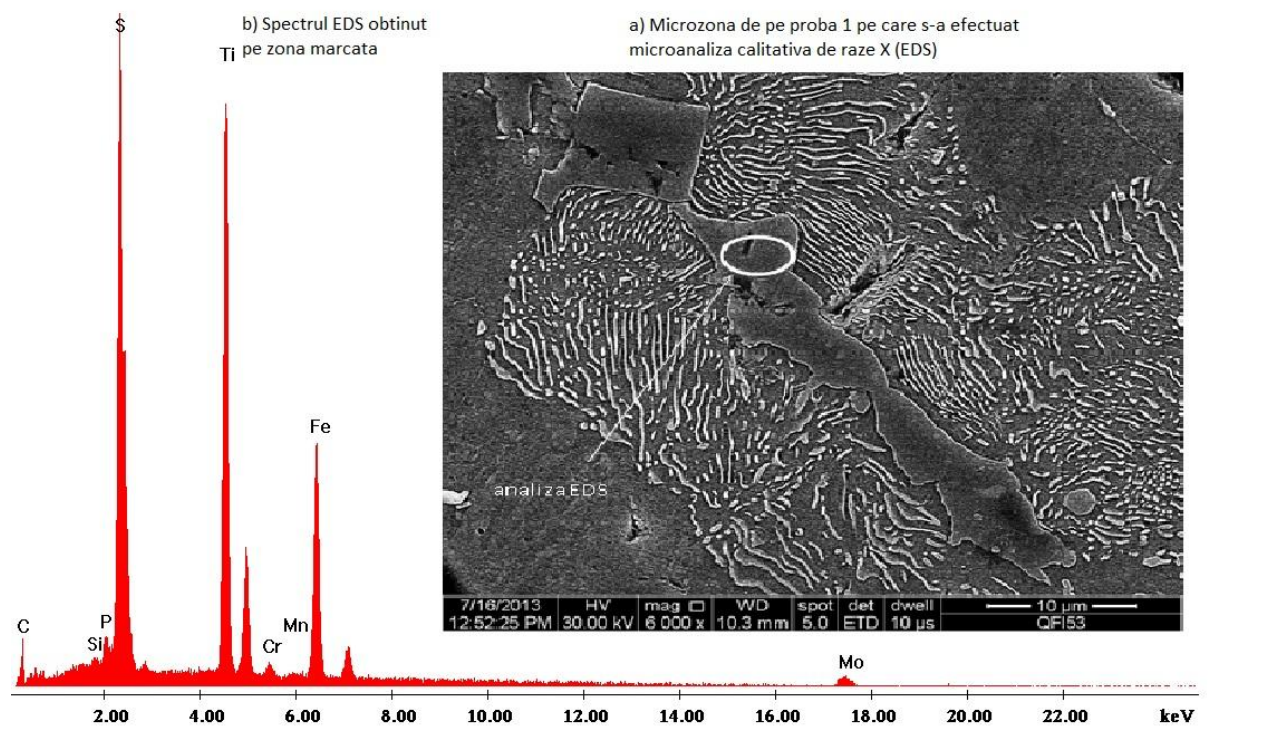


Fig. 2.19. Microanaliza calitativă cu raze X

Incluziunile de silicați sunt frecvente și cele mai multe sunt nucleate pe lamelele de grafit. Ponderea mare pe care o au aceste formațiuni în microstructura materialului conduc la concluzia că la elaborarea secundară a fontei au fost folosite deșeuri de oțeluri și fonte aliate.

Concluziile analizei metalografice justifică diferențele dintre proprietățile materialelor de la lot la lot și în cadrul loturilor de la piesă la piesă. Se determină ca probele au fost prelevate din șarje foarte diferite, sub aspect compozițional.

Imaginile de distribuție a elementelor au condiții limitative privind compoziția.

În mare, se poate considera că materialul analizat microstructural și supus încercărilor descrise în acest paragraf se apropie ca microstructură și caracteristici mecanice de fonta cenușie cu grafit lamelar F<sub>c</sub>10, care se constituie în material de referință. Prezența necontrolată a incluziunii și elementele străine fac ca materialul analizat să fie, din unele puncte de vedere, inferior fontei cenușii F<sub>c</sub>10.

Analiza metalografică justifică proprietatea fontei cenușii cu grafit lamelar de a disipa energia. Prezența lamelelor de grafit este cauza creșterii frecărilor interne în timpul deformării materialului.

În tabelul 1, proprietățile disipative ale materialului sunt determinate prin decrementul logaritmic al vibrațiilor amortizate.

Modelul constitutiv de material ce urmează să fie formulat în paragraful următor va curpinde și proprietățile disipative sub forma unor forțe vâscoase, dependente de vitezele de deformare.

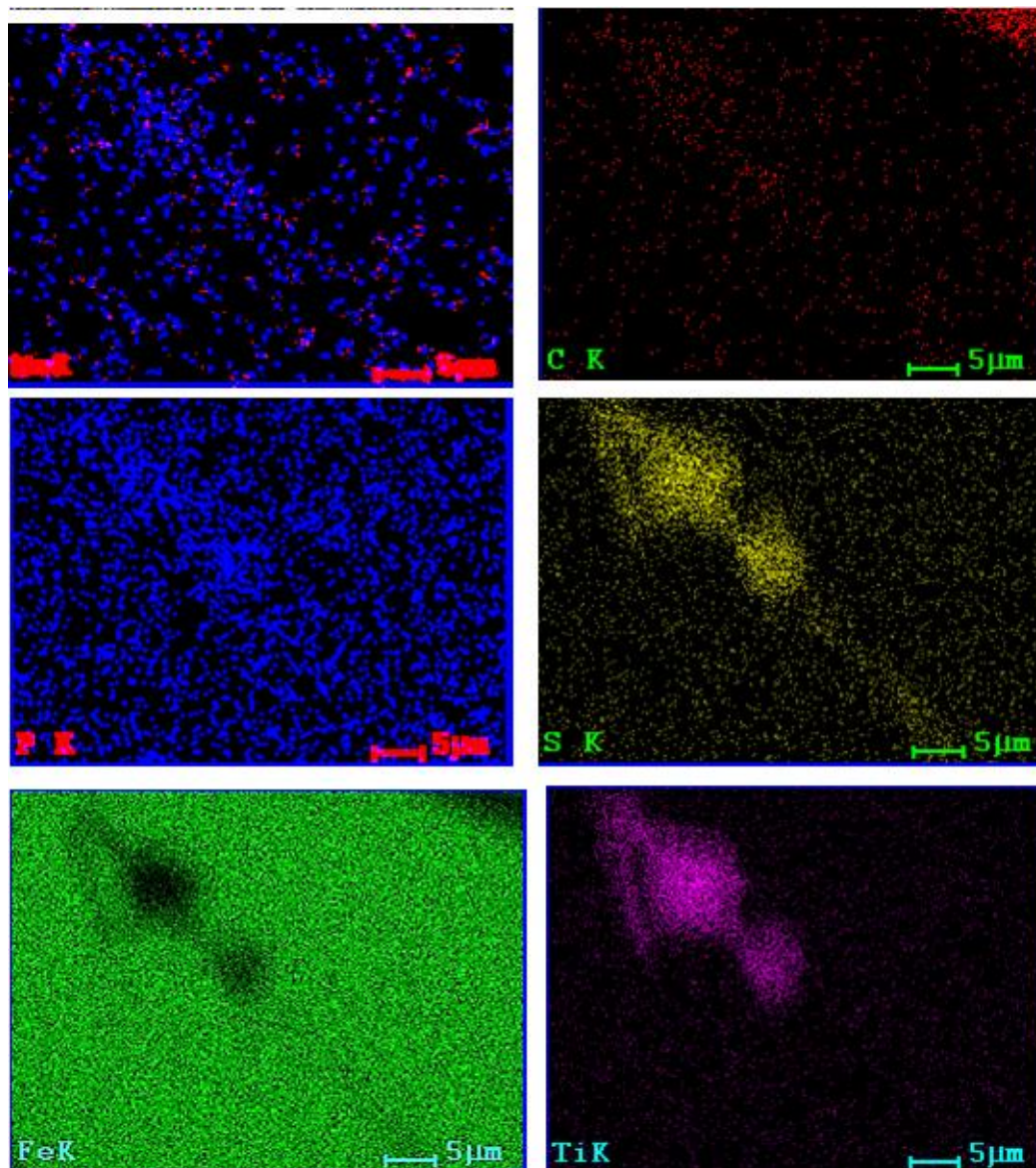


Fig. 2.20. Analiza metalografică

#### 2.3.5.4. Concluzii privind diagramele caracteristice la compresiune ale materialelor folosite la realizarea pieselor din structura formelor pentru turnarea sticlei

În primul rând se poate semnala faptul că toate încercările la compresiune s-au efectuat fără ca mașinile de încercat să fie configurate pe regimul de corectare a complianței, deși toate mașinile pe care s-a lucrat dispuneau de posibilități de corecție. Din această cauză înregistrările curbelor sunt deformate-glisate spre dreapta. Mărimea distorsiunilor se poate determina comparând modulul de elasticitate aparent, panta în origine a curbelor înregistrate cu modulul de elasticitate real. Pe curbele înregistrate valorile modulului de elasticitate aparent sunt cu aproape un ordin de mărime mai mici decât cele reale (0.11...0.21).

Curbele caracteristice, înregistrate în aceste condiții, nu pot fi folosite în aplicații de mecanica solidului deformabil. Pentru a le face utilizabile a fost concepută o procedură (anexa nr.1) pe baza

căreia să se facă o corecție prin care se elimină efectul complianței. Deoarece procedura este formulată pe baza ipotezei liniarității deformațiilor pieselor din structura mașinii de încercat, rezultatul aplicării acestei proceduri are caracter aproximativ, dar devine suficient de precis în aplicațiile în care deformațiile plastice sunt mari, așa cum este cazul procedurilor tehnologice bazate pe plasticitatea materialelor. Se poate considera că procedura aplicată conduce la rezultate mai bune decât procedura de corectare automată a complianței, care, la rândul ei, are anumite curențe prin faptul că generează erori relativ mari, mai ales în zona deformațiilor mici.

În al doilea rând, se constată o dispersie importantă a măsurătorilor, fapt ce arată că omogenitatea materialului diferă de la lot la lot și chiar în cadrul aceluiași lot, de la probă la probă. Analiza diagramelor caracteristice, reprezentate în figurile 2.14, 2.15 și 2.16, evidențiază calitatea mai bună a materialului din lotul nr.1, în privința rezistenței la compresiune cu valori cuprinse între 457 MPa și 574 MPa și a deformației la rupere, care, cu o excepție, este cuprinsă între 24% și 26%.

Material foarte prost pare a fi cel din lotul nr.3, care are deformația la rupere aproximativ la jumătate față de cel din lotul nr.1.

Pe diagramele caracteristice convenționale, deformația la rupere dă măsura intensității procesului tehnologic de deformare, a gradului de ecrusare. Sub acest aspect, fontele cu proprietăți comparabile cu cele din figura 2.14 se pot prelucra mult mai bine decât cele din lotul nr.3.

Cea de a treia concluzie se referă la stabilirea proceselor tehnologice de deformare plastică la rece a fontelor cenușii cu grafit lamelar și a regimurilor de lucru. Menținerea integrității materialului în timpul prelucrării se poate realiza numai dacă starea de tensiune indusă în material este predominantă de compresiune (indice de triaxialitate negativ). În momentul în care, în unele zone ale materialului prelucrat se instalează starea de tensiune predominant de tracțiune (pozitivă), în acele zone se formează fisuri sau exfolieri, dacă zonele afectate sunt în apropierea suprafețelor prelucrate.

Ținând seama de faptul că plasticitatea la compresiune a fontelor cenușii cu grafit lamelar este foarte limitată, practic, se poate conchide că prelucrarea prin deformare plastică la rece a acestor materiale se poate realiza sub un control riguros al stării deformate în raport cu proprietățile plastice cunoscute.

Procedeele tehnologice de netezire cu ecrusare aplicat pieselor turnate din fontă cenușie cu grafit lamelar se încadrează bine în limitele determinate de proprietățile materialului. În acest procedeu se urmărește, în special, îmbunătățirea calității suprafețelor expuse prin netezirea rugozităților și, auxiliar, întărirea materialului pe suprafețele active ale pieselor, în condițiile realizării formei impuse.

#### *2.3.5.5. Elaborarea modelelor de material*

Diagramele caracteristice convenționale oferă informații utile în determinarea comportării materialului în regim de solicitare. Utilitatea lor este evidentă, mai ales, la calculul de rezistență și rigiditate pentru structuri.

Pe diagramele caracteristice convenționale, tensiunile și deformațiile sunt definite prin raportare la mărimi constante, aria inițială a secțiunii transversale a epruvetei în cazul tensiunii și lungimea inițială ca referință pentru deformare. Faptul că în timpul deformării epruvetelor cele două mărimi își modifică valoarea, face ca tensiunile și deformațiile din diagramă să capete caracter nereal. Utilizarea nemijlocită a diagramelor caracteristice convenționale în aplicații în care se produc deformații mari este incorectă. Pentru a da caracter real diagramelor care dau dependența tensiunilor de deformații este necesară redefinirea celor două mărimi care intervin: tensiunea și deformația. Astfel, tensiunea se definește prin forța aplicată raportată la valoarea instantanee a ariei secțiunii transversale, pe când deformația se obține prin raportare la lungimea de referință instantanee.

Pornind de la moduri diferite în care sunt definite mărimile tensiune și deformație, diagramele caracteristice convenționale se pot transforma în diagrame caracteristice reale, utile în mecanica solidului deformabil.

În anexa nr.2.2 este prezentată o modalitate aproximativă de conversie a diagramelor caracteristice pentru încercarea de compresiune.

Conversia se bazează pe următoarele ipoteze:

- deformația volumică este elastică și proporțională cu tensiunea medie în consecință mică în raport cu deformațiile totale elasto plastice;
- starea de tensiune în epruveta comprimată se menține monoaxială, fapt ce presupune alunecarea ideală la contactul dintre epruvetă și platoul mașinii.

În realitate, epruveta deformată are formă de butoi cu umflarea relativ mică. Dacă se iau măsuri speciale de lubrificație, umflarea relativă rămâne mică. Pentru epruvetele încercate nu a depășit 5...6%.

Aceste ipoteze permit calculul la volum incompresibil și pe o secțiune transversală mediată pe înălțimea epruvetei, cu raportul dintre volumul constant și înălțime.

În anexa nr.2.2 sunt date relațiile de definiție pentru mărimile convenționale și relațiile de conversie. De specificat că deformația reală este definită ca deformație logaritmică, formă sub care este utilizată în teoria curgerii plastice. În figura din anexa nr.2.2 este arătat și modul în care s-a calculat limita de curgere tehnică (0.2%) a materialului, fiind prezentate și două diagrame caracteristice tipice.

La conversia diagramei convenționale în diagramă reală, pentru solicitarea de compresiune, tensiunile se reduc ca urmare a creșterii ariei secțiunii epruvetei, iar deformațiile cresc din cauza scurtării acesteia.

Folosind metodologia dată în anexa nr.2.2, au fost convertite diagramele caracteristice convenționale la compresiune în diagrame reale pentru cele trei loturi de epruvete încercate. Rezultatul conversiei este arătat în figurile 2.21, 2.22, 2.23. Reprezentările grafice din aceste figuri sunt însoțite de tabele cu valorile tensiunilor de curgere, inițiale și ultima.

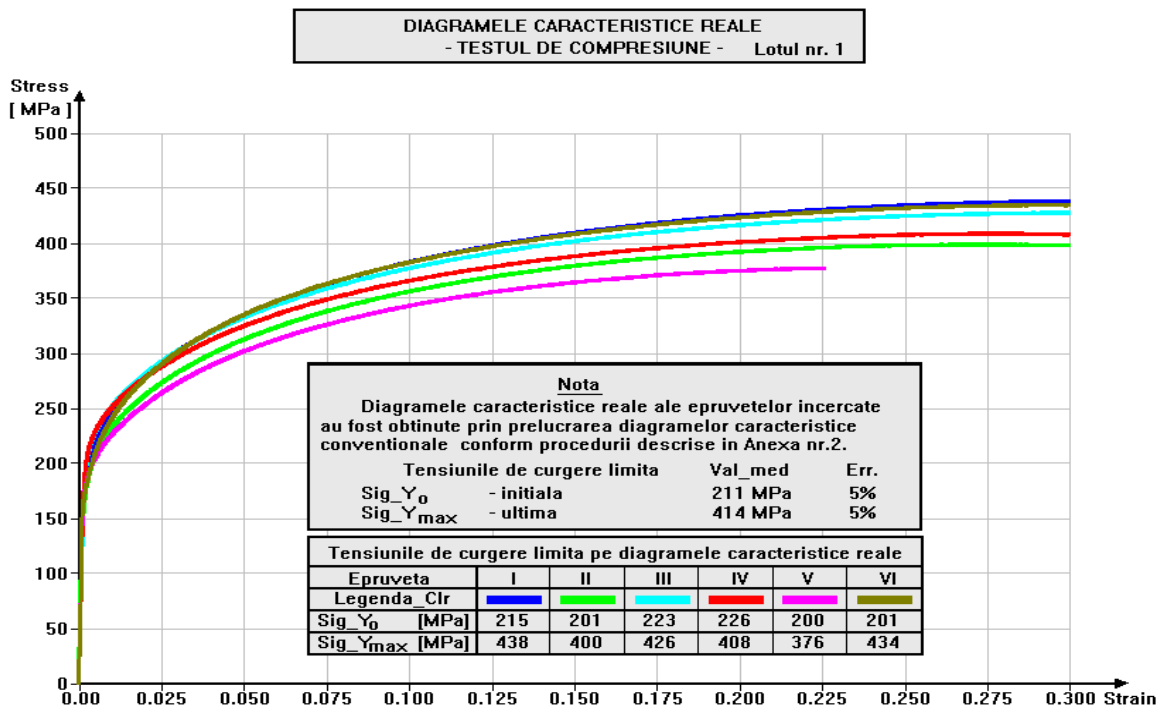


Fig. 2.21. Diagramele caracteristice reale – testul de compresiune – lotul nr. 1.

În plus, sunt date și valorile medii ale tensiunilor de curgere și abaterile pătratice medii pentru fiecare lot încercat.

Concluziile privind dispersia valorilor și diferențele mari de la lot la lot trase în urma analizei diagramelor caracteristice convenționale experimentale, se extind și asupra diagramelor caracteristice reale.

Exprimarea analitică exactă a curbilor de material, necesară la construcția unui model matematic complet, este în cele mai multe situații imposibilă. De aceea, în teoria plasticității se folosesc modele aproximative de material, care cu exprimări matematice simple se pot integra convenabil în modelul matematic.



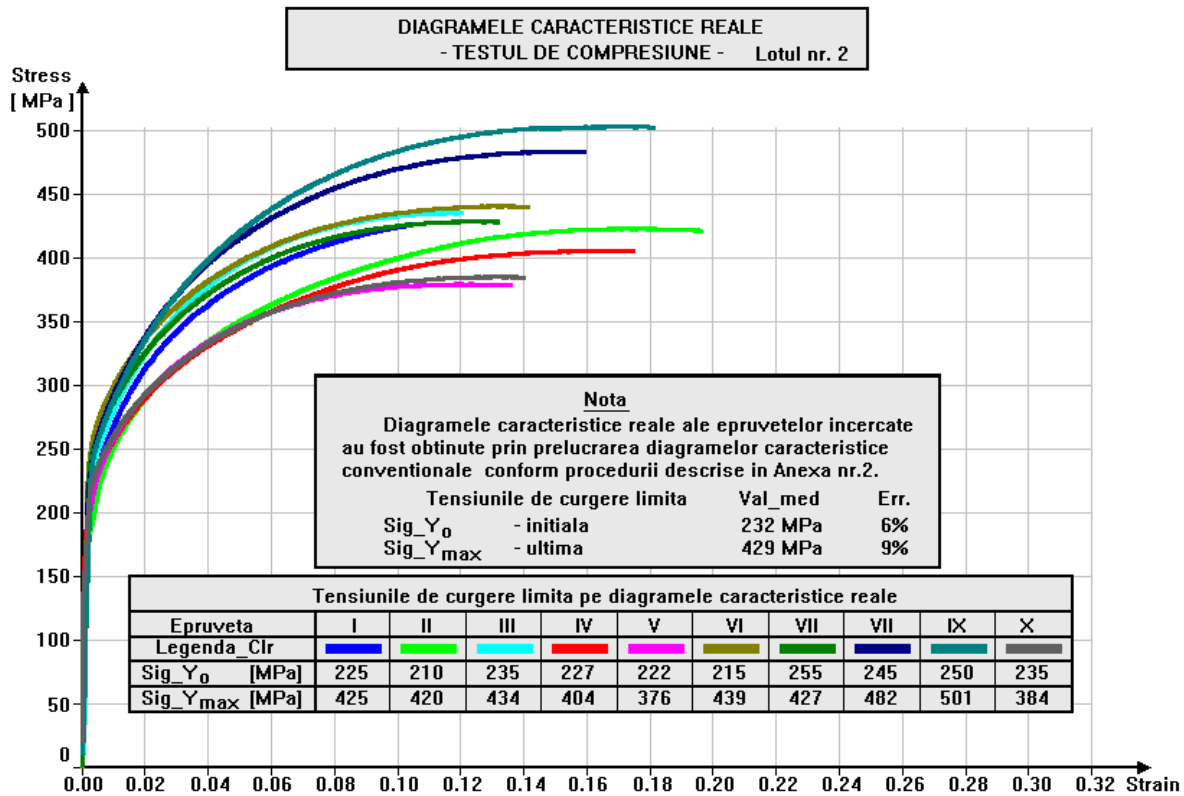


Fig. 2.22. Diagramele caracteristice reale – testul de compresiune – lotul nr.2.

Pe parcurs, pentru materiale plastice au fost construite modele de material, începând cu cele mai simple, dar care au un grad de aproximare scăzut, până la modele complicate, mai exacte. Mai mult timp, pe când soluțiile problemelor de plasticitate se formulau pe cale analitică, se caută modele de material care să conducă la ecuații constitutive cu relații matematice simple și să nu creeze complicații în sistemul global de ecuații. Odată cu dezvoltarea calculului numeric, cu cele două laturi ale sale, hard și soft, posibilitățile de construire a modelelor de material, cu aproximare foarte bună s-au înmulțit.

**Primul model de material elasto plastic**, creat odată cu apariția teoriei plasticității, a fost modelul elasto plastic cu întărire liniară, schematizat în figura 2.24 . Modelul de material elasto plastic biliniar, așa cum se remarcă în figura 2.24, încearcă să aproximeze curba caracteristică reală de material în cele două zone: zona elastică și zona plastică cu segmente de dreaptă. Este evident că aproximarea biliniară introduce erori importante în calcul.

**DIAGramele CARACTERISTICE REALE**  
- TESTUL DE COMPRESIUNE - Lotul nr. 3

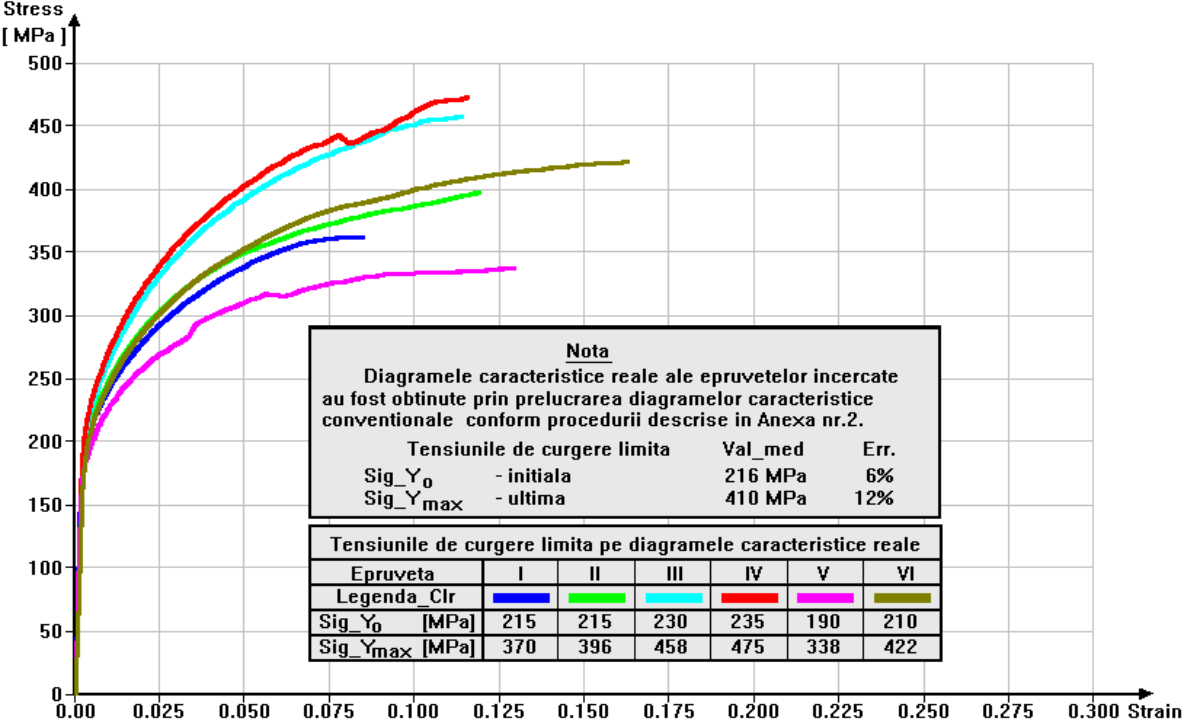


Fig. 2.23. Diagramele caracteristice reale – testul de compresiune – lotul nr.3

**DIAGRAMA CARACTERISTICA REALA A FONTEI TESTATE**  
MODELUL ELSTO-PLASTIC CU INTARIRE LINIARA

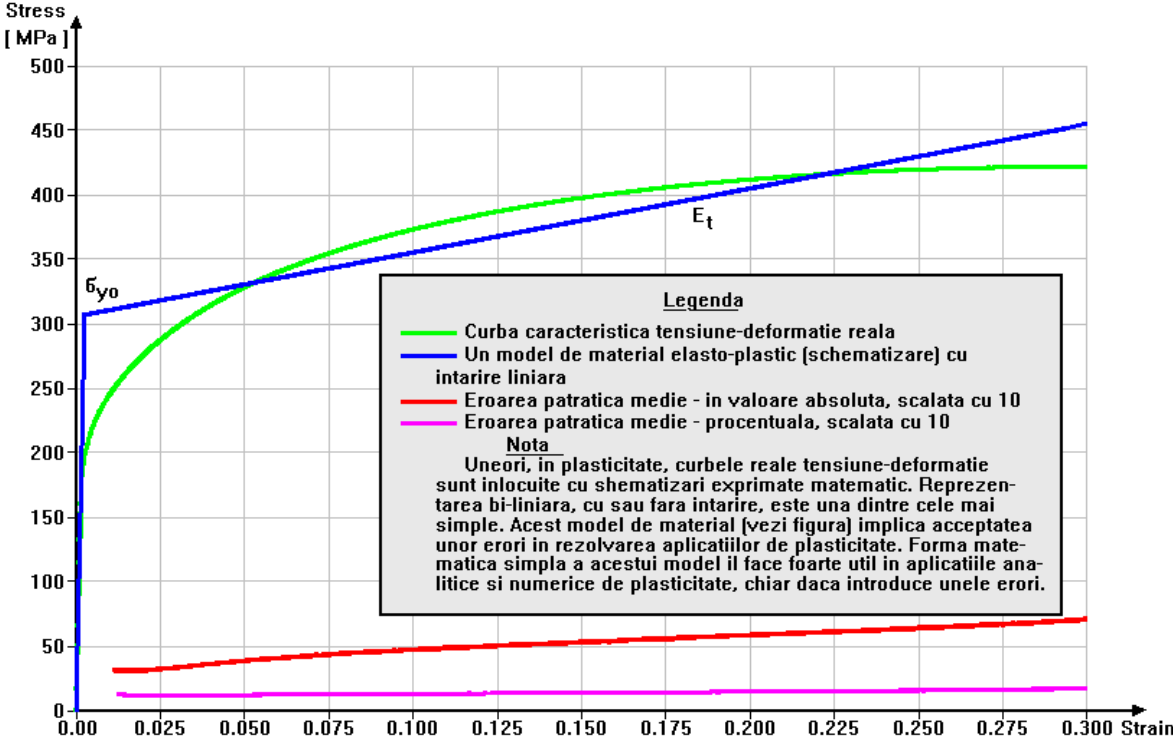


Fig. 2.24. Diagrama caracteristică reală a fontei testate. Modelul elasto plastic cu întărire liniară.

Erorile de calcul induse de acest model se pot reduce dacă la construcția lui se face “cea mai bună aproximare” în sensul minimizării erorii. Se poate obține un câștig de precizie dacă aproximarea se limitează numai la domeniul în care se produc deformațiile. În figura 2.24 aproximarea s-a făcut în ideea că materialul se poate deforma plastic până la rupere. Dacă se poate preevalua pragul până la care materialul se deformează, aproximarea se dezvoltă până la acest prag. Astfel se obține o reducere a erorii. În figură este reprezentată abaterea pătratică medie, absolută și procentuală, multiplicată cu 10.

Forma matematică simplă a acestui model, fie că este cu întărire sau fără, îl face foarte util în aplicațiile analitice și numerice de plasticitate. Acest model de material, se poate exprima numai prin doi parametri:  $\sigma_{y0}$  – limita de curgere inițială și modulul de plasticitate tangent,  $E_t$ . În condițiile de minimizare a erorilor, limita de curgere inițială este crescută artificial. Modulul de plasticitate tangent reprezintă panta drepte care aproximează curba de material în regiunea plastică.

Modelul de material elasto plastic cu întărire liniară sau fără ( $E_t=0$ , modelul Prandtl) se folosește încă, cu succes, în aplicațiile de plasticitate, chiar dacă acestea se fac pe calculator. În condițiile în care este acceptat un nivel de eroare de ordinul procentelor (pentru modelul din fig 2.24, de max 2.5%).

**Al doilea model**, ca importanță practică și istorică, este **modelul exponențial de material plastic**. Acest model figura 2.25 se referă numai la componenta plastică a deformației. În teoria plasticității, așa cum s-a observat în paragraful 2.3.2, se folosește ipoteza separării deformațiilor în două părți: elastică și plastică. Deformațiile elastice se pun în acord cu tensiunile cu ajutorul legii lui Hooke.

Pentru zona plastică, tensiunea pe suprafața de curgere  $\sigma_y$  se exprimă în funcție de deformația plastică efectivă cu ajutorul relației:

$$\sigma_y = A + B \varepsilon_p^n, \quad (2.19)$$

în care A, B și n sunt constante care se determină minimizând erorile de aproximare.

Un caz particular, pentru  $n=1$ , reprezintă modelul liniar de plasticitate, ce corespunde componentei plastice din modelul biliniar Figura 2.24. Pentru modelul liniar de plasticitate, constantele se particularizează astfel,  $A = \sigma_{y0}$ ,  $B = E_t$  și evident  $n=1$ . Și în acest caz, valoarea tensiunii inițiale de curgere este alterată, în sensul creșterii cu scopul reducerii erorii globale. Pentru cazul general, constantele A, B și n se determină pe baza minimizării erorilor de aproximare.

Constanta A se menține la valoarea limitei de curgere inițială, dar o ameliorare a preciziei de calcul, în cazul deformațiilor mari, se poate obține prin ajustarea acestei limite.



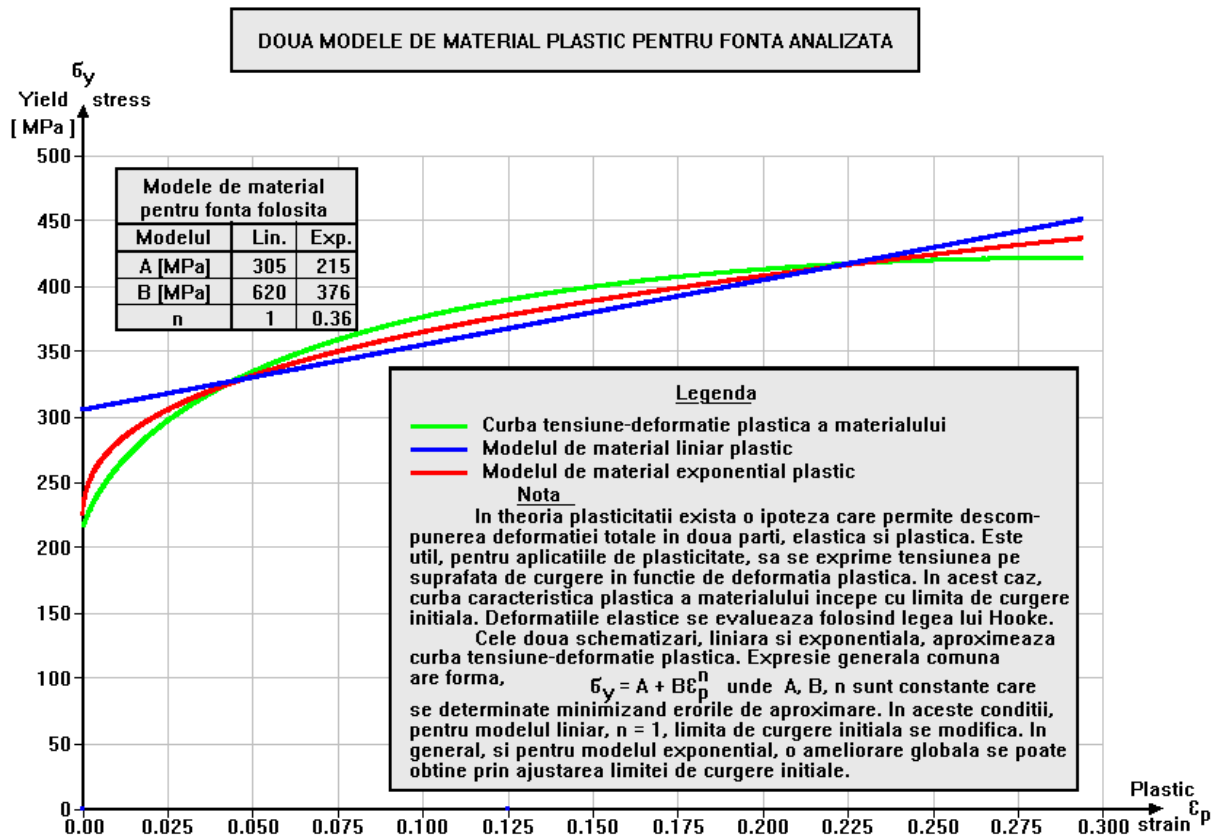


Fig. 2.25. Două modele de material plastic pentru fonta analizată.

În figura 2.26 sunt date rezultatele unui studiu privind amplasarea limitei de curgere inițiale fictive în modelul exponențial. Curba reală stabilită prin date experimentale a fost aproximată exponențial în cinci variante, cu ajustarea limitei de curgere inițiale. Modificarea convenabilă a limitei de curgere inițiale nu are efecte globale în cazul deformațiilor plastice mari. La această concluzie se ajunge dacă se analizează configurația curbelor exponențiale lângă axa tensiunii (fig 2.26), la nivelul tensiunilor de curgere inițiale fictive, unde se constată o suprapunere, până la identificare pe curba reală. În tabelul din figura 2.26 sunt dați parametrii celor cinci variante de aproximare exponențială și erorile de aproximare. Se constată că, pe măsură ce limita de curgere inițială,  $\sigma_{y0}$ , fictivă scade, se produce o ușoară îmbunătățire a preciziei de aproximare.

Pentru menținerea corectitudinii aproximării și în domeniul deformațiilor plastice mai mici, se optează pentru un model exponențial care pornește de la limita de curgere inițială reală.

Multe modele de material, formulate pe parcursul timpului, integrează exprimarea exponențială a comportării materialului. Printre acestea cel mai cunoscut, este reprezentat de modelul Johnson-Cook.

Modelul de material plastic Johnson-Cook definește mai complet tensiunea de curgere  $\sigma_y$ , luând în considerare, pe lângă efectul deformației plastice efective, și efectele vitezei de deformare, și ale temperaturii.

MODELUL EXPONENTIAL DE MATERIAL PLASTIC  
- VARIANTE -

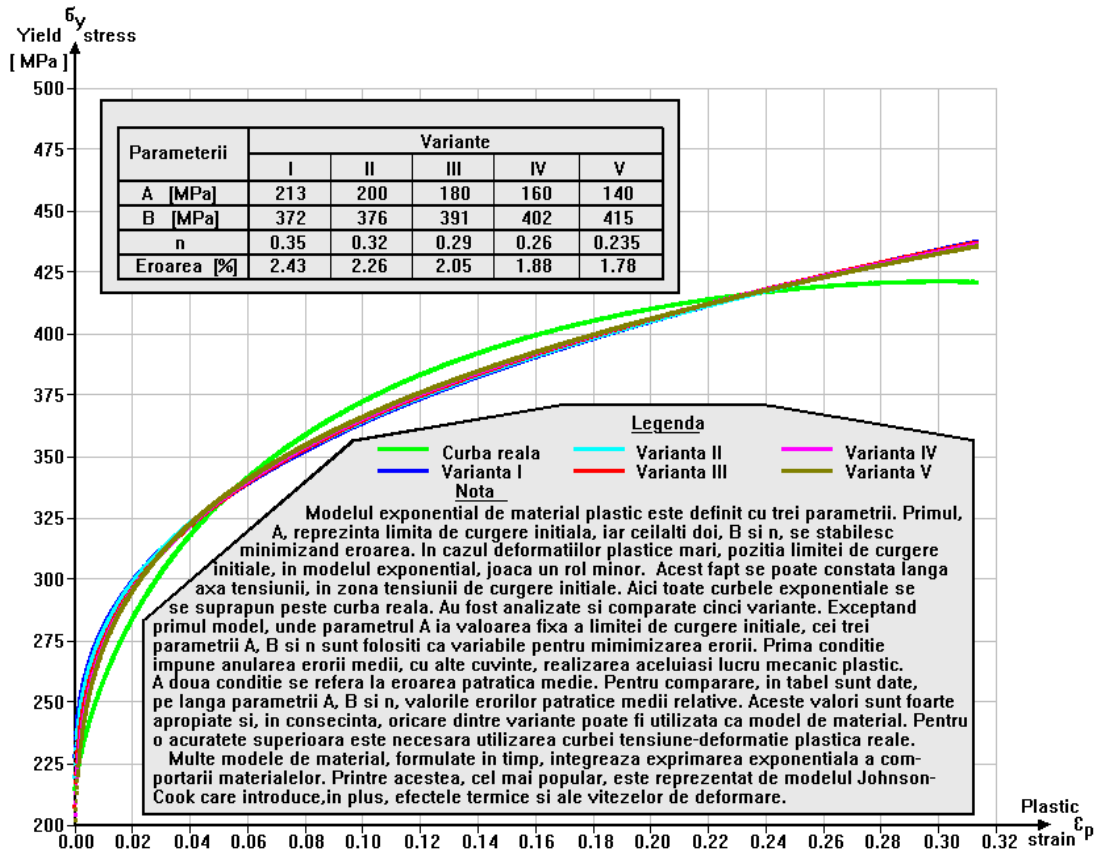


Fig. 2.26. Modelul exponential de material plastic – variante.

Modelul de plasticitate Johnson-Cook se exprimă prin ecuația constitutivă:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n) \left[ (1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_c}{T_{top} - T_0} \right)^m \right] \quad (2.20)$$

în care:

- prima paranteză din membrul drept este componenta exponențială deja definită;
- A, B, C sunt coeficienți;
- $T_0$  și  $T_{top}$  reprezintă temperatura mediului, respectiv, temperatura de topire a materialului;
- $\varepsilon_p$  este deformația plastică efectivă;
- $\dot{\varepsilon}_p$  este viteza de deformare plastică – rata deformației plastice;
- $\dot{\varepsilon}_0$  este viteza de deformare de referință, stabilită în funcție de unitatea de măsură a timpului (când timpul se măsoră în secunde,  $\dot{\varepsilon}_0 = 1s^{-1}$ );
- n și m sunt exponenți;
- T este temperatura materialului.

Modelarea materialului plastic cu ecuația constitutivă (2.20) presupune existența unei baze experimentale de date, achiziționate prin încercări complexe de material. Mașinile actuale de încercat materiale au posibilitatea de a cuantifica atât influența temperaturii, cât și a vitezei de deformare

asupra stării plastice a materialului. Bineînțeles, aceste posibilități sunt limitate atât în ce privește viteza de deformare, cât și temperatura. Sunt însă, instalații și teste speciale care extind aceste posibilități. Pentru nevoile aplicațiilor din cadrul tezei de doctorat, mașinile de încercat actuale (de exemplu INSTRON) pot fi folosite pentru completarea bazei de date necesare stabilirii valorilor tuturor coeficienților modelului Johnson-Cook.

Pentru ca modelul Johnson-Cook să funcționeze în toate situațiile practice de deformare plastică, acesta este asociat cu o ecuație de stare, care leagă presiunea de deformația volumică și de energia internă, similară, de exemplu, cu ecuația de stare a gazelor perfecte.

Există și un model Johnson-Cook simplificat, în care se renunță la efectul termic și la ecuația de stare (este exclusă ultima paranteză din relația 2.20).

Acest model este utilizat cu succes în cazul deformărilor plastice cu viteze nu prea mari și fără surse de căldură importante. Modelul de material plastic simplificat Johnson-Cook corespunde foarte bine proceselor tehnologice de prelucrare la rece a metalelor, mai ales dacă se iau măsuri pentru lubrificare și răcire. Materialul prelucrat în cadrul procesului tehnologic de netezire cu ecrusare, care respectă condițiile de mai sus, se poate modela foarte bine prin modelul de material plastic simplificat Johnson-Cook. Deoarece în timpul aplicării procedurii presiunea (tensiunea medie) nu are valori excesive, se renunță la ecuația de stare.

Modelele de materiale plastice prezentate sunt modele simple, cu ecuații constitutive ușor de implementat în sistemul general de ecuații care descriu stările solidului deformabil, dar care au un grad de aproximare mai mic sau mai mare, ce generează erori ale soluțiilor, în mare specificate în tabelele care însoțesc diagramele caracteristice, fiind evaluate pentru materialul supus testelor mecanice.

Reducerea erorilor de aproximare este posibilă dacă se folosesc modele de material plastic, care în reprezentare grafică se suprapun mai bine pe curba caracteristică plastică tensiune-deformație. Aproximarea poliliniară satisface, în bună măsură, condiția de reducere a erorilor de aproximare (fig.2.27). Modelele de material plastic poliliniare (cu mai mult de două segmente) se utilizează numai pentru calculul numeric. Aceste modele se realizează prin aproximarea curbei caracteristice plastice cu o linie poligonală cu mai multe segmente, definită prin puncte. Numărul de segmente se alege în funcție de precizia dorită și de capacitatea programului folosit pentru simularea numerică. Pentru satisfacerea nevoilor practice de precizie, se consideră că o aproximare în opt puncte este suficientă în condițiile minimizării erorilor. Nu există, însă, nici o restricție asupra numărului de segmente. Astfel, se poate utiliza pentru zona plastică un singur segment, similar modelului liniar (fig.2.25), sau se poate utiliza chiar curba tensiune deformație plastică, sub formă digitală, așa cum a fost obținută după prelucrarea datelor experimentale, ajungându-se la reprezentări în mii de puncte.

Expresia cantitativă a modelului poliliniar de plasticitate este dată de șirul de perechi de valori deformație-tensiune. În rutina de calcul, valoarea tensiunii de curgere se obține prin interpolare liniară, pentru valoarea dată a deformației plastice.

În figura 2.27 sunt expuse exemple de modele de material plastic poliliniar, tabelul perechilor de valori tensiune de curgere-deformație plastică ce corespund celor două fonte analizate.

Exceptând modelele Johnson-Cook, toate celelalte modele prezentate sunt modele în care tensiunea de curgere este dependentă numai de deformația plastică efectivă.

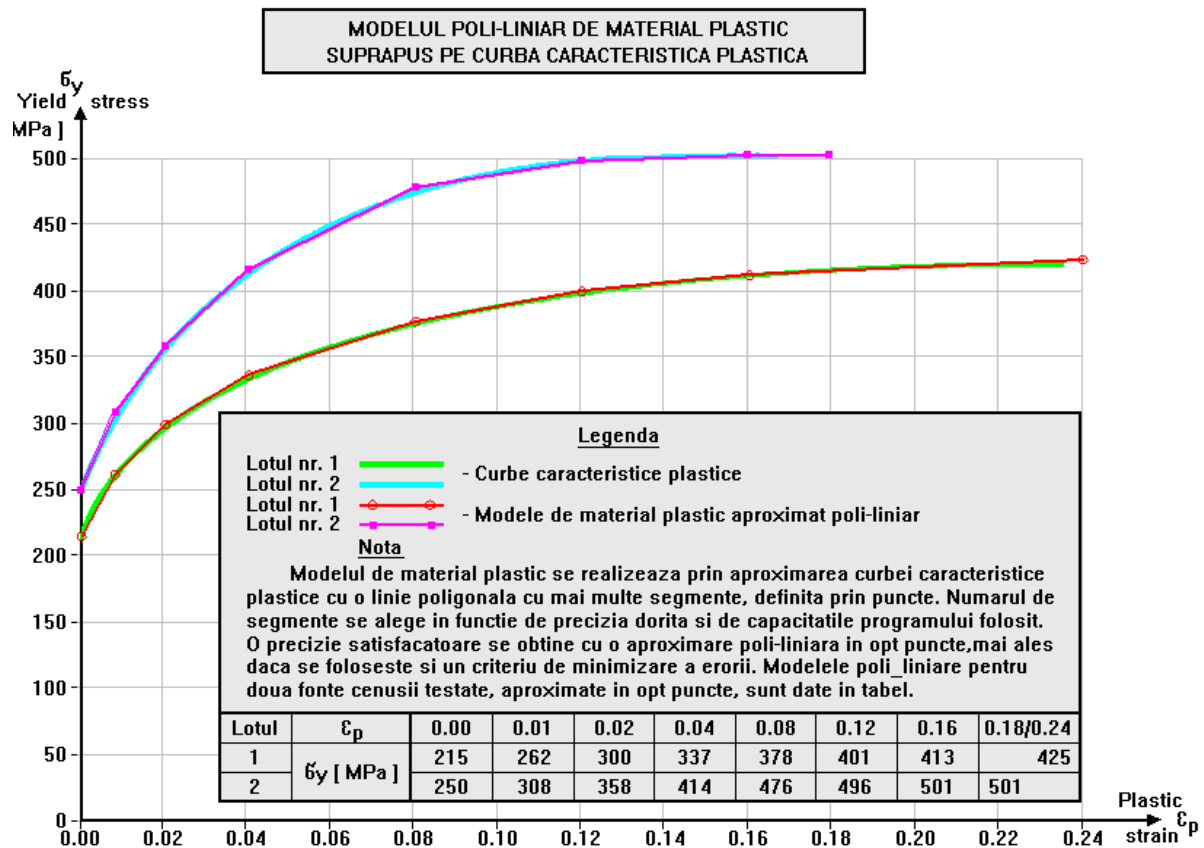


Fig. 2.27. Modelul poliliniar de material plastic suprapus pe curba caracteristică plastică

Pentru toate modelele liniare, o modalitate de luare în calcul a efectelor vitezei de deformare (rata deformațiilor) asupra tensiunii de curgere, este de a folosi multiplicatorul Cowper-Symond, de regulă în forma:

$$1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{C}\right)^{1/p}, \quad (2.21)$$

în care  $\dot{\epsilon}_p$  este viteza de deformare plastică efectivă, C și p fiind parametrii materialului.

Multiplicatorul Cowper-Symond poate fi folosit fie la scalarea tensiunii de curgere,

$$\sigma_y(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p) = \sigma_y(\epsilon_p) * \left[ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{C}\right)^{1/p} \right], \quad (2.22)$$

fie la decuplarea expresiei tensiunii de curgere

$$\sigma_y(\varepsilon_p, \varepsilon_p) = \sigma_y(\varepsilon_p) + \sigma_{y_0} \left( \frac{\varepsilon_p}{C} \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (2.23)$$

Expresia (2.23) reprezintă o ecuație constitutivă a vâscoplasticității definită de ecuația (2.2).

Utilizarea în modelarea vâscoplastică a ecuației (2.23) mărește efortul de calcul prin dezvoltarea în proces a deviatorului vitezelor de deformare, în comparație cu modelul dat de ecuația (2.22), unde operația de calcul se reduce la o simplă multiplicare.

### ***2.3.6. Alegerea, verificarea și validarea modelului de material folosit în operațiunile de simulare a procesului tehnologic de deformare plastică la rece de netezire cu ecruisare a pieselor de fontă din structura agregatelor de turnare a sticlei***

Analiza comparativă a modelelor de material descrisă în paragraful anterior evidențiază avantajele modelului poliliniar:

- simplitate;
- exprimare matematică prin puncte cu interpolare liniară;
- cea mai buna aproximare a curbei reale tensiune de curgere–deformație plastică;
- baza de date completă.

În consecință, pentru aplicațiile de simulare a procesului de netezire cu ecruisare a fontei cenusii F<sub>c</sub>10 se va utiliza numai modelul poliliniar cu datele din tabelul care însoțește figura 2.27.

Deoarece pe parcursul prelucrării datelor experimentale s-au introdus unele ipoteze simplificatoare de calcul (anexa nr.2), este necesar ca modelul de material să fie verificat. Verificarea modelului se face chiar pe probele de compresiune de la care au provenit datele pe bază cărora s-a construit epruveta I din lotul de teste nr.1 și epruveta IX din lotul de teste nr.2, de la care se rețin, pentru comparare, următoarele date:

- forța maximă: 45.13kN; 47.91kN;
- cursa 1 la forța maxima: 5.2mm; 4.1mm;
- diametrul suprafeței de așezare: 10 mm;
- după test: valoarea medie 11.2mm.

S-a reprodus, prin simulare numerică, testul de compresiune pe un model axial simetric, care va fi precizat cu detalii într-o altă secțiune a capitolului.

Figura 2.28 redă modelul simplificat al testului de compresiune pe epruveta I din lotul nr.1.

Epruveta simulată a fost dispusă între cele două platane ale mașinii de încercat la compresiune, platanul inferior fix și platanul superior mobil, acționat prin interfața rigidă. Controlul încărcării epruvetei s-a făcut în deplasări, imprimându-se platanului mobil o viteză de deplasare similară cazului

experimental. Răspunsul static al probei simulate s-a reținut în forma curbei forță-deplasare. Curbele forță-deplasare, pentru ambele teste simulate numeric, sunt reprezentate în figura 2.29, împreună cu cele reale, înregistrate de mașina de încercări în timpul testării epruvetelor I din lotul nr.1 și IX din lotul nr.2.

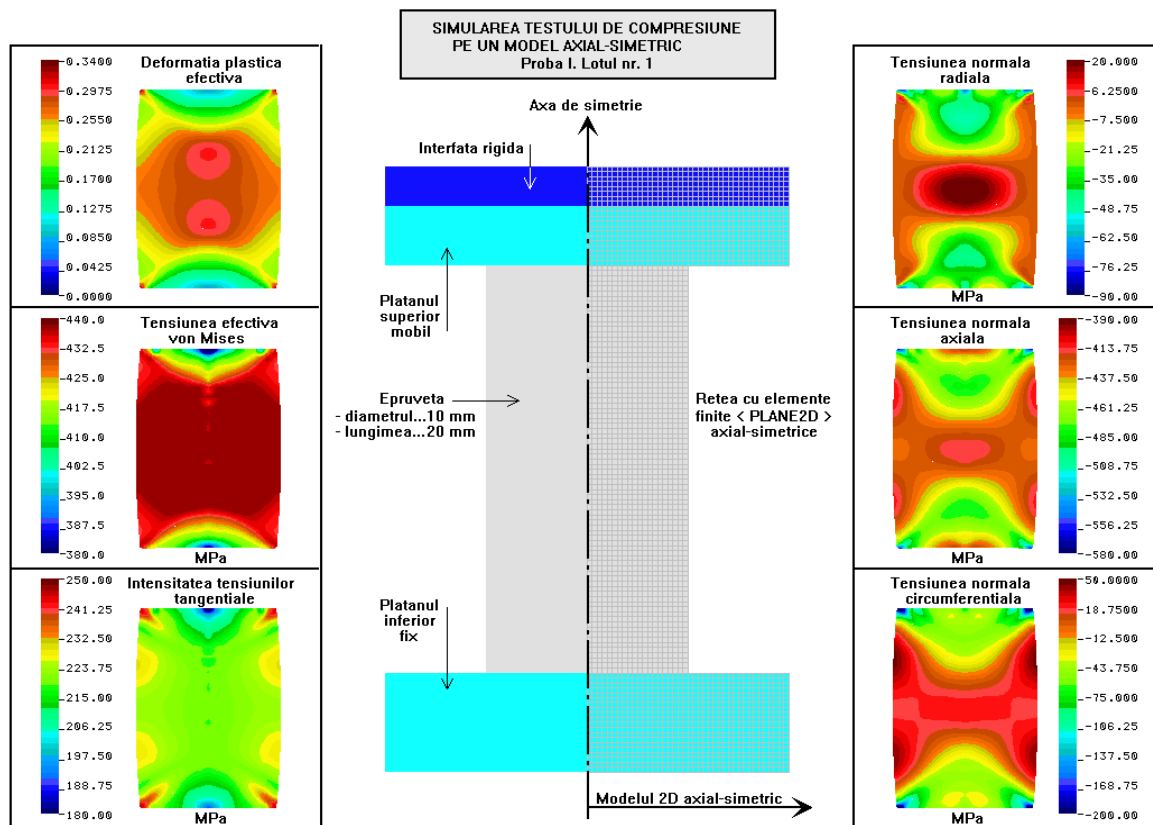


Figura 2.28. Simularea testului de compresiune pe un model axial-simetric. Proba I. Lotul nr. 1.

*Diferențele constatate dintre reprezentările simulate și cele reale s-au compensat prin ajustarea valorilor care definesc modelele de material, respectând procedura de simulare numerică. După prima ajustare, s-a realizat suprapunerea satisfăcătoare a curbelor simulate peste cele reale, exceptând zona de pierdere a stabilității plastice a materialului.*

Modelele de material plastic, corectate, cu datele din tabelul din figura 2.29 sunt cele care urmează a fi folosite în continuare.

În procesul de comprimare a epruvetei între platanele mașinii de încercat, pe suprafețele de contact, pe lângă presiunile transmise, acționează și forțele de frecare distribuite.

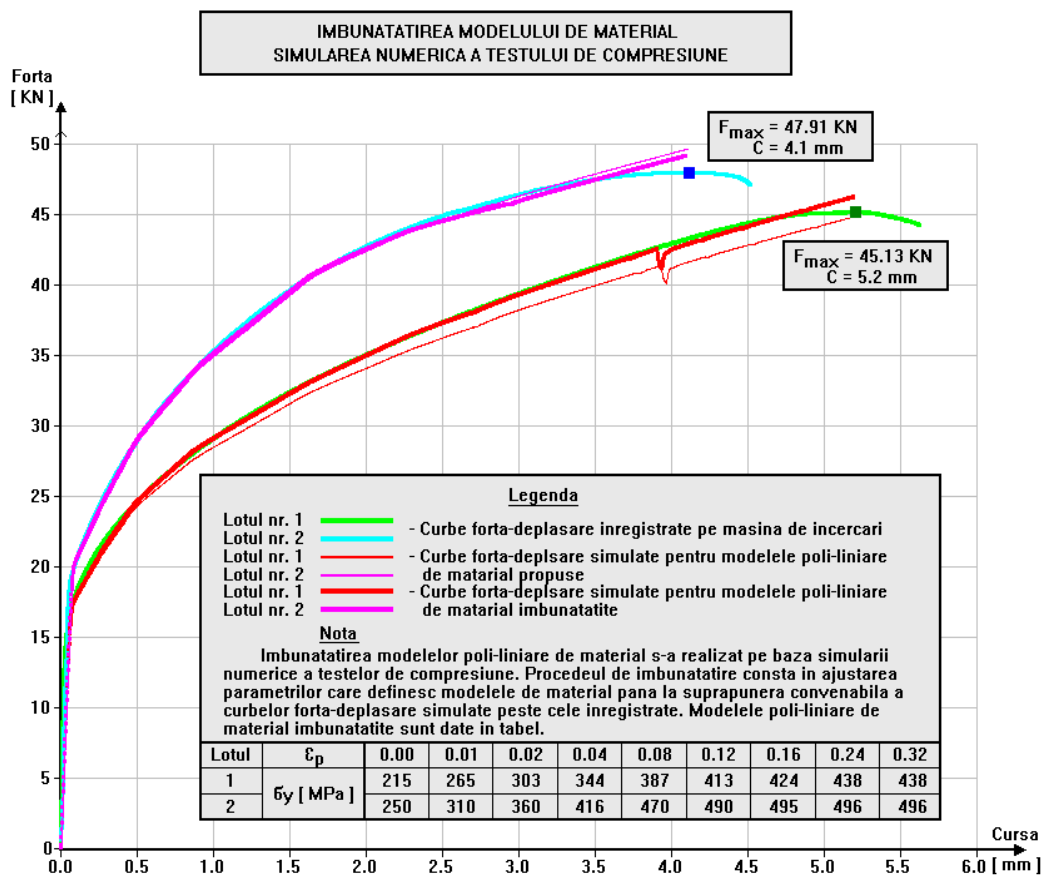


Fig. 2.29. Îmbunătățirea modelului de material. Simularea numerică a testului de compresiune.

Câmpurile de tensiune din epruvetă, așa cum sunt cele reprezentate în figura 2.28, sunt influențate de forțele de frecare, respectiv de valoarea coeficientului de frecare. În practică, pentru diminuarea influenței forțelor de frecare se utilizează o vaselină siliconică cu grafit.

Pentru că simularea numerică a compresiunii să fie fidelă experimentului, a fost necesară o evaluare a coeficientului de frecare pe suprafețele de contact. Determinarea valorii coeficientului de frecare s-a realizat prin simulări numerice repetate, cu coeficienți de frecare diferiți, aleși în ordine crescătoare, pornind de la o valoare plauzibilă minimă, de 0.02, și urmărind diametrul secțiunii de contact în starea finală, a cărui valoare medie, măsurată pe epruvetele încercate (fig. 2.30), este de 11.2mm. Coeficientul de frecare în simulări care conduce la aceeași valoare este 0.08. Această valoare a coeficientului de frecare a fost folosită ca dată de intrare în toate simulările testelor de compresiune.

Un parametru definitoriu al modelului de material ar trebui să fie deformația efectivă plastică la cedare. Acest parametru condiționează limitele proceselor tehnologice de prelucrare plastică. Deformația la rupere determinată experimental prin testul de compresiune este o mărime convențională utilizată, mai ales, în calculul structurilor. Valoarea stabilită experimental pentru acest parametru este foarte puternic influențată de condițiile de testare. O determinare ideală s-ar realiza în condițiile absenței forțelor de frecare și a unei geometrii perfecte. În această situație ideală, s-ar produce în epruvetă o stare de solicitare monoaxială cu câmp de tensiune normală axială uniformă. Simularea

numerică a testului de compresiune scoate în evidență situația reală a câmpurilor de tensiune, într-o aplicație în care s-a utilizat pentru coeficientul de frecare valoarea 0.08 stabilită anterior.

Reprezentările câmpurilor de tensiune, pentru o sarcină de 98% din forța maximă, din figura 2.28, neomogene și puternic distorsionate, arată cât de importantă este frecarea la interfață, consecința acesteia - forma de butoi pe care o ia epruveta deformată. Cel mai important lucru care se constată la analiza tensiunilor este existența unor puternici concentratori de tensiune plasați pe frontierele suprafețelor de contact (pe muchii). În zonele concentratorilor, deformația plastică efectivă și intensitatea tensiunilor tangențiale (tensiune tangențială maximă) iau valorile maxime,



a)





b)

Fig. 2.30. Reprezentarea epruvetelor după încercări: a) la compresiune; b) la tracțiune.

asigurând condițiile de amorsare a fracturii de cedare. Toate cele șase reprezentări de tensiune din figura 2.28 prefigurează apariția unei suprafețe de alunecare orientată aproximativ la  $45^\circ$  față de axa epruvetei. Epruvetele distruse din figura 2.30 evidențiază tocmai acest fapt.

Această analiză a rezultatelor simulării numerice a testului de compresiune conduce la concluzia că cedarea epruvetei se produce nu din cauză că s-ar fi epuizat capacitatea sa naturală de rezistență, ci din cauza concentratorului de tensiune de pe frontieră. Astfel, testul de compresiune dă numai un prag inferior deformației la rupere a materialului. În consecință, valoarea deformației plastice efective la rupere rămâne nedeterminată după testele de compresiune. În continuare, în locul efectuării unor teste complexe și costisitoare pentru găsirea acestui parametru, se folosește metoda empirică a corelării valorii deformației la cedare a materialului cu rezultatele modelelor experimentale și simulate ale proceselor tehnologice de deformare plastică.

Efectele dinamice, precum cel al vâscozității materialului, sunt introduse în calcul prin coeficientul  $C$  din ecuația constitutivă Johnson-Cook (2.20) sau prin coeficienții  $C$  și  $p$  din ecuațiile constitutive (2.23) și (2.24).

Testele pentru răspunsul dinamic al materialelor se fac pe instalații speciale. Există puține locuri unde se pot efectua asemenea teste.

Deoarece componența dinamică în procesul tehnologic de netezire cu ecrusare este minoră, s-a considerat că efortul pentru realizarea încercărilor dinamice nu este justificat. S-a preferat metoda de achiziționare a datelor din literatura disponibilă. Practic, au fost găsite date pentru coeficientul C al ecuației constitutive Johnson-Cook pentru materialele apropiate fontei cenușii. Astfel, pentru fier C.E. s-a găsit valoarea  $C=0.055$ , iar pentru fier moale – ARMCO,  $C=0.060$ .

În lipsa altor informații, pentru fonta cenușie s-a adoptat valoarea  $C=0.06$ . Efectul vâscozității din ecuația constitutivă Johnson-Cook  $(1 + C \ln \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0})$  se poate transpune aproximativ în expresia Cowper-Symond  $1 + (\frac{\epsilon_p}{c})^{1/p}$ . Pentru gama vitezelor de deformare de la  $1s^{-1}$  la  $1000 s^{-1}$  s-au găsit următoarele valori:

$$C=7200s^{-1} \text{ și } p=3.32.$$

Cu aceste valori s-au completat modelele de material plastic poliliniare formulate pentru fonta cenușie utilizată în aplicațiile reale și simulate numeric în teza de doctorat.

Punerea în evidență a efectului vâscozității materialului s-a făcut simulând deformarea unui singur element finit, în condițiile menținerii constante a vitezei de deformare.

Deoarece deformația logaritmică are expresia

$$\epsilon = \ln \frac{l}{l_0} , \quad (2.24)$$

în care  $l_0$  este o lungime de referință inițială, iar  $l$  este lungimea la un moment dat, pentru menținerea constantă a vitezei de deformare, obținută prin derivarea relației (2.24), avem forma:

$$\epsilon = \frac{v}{l} , \quad (2.25)$$

unde  $v$  este viteza relativă dintre cele două fețe opuse ale elementului în momentul considerat. Este necesar ca această viteză relativă să varieze în timp după legea exponențială:

$$v = v_0 e^{-st} . \quad (2.26)$$

În relația (2.26),  $v_0$  este viteza relativă inițială, iar viteza de deformare  $\dot{\epsilon}$  este considerată în mărime absolută, făcând abstracție că solicitarea este de compresiune.

Legea vitezei (2.26), în aplicațiile experimentale, practic, nu se poate aplica, însă pentru simulările numerice aceasta își dovedește utilitatea.

Efectul vâscozității materialului asupra răspunsului dinamic al materialului, obținut prin simulare numerică pentru vitezele de deformare  $1s^{-1}$ ,  $10s^{-1}$ ,  $100s^{-1}$  și  $1000s^{-1}$ , este prezentat în formă grafică în figura 2.31. Reprezentările grafice din figura 2.31 nu sunt altceva decât concretizări ale modelului de material vâscoelastoplastic tipic (fig.2.05) pentru fontele cenușii folosite în structura sistemelor de prelucrare a sticlei.

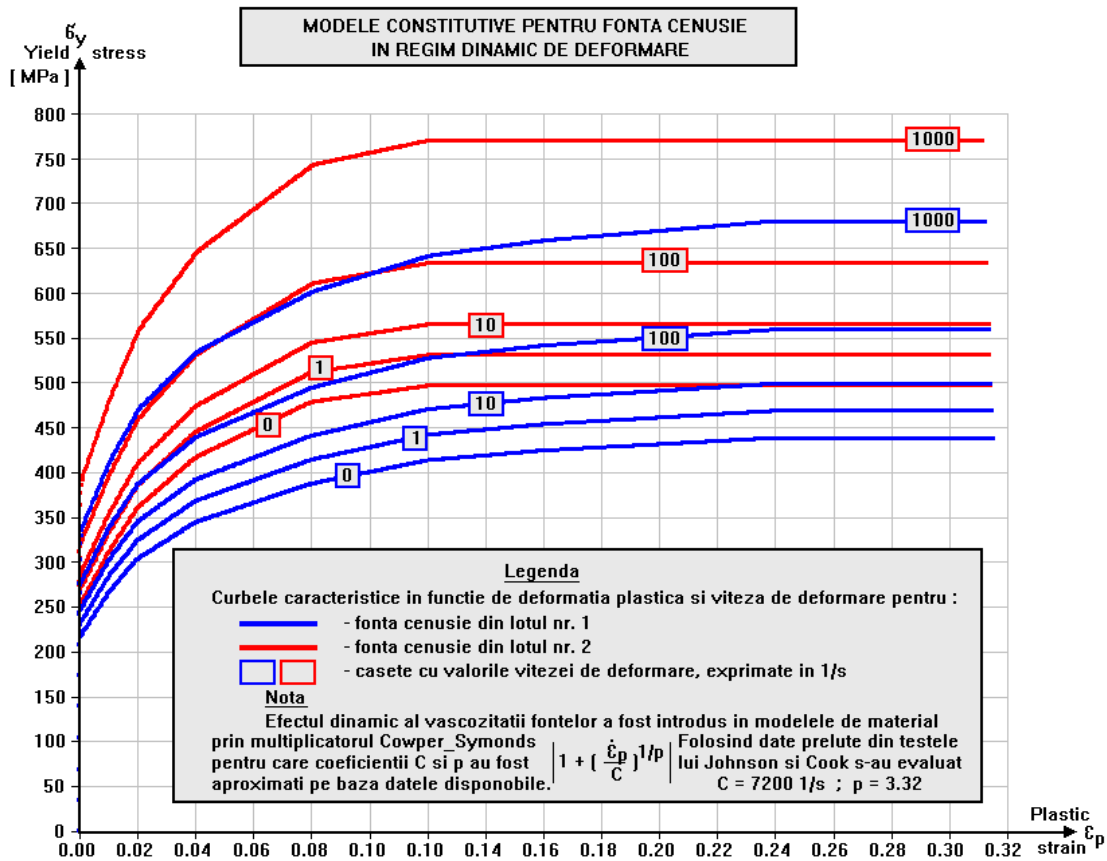


Fig. 2.31. Modele constitutive pentru fonta cenușie în regim dinamic de deformare

#### 2.4. Obiectivele de formare a peliculelor de grafit pe suprafețele lor active cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls

Descărcările electrice în impuls sunt aplicate larg în durificarea suprafețelor pieselor de mașini și aparate datorită proprietăților unice care le posedă: ele permit prelucrarea strict localizată fără necesitatea de a proteja restul suprafeței; suprafața supusă prelucrării nu necesită pregătire preliminară; piesa nu este supusă supraîncălzirii în procesul de formare a stratului; ele oferă o aderență înaltă a stratului format la suprafața prelucrată a piesei și posibilitatea utilizării cu scopul formării straturilor de suprafață din diferite materiale etc. [2, 3, 4]. După cum se arată în [1], în prezent, metoda de prelucrare prin electroeroziune s-a divizat în două direcții: prelucrarea dimensională cu prelevarea de material și alierea suprafețelor, ceea ce conduce la formarea straturilor de depunere. Aceste procese sunt acompaniate cu fenomene termice și termochimice ce se produc în materialul piesei sub influența canalului de plasmă a descărcărilor electrice în impuls.

Procesul de durificare ca rezultat al aplicării descărcărilor electrice în impuls asupra suprafețelor metalice se bazează pe efectul eroziunii electrice și transferului polar al materialului anodului pe suprafața catodului la străpungerea interstițiului dintre ele. Aceasta asigură posibilitatea de formare a straturilor superficiale cu proprietăți fizico-chimice deosebite pe suprafața piesei supuse prelucrării [1].

Pentru prelucrarea suprafețelor în conformitate cu această metodă au fost utilizate diferite materiale conductoare de electricitate, unul dintre care este grafitul.

În articolele [5, 6, 7] se demonstrează că eroziunea grafitului tehnic pur diferă foarte mult în comparație cu materialele metalice. În cazul când electrodul-sculă din grafit este conectat în circuitul de descărcare în calitate de catod, acesta erodează mai intensiv, iar pe suprafața piesei-anod se formează pelicula subțire. Însă, în cazul când acesta se conectează în calitate de anod, influențează asupra modificării microdurității stratului superficial, micșorând rugozitatea suprafeței.

Așadar, pentru durificarea mai favorabilă a straturilor de suprafață din oțeluri, a fost utilizată schema electrică a generatorului de impulsuri descrisă în [7, 8].

Aceasta permite generarea impulsurilor bipolare de descărcare.

Unele lucrări propun modele fizice de prelucrare cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls în regim de contact electric, iar altele în regim de subexcitare cu diferiți electrozi. În continuare se propune un model fizic în care grafitul este conectat în circuitul de descărcare a generatorului de impulsuri în calitate de catod, iar în procesul de prelucrare polaritatea lui se schimbă.

#### ***2.4.1. Conceptul de eroziune a grafitului***

Conceptul modelului fizic pornește de la analiza datelor experimentale obținute anterior de autorii lucrărilor [8, 9] în care demonstrează că eroziunea mai pronunțată a grafitului are loc în cazul când electrodul din grafit este conectat în circuitul de descărcare a generatorului de impulsuri de putere în calitate de catod.

Dacă luăm în considerație că eroziunea electrodului din grafit este mai puternică când acesta este conectat în calitate de catod, atunci căderea de tensiune pe suprafața lui este mai considerabilă. În timp ce căderea de tensiune crește pe suprafața electrodului-catod, crește și cantitatea de energie ce se degajă pe suprafața lui.

În conformitate cu teoria clasică a electroeroziunii, materialul este prelevat de pe suprafața anodului în formă de ioni pozitivi, pe când suprafața catodului în principal emite electroni. Aceasta nu se referă la electrozi-catod din grafit.

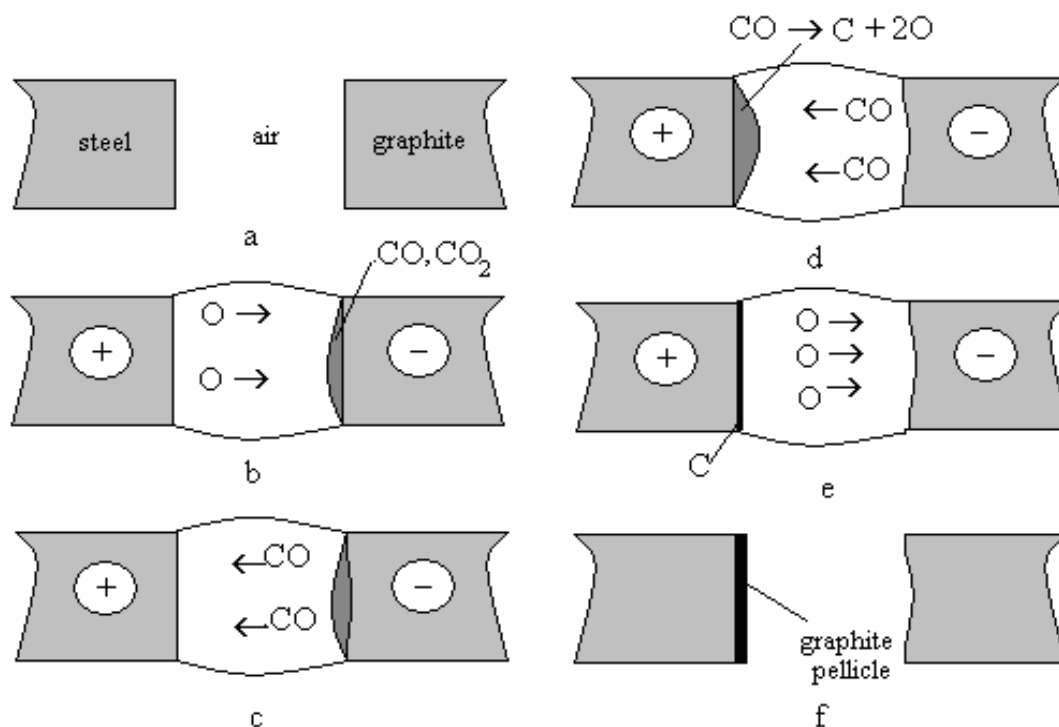
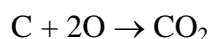
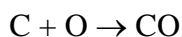


Fig. 2.32. Modelul fizic de formare a peliculei de grafit pe suprafețele pieselor sub acțiunea descărcărilor electrice în impuls: a) starea inițială a electrozilor; b) formarea oxidului și bioxidului de carbon; c) electrizarea moleculelor de gaz; d) disocierea moleculelor de gaz; e) formarea peliculei de grafit și a oxigenului; f) starea finală a electrozilor.

În cazul în care ne referim la faptul că procesul de eroziune electrică este unul de natura electrochimică ce are loc la temperaturi înalte, atunci putem presupune că au loc procese de recombinare și disociere atât pe suprafețele electrozilor (anodului și catodului), cât și în canalul de plasmă.

Luând în considerație condițiile reale de tratare termică sau termo-chimică putem presupune că au loc reacțiile de oxidare datorită faptului că oxigenul din canalul de plasmă interacționează mai intensiv cu suprafețele electrodului-catod. În conformitate cu aceste reacții se formează oxidul de carbon CO și posibil bioxidul de carbon CO<sub>2</sub> (figura 2.32,b):



Procesele de oxidare a grafitului pe suprafața catodului sunt confirmate de rezultatele obținute de autorii lucrărilor [7-9] în care sunt descrise procesele de oxidare a suprafețelor metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Oxidul de carbon se electrizează negativ în plasma descărcărilor electrice în impuls prin preluarea unui electron și este supus prelevării spre suprafața piesei-anod. (figura 2.32, c).

Datorită faptului că energia ce se degajă pe suprafața anodului este mai mare decât cea în interstițiu, moleculele de gaz se disociază în ioni de carbon și oxige (figura 2.32, d).

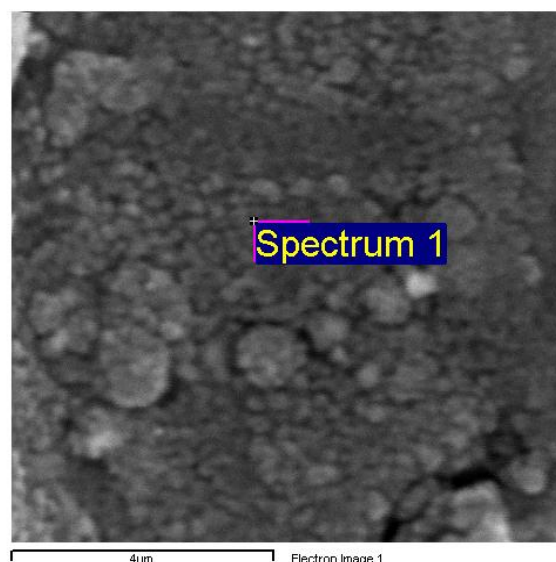
Ioni de oxigen se întorc în canalul de plasmă și din nou participă în oxidarea suprafeței catodului, iar cei de carbon recombina pe suprafața anodului cu formarea peliculei de grafit (figura 2.32, e).

În continuare, pelicula de grafit formată pe suprafața piesei sub influența căldurii emisă la interfață cu plasma din canalul de plasmă este supusă procesului de difuzie în suprafața piesei cu formarea stratului durificat. Nu este exclusă și eroziunea unei cantități de grafit de pe suprafața piesei în faza finală.

#### 2.4.2. Aplicarea practică a ipotezei

Pentru a confirma ipoteza propusă am cercetat formarea peliculelor de grafit pe suprafețele plonjoarelor formelor de turnare a sticlei. Analiza morfologiei suprafeței a arătat că formațiunile pe suprafață nu depășesc dimensiunile micrometrice. Pe lângă componentele inițiale ale materialului supus prelucrării, în stratul superficial se atestă o cantitate considerabilă de carbon (circa 80% atomic). Acesta nu este în stare liberă, ci este un conector în structura metalică ce formează carburile. Acesta poate exista, de asemenea, în structuri separate așa ca grafitul. Dacă analizăm figura 2.34, am putea constata că marea majoritate a carbonului transferat pe suprafața piesei se atestă la adâncimi micrometrice. Aceasta permite să concludem că fazele de carburi și grafit pot fi formate separat.

Cele menționate mai sus se confirmă prin rezultatele obținute la încercarea plonjoarelor în condiții reale de exploatare la Fabrica de Sticlă din Chișinău. Suprafețele active ale plonjoarelor formelor de



Tabelul 2.3

Element	Masa%	Atomic %
C K	54.06	80.71
O K	4.75	5.32
Al K	0.92	0.61
Si K	1.05	0.67
S K	0.36	0.20
Mn K	0.70	0.23
Fe K	38.16	12.25
Totals	100.00	

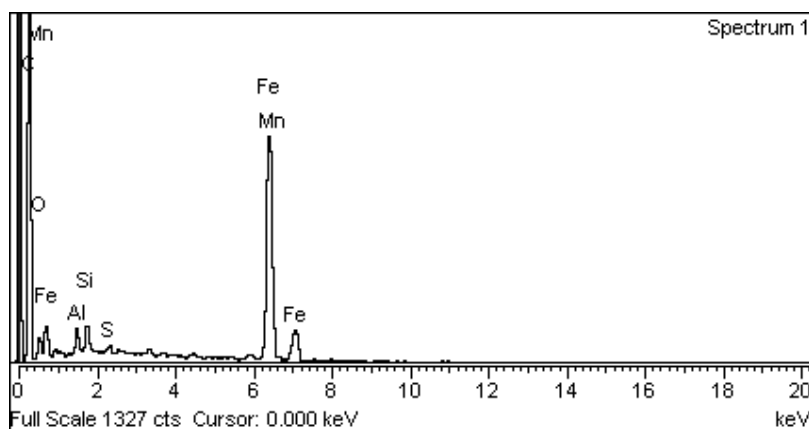


Fig. 2.33. Morfologia și compoziția chimică a suprafeței

turnare a sticlei au fost acoperite cu pelicule de grafit. Aceste plonjoare au

funcționat 57600 de cicluri fără schimbarea formei și dimensiunilor. Sporirea rezistenței la uzură a acestor piese poate fi explicată din două puncte de vedere: pe de o parte, pelicula de grafit servește ca unguent solid care nu permite aderarea sticlei lichide pe suprafață, iar pe de altă parte, prezența oxigenului în structură poate cauza formarea oxizilor, care face piesa mai rezistentă la uzură.

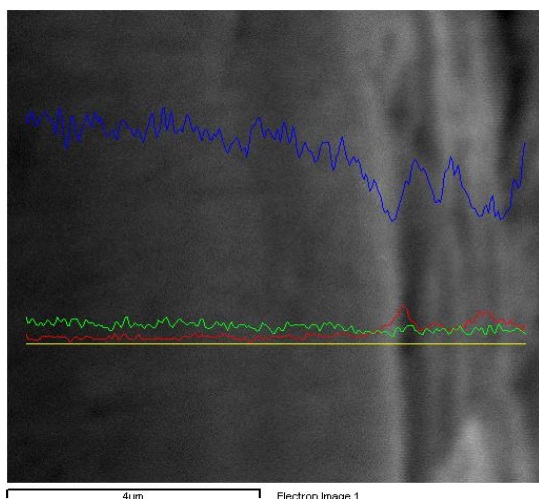
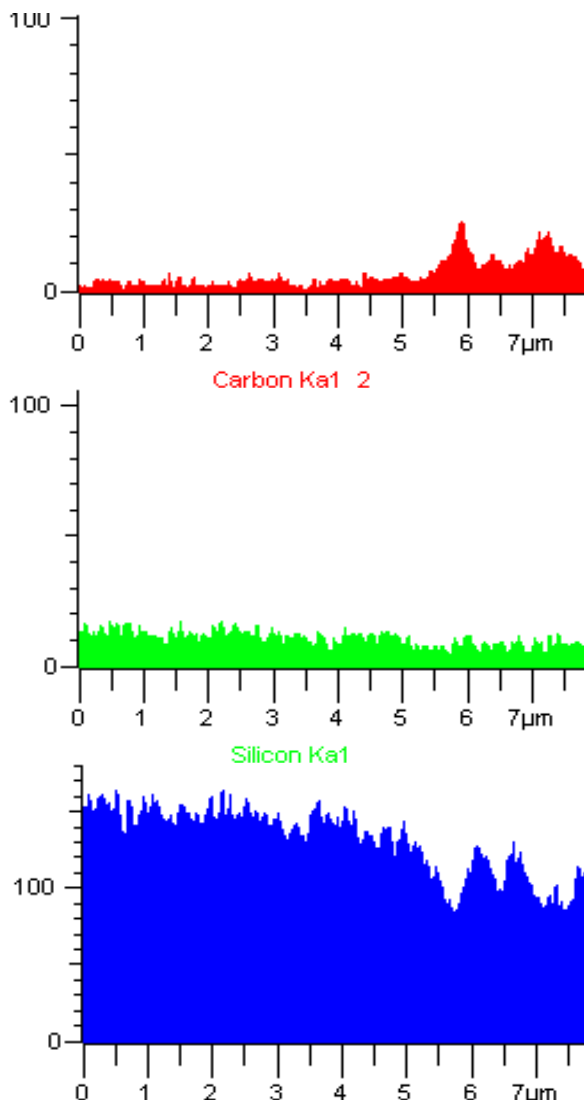


Fig.2.34. Distribuția carbonului pe suprafața prelucrată

Toate acestea sunt confirmate de aplicări practice descrise în detalii în [7]. Rezultatele măsurării microdurității stratului superficial (figura 2.35) prelucrat cu electrodul-sculă din grafit conectat în calitate de catod arată că pentru cele trei energii, microduritatea întâi crește, după care descrește cu creșterea numărului de

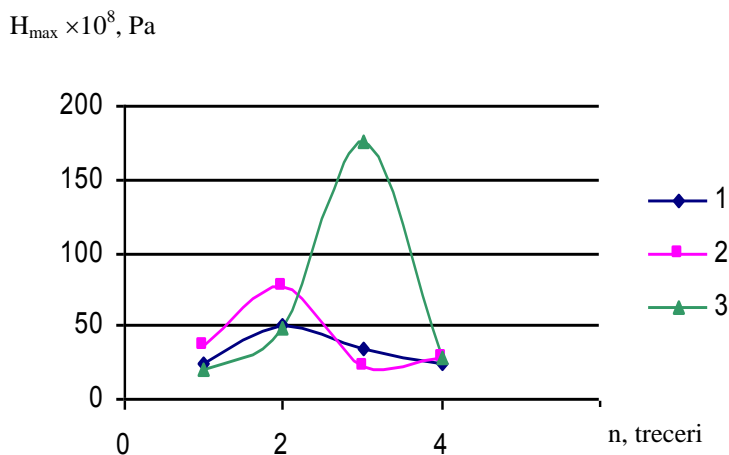


Fig. 2.35. Dependența valorii maxime a microdurității de numărul de treceri la prelucrarea suprafețelor pieselor din oțel 45 după interacțiunea cu descărcările electrice în impuls pentru:  $C=8\mu F$ ;  $f=8Hz$ ;  $S=0,5mm$ : 1)  $W=0,26 J$ ; 2)  $W=0,42 J$ ; 3)  $W=0,58 J$

treceri. Microduritatea stratului alb la prelucrarea suprafeței în două treceri constituie  $50,3 \times 10^8 Pa$  și  $77,2 \times 10^8 Pa$  pentru energia degajată în interstițiu  $W=0,26 J$  și  $W=0,42 J$ , respectiv. Adică microduritatea crește de 4-7 ori față de cea a materialului în stare inițială. Pentru valoarea energiei degajate în interstițiu  $W=0,58 J$ , microduritatea maximală se obține pentru trei treceri și este mai mare decât microduritatea inițială de 18 ori, constituind  $175,2 \times 10^8 Pa$ .



## 2.5. Condițiile termice de lucru a formelor

Procesul de turnare a produselor din sticlă este strâns legat de pierderea energiei termice și viteza de întărire a sticlei, astfel încât pentru a îmbunătăți în continuare tehnologia este necesar a cunoaște condițiile termice în care are loc fabricația. Calitatea produsului depinde în mare măsură de temperatura formei și de fluctuațiile sale în timpul ciclului complet. În cazul de lucru al formelor cu temperatura scăzută a suprafeței de lucru apar defecte pe produse. Odată cu apropierea temperaturii formei la  $600^{\circ}\text{C}$  și mai sus, apare, de regulă, adeziunea sticlei de suprafața formei și astfel se perturbă regimul normal de lucru al mașinii de formare a sticlei. Nivelul de temperatură a matrițelor de sticlă depinde de metoda de formare a sticlei, tip de produs, compoziția masei de sticlă, construcția și metoda de răcire a formelor. În legătura cu datele descrise mai sus a fost studiat intens procesul de transfer al căldurii în sticlă și în părțile formelor, schimbul de căldură în zona de contact dintre sticlă și metal, transferul de căldură de la forma de sticlă în mediu, precum și câmpurile termice din formă în procesul formării diferitelor produse.

### 2.5.1. Transferul de căldură în zona de contact sticlă-metal

Odată cu apropierea temperaturii produsului de temperatura mediului, viteza de răcire scade treptat. Prin urmare, fluxul de căldură în zona de contact sticlă-metal atinge cea mai mare intensitate în etapa inițială de formare. Apoi, ca urmare a egalizării temperaturilor, fluxul de căldură se reduce semnificativ. Densitatea fluxului de căldură în zona de contact în timpul fasonării sticlei este egală cu  $1450 \cdot 10^3 \text{ Wt/m}^2$ , iar la producerea articolelor cavitate pe automate de suflare de la  $348 \cdot 10^3$  până la  $580 \cdot 10^3 \text{ Wt/m}^2$ . Intensitatea fluxului de căldură în zona de contact sticlă-metal depinde în mare măsură de tipul contactului termic dintre sticlă și suprafața de lucru a formei. Rezultatele cercetărilor efectuate arată că odată cu creșterea timpului de formare, contactul dintre sticlă și formă scade semnificativ, cauza majoră fiind contractarea stratului superficial al sticlei, care este mult mai importantă decât contractarea straturilor interne. Ca rezultat, suprafața sticlei devine ondulată, ceea ce conduce la scăderea contactului și creșterea zonei discrete. Prezența decalajului chiar și de  $0,005\text{mm}$  între sticlă și formă are impact asupra trecerii de căldură, iar decalajul de  $0,5\text{mm}$  are efect de scădere semnificativă a procesului de răcire. Ca rezultat, are loc formarea zonelor locale cu vâscozitatea scăzută a sticlei, ceea ce conduce la diferența dintre grosimea pereților produsului finit.

Temperatura suprafeței interne a formei crește brusc cu câteva zeci de grade în momentul contactului cu sticlă. Condiția suprafeței de lucru a formei are impact asupra contactului termic cu sticla astfel, încât suprafața formei devine netedă și are loc un contact strâns cu sticla în etapa inițială. În caz contrar, dacă forma are o suprafață dură (rugoasă), sticla nu poate pătrunde în toate concavitățile și contactul se perturbă. Temperatura suprafeței de lucru are un impact important asupra temperaturii stratului superficial al sticlei. Temperatura formei mai mică de  $300^{\circ}\text{C}$  conduce la o răcire bruscă a



sticlei și contactul termic se înrăutățește cu 0,1-0,3s. Însă când temperatura formei este mai înaltă, contactul termic se menține un timp mai îndelungat (până la câteva secunde și mai mult), la fel crește și calitatea suprafeței produsului. La temperatura de 600-620<sup>0</sup>C se atestă lipirea sticlei de metalul formei. Acest fenomen se observă la forme din diferite materiale. Există un șir de ipoteze care explică mecanismul adeziunii sticlei de materialele metalice, dar nici una nu poate fi considerată unanim acceptată. În conformitate cu ipoteza adeziunii mecanice la contactul cu suprafața metalului sticla topită umple microconcavitățile și cuprinde proeminențele microscopice, din care cauză și apare o adeziune ”dințată”.

În majoritatea cazurilor, silicatele topite umezesc mai bine suprafața metalelor care a fost oxidată mai înainte. Din această cauză, fenomenul adeziunii se explică prin alipirea la stratul intermediar oxidat.

Unii autori consideră că adeziunea dintre masa de sticlă și metal poate avea loc și fără prezența între ei a unui strat intermediar de oxizi metalici, doar prin intermediul punților de oxigen. Adeziunea are loc datorită comunicațiilor chimice Si-O-metal.

Însă în conformitate cu cercetările altor specialiști, straturile oxizilor chiar și de o grosime monomoleculară, asigură umectarea suprafeței metalului cu topitura silicatulului. În afară de oxizi, ca strat absorbant poate servi și un alt strat monomolecular.

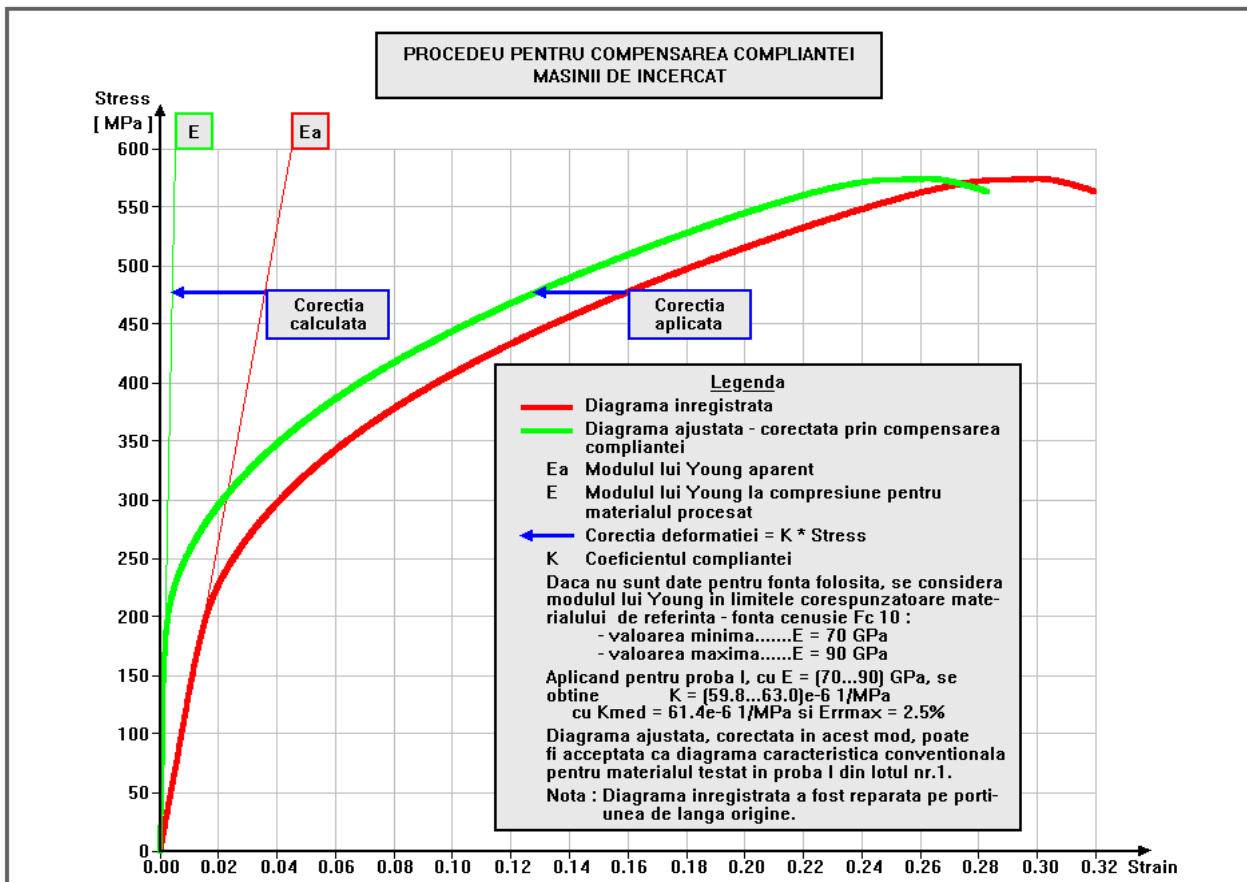
În afară de temperatura și rugozitatea suprafeței formei, procesul complex de adeziune este influențat de compoziția, vâscozitatea și tensiunile superficiale ale sticlei, la fel ca și capacitatea de căldură și conductivitatea termică a materialului formelor. În condiții de fabricație adeziunea, sticlei de formă este o consecință a creșterii temperaturii într-o anumită zonă a formei. De exemplu, în timpul presării produselor din sticlă cu adaos de plumb în forme din fontă, adeziunea a avut loc la temperatura de 490<sup>0</sup>C, din sticlă cu bor și silicat la 570-590<sup>0</sup>C, iar din sticlă MKP1 la 590-600<sup>0</sup>C. În cazuri speciale, micșorarea timpului de contact a sticlei cu forma (formare rapidă), micșorarea tensiunii în timpul formării, aplicarea lubrifianților tehnici pe suprafața de formare ajută la menținerea temperaturii formelor la limita de sus, evitând lipirea sticlei.

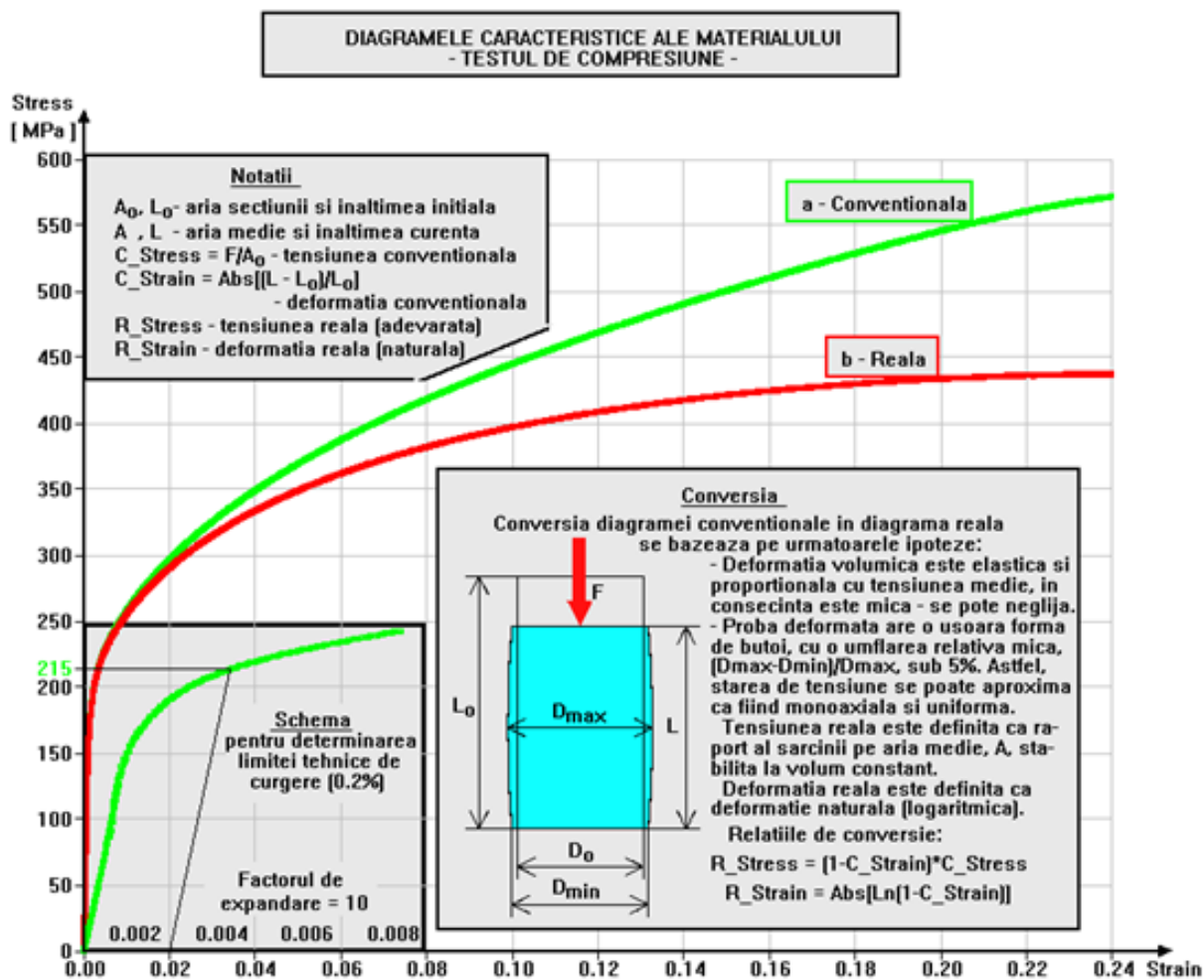
Astfel, transferul de căldură la limita sticlă-metal este un proces complicat și viteza transferului de căldură în mare parte depinde de condițiile de contact și rezistența termică în zona dată. Contactul fizic între sticlă și formă nu este ideal din cauză că răcirea intensă a sticlei conduce la contractarea ei, dar încălzirea formei de la căldura sticlei conduce la extensia volumică a acesteia. Din cauzele menționate trebuie să se țină cont de rezistența termică a mediului din zona intermediară, care este mai mare de sute de ori decât cea a metalului sau a sticlei.

## CONCLUZII LA CAPITOLUL 2

- În urma analizei posibilităților programelor actuale au fost elaborate metode noi de abordare a proceselor tehnologice de deformare plastică cu metodele de simulare numerică ce oferă largi posibilități de înțelegere a fenomenelor, de analiză și de optimizare a proceselor.
- După o prezentare a metodelor și fundamentelor matematice ale simulărilor numerice și descrierea etapelor principale parcurse la aplicarea acestor metode, se poate trage concluzia că există etape care au influență asupra preciziei soluțiilor.
- În urma analizei legilor plasticității a fost trasă concluzia privind importanța metodologiei de simulare numerică, bazată pe metoda elementelor finite, aplicată proceselor de prelucrare prin deformare plastică. S-a insistat asupra realizării unui model fizic fidel, în care sunt incluse corpurile principale care participă la proces și a cărei funcționare corespunde tehnologiei aplicate.
- Analizând procedurile și limitele de lucru, a fost trasă concluzia că proprietățile materialelor, fiind date importante de intrare, joacă un rol hotărâtor asupra acurateței soluției. Au fost studiate mai multe modele de material, toate formulate pe baza datelor experimentale. Au fost analizate trei eșantioane extrase din șarje de fabricație diferite, toate din fontă cenușie cu grafit lamelar.
- După analiza experimentală a materialelor prin probe de compresiune, tracțiune și duritate, precum și a caracteristicii metalografice a fontei cenușii utilizate în procesul tehnologic s-a constatat că prelucrarea datelor experimentale a constituit un obiectiv important în realizarea modelului corect de material.
- Din analiza datelor experimentale, a fost trasă concluzia că acestea necesită corectări, transformări în diagramele caracteristice convenționale, apoi în cele reale. La sfârșitul lanțului de transformări, datele determinate experimental se regăsesc în forma diagramelor de plasticitate pe baza cărora au fost concepute modelele de material.
- În urma analizei rezultatelor simulării numerice a probei de compresiune și a epruvetelor distruse constată o capacitate de rezistență a materialului la compresiune superioară celei determinate experimental.
- În consecință, modelele de material concepute pentru fonta cenușie cu grafit lamelar nu au fost limitate la deformația de cedare la proba de compresiune. În continuare, pe baza simulării de duritate Brinel, unde tipul de solicitare se apropie de cel care are loc în timpul procesului de deformare plastică cu sculă cu cap sferic, a fost trasă concluzia necesității de limitare, corespunzător, de cedare.

- Comportarea fontei cenușii cu grafit lamelar la deformări plastice care a fost folosită în mai multe tipuri de modele de material a condus la concluzia că două dintre acestea realizează o aproximare foarte bună: modelul poliliniar și modelul experimental.
- Datorită faptului că modelele fizice încorporează și proprietățile de material, se poate trage concluzia că acestea sunt valabile eventual cu modificări minore, în simulările numerice ale procesului de netezire și de durificare a pieselor prin deformare plastică cu scula cu cap sferic.
- Luând în considerație numărul de experimente cu ajutorul cărora s-a pregătit și formulat modelele de material, se poate constata că acestea sunt corecte.
- După prezentarea condițiilor termice de lucru al formelor și compararea lor cu obiectivele de formare a peliculelor de grafit, se evidențiază aplicabilitatea lor.





### 3. SIMULAREA NUMERICĂ A PROCEDEELOR DE NETEZIRE ȘI DE DURIFICARE A SUPRAFEȚELOR ACTIVE ALE SCULELOR DIN COMPUNEREA UTILAJELOR DE TURNARE A STICLEI ÎN FORME ȘI TRANSFERUL DE CĂLDURA ÎN FORMĂ

#### 3.1. Pregătirea completă a modelului supus simulării numerice

Simularea numerică a procedeelelor de netezire și de durificare a suprafețelor active ale sculelor analizate în lucrare se efectuează conform procedurii din capitolul 2.

Codul numeric folosit pentru simulare, LS-DYNA, este un program de analiză a proceselor și fenomenelor fizice, cu largi posibilități de utilizare în domeniul mecanicii corpurilor deformabile. Ca metodă de analiză s-a optat pentru o metodă cu rețea – metoda elementelor finite – care asigură o foarte bună reprezentare discretă a corpurilor implicate în proces. Solverul explicit al programului LS-DYNA, ales pentru integrarea ecuațiilor, are avantajul unei mai bune reprezentări în timp a soluțiilor, față de solverul implicit. Alegerea este justificată de faptul că procesele analizate sunt procese mecanice de durată, continue și se produc cu o anumită viteză. Pentru o soluție corectă și completă este necesar ca incrementul de calcul să fie în concordanță cu pasul rețelei și cu viteza relativă dintre semifabricat și sculă.

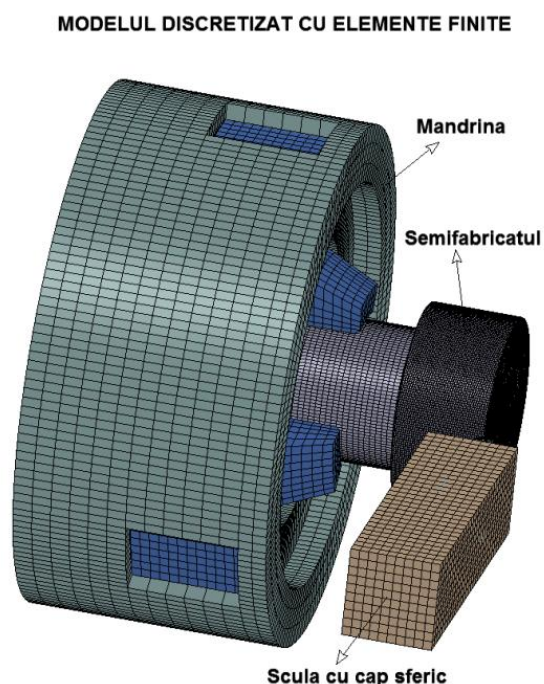


Fig. 3.1. – Modelul discretizat cu elemente finite

Conform metodologiei stabilite în capitolul 2, pentru realizarea simulării numerice a proceselor de netezire și durificare a sculelor prin deformare plastică superficială este necesară elaborarea unui model discretizat cu elemente finite în concordanță cu scopul urmărit.

Discretizarea modelului fizic, descris în capitolul 2 și reprezentat în figura 2.7, ca esențializare a procesului impus analizei, a fost efectuată cu densități foarte diferite de elemente finite, în funcție de locul și importanța corpului în proces. Modelul procedeeului de netezire și durificare a sculelor prin deformare plastică prin contact de alunecare este reprezentat în figura 3.1.

Corpul cel mai important în ansamblu – semifabricatul – a fost discretizat diferențiat cu 142848 elemente finite SOLID cu 8 noduri și un număr total de noduri de 156369, așa cum se arată în figura 32. Stratul superficial al semifabricatului, locul în care se produc deformațiile plastice are cea mai mare densitate de discretizare. Astfel, pe generatoarea suprafeței prelucrate sunt dispuse 64 de elemente cu pasul de 0.25 mm, iar pe

circumferință sunt 256 de elemente cu pasul de 0.43 mm. Rețeaua diferențiată de elemente finite, reprezentată în figura 3.3, a redus considerabil efortul de calcul.

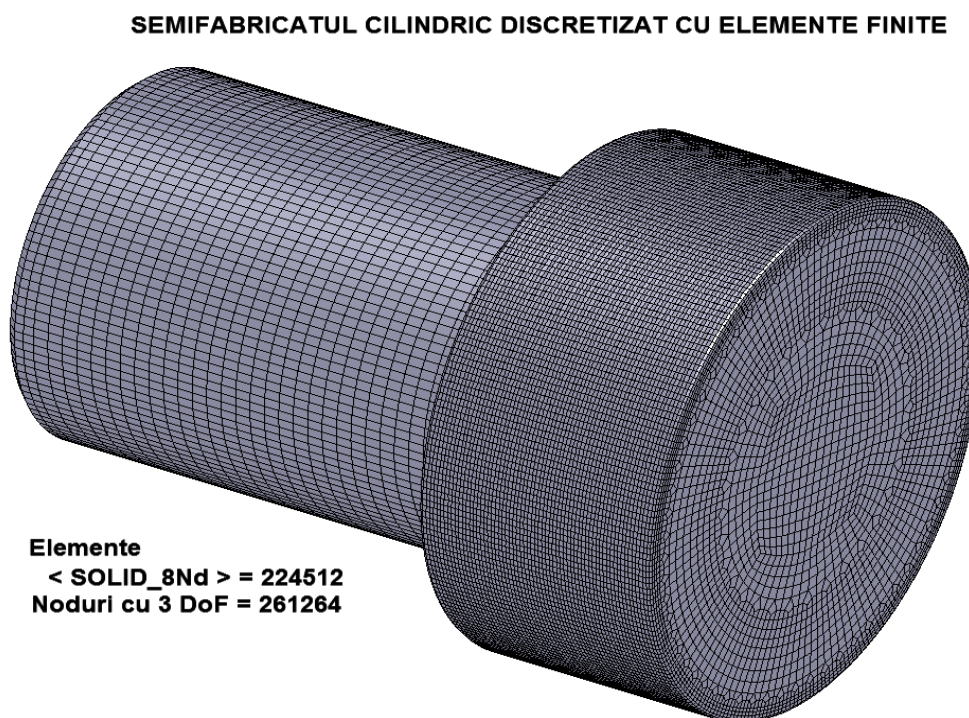


Fig. 3.2. – Semifabricatul cilindric discretizat cu elemente finite

Sfericitatea corpului sculei a fost asigurată cu precizie suficientă prin modelarea pe suprafața activă cu o rețea fină cu pasul de 0.4 mm.

Pentru celelalte corpuri ale modelului, rețeaua de discretizare este mai puțin fină, dar suficient de densă pentru a asigura simularea corectă a funcționării, mai ales a contactelor la prinderea piesei de prelucrat și la ghidarea bacurilor. În total, pentru discretizarea întregului model au fost folosite 224512 elemente finite 3D de tipul SOLID cu 8 noduri și un număr de 261264 noduri. Această schemă de discretizare a fost folosită fără modificări la toate formele de semifabricate.

Procedeul de netezire presupune că suprafața de prelucrat are o rugozitate produsă prin procesul tehnologic de fabricație, cel mai frecvent prin așchiere.



**REȚEAUA DIFERENȚIATĂ DE ELEMENTE FINITE  
IN SCULĂ SI SEMIFABRICAT  
( Vedere frontala )**

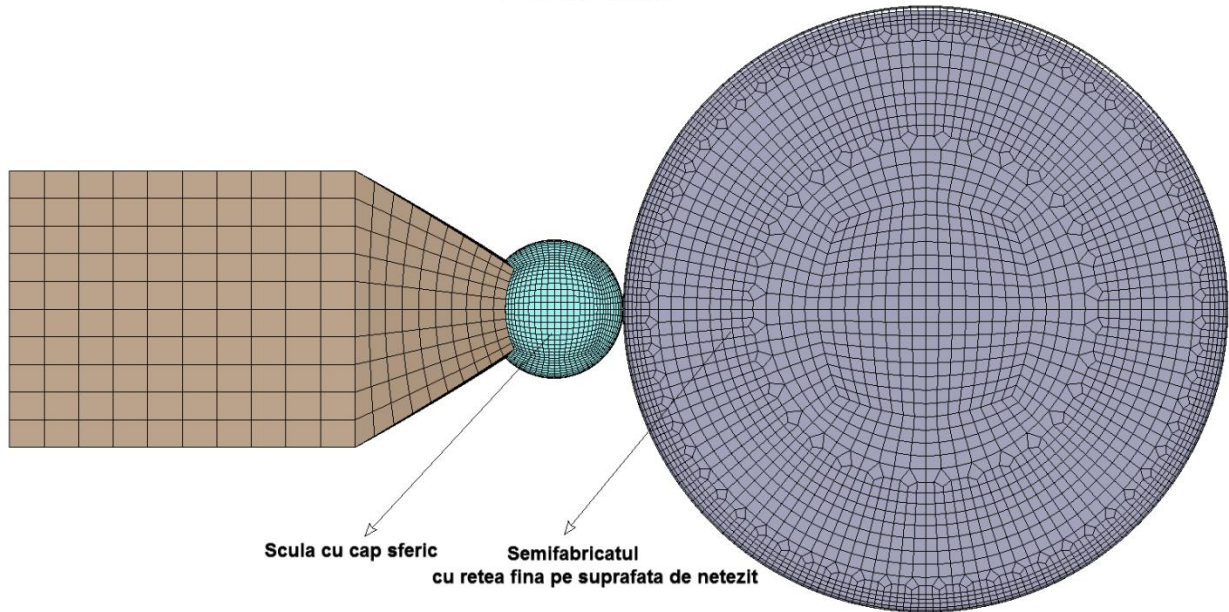


Fig. 3.3. – Rețeaua diferențiată de elemente finite în sculă și semifabricat

Modelele analizate încearcă să fie fidele realității, având pe suprafața de prelucrat o rugozitate simulată, similară celei rezultate în procesul de strunjire normală, cu avansul comparabil cu rețeaua de elemente finite, de 0.5 mm/rot.

Generarea rugozității virtuale s-a efectuat printr-o metodă de calcul aleator. Astfel, nodurile de pe suprafața de prelucrat a piesei au fost deplasate aleator în toate cele trei direcții, folosind un parametru al generării cu o valoare impusă în acord cu rugozitatea dorită. Cu ajutorul parametrului generării se delimitează câmpul probabilității uniforme. Pentru cele trei direcții, deplasările impuse nodurilor s-au calculat prin următoarele relații aleatoare:

- direcția radială:  $\Delta_r = \pm D[1-\text{RAND}(-1, 1)]$ ;
- direcția circumferențială ca deplasare unghiulară:  $\Delta_t = D \cdot \text{RAND}(-1, 1) \cdot 180^\circ / \pi R$ ; (3.1)
- direcția axială:  $\Delta_a = 5 \cdot D \cdot \text{RAND}(-1, 1)$ ;

în care  $\text{RAND}(-1,1)$  este un număr real, extras aleator, cu densitate de probabilitate uniformă, din intervalul  $(-1, +1)$ , iar  $R$  este raza medie a suprafeței înainte de alterare.

Rugozitatea fictivă corespunzătoare procedurii de strunjire normală  $R_a = 3.2 \dots 6.3 \mu\text{m}$  se obține pentru un parametru de generare  $\Delta = 0.01 \text{ mm}$ . În lucrare se utilizează mai des rugozitatea măsurabilă  $R_z$ . Concret, pentru parametrul de generare folosit,  $\Delta = 0.01 \text{ mm}$ , valorile rugozității  $R_z$  sunt în jur de  $20 \mu\text{m}$  figura 2.8 și are corespondentul  $R_a \approx 5 \mu\text{m}$  încadrat în limitele impuse.

Evidențierea clară a unora dintre efectele procedurii – netezirea suprafețelor – a implicat realizarea unor modele cu rugozitate vizibilă și măsurabilă virtual, ca cel din figura 3.4.



**RUGOZITATEA SIMULATA PE SUPRAFATA PRELUCRATA  
PRIN NETEZIRE CU SCULA CU CAP SFERIC  
( Rezentate comparata )**

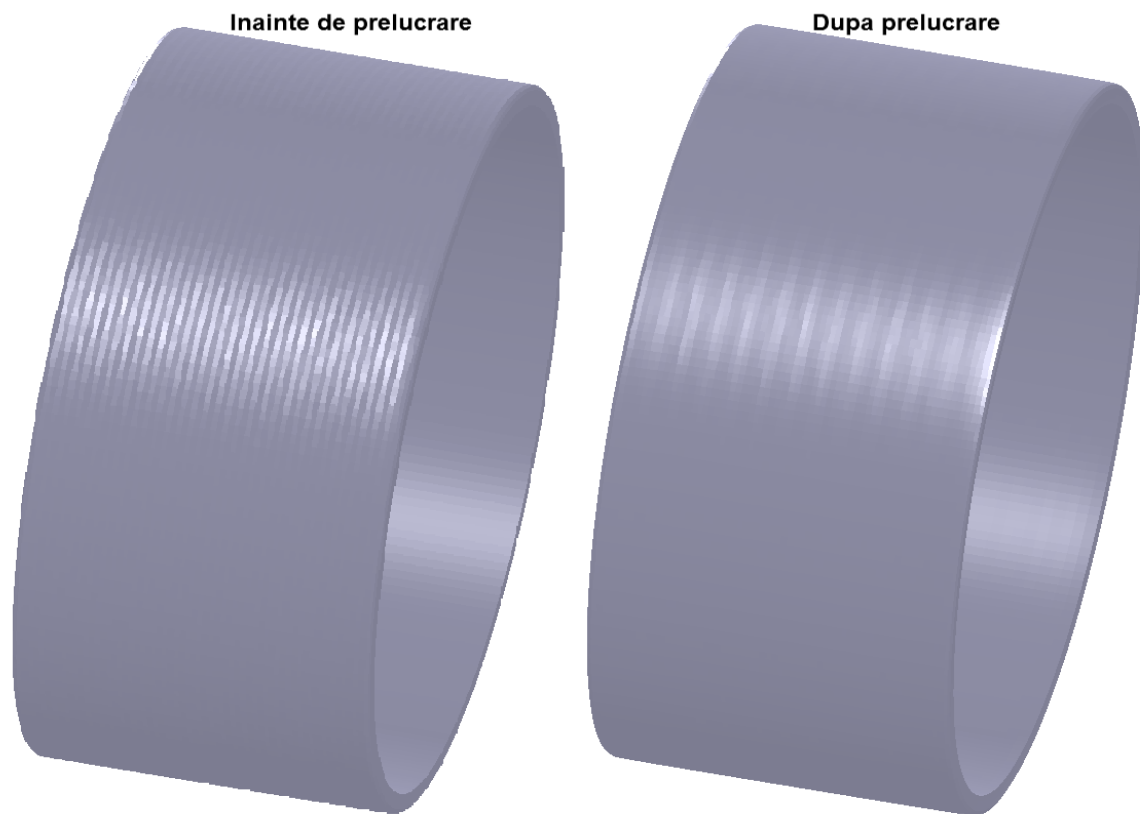


Fig. 3.4 – Rugozitatea simulată pe suprafața prelucrată prin netezire și durificare cu scula cu cap sferic

Modelarea suprafețelor cu rugozități mai mici, cu  $R_a < 3.2 \mu\text{m}$ , ar conduce la discretizări cu un număr mult mai mare de elemente și, practic, la imposibilitatea soluționării cu un efort de calcul rezonabil.

Rugozitatea generată aleator pe o suprafață (fig. 3.4) a fost evaluată, utilizând procedura standardizată, prin calcul într-o serie de noduri predefinite, dispuse pe generatoarea suprafeței. Astfel, pentru piesa cilindrică reprezentată în figura 3.4 s-a obținut seria de valori: 20.15, 19.28, 17.23, 19.22, 21.65  $\mu\text{m}$ , cu valoarea medie  $R_z = 19.5 \mu\text{m}$ .

După prelucrare, rugozitatea va fi recalculată în aceleași noduri de control și comparată cu cea inițială. Din considerentele expuse mai sus derivă justificarea utilizării sculei cu capul de netezire sferic cu rază mare  $R_{sf} = 4 \text{ mm}$ , la limita celor uzuale.

Controlul forțelor aplicate de sculă piesei în procesul de prelucrare simulat este realizat de sistemul de senzori dispuși pe corpul sculei.

Al doilea pas important în faza de pre procesare se referă la formarea modelului de material. Analiza consistentă a materialelor asociate modelelor simulate făcută în capitolul 2 își dovedește acum utilitatea. Modelul de plasticitate Johnson-Cook (2.20) în formă simplificată:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}) \quad (3.2)$$

are reprezentarea cea mai completă. Termenul termic din relația (2.20), din motive justificate – încălzire ne semnificativă dovedită experimental – a fost neglijat.

Pentru fonta cenușie cu grafit lamelar, folosită în simulare, valorile coeficienților A, B și n sunt cele determinate experimental în capitolul 2. Coeficientul C a fost preluat de la materiale similare cu valoarea C = 0.06, conform pct. 2.3.5 din teză.

Celelate corpuri sunt modelate din materiale elastice (oțeluri) sau perfect rigide.

Condițiile de frontieră și cele funcționale simulate au fost stabilite în concordanță cu parametrii proceselor tehnologice de netezire și durificare.

Prinderea piesei în madrină este simplă, prin contact între bacuri și prelungirea tehnologică a piesei.

Contactul dintre capul sferic al sculei și semifabricat se realizează fie elastic, cu controlul forței, fie rigid, cu controlul deplasării. Avantajele și dezavantajele acestor două posibilități de control se vor analiza după simulările numerice.

Turația, avansul longitudinal, forța de apăsare sau adâncimea radială sunt stabilite conform criteriilor generale expuse în capitolul 1, tabelul 1.2.

Materialul supus prelucrării simulate – fonta cenușie cu grafit lamelar cu duritate Brinell, determinată experimental, cuprinsă între 122 și 140 HB nu se încadrează în tabelul 1.2 și, în consecință, datele din acest tabel au fost folosite cu valoare orientativă.

Densitatea mică și rugozitatea mare (3.2...6.3 μm) specifică fontei cu grafit lamelar, dar și riscul de producere a fărâmițării superficiale a materialului, au influențat decisiv alegerea parametrilor regimului de lucru.

Raza aleasă pentru capul sferic,  $R_{sf} = 4$  mm, se poate justifica extrapolând tendințele din tabelul 1.2. Conform acestor tendințe, pentru materialele moi cu densități mici și rugozități mari, pentru realizarea efectului sunt necesare scule cu raze mai mari.

Viteza periferică a suprafeței de prelucrat stabilită pentru simulare este puțin inferioară limitei minime, recomandată în tabelul 1.2. Cauza principală care a impus o viteză periferică la limita inferioară descrisă a constat disponibilitatea unui agregat dotat cu un sistem dinamometric cu 6 grade de libertate pentru probele experimentale, care funcționează optim la turația de 380 rot/min. Agregatul respectiv se găsește în laboratoarele Facultății Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice din cadrul Universității “POLITEHNICA”, București.

Necesitatea confruntării soluțiilor simulate cu datele experimentale a condiționat alegerea vitezei periferice corespunzătoare acestei turații ( $\approx 42$  m/min). Turația mică a arborelui utilajului este un dezavantaj, deoarece mărește durata calculului unui ciclu tehnologic complet.

În consecință, simulările importante au fost realizate la turația de 380 rot/min.

Valoarea avansului axial pentru majoritatea simulărilor ( $s = 0.09$  mm/rot) se încadrează în recomandările din tabelul 1.2.

Pentru forțele de apăsare s-a folosit o gamă mai largă cuprinsă între 200 și 1000 N. Forțele mai mari sunt necesare pentru netezirea rugozităților mai mari ( $6.3 \mu\text{m}$ ).

Când se dorește durificarea în stratul superficial, forțele de apăsare radială trebuie crescute.

În procedeul cu sculă rigidă – controlul deplasărilor – adâncimea de pătrundere a fost reglată în funcție de efectul dorit, încadrându-se în limitele impuse  $h_d = 0.03 \dots 0.3$  mm.

Utilajul experimental disponibil lucrează cu sculă rigidă dispusă pe dispozitivul dinamometric, având utilizare limitată la suprafețele cilindrice coaxiale.

Un agregat experimental complet pentru aplicarea procedeului cu sculă rigidă este mai greu de realizat, deoarece necesită un sistem central activ care să urmărească continuu poziția sculei în raport cu suprafața de prelucrat.

E de notat că dispozitivul tehnologic simulat este complet izolat și nu interacționează cu alte corpuri, fiind o idealizare a unui agregat experimental, care în întregime, prin deformații elastice, jocuri și vibrații, influențează calitatea produsului.

### **3.2. Simularea testului brinell**

Confirmarea alegerii juste a modelului de material plastic (Johnson-Cook) se bazează pe simularea numerică a testului de duritate Brinell pe modelul fizic din figura 2.9.

Compararea durităților simulate cu cele măsurate experimental se constituie în criteriul de validare a modelelor de material.

În figura 3.5 sunt prezentate sintetic modelul discretizat cu elemente finite ( $1/4$ ) și modelul simulărilor testului Brinell pe două dintre materialele analizate în capitolul 1. Procedura și condițiile de simulare respectă în totalitate procedura și condițiile testului Brinell. Reprezentarea grafică din partea dreaptă a figura 3.5 redă, în paralel și comparativ, câmpurile deformațiilor plastice efective, remanente, în două eșantioane din fontă cu proprietățile mecanice corespunzătoare loturilor de material nr. 1, respectiv, nr. 2. Evaluarea durității s-a făcut prin măsurarea diametrului amprentei produsă de bila de oțel cu diametrul de 10 mm sub sarcină totală de 3 tf (29.43 kN). Pe baza măsurătorilor au fost evaluate duritățile Brinell. Rezultatele sunt date centralizat în tabelul din figura 3.5.

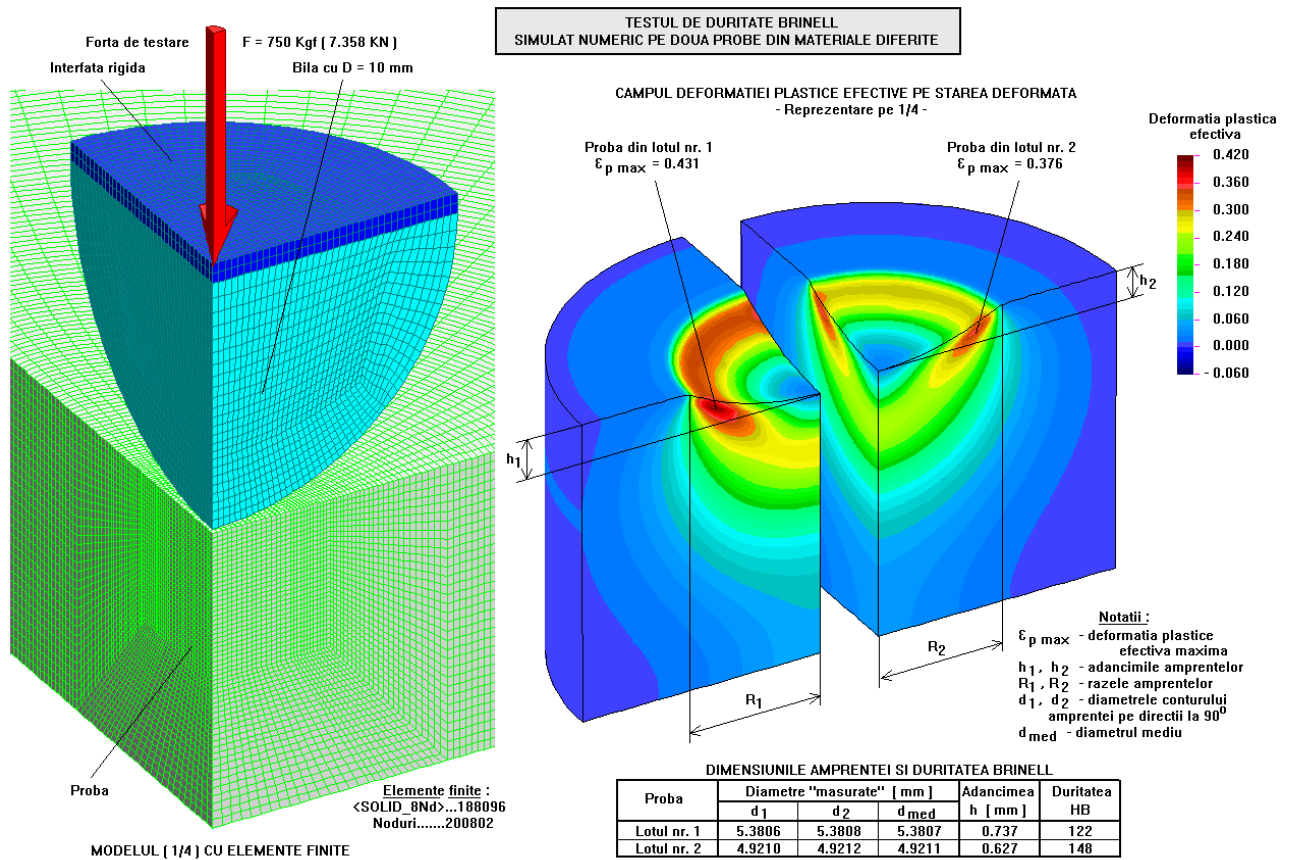


Fig. 3.5. – Testul de duritate Brinell simulat numeric pe două probe din materiale diferite

Rezultatele testului de duritate Brinell simulate sunt comparate cu cele măsurate experimental pe cele două loturi de materiale reținute pentru aplicații și date în tabelul 3.1

**Tabelul 3.01 Duritatea Brinell**

Specimen	Lot	1	2	3	4	5	6	Aver.	Err. [%]
		Brinell Hardness [HB]	1	115	107	119	125		
	2	150	139	137	141	138	136	140	3.7
	3	126	102	112	124	115	119	116	6.9

Între rezultatele simulate (122 și 148 HB) și cele medii măsurate (118 și 140) diferențele procentuale de material definite în capitolul 2 sunt conforme cu realitatea. Concluziile favorabile ale procedurii de validare a modelelor de material dau garanția obținerii unor rezultate reale în simulările numerice care urmează.

### 3.3 Rezultatele simulărilor numerice pentru variantele tehnologice ale procesului de netezire și durificare prin deformare plastică cu sculă cu cap sferic

Rezultatele simulărilor sunt prezentate concis, în formă grafică, prin câmpuri de culoare și diagrame. Se insistă mai mult asupra câmpului tensiunilor echivalente von Mises și pe al deformației plastice efective și asupra diagramelor forțelor de prelucrare. Se mai urmărește calitatea suprafeței prelucrate prin netezire, comparând rugozitatea finală cu cea imprimată prin generare aleatoare înainte de aplicarea procedurii.

#### 3.3.1. Analiza efectului intensității forței de apăsare asupra calității suprafeței prelucrate

Piesa cilindrică cu diametrul de 35 mm cu rugozitatea simulată aproximativă  $R_a$  5.0  $\mu\text{m}$  a fost supusă prelucrării simulate cu trei regimuri de forță. S-au folosit forțe de apăsare radială de 250 N, 500 N, 1000N. Prelucrările s-au făcut cu același regim de turație  $n = 380$  rot/min și cu același avans axial  $s = 0.09$  mm/rot. Economia de resurse de calcul a impus ca simulările să fie oprite după ce procesul de deformare plastică s-a stabilizat și cantitatea de date achiziționate a fost considerată suficientă pentru analiza completă a fenomenelor urmărite. Timpul real la care s-au oprit simulările a fost puțin peste 10 secunde. Analiza comparativă a rezultatelor s-a făcut pentru toate cele trei variante la  $t = 10$  s. Rezultatele simulărilor sunt prezentate în formă grafică.

Datele din figura 3.6 permite analiza calitativă a suprafeței prelucrate în funcție de forța de apăsare radială. Este vizibilă o diferență de calitate, determinată prin rugozitate, a suprafețelor prelucrate. În cazul simulării cu forța radială de 250 N, scula nu a reușit să producă netezire și să reducă rugozitatea la valori acceptabile.

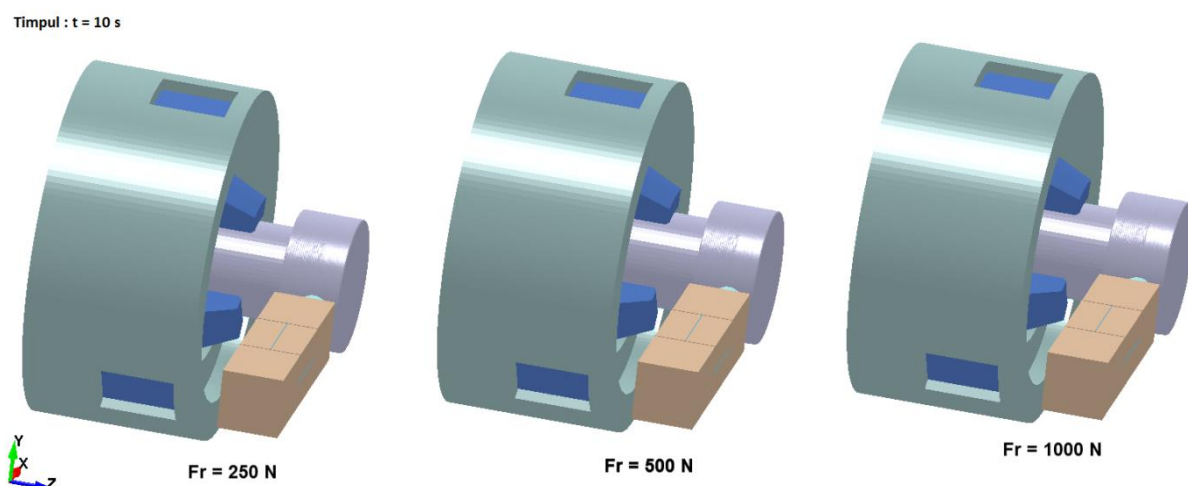


Fig. 3.6. - Analiza calitativă a suprafeței prelucrate în funcție de forța de apăsare radială

Prelucrarea sub forța radială de 500 N dă o suprafață cu aspect neted și cu rugozitate redusă. Prelucrarea cu forță mai mare, de 1000 de N, reduce foarte mult rugozitatea, dar produce abateri de formă mai mari prin ondulare.

Interpretarea de mai sus a aspectului suprafeței prelucrate este reflectată în figura 3.7, în care este reprezentat profilul suprafeței prelucrate în funcție de forța radială. Profilul suprafeței piesei a fost reprezentat pe una dintre generatoarele sale în planul yoz. Suprafața piesei este împărțită în două porțiuni. În fața frontului de atac al corpului sferic al sculei, în partea stângă se găsește porțiunea inițială care are rugozitatea generată aleator, cu valori înscrise pe figură. În spatele frontului de atac se găsește suprafața prelucrată, netezită până la un anumit nivel. Pentru evidențierea profilului suprafeței piesei, dimensiunea radială s-a multiplicat de 10 ori.

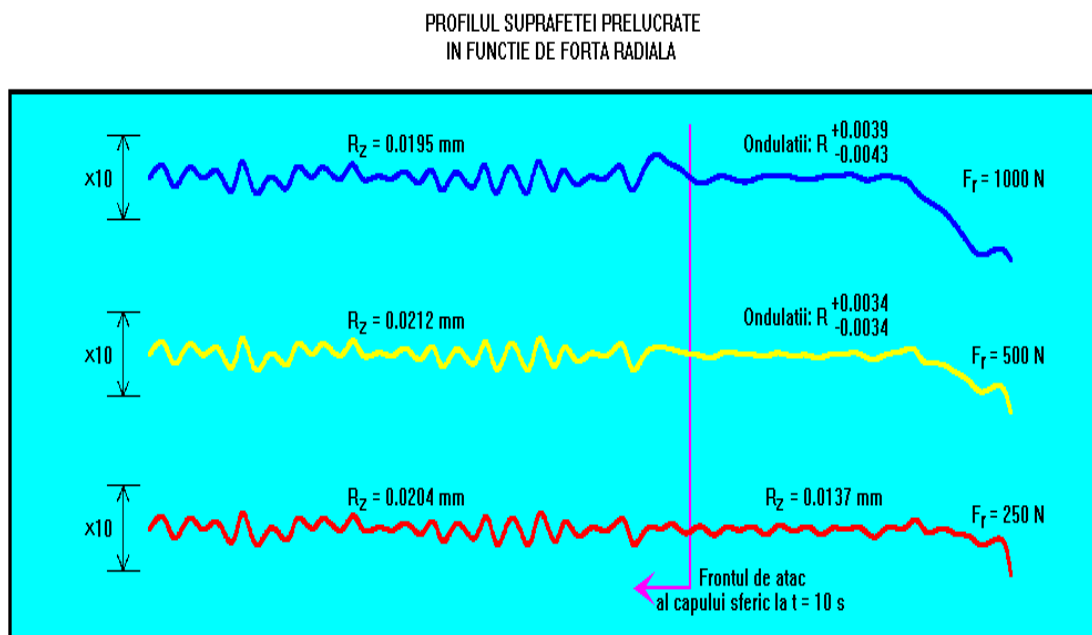


Fig. 3.7. – Profilul suprafeței prelucrate în funcție de forța radială

Concluziile calitative la analiza din figura 3.06 devin interpretări cantitative în figura 3.7.

Datele obținute prin simulare numerică arată că prelucrarea, în condițiile inițiale date, sub forța radială de 250 N, nu este eficientă. Rugozitatea rămasă depășește jumătate din cea inițială.

O netezire mai bună se realizează cu o forță de apăsare a sculei de 500 N. Se constată că pe suprafața prelucrată apar ondulații cu o anumită periodicitate. Aceste ondulații dau o abatere de formă care, raportată la raza medie, se încadrează între  $-3.4 \mu\text{m}$  și  $+3.4 \mu\text{m}$ . Ondulații mai mari se produc pe măsură ce forța de apăsare crește.

Prezența ondulațiilor produse pe suprafața prelucrată a împiedicat calculul simulat al rugozității.

După analiza reprezentărilor din figura 3.6 și figura 3.7 se impune o primă concluzie.

Alegerea regimului forței de apăsare radială în procesul de netezire și durificare a pieselor realizate din fontă cenușie cu grafit lamelar se face în funcție de scopul urmărit și de starea inițială a suprafețelor. Pentru procesul de netezire a suprafețelor cu rugozități mici pe scula cu cap sferic se

aplică forțe mai mici. Pe măsură ce rugozitatea suprafeței crește, este necesar să se mărească și forțele de apăsare. Pentru durificarea în profunzime se aplică forțe mai mari comparativ cu cele aplicate în cazul netezirii simple.

O problemă specială, observată atât experimental, cât și la simulare, este apariția unui val de material în fața frontului capului sferic al sculei. Înălțimea acestui val depinde de material, de raza capului sferic și evident de forța de apăsare. Existența acestui val și mișcarea lui de-a lungul suprafeței prelucrate sunt nedorite, având efecte care reduc calitatea suprafețelor prelucrate prin acest procedeu. În figura 3.7 se poate observa clar cum contribuie la formarea valului de material forța de apăsare. Înălțimea valului crește pe măsură ce crește forța de apăsare.

Simularea numerică a arătat că forma și dimensiunile valului de material din fața capului sferic al sculei se modifică continuu pe durata aplicării procedurii. În figura 3.8 este surprinsă evoluția profilului suprafeței prelucrate în intervalul de timp 5...10 s.

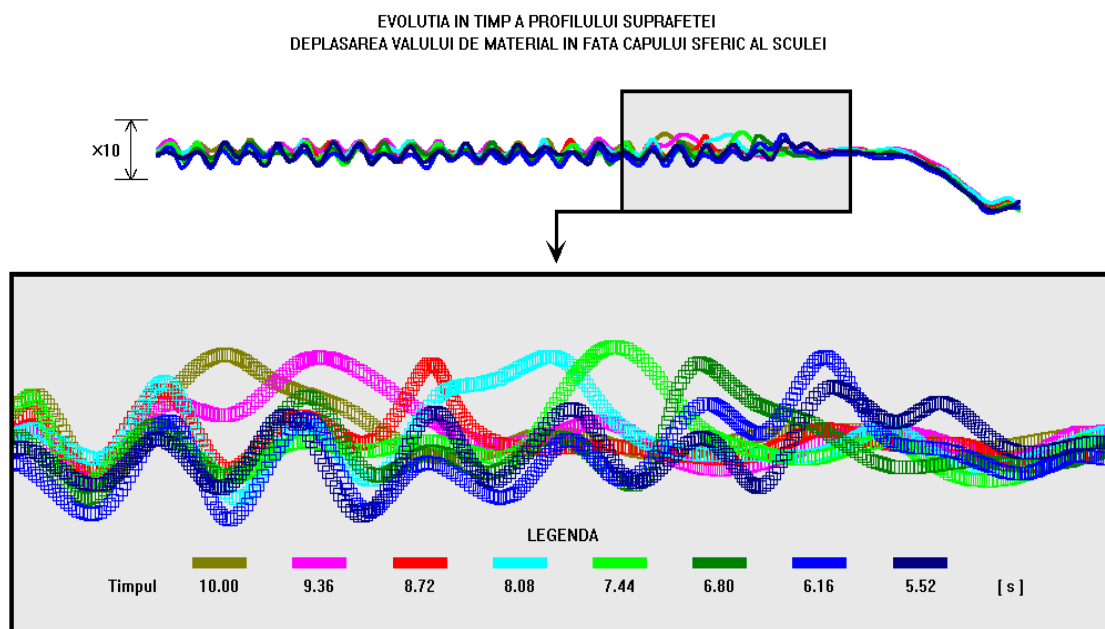


Fig. 3.8. Evoluția în timp a profilului suprafeței. Deplasarea valului de material în fața capului sferic al sculei

Se observă cum forma valului de material se modifică de la un moment la altul. O consecință imediată a acestui comportament constată în modificarea poziției sculei în sens radial, deoarece suprafața de contact dintre capul sferic și material este variabilă. Schimându-se poziția sculei, forța menținându-se constantă, gradul de deformare locală este variabil. Deci, se constată o anumită periodicitate a fluctuațiilor gradului local de deformare.

În figura 3.9 este reprezentat câmpul tensiunilor echivalente remanente în regiunea prelucrată, după 10 s. Intensitatea tensiunilor remanente depinde direct de mărimea forțelor radiale aplicate. Neomogenitatea câmpurilor tensiunilor remanente este justificată prin existența valului de material din



fața capului sferic al sculei, a cărei formă se modifică continuu. Pe cele trei reprezentări se poate observa o anumită periodicitate a variației câmpului. Se mai poate observa că neomogenitatea câmpului tensiunilor echivalente depinde de forța aplicată.

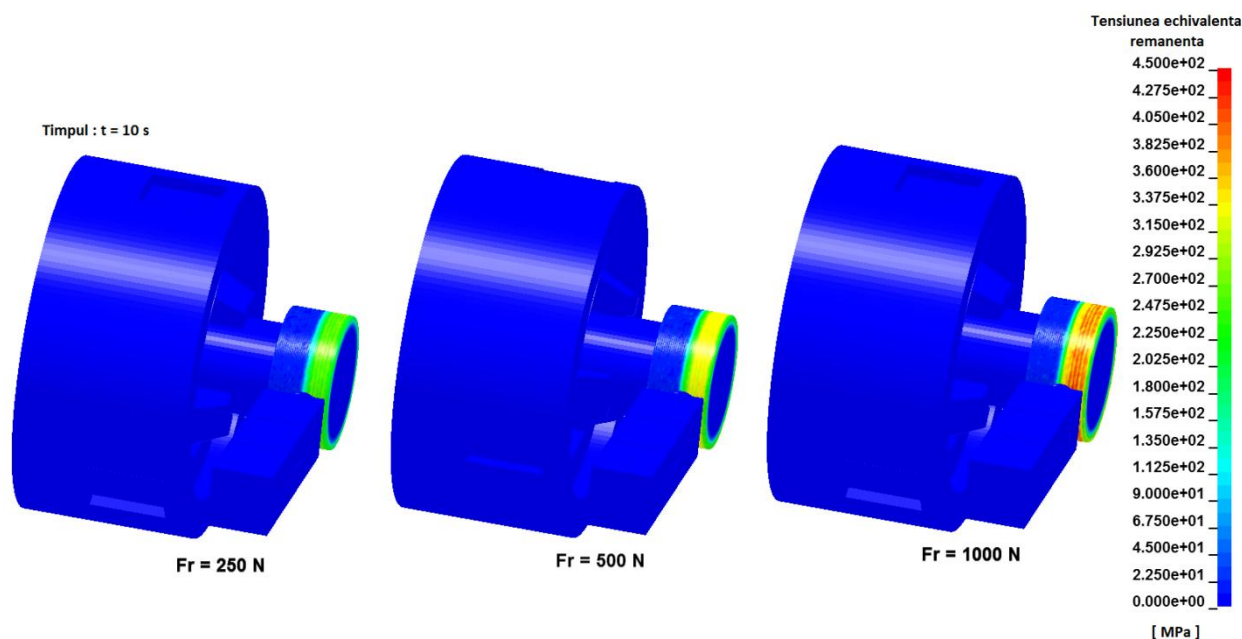


Fig. 3.9. Câmpul tensiunilor echivalente remanente în regiunea prelucrată după 10 s

Constatări asemănătoare rezultă și din analiza câmpului deformației plastice efective reprezentat în figura 3.10. Deci, este mai evident avantajul operării cu forțe moderate asupra omogenității deformațiilor plastice. Pe reprezentarea corespunzătoare forței de 500 N, câmpul deformației plastice este aproape monocromatic spre deosebire de situația produsă de forța de 1000 N căreia îi corespund deformații plastice efective cu valori cuprinse între 0.24 și 0.32.

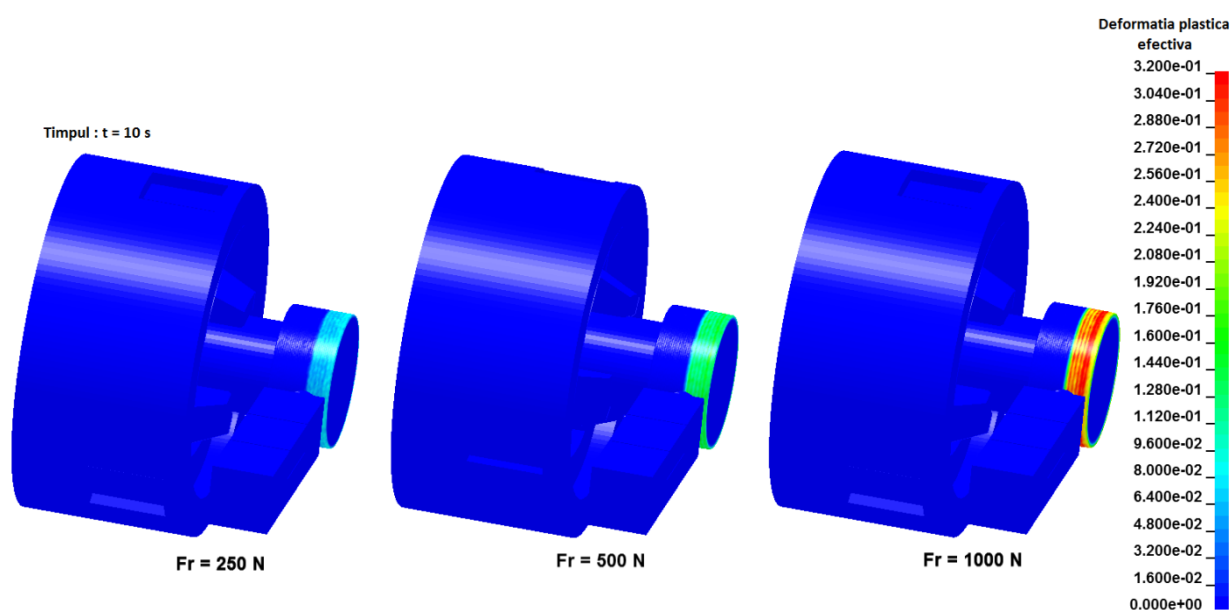


Fig. 3.10. Câmpul deformației plastice efective la  $t = 10$  s



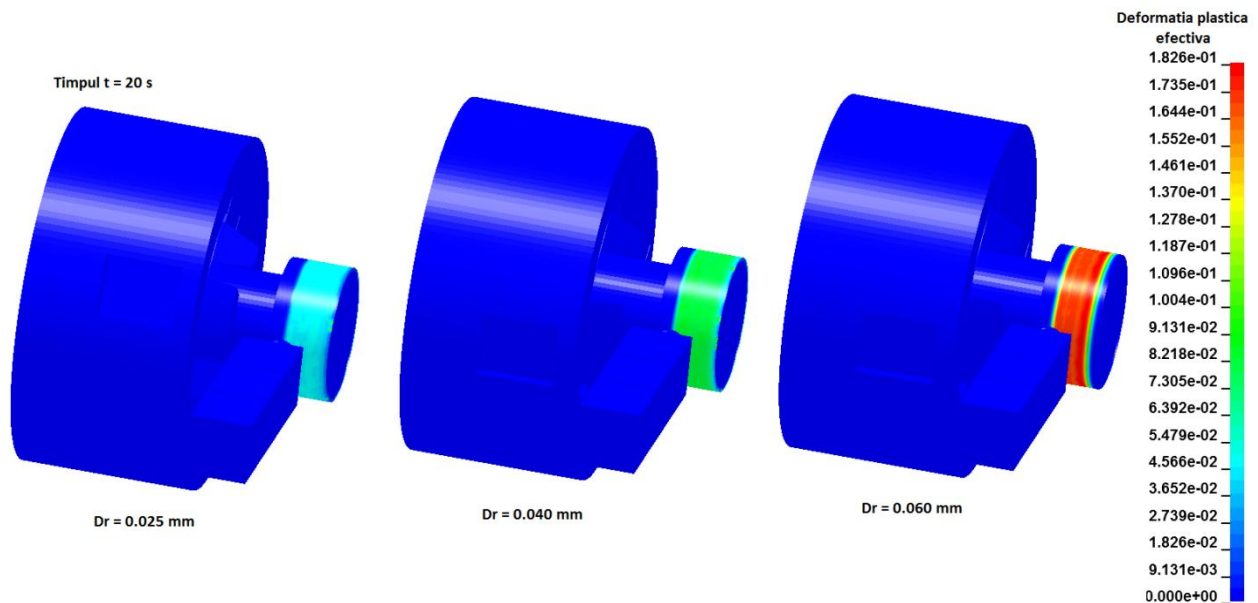


Fig. 3.11. Câmpul deformației plastice efective la  $t = 20$  s

Dacă se analizează reprezentarea din stânga din figura 3.10 se poate observa că în condițiile date (rugozitate mare, cap sferic cu rază mare) forța de 250 N nu este capabilă să producă netezire. Pe suprafața prelucrată au rămas urme de strunjire simulată, cu rugozitate inițială,  $R_z \approx 0.020$  mm.

Simularea procedurii de netezire și durificare a pieselor cu sculă flexibilă, deci cu control în forță, a pus în evidență unele avantaje și dezavantaje ale acestei metode ce vor fi prezentate prin comparație cu cele ale metodei rigide – cu control în deplasări.

### 3.3.2. Analiza influenței adâncimii de pătrundere asupra calității suprafețelor prelucrate cu metoda prin sculă rigidă

Pentru aplicarea metodei cu sculă rigidă este necesară respectarea mai multor condiții restrictive. În aplicațiile industriale sunt necesare utilaje computerizate cu control activ al poziției sculei în raport cu suprafața prelucrată. În această situație, piesele pot avea forme diferite de cele de revoluție. Atunci când nu se dispune de astfel de utilaje, se pot folosi mașini-unelte (strunguri), eventual cu comandă numerică și avans pe două direcții – axială și radială. Pe aceste mașini se poate aplica procedeul de netezire și durificare, dar numai pe suprafețe de revoluție cu abateri minime de formă, concentricitate și coaxialitate. La strungurile obișnuite se pot netezi numai piese cilindrice. Pentru înlăturarea abaterilor este recomandabil ca înainte de prelucrare suprafața piesei să fie corectată prin strunjire.

Forța radială depinde de adâncimea reglată, crescând odată cu aceasta (fig. 3.12).

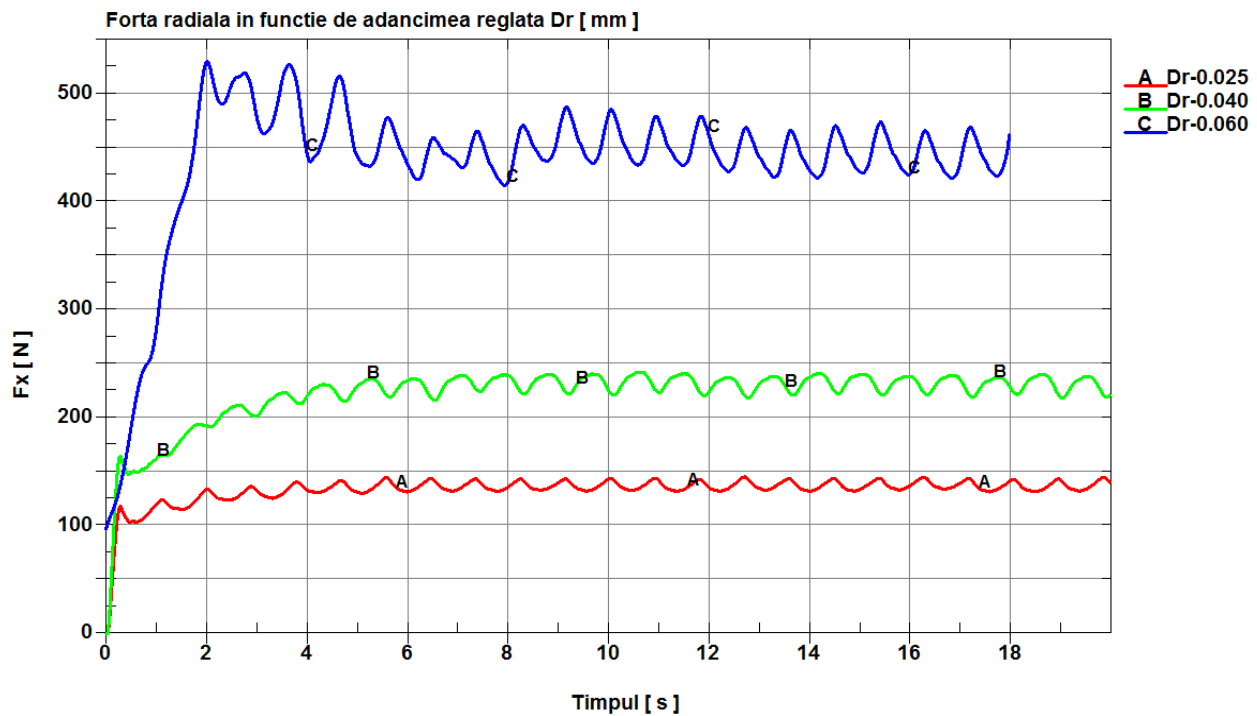


Fig. 3.12. Forța radială în funcție de adâncimea reglată  $D_r$

Simularea numerică s-a realizat în ipoteza că piesele sunt perfect cilindrice și coaxiale. În practică, la aplicarea acestei metode este necesar să fie luat în seamă faptul că abaterile de formă și dimensionale ale pieselor și abaterile poziționale sunt de același ordin de mărime cu adâncimea de pătrundere.

### 3.4. Analiza stratului deformat plastic prin operația de netezire

#### 3.4.1. Completarea modelului simulat

Îmbunătățirea proprietăților mecanice ale pieselor și creșterea calității suprafețelor obținute prin deformare plastică în procesul de netezire se pot determina, folosind metodele de simulare numerică, prin analiza în profunzime a stratului în care se produc deformațiile plastice.

Analiza în profunzime a stratului supus deformării plastice la operația de netezire are la bază modelul definit în paragraful 3.1, cu unele îmbunătățiri specificate în continuare. Sub suprafața supusă procesului de netezire a fost delimitat un strat de control, a cărui grosime a fost sugerată de simulările preliminare, expuse în paragraful anterior. În cadrul acestor simulări s-a constatat că grosimea stratului deformat plastic prin netezire cu sculă cu cap sferic nu depășește 0.8 mm, chiar în cazul în care forța radială de lucru ia valoarea maximă de 1000N. Acest strat, compus din 4 rânduri de elemente, cu

grosimile variabile în funcție de rază este prezentat în figura 3.13. Simetria problemei a permis dezvoltarea circumferențială a stratului de control pe un singur rând de elemente.

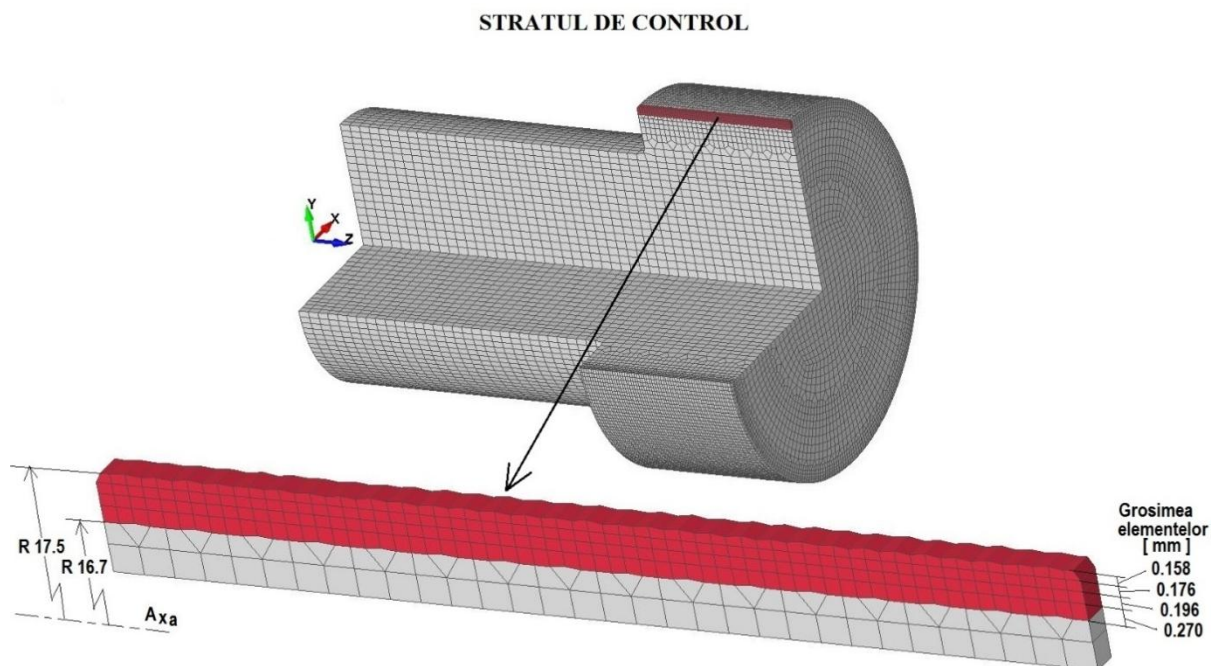


Fig. 3.13. Stratul de control

Stratul de control conține un set de elemente de control și un set de noduri de control. Situația în detaliu este expusă în igura 3.14 împreună cu o schemă foarte sugestivă de identificare a elementelor și nodurilor de control pe rânduri.

În algoritmul de rezolvare a programului de simulare folosit – LS-DYNA – elementele și nodurile de control ocupă o poziție privilegiată.

Pe lângă soluția generală a problemei, simulările numerice care stau la baza analizei stratului deformat plastic se concentrează, în mod special, pe istoria funcțiilor de câmp, deplasări, deformații și tensiuni în elementele și nodurile de control, cu condiția ca acestea să fie declarate în fișierul de comenzi. Datele de ieșire pentru elementele și nodurile de control sunt depuse în fișierele ELOUT și NODOUT (Anexe).



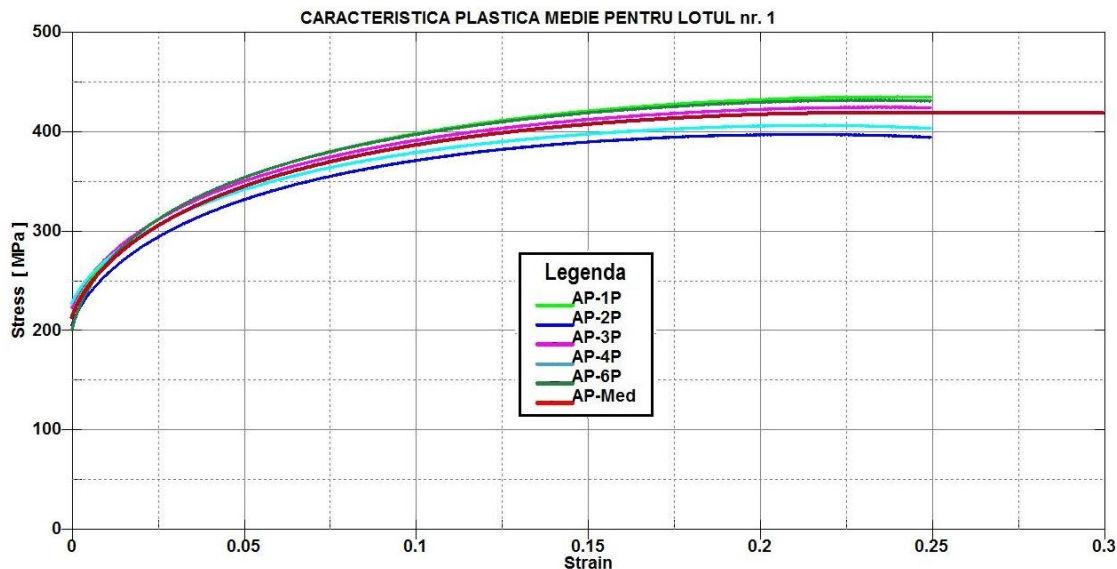


Fig. 3.15. Caracteristica plastică medie pentru lotul nr. 1

Curbei de material i s-a asociat și efectul vâscozității materialului, care se resimte cel mai puternic în zona de contact cu scula, în momentul în care capul sferic al acesteia trece peste material. Cantitativ, efectul vâscozității este introdus prin metoda Cowper-Symond, cu coeficienții stabiliți în subparagraful 2.3.5:  $C = 7200 \text{ s}^{-1}$  și  $p = 3.32$ . S-a folosit metoda scalării tensiunii de curgere (2.22).

Curbei caracteristice plastice, determinate prin teste de compresiune, până la limita de cedare  $\epsilon_{pl} = 0.25$ , i s-a adăugat o extensie care asigură rezistența materialului până la cel puțin  $\epsilon_{pl} = 0.4$ . Această corecție este justificată pentru solicitările care se produc în cazul operației de netezire – compresiune în cele trei direcții, fără concentratori, așa cum se întâmplă și în cazul testelor de duritate BRINELL analizate în figura 3.5, unde s-au atins valori ale deformației plastice efective peste 0.4 fără ca materialul să cedeze.

Considerându-se că procesul beneficiază de o lubrificație optimă, coeficientul de frecare dintre material și capul sferic al sculei a fost redus de la 0.08 la 0.05.

Pentru mărirea productivității, respectiv pentru reducerea efortului de calcul la simulare, avansul axial a fost mărit de la 0.09 mm/rot la 0.16 mm/rot.

Stratul deformat plastic a fost analizată prin simulare numerică pentru două trepte de forță, 500 N și 1000 N, urmărind câteva aspecte importante cum ar fi:

- producerea și dezvoltarea în profunzime a stării plastice;
- starea de tensiune remanentă;
- starea de tensiune în zona de contact;
- îmbunătățirea calității suprafeței prin operația de netezire.



### 3.4.2. Producerea și dezvoltarea în profunzime, în stratul de control, a stării plastice

Analiza s-a efectuat, pentru fiecare caz de încercare, considerând două stări de deformare? o stare intermediară și o stare finală.

În figurile 3.16 și 3.17 sunt reprezentate deformațiile plastice efective produse la netezirea cu forța de 500 N.

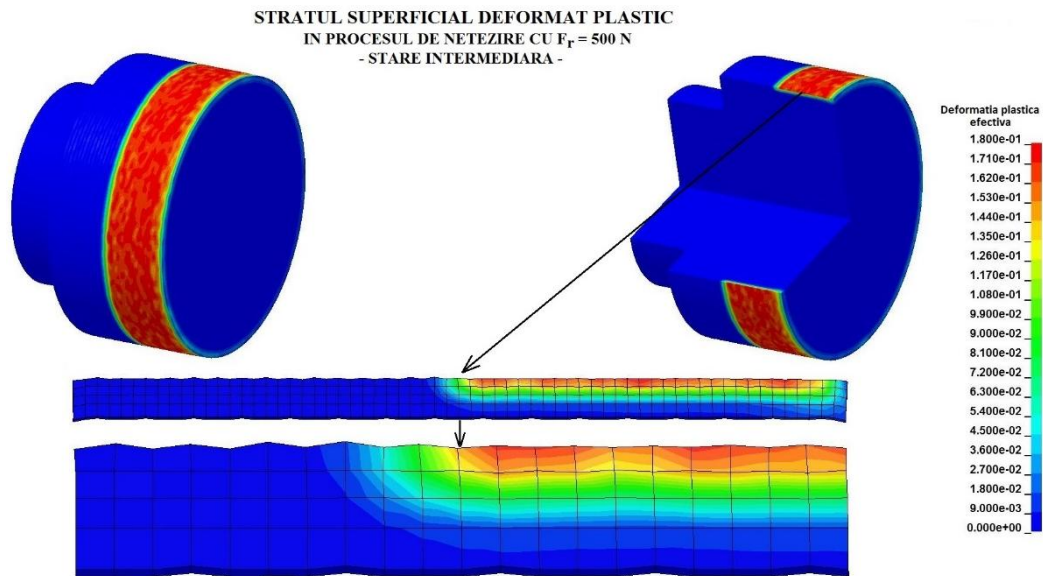


Fig. 3.16. Stratul superficial deformat plastic în procesul de netezire cu  $F_r = 500$  N – stare intermediară.

Se constată că în stratul superficial – primul rând de elemente – câmpul deformațiilor plastice este, relativ, neomogen. Una dintre cauzele deformării stratului superficial cu intensități variabile este prezența asperităților. Pe măsură ce deformația plastică pătrunde în profunzime, gradul de omogenitate a câmpului crește.

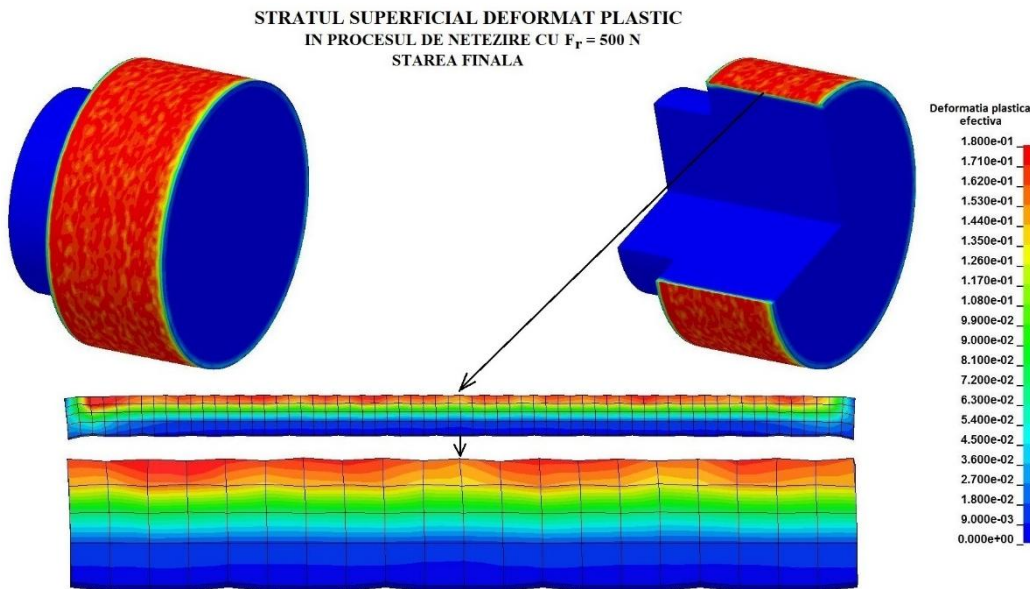


Fig. 3.17. Stratul superficial deformat plastic în procesul de netezire cu  $F_r = 500$  N – starea finală.

Efectul de margine este evident. Suprafețele frontale, libere, ale semifabricatului dau libertate de mișcare axială, fapt ce reduce din intensitatea deformației plastice efective.

Exceptând zonele de margine ale semifabricatului, se poate considera că operația de netezire rezolvă problema întăririi materialului pe suprafața prelucrată cu forța de lucru de 500 N. Astfel, pe această suprafață tensiunea de curgere crește de la valoarea inițială de 215 MPa la minimum 400 MPa în zonele cele mai slabe. Pe detaliul din figura 3.17 se poate observa că deformația plastică variază monoton, reducându-se ca intensitate odată cu pătrunderea în material. La această forță de lucru ultimul rând de elemente este foarte puțin afectat.

Rezultatele obținute la simularea cu forța de 1000 N, reprezentate grafic în Figurile 3.18 și 3.19, evidențiază același efect de margine. În privința omogenității, se constată o îmbunătățire la nivelul primului rând de elemente. La prelucrarea cu forța de 1000 N, durificarea pe suprafața exterioară crește corespunzător până la o valoare a tensiunii de curgere de min. 420 MPa, conform curbei de material.

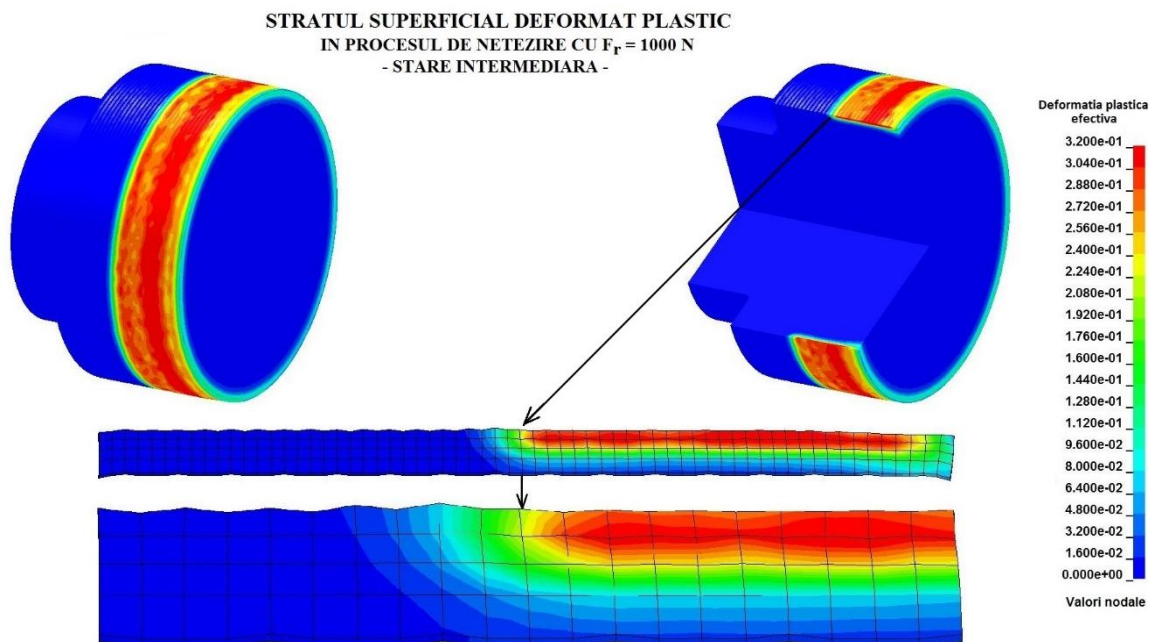


Fig. 3.18. Stratul superficial deformat plastic în procesul de netezire cu  $F_r = 1000$  N – starea intermediară

La acest regim însă se evidențiază un fapt remarcabil, și anume, că intensitatea maximă a deformației plastice efective se realizează în substrat. Pe detaliile din cele două figuri analizate se poate observa o concentrare de deformații plastice efective la nivelul celui de-al doilea rând de noduri. În acest regim de lucru, deformația plastică efectivă nu mai scade monoton pe grosime, deoarece are un maximum în substrat. De data aceasta se plasticizează și ultimul rând de elemente.

Importanța existenței unor valori maxime sub nivelul suprafeței prelucrate se va analiza ulterior, în ansamblu cu starea de tensiune.

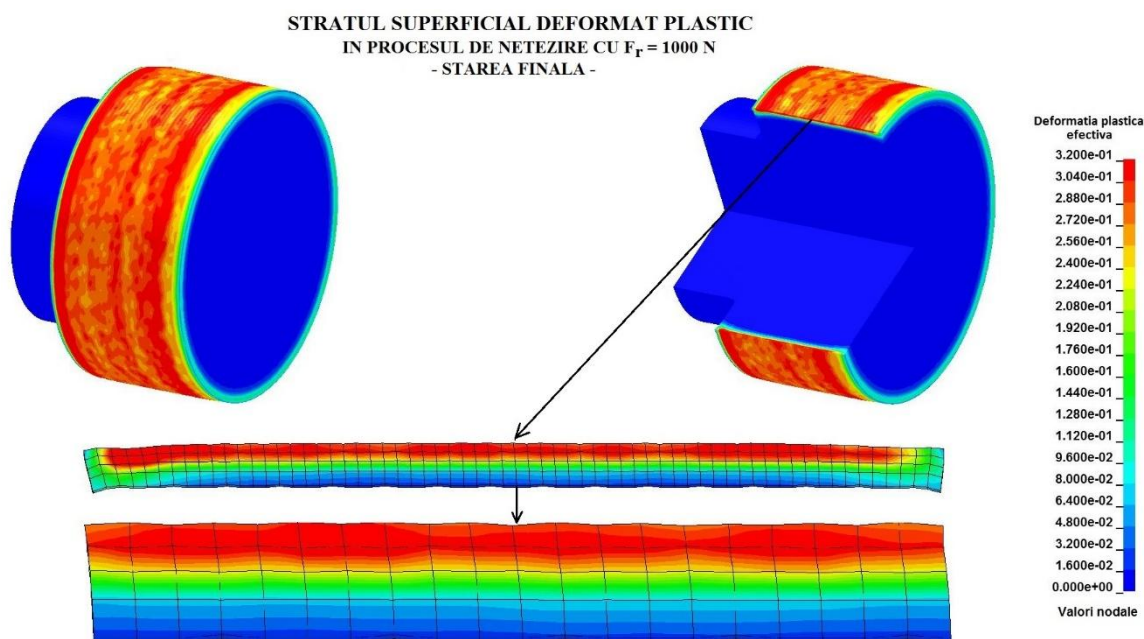


Fig. 3.19. Stratul superficial deformat plastic în procesul de netezire cu  $F_r = 1000$  N – starea finală.



Referindu-ne la concluziile testului de duritate Brinell privind rezistența materialului în stare de solicitare predominant de compresiune, se poate determina că procesul de deformare plastică ce are loc în timpul operației de netezire, cu forțe de până la 1000 N, nu este periculos dacă se asigură o lubrificație bună.

După această analiză se poate constata că unul dintre scopurile procesului de netezire – îmbunătățirea a caracteristicilor mecanice, rezistență și duritate – se atinge ca urmare a deformării plastice a stratului superficial. Cu cât deformațiile plastice sunt mai intense, cu atât materialul devine mai tare (se produce ecruisarea).

Pentru scula cu cap sferic, cu raza de 4 mm, în urma acestei analize se poate determina că prelucrarea cu forța 1000 N are efectele mecanice cele mai bune, fără a periclita integritatea pieselor prelucrate.

Producerea stării plastice și evoluția ei în timp în stratul superficial al semifabricatului se poate analiza pe graficele din figurile 3.20 și 3.21.

În aceste grafice sunt trasate funcțiile de timp ale deformației plastice efective pe o parte dintre elementele de control alese în patru grupe echidistante, conținând câte patru elemente pe grosime. Pentru a fi mai sugestive, graficele sunt orientate după mișcarea sculei, abscisa fiind legată de poziția centrului capului sferic.

**PRODUCEREA STĂRII PLASTICE ÎN STRATUL SUPERFICIAL AL SEMIFABRICATULUI  
 ÎN TIMPUL PROCESULUI DE NETEZIRE CU FORȚA  $F_r = 500$  N  
 - Reprezentare pe elementele de control -**

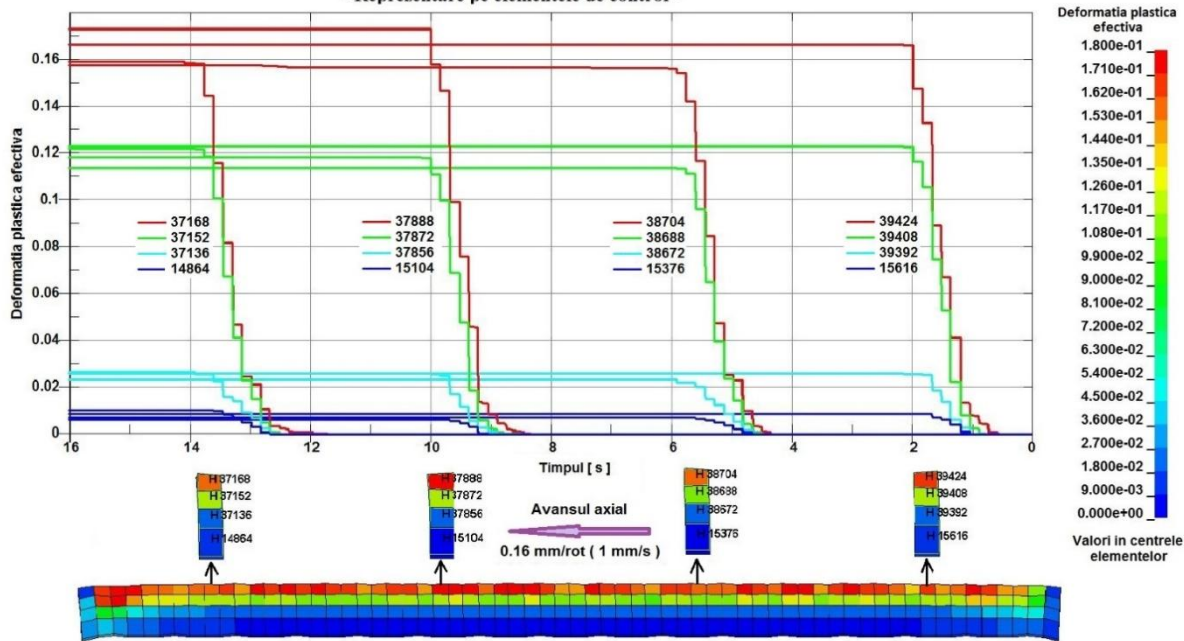


Fig. 3.20. Producerea stării plastice în stratul superficial al semifabricatului în timpul procesului de netezire cu forța  $F_r = 500$  N – reprezentare pe elementele de control.

**PRODUCEREA STĂRII PLASTICE ÎN STRATUL SUPERFICIAL AL SEMIFABRICATULUI  
 ÎN TIMPUL PROCESULUI DE NETEZIRE CU FORȚA  $F_r = 1000$  N  
 - Reprezentare pe elementele de control -**

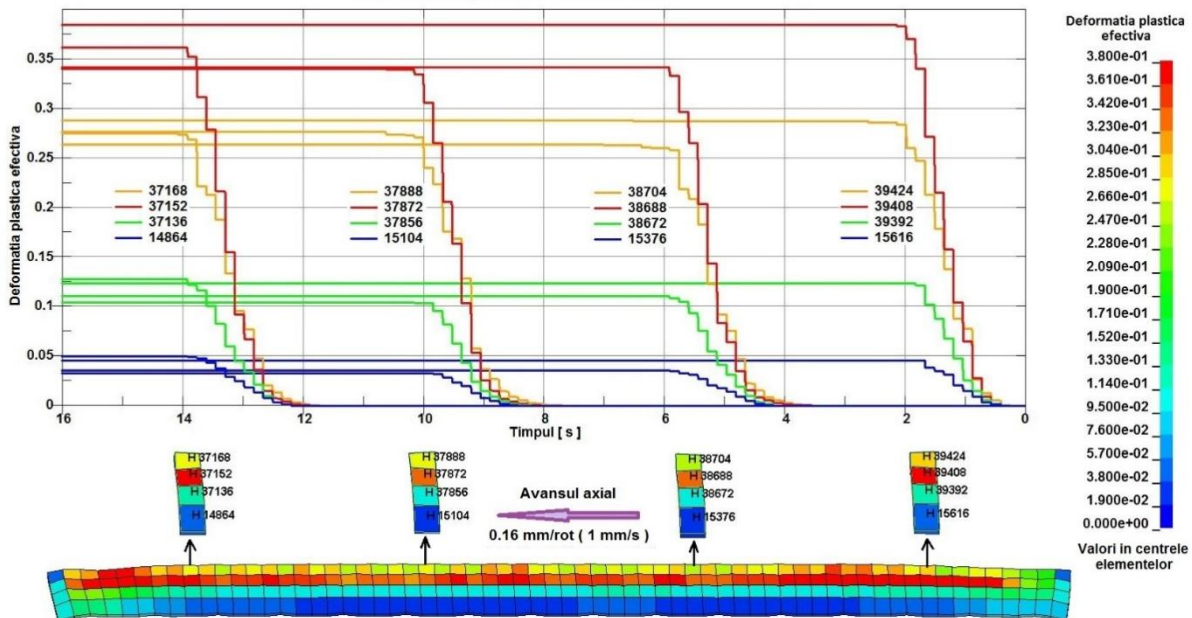


Fig. 3.21. Producerea stării plastice în stratul superficial al semifabricatului în timpul procesului de netezire cu forța  $F_r = 1000$  N – reprezentare pe elementele de control.

O evidențiere mai clară a variației în profunzimea stratului de control s-a făcut prin reprezentarea valorilor deformațiilor, nu pe noduri ca până acum, ci în centrele elementelor. În reprezentările

câmpurilor din figurile 3.20 și 3.21, întregului element i s-a atribuit valoarea calculată în centrul său, fără interpolări. La analiza acestor reprezentări grafice se constată că deformațiile plastice cresc în trepte, la intervale egale cu avansul axial de 0.16 mm/rot. Deformațiile variază numai în timpul interacțiunii dintre elemente și capul sferic al sculei. În grafice, elementele de pe același rând sunt reprezentate cu aceeași culoare, apropiată cu cea predominantă din reprezentarea câmpului deformației plastice efective pe elemente.

În general, graficele sunt bine grupate pe culori, fapt ce arată o bună omogenitate. Așa cum s-a mai constatat, rândurile din profunzime au o omogenitate mai bună. Graficele din cele două figuri arată mult mai clar față de reprezentările anterioare ale modului de variație a deformației plastice efective pe grosimea stratului de control. Dacă la prelucrarea cu forța de lucru de 500N deformația scade monoton, cele mai mari valori luând în exterior, la prelucrarea cu forța de 1000N se produce o relocare a valorilor maxime. În figura 3.21 se observă clar, și din câmpul deformațiilor, și din grafic, că valorile maxime se produc în substrat, adică la nivelul discretizării adoptate, pe rândul al doilea. Pe grafic se pot face și unele evaluări cantitative. Astfel, dacă în elementele adiacente suprafeței prelucrate deformațiile plastice efective nu depășesc valoarea 0.3, în rândul de elemente imediat următor se realizează creșteri de până la valoarea 0.38. Așa cum s-a mai menționat, problema creșterii deformației plastice în substrat va fi abordată împreună cu problema stării locale de tensiune.

### 3.4.3. Tensiunile remanente în semifabricatele cilindrice după operația de netezire

Pentru corpurile cu simetrie axială sunt relevante tensiunile în coordonatele cilindrice. Sistemul cilindric adoptat pentru reprezentarea tensiunilor păstrează axa z a sistemului cartezian, axele r și t fiind în planul xoy, unghiul polar, măsurat de la axa Ox, fiind  $\alpha$ .

Codul LS-DYNA, prin care s-au realizat simulările numerice, oferă funcțiile de câmp în coordonatele carteziene, pentru tensiuni  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ .

Pentru transformarea acestor tensiuni în coordonatele cilindrice se folosesc relațiile:

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + 2\tau_{xy} \sin \alpha \cos \alpha; \\
 \sigma_t &= \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha - 2\tau_{xy} \sin \alpha \cos \alpha; \\
 \sigma_z & - \text{rămîne aceeași (tensiune normală axială)}; \\
 \tau_{rt} &= \tau_{xy} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) - (\sigma_x - \sigma_y) \sin \alpha \cos \alpha; \\
 \tau_{rz} &= \tau_{xz} \cos \alpha + \tau_{yz} \sin \alpha; \\
 \tau_{tz} &= -\tau_{xz} \sin \alpha + \tau_{yz} \cos \alpha.
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

În ANEXE se găsesc două foldere în care se află datele extrase din program și cele prelucrate, Fr-500 și Fr-1000.

Stările de tensiune remanente sunt centralizate în fișierele EXCEL: Starea\_Rem-500 și respectiv, Starea\_Rem-1000. Starea remanentă se dă pentru întreaga piesă, deci, pentru toate elementele acesteia (ANEXE). Valorile corespund centrelor elementelor. Coordonatele centrelor elementelor sunt extrase în fișierele CENT-500 și CENT-1000, ce se găsesc în ANEXE.

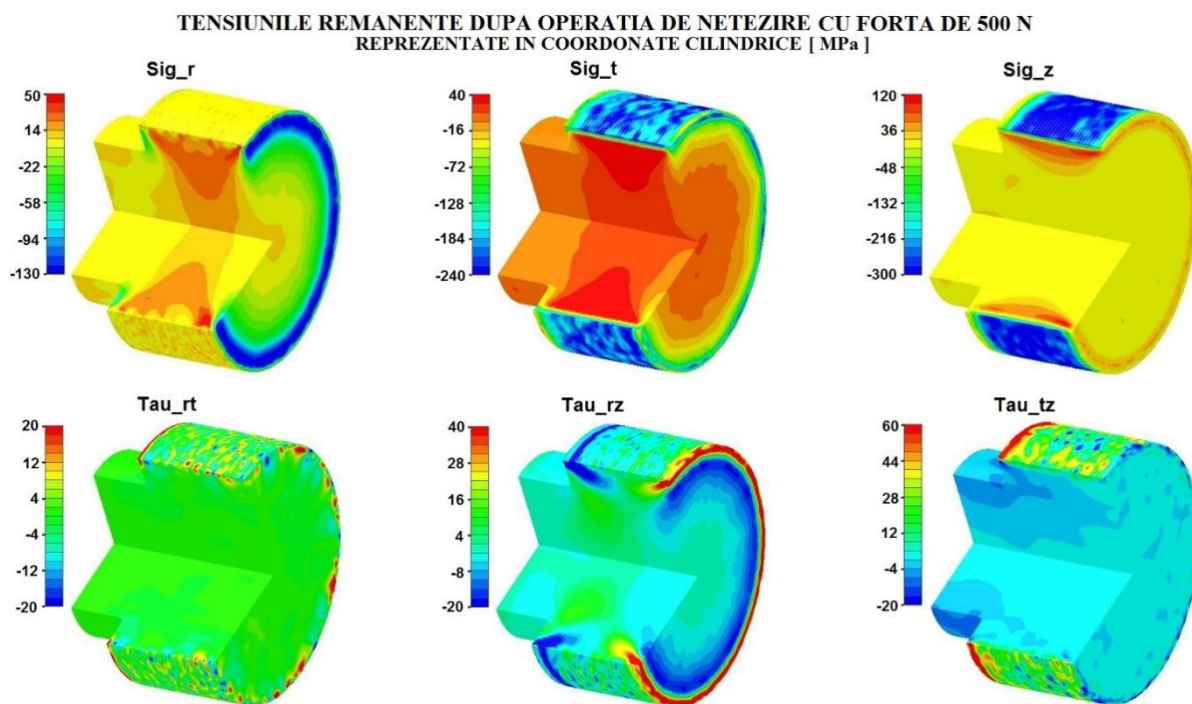


Fig. 3.22. Tensiunile remanente după operația de netezire cu forța de 500 N reprezentate în coordonatele cilindrice [MPa]

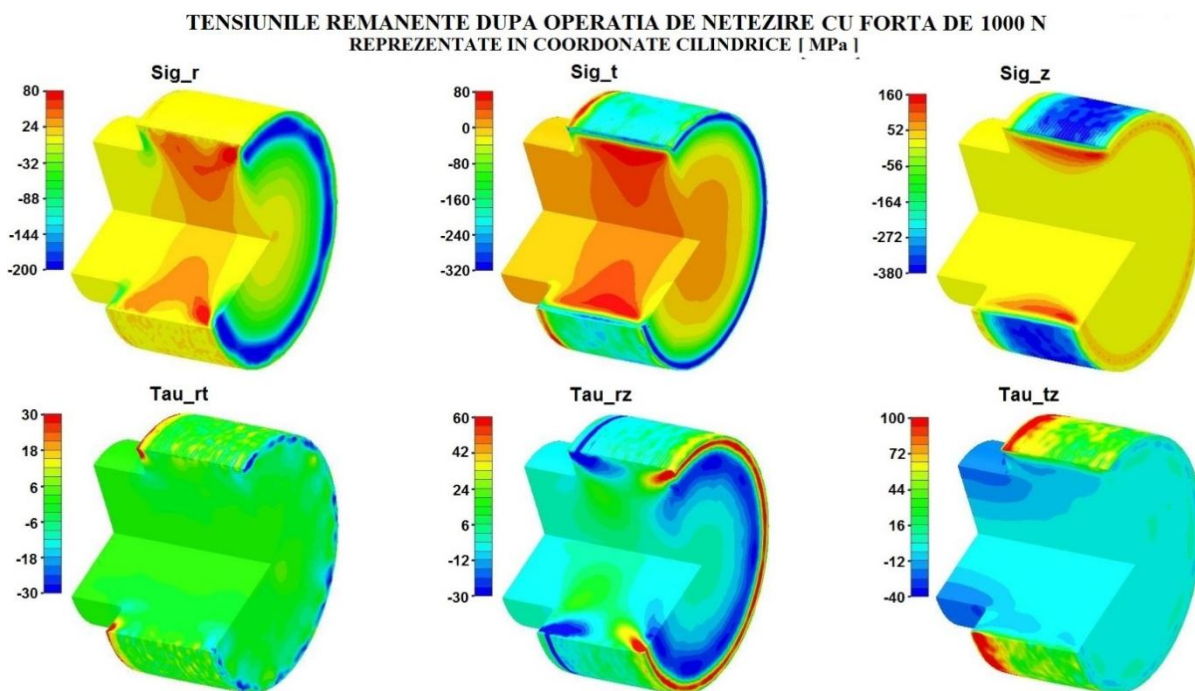


Fig. 3.23. Tensiunile remanente după operația de netezire cu forța de 1000 N reprezentate în coordonatele cilindrice [MPa]

Calculul tensiunilor în coordonatele cilindrice s-a făcut în tabelul de calcul EXCEL CALC- 50 și CALC-1000 care de asemenea se găsesc în ANEXE.

În tabelele de calcul s-au introdus tensiunile preluate de la soluțiile simulate, din fișierele Starea\_Rem-500 și Starea\_Rem-1000 și coordonatele centrelor din fișierele CENT-500 și CENT-1000.

Tensiunile în coordonatele cilindrice s-au calculat pe coloane, folosind relațiile (3.3).

Datele calculate au fost în final transferate în fișiere grafice de reprezentare, pentru ambele variante de lucru Sr, St, Trt, Trz și Ttz. Fișierul pentru  $\sigma_z$ , Sz a fost preluat nemodificat.

Stările remanente de tensiune din semifabricat, în coordonatele cilindrice, sunt reprezentate în figura 3.22 pentru Fr = 500 N și figura 3.23 pentru Fr = 1000 N. În aceste figure, fiecare tensiune are scară de reprezentare proprie. Pentru claritatea imaginilor, scările au fost ajustate, rotunjind valorile de la capete la ordinul zecilor.

Se constată, la analiza ambelor figuri, că tensiunile remanente sunt concentrate în vecinătatea suprafeței prelucrate și pe aceasta. Se observă o scădere rapidă a intensității tensiunilor pe măsura depărtării de stratul deformat plastic. Și aici, ca și în cazul analizei stratului plasticizat, se remarcă efectul de margine care influențează negativ omogenitatea tensiunilor remanente și, în consecință, proprietățile mecanice.

Pentru simularea cu forța de 1000 N se decelează tensiunea circumferențială extremă în substrat, împreună cu alte constatări anterioare în acest sens.

În concluzie, câmpurile tensiunilor remanente după operația de netezire arată că aceasta își atinge unul dintre principalele scopuri în care este aplicată – întărirea superficială a materialului.

#### **3.4.4. Analiza locală a tensiunilor**

În zona de contact dintre capul sferic al sculei și materialul semifabricatului se produce o stare locală, dinamică, de tensiune care are ca efect deformări elasto-plastice. La încetarea acțiunii locale a forțelor de contact, ca urmare a mișcării celor două corpuri, materialul rămâne în stările de deformare și de tensiune descrise în punctele 3.4.2 și 3.4.3.

Analiza stării de tensiune care produce deformarea plastică este necesară pentru a evidenția unele proprietăți caracteristice contactului dinamic elasto-plastic.

Pentru analiză, s-a reținut o secvență intermediară a operației de netezire ( $t = 6.71$  s), cu condiția ca punctul teoretic de contact să se suprapună pe un nod al rețelei semifabricatului, condiție care permite realizarea secțiunilor de reprezentare interelementare. Analiza acestei probleme s-a făcut numai pentru cazul netezirii cu forța maximă Fr = 1000 N.

În figura 3.24, în partea centrală, este reprezentat modelul contactului în acțiune. În scopul evidențierii clare a efectului local al contactului, din piesa secționată s-a extras o porțiune limitată la câteva rânduri de elemente, suficient de mare, însă, pentru a prinde variația câmpului de tensiune.



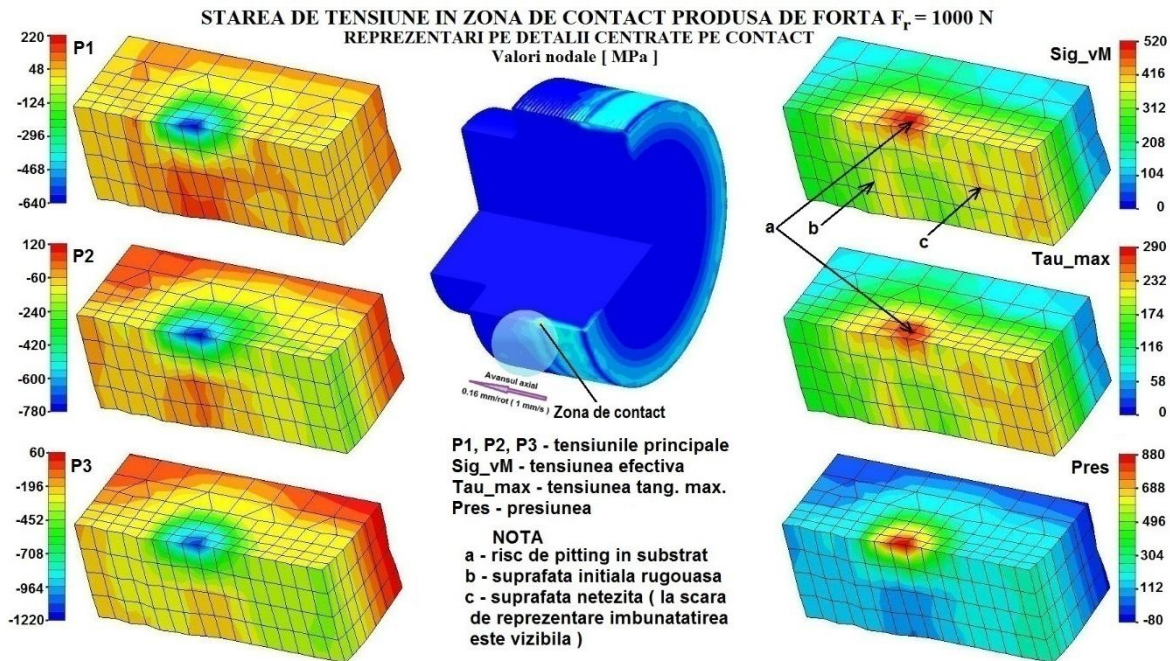


Fig. 3.24. Starea de tensiune în zona de contact produsă de forța  $F_r = 1000$  N – reprezentări pe detalii centrate pe contact [MPa].

Starea de tensiune simulată a fost reprezentată prin setul de tensiuni care nu depind de sistemul de referință:

- tensiunile principale, maximă, intermediară, minimă:  $P_1, P_2, P_3$ ;
- tensiunea efectivă Von Mises:

$$Sig_{vM} = \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)^2 + (P_2 - P_3)^2 + (P_3 - P_1)^2}{2}}; \quad (3.4)$$

- tensiunea tangențială maximă – Tresca:

$$Tau_{max} = \frac{P_1 - P_3}{2} \quad (3.5)$$

- presiunea (tensiunea medie cu semn schimbat)

$$Pres = -\frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad (3.6)$$

Reprezentările câmpurilor acestor tensiuni, pe decupajul centrat pe contact, permit formularea câtorva concluzii utile pentru această analiză. În primul rând, se constată că cele trei tensiuni principale produc compresiuni pe cele trei direcții cu intensități (640 MPa, 780 MPa, 1220 MPa) care depășesc rezistența unidirecțională a materialului chiar și de trei ori. Lucrând însă simultan, cele trei tensiuni principale produc o stare majoritar hidrostatică la presiunea maximă de 880 MPa. Pentru această stare, tensiunile care dau rezistență materialului  $Sig_{vM}$  și  $Tau_{max}$ , afectate și de vâscozitate, au valorile maxime încadrate pe curba de material. În consecință, pentru solicitarea preponderent de compresiune care se produce la contactul dintre sculă și piesă, la netezirea cu forța de 1000 N, respectând condițiile

unei lubrificații bune (coeficient de frecare de 0.05), se poate considera că rezistența materialului nu este afectată.

În al doilea rând, se poate observa clar, pe reprezentările tensiunilor  $Sig_{vM}$  și  $Tau_{max}$ , că valorile maxime ale acestora se realizează în substrat. Această distribuție a tensiunilor pe care se bazează criteriile de cedare, tensiunea efectivă și tensiunea tangențială maximă, sugerează riscul producerii fenomenului de măcinare, de fulgure, de microexfoliere sau mai pe scurt *pitting*. Pitting-ul se produce în anumite condiții de lucru, când forța limită de lucru a fost depășită sau când se lucrează cu o lubrificație neadecvată, sau mai grav, când nu există lubrificație. Acest fenomen nedorit are loc ca urmare a alunecării relative a straturilor de material, produse în special de tensiunea tangențială maximă. Când această mărime depășește valoarea de cedare, din material se desprind particule sub formă de solzi. Această explicație, consecință a simulărilor numerice, susține constatarea experimentală a măcinării suprafeței prelucrate atunci când regimul de lucru iese din parametri. În prevenirea pitting-ului lubrificația corectă joacă un rol determinant.

O altă constatare, vizibilă pe reprezentările la scară mărită din figura 3.24 se referă la îmbunătățirea calității suprafeței prelucrate prin netezire. O abordare cantitativă a acestui efect se va efectua în paragraful următor.

#### **3.4.5. Îmbunătățirea calității suprafeței prelucrate prin operația de netezire**

Un alt scop principal al aplicării operației de netezire constă în îmbunătățirea calității suprafețelor prelucrate.

Simularea numerică a procesului de netezire permite o abordare cantitativă a rugozității pe suprafețele prelucrate. După cum s-a stabilit în paragraful 3.1, pe întreaga suprafață de prelucrat s-a generat aleator o rugozitate ce corespunde unei operații de strunjire brută. Generarea s-a făcut prin deplasarea aleatoare, între anumite limite, a nodurilor de pe suprafață, în cele trei direcții, astfel încât pe suprafață să apară șanțuri neregulate care imită urmele de cuțit la operația de strunjire brută.

Înainte de simulare, pe suprafața de prelucrat s-au stabilit 8 zone pentru evaluarea rugozității (fig. 3.25). Aceste zone sunt repartizate uniform, la jumătatea semifabricatului. În partea dreaptă a figurii 3.25 este reprezentată zona de evaluare nr. 1, care include o parte din elementele și nodurile de control. Pe acest detaliu sunt vizibile denivelările rugozității simulate în forma inițială.

Pentru evaluarea rugozității s-au reținut pe bază de măsurare nodurile corespunzătoare celor cinci valori maxime, respectiv celor cinci valori minime de înălțime.

Calculul rugozității măsurate,  $R_z$ , s-a considerat diferență dintre media celor cinci valori maxime și media celor cinci valori minime.

Deși rețeaua de elemente finite impune o formă într-o oarecare măsură artificială, modelul rugozității simulate adoptat este acoperitor din punct de vedere practic.

## LOCALIZAREA ZONELOR PENTRU EVALUAREA RUGOZITĂȚII SIMULATE

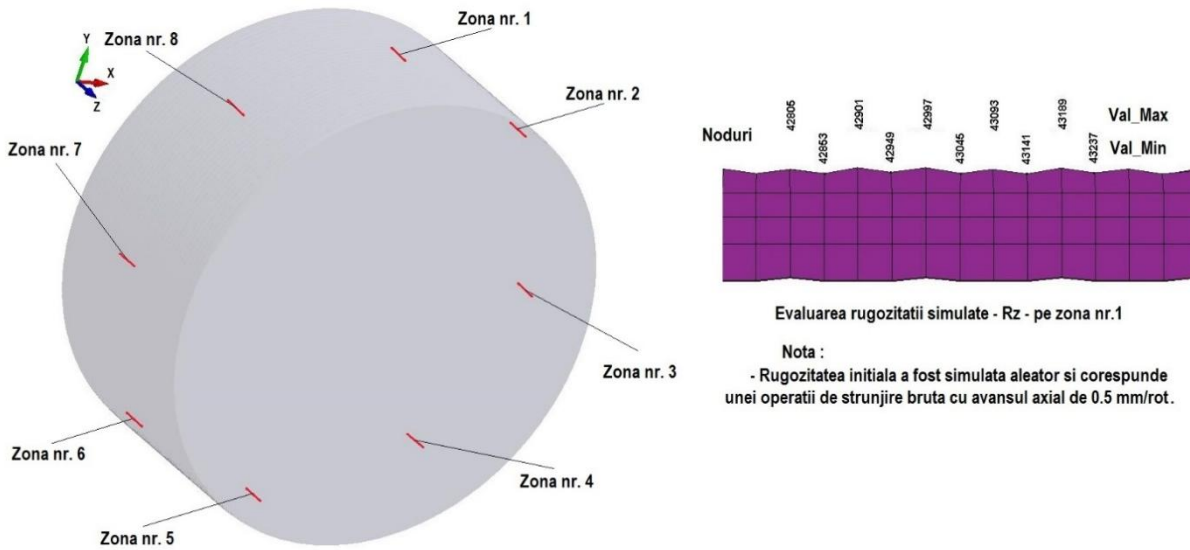


Fig. 3.25. Localizarea zonelor pentru evaluarea rugozității simulate

Calculul rugozității  $R_z$  s-a efectuat în tabelul de calcul EXCEL CALC\_RUGOZ (ANEXE) pentru cele 8 zone în starea inițială și în cea finală pentru cele două forțe de lucru, folosind coordonatele nodurilor de referință cu care s-au determinat razele, pentru fiecare zonă, cinci raze maxime și cinci raze minime. Conform celor stabilite, razele s-au mediat pe categorii, apoi, prin scădere s-a determinat rugozitatea simulată pentru fiecare zonă.

Rugozitatea generală a suprafeței prelucrate s-a obținut prin medierea valorilor rugozității stabilite pe zone.

În tabelul 3.2 sunt centralizați datele calculate în tabelul de calcul CALC\_RUGOZ.

Din analiza datelor centralizate în tabelul 3.2 se constată că prelucrarea cu forță de netezire de 1000 N asigură o calitate a suprafeței de aproximativ patru ori mai bună după criteriul rugozității. Rugozitatea inițială fiind simulată aleatoriu, apar diferențe de la o zonă la alta.



## Centralizator rugozității generale a suprafeței prelucrate

Tabelul nr. 3.02

	STAREA INITIALA		STAREA FINALA			
	R [ mm ]	Rz [micron]	Fr = 500 N		Fr = 1000 N	
			R [ mm ]	Rz [ micron ]	R [ mm ]	Rz [ micron ]
			<b>Zona nr.1</b>			
Rmaxmed	1.74743E+01		1.74632E+01		1.74595E+01	
Rminmed	1.74397E+01		1.74472E+01		1.74546E+01	
		34.6		16.0		4.9
			<b>Zona nr. 2</b>			
Rmaxmed	1.74684E+01		1.74601E+01		1.74556E+01	
Rminmed	1.74398E+01		1.74464E+01		1.74531E+01	
		28.8		13.7		2.5
			<b>Zona nr. 3</b>			
Rmaxmed	1.74678E+01		1.74591E+01		1.74585E+01	
Rminmed	1.74428E+01		1.74485E+01		1.74543E+01	
		25.0		10.6		4.2
			<b>Zona nr. 4</b>			
Rmaxmed	1.74697E+01		1.74637E+01		1.74612E+01	
Rminmed	1.74406E+01		1.74439E+01		1.74507E+01	
		29.1		19.8		10.5
			<b>Zona nr.5</b>			
Rmaxmed	1.74727E+01		1.74614E+01		1.74632E+01	
Rminmed	1.74436E+01		1.74468E+01		1.74546E+01	
		29.1		14.8		8.6
			<b>Zona nr. 6</b>			
Rmaxmed	1.74716E+01		1.74595E+01		1.74625E+01	
Rminmed	1.74333E+01		1.74457E+01		1.74489E+01	
		38.3		12.0		13.8
			<b>Zona nr. 7</b>			
Rmaxmed	1.74690E+01		1.74607E+01		1.47624E+01	
Rminmed	1.74417E+01		1.74490E+01		1.74527E+01	
		27.3		11.7		9.7
			<b>Zona nr. 8</b>			
Rmaxmed	1.74678E+01		1.74625E+01		1.47603E+01	
Rminmed	1.74375E+01		1.74498E+01		1.07000E+02	
		30.3		12.7		10.7
<b>Rugozitatea [ micron ]</b>		<b>30.3</b>		<b>13.9</b>		<b>8.1</b>

Odată cu evaluarea calității suprafeței supusă operației de netezire, se încheie analiza prin simulare numerică a stratului deformat plastic fiind trase următoarele concluzii:

- procesul de netezire aplicat pieselor din fontă, are ca prim efect creșterea caracteristicilor mecanice pe suprafața prelucrată, fapt ce le face mai rezistente la solicitările mecanice și la uzură;
- prin netezire rugozitatea se reduce foarte mult și în consecință, interacțiune dintre piesele supuse acestui procedeu și mediul conjugat (de exemplu pasta de sticlă) se face cu forțe de frecare reduse, diminuându-se în acest fel aderența;
- în anumite condiții de lucru, în procesul de netezire se poate produce pitting-ul. Acest fenomen nedorit poate fi evitat, limitând forțele de lucru și asigurând o lubrificație optimă;
- sunt necesare unele măsuri pentru reducerea efectului de margine precum: rotunjirea sau teșirea muchiilor, controlul intensității forțelor, proiectarea pieselor cu forme continue și netede.

### 3.5. Analiza transferului de căldură în interiorul matriței

În timpul formării produsului, prin pereții matriței trec până la 95% de căldură. Câmpul termic în matriță se schimbă în funcție de timp, ceea ce conduce la dificultăți în rezolvarea matematică a acestei probleme. Matrița lucrează într-un regim cvasistaționar, caracterizat prin repetarea câmpurilor termice și pentru care este veridică ecuația transferului de căldură în regim staționar, luând în considerare coeficientul de corecție pentru ciclul de formare. Diferența dintre temperatura medie a suprafeței interne și externe a matriței dreptunghiulare se exprimă prin următoarea dependența de parametrii tehnologici:

$$t_1 - t_2 = \frac{kQ\delta}{S\lambda\tau} \quad (3.7)$$

Unde:  $t_1$  - temperatura medie a suprafeței interne a formei;  $t_2$  - temperatura medie a suprafeței externe a formei;  $k$  - coeficientul care ia în considerație transferul căldurii prin părțile de capăt și de sprijin;  $Q$  - cantitatea de căldură, transmisă printr-un ciclu de formare;  $\delta$  - grosimea peretelui formei;  $S$  - suprafața comună de contact;  $\lambda$  - capacitatea de căldură a materialului formei;  $\tau$  - durata totală a ciclului de formare.

Pentru matrița cilindrică formula ia aspectul următor:

$$t_1 - t_2 = \frac{kQ \ln \frac{r_2}{r_1}}{2l\pi\lambda\tau} \quad (3.8)$$

unde:  $t_1, t_2, k, Q, \lambda, \tau$  - ca și în formula precedentă;  $l$  - lungimea formei cilindrice;  $r_1$  și  $r_2$  - radiusul intern și extern al formei.

Temperatura cea mai înaltă a matriței este la suprafața de lucru, unde variațiile ei sunt de 50-80°C. Însă astfel de variații au loc în apropierea masei de sticlă în procesul de formare, iar la adâncimea de 10mm variațiile sunt atenuate și au valoarea (în caz de durata ciclului  $\tau=10s$ ) de 30%, iar la adâncimea de 20mm doar 1% în comparație cu variațiile temperaturii pe suprafața de lucru. Prin urmare, în zona adiacentă, în cavitatea de formare a matriței are loc formarea zonei nestaționare de transfer de căldură – zona de acumulare, care se extinde la adâncimea pătrunderii valului de căldură  $E$ , ce poate fi determină prin ecuația:

$$E = \sqrt{\lambda c \gamma} \quad (3.9)$$

unde:  $\lambda$  - coeficientul de conductivitate termică;  $c$  - căldura specifică;  $\gamma$  - densitatea specifică a materialului.

Cînd  $E$  ia o valoare mică, are loc creșterea variației temperaturii și astfel crește posibilitatea lipirii sticlei de formă.

La zona nestaționară a matriței se învecinează zona staționară, care se caracterizează prin schimbarea stabilită liniară a temperaturii și poate fi considerată ca un strat termoizolator.

Cu creșterea grosimii peretelui matriței crește și nivelul termic al zonei nestaționare din cauza creșterii stratului termoizolant. În cazuri când grosimea matriței este mai mică decât a zonei nestaționare, ceea ce înseamnă lipsa zonei staționare, variația termică din matriță atinge suprafața și procesul de formare devine instabil din cauza impactului parametrilor de răcire a formei care au fost schimbați. În practică se impune o grosime a peretelui matriței mai mare de 1,5-2 ori decât a zonei de acumulare.

### 3.5.1. Transferul de căldură de la matriță în mediul ambiant

Balanța termică a matriței în timpul ciclului de formare a produsului poate fi exprimată prin ecuația:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3.10)$$

unde:  $Q$  – cantitatea de căldură care a pătruns în matriță în timpul unui ciclu de formare;  $Q_1$  – cantitatea de căldură care a fost acumulată de matriță;  $Q_2$  – cantitatea de căldură care a fost transferată de la matriță în mediul ambiant într-un ciclu de formare.

Eliminarea căldurii de la pereții matriței în procesul modelării se efectuează prin răcire cu flux forțat de aer sau prin convecție naturală. În unele cazuri, la modelarea produselor suflate, matrițele sunt răcite prin cufundarea în apă sau stropirea cu aceasta.

Aerul este bine dozat și pătrunde liber în formă, astfel, deși capacitatea termică a aerului este scăzută, acesta este utilizat pe larg în industria de sticlă ca un agent de răcire. Intensitatea eliminării căldurii de la suprafața externă a formei spre mediul de răcire se caracterizează prin ecuația:

$$Q = (t_2 - t_0)\alpha S \tau \quad (3.11)$$

unde:  $t_2$  – temperatura suprafeței externe a formei;  $t_0$  – temperatura aerului de răcire;  $\alpha$  – coeficientul transferului de căldură;  $S$  – suprafața de răcire;  $\tau$  – timpul.

Experimental s-a demonstrat că coeficientul transferului de căldură de la suprafața externă a matriței în mediul ambiant nu este dependent de durata ciclului de formare, însă crește odată cu creșterea vitezei de alimentare cu aer. La temperatura  $t_2 = 400^\circ\text{C}$  și viteza

aerului de răcire 10 m/s, coeficientul transferului de căldură este egal cu 70,8 Wt/(m<sup>2</sup>\*°C), iar la viteza de 20 m/s crește până la 96,3 Wt/(m<sup>2</sup>\*°C).

Însă, odată cu creșterea vitezei de alimentare cu aer are loc creșterea importantă a cheltuielilor energetice, de aceea este rațional a utiliza aer cu viteză medie pentru răcirea formelor.

Metoda cea mai efectivă pentru intensificarea transferului de căldură constă în creșterea suprafeței externe a formei prin executarea suprafeței neregulate. Cu ajutorul nervurilor, suprafața se extinde de 3-4 ori și astfel crește brusc transferul de căldură în mediul ambiant la menținerea cheltuielilor pentru aerul de răcire.

Pentru a determina suprafața necesară de răcire, trebuie determinat volumul de energie termică preluat de formă în zona respectivă. Toate aceste datele depind de configurația articolului fabricat.

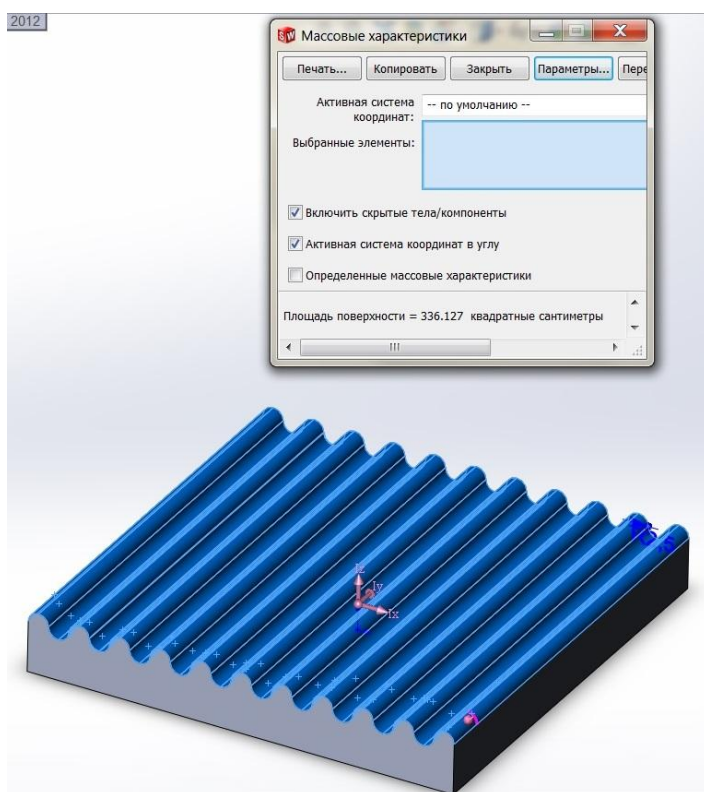
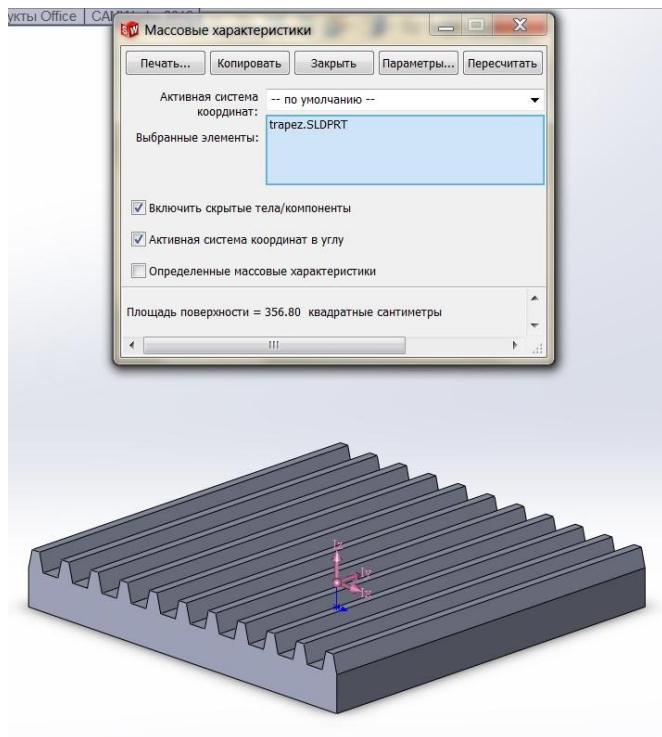
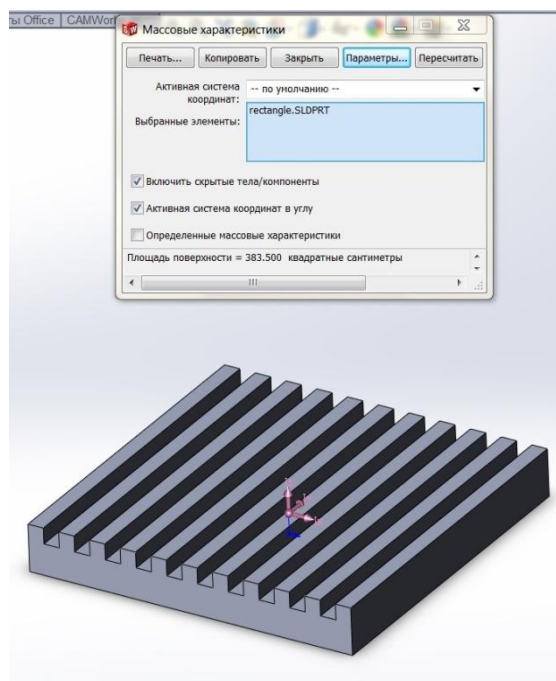


Fig. 3.26. a). Suprafața maximală a diferitor variante constructive de radiatoare



b)



c)

### 3.5.2. Lărgirea capacităților tehnologice ale procesului de fabricație prin metode constructive

Lărgirea capacităților tehnologice, și anume, mărirea complexității buteliilor confecționate, micșorarea masei lor sau sporirea productivității mașinii poate fi atinsă prin două căi: 1. Schimbarea tehnologiei folosite sau modificarea ei. 2. Modificarea elementelor constructive.

1. Schimbarea tehnologiei aplicate propusă reprezintă o combinație a tehnologiilor existente prin aplicarea pieselor modificate și descrise în brevetul de invenție MD358Z2011.11.30 “Echipament de prefasonare pentru mașina automată de formare a produselor din sticlă cu gât îngust”.

Invenția se referă la industria fabricării sticlei și este destinată pentru obținerea produselor din sticlă cu gât îngust cu diverse destinații, profil și capacitate, pe automate de formare a sticlei.

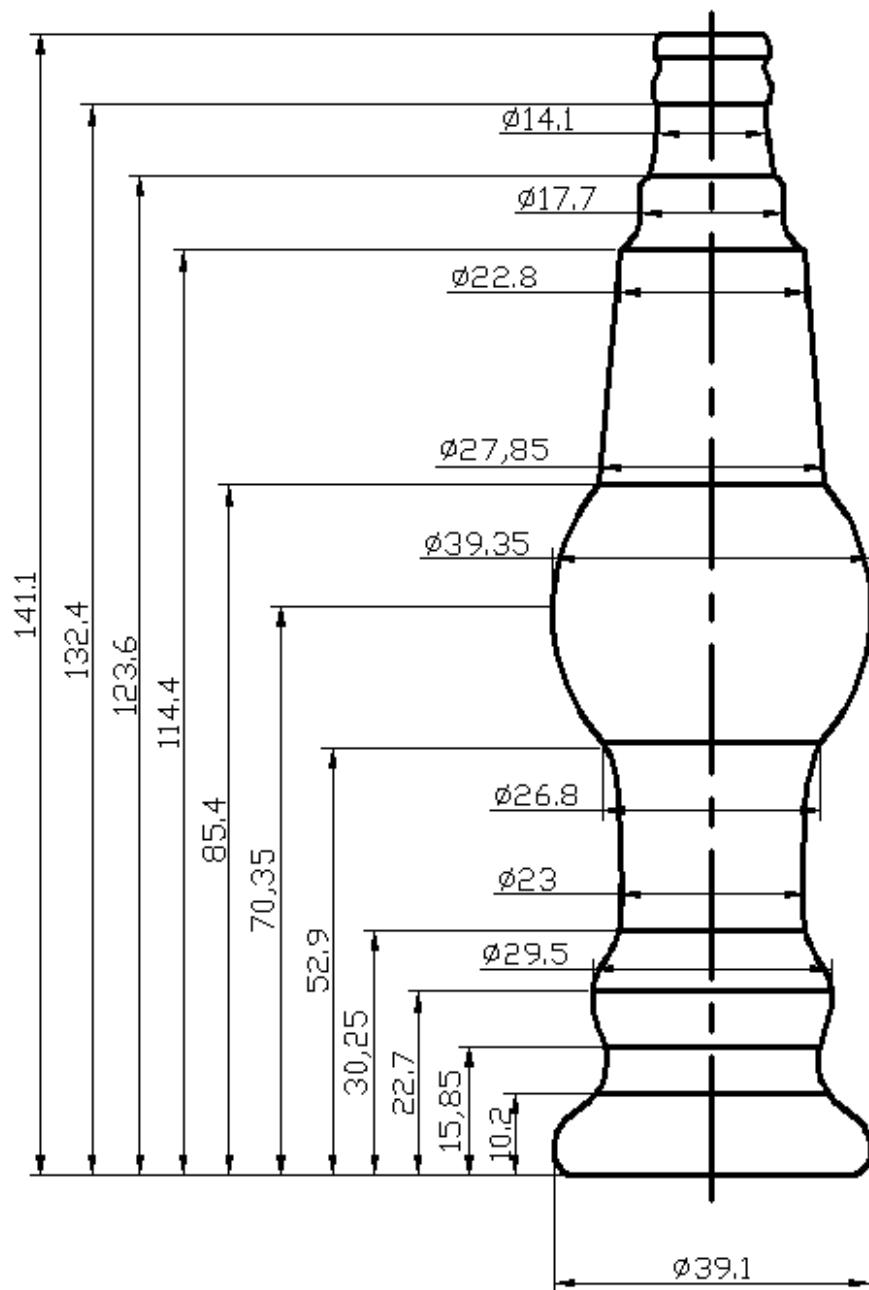


Fig.3.29. Sticla de formă complexă „extaz 0,25l”

Este cunoscută construcția plunjerului cu suprafața de lucru ce constă din două sectoare cu secțiuni variabilă și altul de secțiune cilindrică.

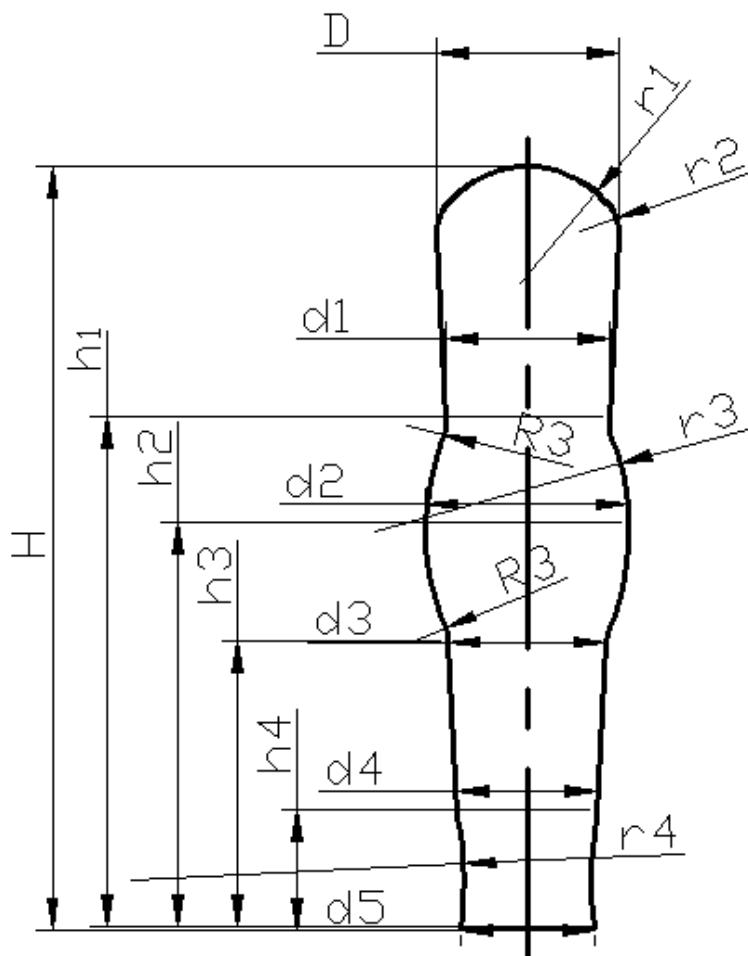


Fig.3.30. Forma semifabricatului pentru fabricarea sticlei

Această construcție a plunjerului nu permite executarea produselor din sticlă de diversă configurație din cauza repartiției neuniforme a sticlei în zonele cu diferență mare în secțiune (apare subțierea pereților sau găurilor).

Scopul invenției, constă în micșorarea masei produselor din sticlă odată cu mărirea nivelului de complexitate a profilului butelii și creșterea productivității automatului de formare a produselor din sticlă.

Scopul invenției se exprimă prin faptul că setul de modelare automată a produselor din sticlă cu gât îngust, care conține plunjer, iar forma prealabilă cu suprafața de lucru de formă sferică cu secțiune variabilă, suprafața de lucru a plunjerului, conține două sectoare variabile, sector determinat de o curbă și ultimul sector de secțiune cilindrică. Pe suprafața determinată de o curbă generatoare sunt amplasate găuri care comunică cu cavitatea interioară a plunjerului. Diametrul găurilor se calculează prin relația:

$$d = 2 \sqrt{\frac{S_{tot}}{\pi * n}} = \sqrt{\frac{S_{tot}}{\pi^2 * F * P * R_{pl}}};$$

unde:

Stot - suprafața totală a găurilor, mm<sup>2</sup>;

R<sub>pl</sub> - raza plunjerului în locul executării găurilor, mm;

F - forța necesară pentru formarea masei de sticlă, N;

P - presiunea aerului în sistem, MPa;

Numărul de găuri se calculează prin relația:

$$n = \frac{S}{\pi * R_{pl}} = \frac{F}{P * \pi * R_{pl}}$$

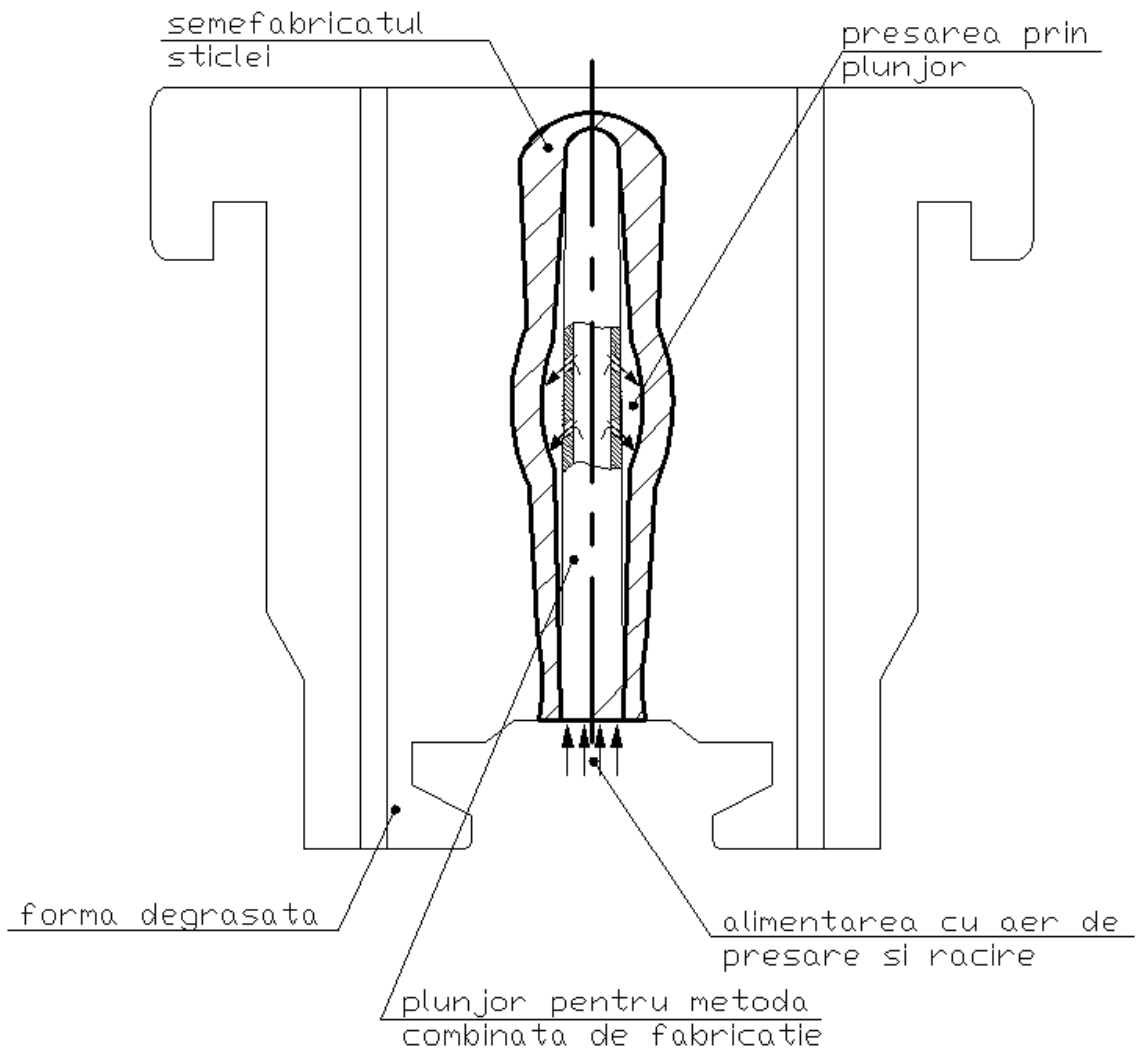


Fig.3.31 Procesul de producere a sticlelor prin metoda combinată de fabricație

În figura 3.29 este reprezentată sticla cu profil complex cu treceri bruște care necesită o repartizare egală a masei sticlei pe tot perimetrul. În figura 3.30 este arătat semifabricatul (rotit la 180 grade) necesar pentru execuția sticlei reprezentată în figura 3.29, cu pereții îngroșați în locul unde are loc trecerea bruscă a suprafețelor sticlei. În figura 3.31 este reprezentată schematic secțiunea



dispozitivului pentru formarea produselor din sticlă. În figura 3.32 este reprezentat plunjerul cu găurile tehnologice destinate pentru suflarea finală.

Configurația propusă a cavității interioare a forme de turnare prealabilă și a plunjerului va permite să organizăm mai rațional curgerea hidrodinamică a masei de sticlă în timpul presării și să asigurăm o evacuare mai rațională a căldurii din cavitatea exterioară și interioară a sticlei. Modificarea grosimii bulei din sticlă pe înălțime se alege astfel, încât straturile exterioare ale bulei după încălzirea repetată la momentul suflării produsului final să aibă o temperatură mai uniformă.

Dispozitivul funcționează în felul următor. Bula din sticlă cade în forma prealabilă. Când ajunge în forma prealabilă, plunjerul se află în poziția de mijloc. După ce paletul coboară pe forma prealabilă, începe ridicarea plunjerului. Sub acțiunea plunjerului, care se deplasează prin inelul gătlejului, în cavitatea forme prealabile, masa din sticlă completează inelul gătlejului având loc

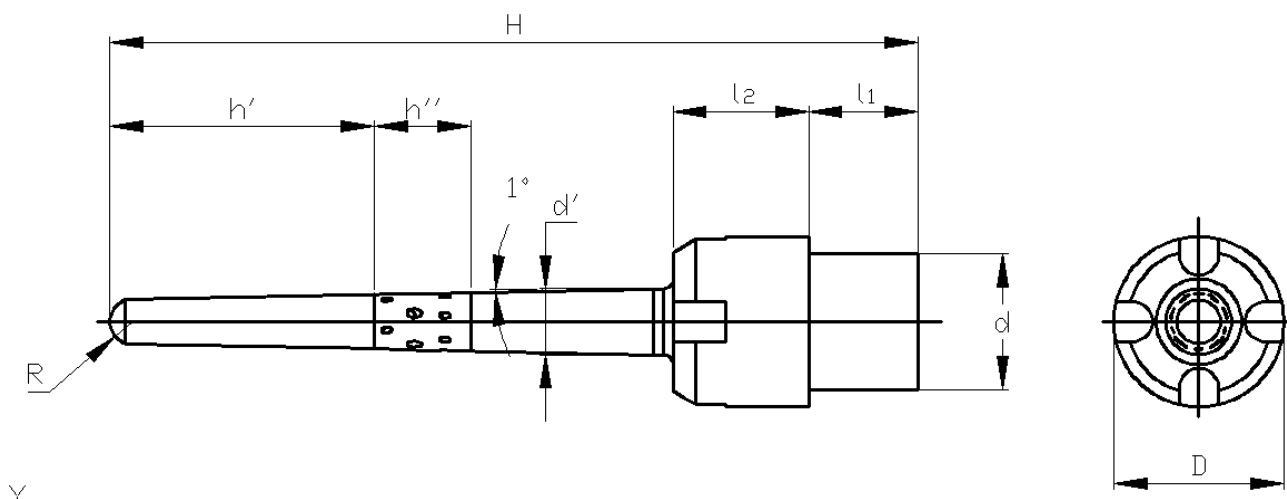


Fig.3.32. Plunjer pentru producerea sticlelor prin metoda combinată:  $h'$  – zona de lucru prin presare mecanică;  $h''$  – zona de lucru presare cu aer comprimat.

formarea bulei de sticlă.

Utilizarea setului de formare automată a produselor din sticlă cu gât îngust propus va permite a micșora masa buteliei (sticlei), a mări complexitatea profilului buteliei și a spori productivitatea automatului de formare a produselor din sticlă.

2. Modificarea elementelor constructive ale elementelor setului de forme reprezintă îmbunătățirea parametrilor tehnologici în mod indirect descrise în brevet de invenție Brevet Nr. 4143 MD, “Dispozitiv pentru turnarea produselor din sticlă prin metoda de aspirație cu vacuum”.

Invenția se referă la industria producătoare de sticlă și poate fi utilizată la execuția utilajului de turnare a sticlei prin formare - suflare și suflare.

Este cunoscută construcția paletului pentru setul de formare unde răcirea părții de jos se realizează cu ajutorul unui sistem de canale.

Construcțiile cunoscute ale paletelor de finisare nu permit obținerea produselor din sticlă calitativă cu fund încovoiat din cauza insuficienței răcirii lui (apar fisuri în partea de jos).

Este cunoscută construcția paletului setului de formare, unde răcirea părții de jos se realizează

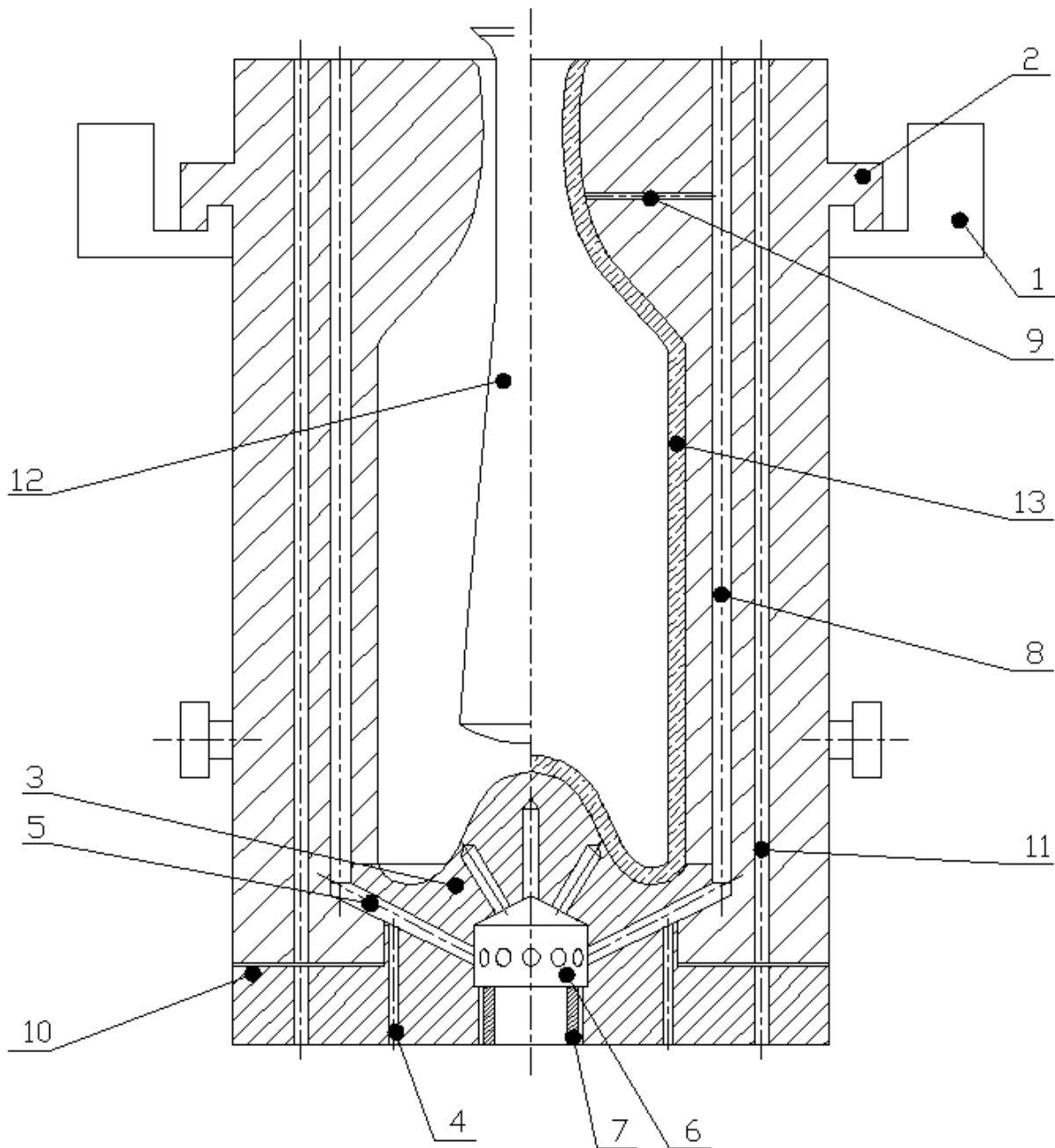


Fig.3.33. Forma asamblată: 1 - Elementul de menținere; 2 - forma de finisare; 3 - paletul de finisare; 4 - găuri de răcire; 5 - canale cu vacuum; 6 - gaura centrală; 7 - magistrala cu vacuum; 8 - canalele cu vacuum ale formei; 9 - canalele cu vacuum de dimensiuni mai mici; 10 - canalele de racire a paletului; 11 - canalele de racire a formei; 12 - semifabricatul produsului; 13 - produsul.

cu ajutorul unui sistem de canale după o spirală.

Soluțiile date ale paletelor de finisare nu permit obținerea produselor din sticlă calitative, deoarece turnarea fundului produsului din sticlă, care are o grosime variabilă, complică construcția forme și înrăutățește condițiile de muncă. În cazul dat este evident că utilizarea răcirii cu vacuum este imposibilă, deoarece conduce la scăderea productivității, a calității de formare a produselor din sticlă și ca urmare la erori geometrice. Totodată, construcția nu are efect pozitiv în cazul executării produselor din sticlă pentru șampanie de tip bordo, deoarece canalele de răcire se regăsesc în zone îndepărtate de la contactul cu paletetele de finisare cu sticla.

Scopul invenției constă în sporirea productivității dispozitivelor pentru formarea produselor din sticlă datorită optimizării condițiilor termice la formarea bazei produselor din sticlă, micșorarea rebutului prin crăpături și fisuri, îmbunătățirea condițiilor de muncă și utilizarea materialelor mai ieftine pentru execuția paletului de finisare.

Scopul invenției este atins prin faptul că, paletul este realizat dintr-o bucată de material în care sunt găuri normale și găuri înfundate. Poziția găurilor depinde de felul cum este prevăzută partea de jos a produsului din sticlă, o parte a găurilor comunicând cu sistemul frigorific, alta cu canalele de vacuum.

Tot în dispozitivul dat, în momentul de răcire a agentului frigorific, canalele de răcire cu vacuum sunt stopate cu o supapă.

În afară de aceasta, în dispozitivul dat canalele de răcire cu vacuum, în momentul răcirii cu agent frigorific, se folosește ghid cu cap de aspirație.

Tot în dispozitivul dat este făcută o gaură centrală radială în care se amplasează un distribuitor

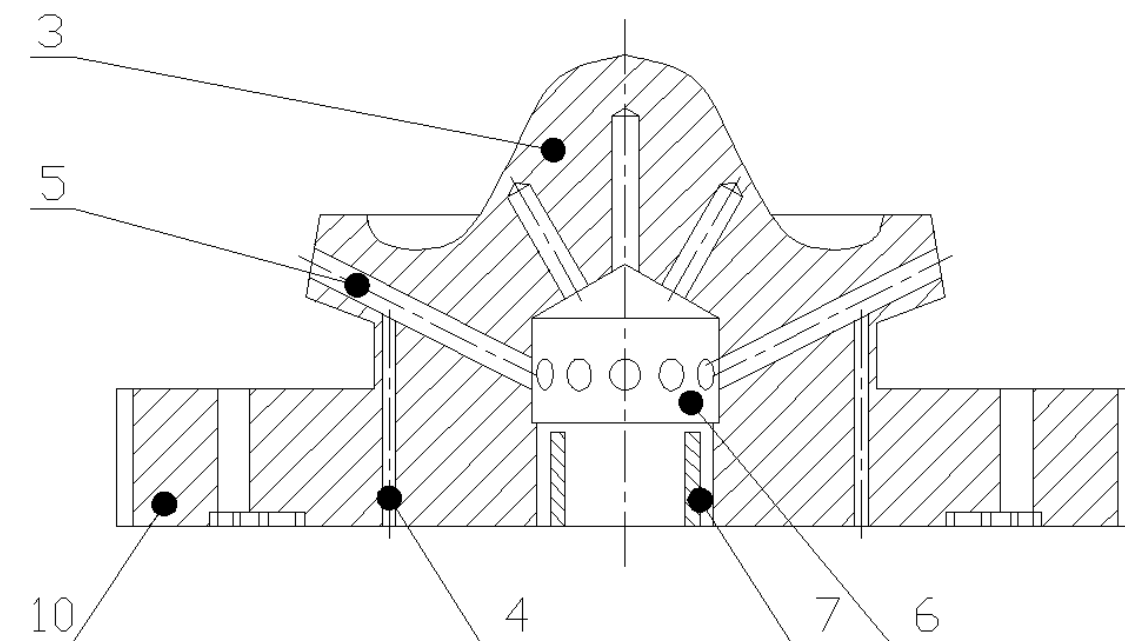


Fig.3.34. Paleta finisată: 3 - paletul de finisare; 4 - găuri de răcire; 5 - canale cu vacuum; 6 - gaura centrală; 7 -magistrala cu vacuum; 10 - canalele de racire a paletetei.

în formă de răcitor-spliter.

În figura 3.33 este reprezentată schematic secțiunea axială a dispozitivelor de formare a produselor din sticlă din figura 3.34. În figura este arătată o construcție a paletului de finisare pentru turnarea sticlelor cu o configurație clasică a Șampaniei sau tip Bordo; în figura 3.35. se reprezintă o construcție a paletului de finisare unde este instalată o supapă; în figura 3.36 se reprezintă o construcție a paletului de finisare unde este instalat distribuitorul de răcire.

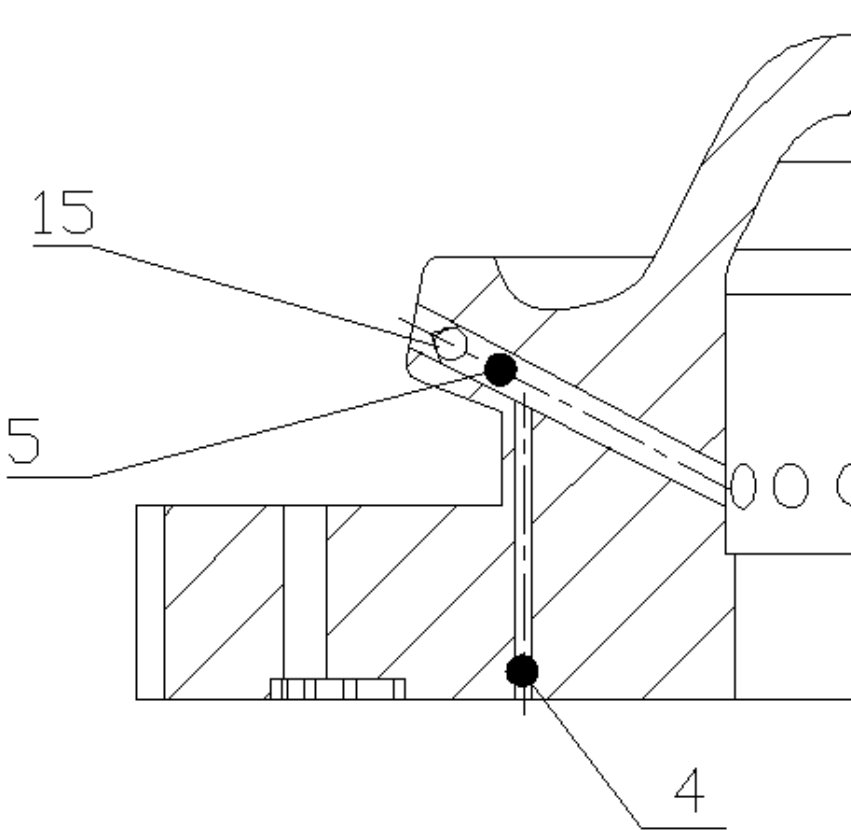


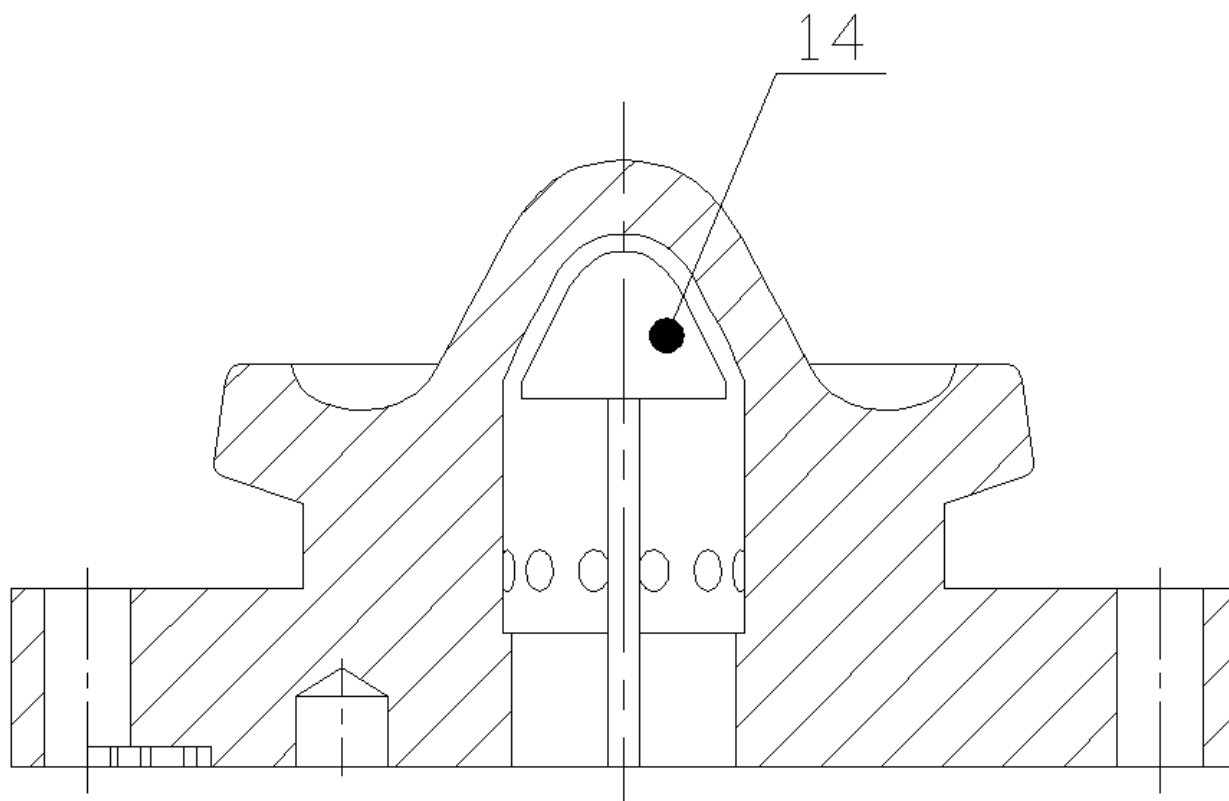
Fig.3.35. Paleta finisată cu o supapă: 4- găuri de răcire; 5- canale cu vacuum; 15- supapă.

Elementul de menținere 1 a formei de finisare este amplasat coaxial cu paletul 3, care este confecționat dintr-o bucată de material cu găuri de răcire 4, în corespundere cu numărul de canale de vacuum 5 care comunică între ele, la rândul lor comunicând cu gaura centrală 6 în care este amplasată conexiunea cu mecanismul de acționare cu vacuum. Canalele cu vacuum ale paletului 5 se comunică cu canalele cu

vacuum ale formei 8, care la rândul lor comunică cu canalele cu vacuum de dimensiuni mai mici 9, având conexiunea cu suprafața de formare. În palet sunt executate găuri axiale de racire a formei 11.

Dispozitivul lucrează în felul următor.

Semifabricatul produsului din sticlă 12 după formarea prealabilă ajunge în forma finită. Apoi cu



ajutorul

Fig 3.36. Paleta finisată cu distribuitorul: 14- distribuitor de răcire

ajutorul aerului comprimat ajunge în cavitatea semifabricatului de sticlă și a magistralei cu vacuum 7, a canalelor 5, 8 și 9 unde are loc formarea finală a produsului din sticlă. Sub acțiunea diferenței de presiune, semifabricatul se umflă, contactând strâns cu suprafețele de formare și ale paletului. În momentul dat, prin găurile 11 sub presiunea mare trece, aerul rece în sens de răcire. După finisarea procesului de formare a produsului din sticlă, aceasta se plasează pe masa de răcire. În momentul când produsul sau semifabricatul din sticlă lipsește are loc răcirea intensă a formei.

Utilizarea dispozitivului propus va permite sporirea productivității utilajului de turnare a sticlei prin intensificarea răcirii temeliei produsului. La turnarea sticlelor cu volum mare, dispozitivul va permite sporirea considerabilă a productivității. Totodată, înlăturarea supraîncălzirii suprafeței de lucru a bazei articolului confecționat va permite creșterea duratei de funcționare a utilajului de formare. În procesul de răcire a bazei se îndepărtează o cantitate considerabilă de căldură care poate fi utilizată și în alte scopuri.

### 3.5.3. Pregătirea completă a modelului supus simulării numerice

Codul numeric folosit pentru simulare, ANSYS, este un program de analiză a proceselor și fenomenelor fizice cu largi posibilități de utilizare în domeniul mecanicii corpurilor deformabile.

Discretizarea modelului fizic reprezentată în figura 3.14, ca o esențializare a procesului impus analizei, a fost realizată cu densitatea constantă.

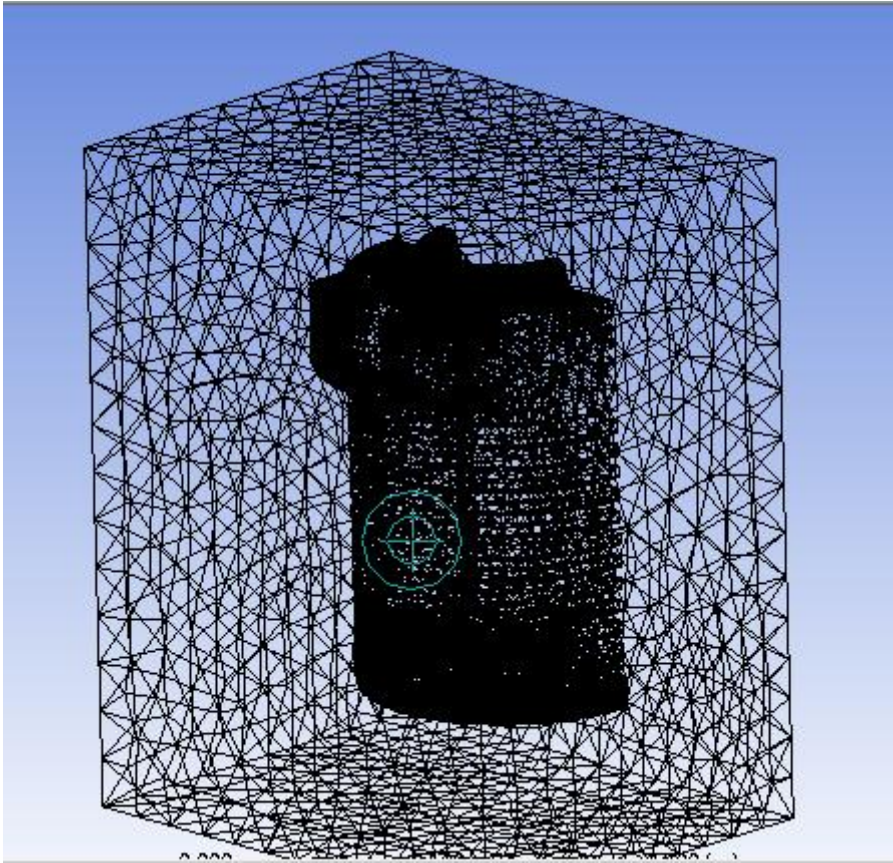


Figura 3.37. Discretizarea modelului fizic

### 3.5.4. Simularea regimului de răcire-încălzire a formei pentru două variante

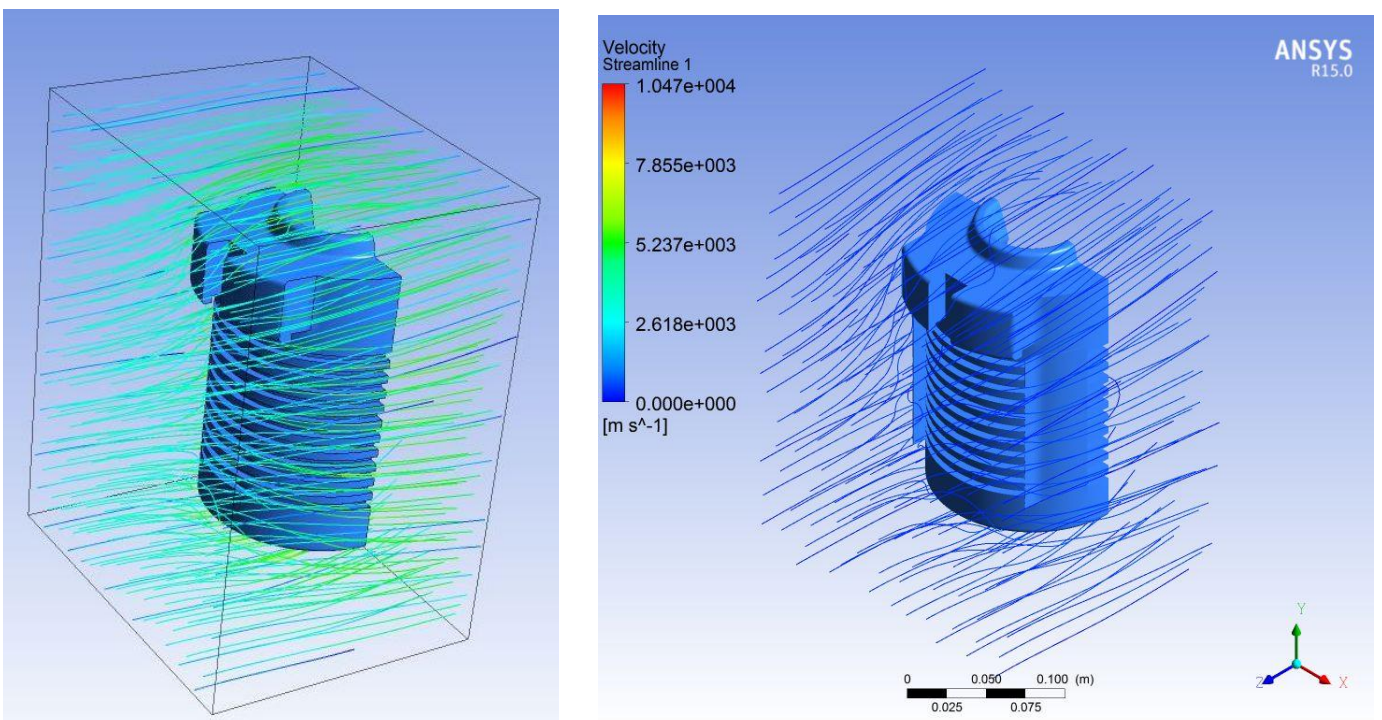


Fig. 3.38. Discretizarea modelului fizic

Piesa cilindrică cu diametrul de 150 mm cu elemente de răcire (radiatoare speciale) constituie prima varianta, iar cu elemente de răcire și aripi speciale a doua variantă. Din figura 3.38 putem efectua analiza calitativă a suprafeței prelucrate în funcție de viteza de suflare. Este vizibilă o diferență de temperatură determinată prin culoare suprafețelor răcite.

### CONCLUZII LA CAPITOLUL 3

- Rezultatele obținute în urma simulărilor numerice ale proceselor de netezire și durificare a pieselor din fontă cenușie cu grafit lamelar a concluziona capacitatea acestor metode de a aborda fenomenele complexe care se produc în materialele deformate plastic.
- În procesul de simulare numerică descris în acest capitol **au fost simulate două variante tehnologice cu mai multe regimuri de lucru**. Rezultatele obținute permit a concluziona că cea mai favorabilă varianta de prelucrare este cu o forță de 500N prin câmpul deformației plastice monocromice.
- Luând în considerare rezultatele obținute, se poate trage concluzia că metoda de prelucrare cu scula flexibilă are avantajul de a fi aplicată pe piese necondiționate cu abateri de formă și poziție. Singura condiție: forma suprafeței de prelucrat trebuie să fie compatibilă cu mișcările mașinii pe care se aplică procedeul.
- Reieșind din rezultatele obținute în diagrame și tabele, se constată că metoda de prelucrare cu scula flexibilă are și unele dezavantaje. Printre acestea se enumeră gradul de deformare pe suprafața prelucrată. Din cauza flexibilității sculei, adâncimea de pătrundere nu se poate menține perfect constantă datorită fluctuațiilor de material din frontul de atac al sculei. Adâncimea de pătrundere variabilă produce, la rândul ei, deformații plastice de intensitate variabilă. În consecință, gradul de deformare, fiind variabil pe suprafața prelucrată, va determina neomogenitatea proprietăților mecanice. În afară de acest dezavantaj, ca urmare a deformării diferite, se produce și o abatere a suprafeței de la forma ideală. Simularea a scos la iveală o periodicitate geometrică și mecanică a calității suprafeței prelucrate.
- Prelucrarea cu sculă rigidă este mult mai pretențioasă, impunând utilaje complexe cu posibilități de control activ al poziției sculei în raport cu piesa prelucrată. De aici reiese că aceste condiții pot fi considerate ca un dezavantaj economic.
- Reieșind din diagramele colorate ale câmpurilor de deformații ale procedurii de prelucrare cu sculă rigidă, se trage concluzia că se menține constantă adâncimea de prelucrare și, în

consecință, se obține o uniformizare a deformației plastice și o omogenitate mai bună a proprietăților obținute de material.

- Datorită acestor simulări s-a observat că acestea pot evidenția faptul că pentru folosirea unor căi, de exemplu experimentale, ar fi necesare resurse importante și instalații deosebite.
- Metodologia de simulare aplicată în acest capitol este validată prin confruntarea cu datele experimentale care permite a trage concluzia că simularea numerică a procesului de netezire și durificare prin deformare plastică a contribuit din plin la înțelegerea și justificarea unor aspecte specifice acestei tehnologii.
- Procesele tehnologice brevetate asigură lărgirea posibilităților tehnologice ale industriei și mărirea duratei de funcționare a elementelor formelor set prin crearea condițiilor mai favorabile de lucru la suprafața de contact.
- Modificările constructive brevetate asigură îmbunătățirea condițiilor de lucru prin faptul folosirea mai intensă și cu randament mai mare a resurselor energetice, în cazul de față a jetului de aer.
- Simularea schimbării răcirii denotă că procesul de răcire va crește cu aproximativ 10%.



#### **4. EXPERIMENTAREA PROCESELOR DE DURIFICARE ȘI DE NETEZIRE PRIN PRESARE CU SCULE CU CAP SFERIC**

Experimentările s-au efectuat pe un stand existent în laboratoarele Facultății Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice din cadrul Universității “POLITEHNICA”, București.

##### **4.1. Prezentarea mașinilor- unelte, dispozitivelor și aparaturii de măsurare**

Pentru realizarea practică a procedurii de deformare plastică la rece au fost utilizate următoarele mașini-unelte, dispozitive, aparatură de măsurare și software:

- strung universal KART E-2H;
- sculă pentru deformare plastică la rece cu bilă de rulment;
- dinamometru KISTLER tip 9257B pentru determinarea forțelor care apar în timpul desfășurării procesului de deformare plastică;
- amplificator electronic de semnal ”Charge Amplifier type 5070”;
- calculator de proces;
- placă de achiziție 2855A4 PCIM-DAS 1602/16, destinată pentru măsurarea forțelor și momentelor care apar în timpul procesului de deformare plastică;
- Dyno Ware - software-ul pentru prelucrarea datelor de achiziție furnizate de placa de achiziție (firma KISTLER);
- termocameră în infraroșu FLIR P660 pentru vizualizarea din punct de vedere termic al procesului de deformare plastică la rece;
- trepied.

##### **4.1.1. Strung universal KART E-2H**

- posibilități de prelucrarea pieselor cu diametre până la 60 mm și lungimi de maximum 500 mm;
- turații realizabile la universal [rot/min]: 46, 64, 92, 133, 184, 264, 380, 523, 752, 1090, 1500, 2160;
- avans longitudinal de la 0.04 – 2.18 [mm/rot]

##### **4.1.2. Sculă pentru deformarea plastică la rece cu bilă de rulment**

Compusă din (fig.4.1):

- corp executat din oțel de scule;
- bilă de rulment cu diametrul de 8 mm, fixată la vârful.

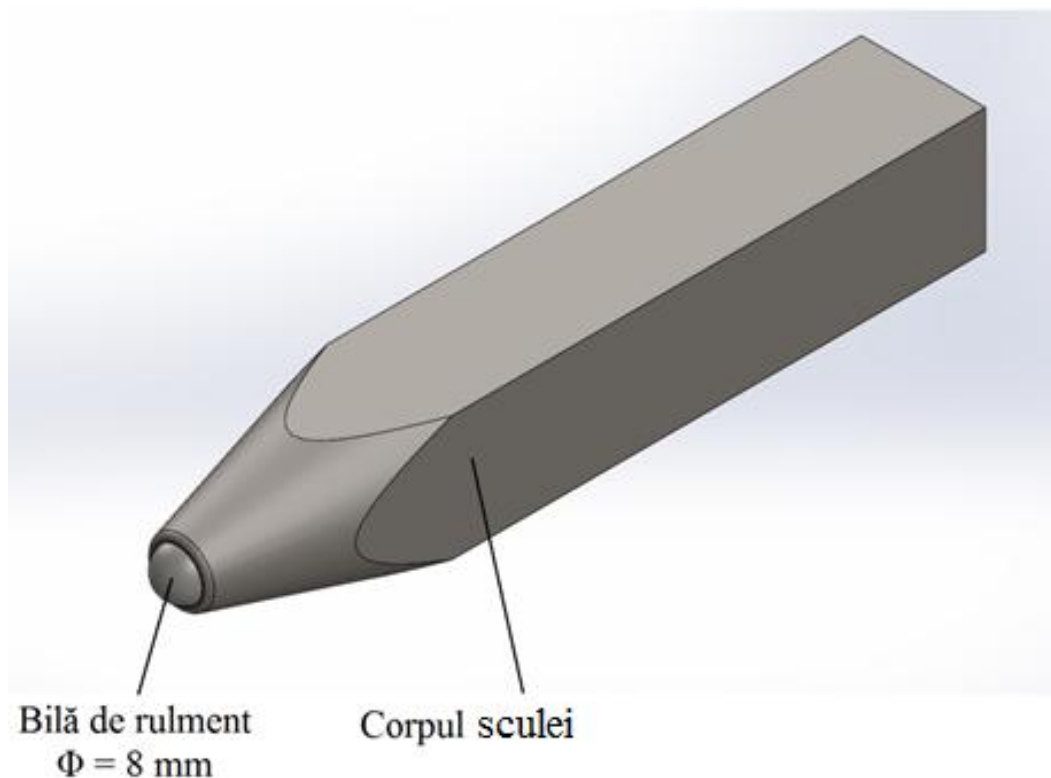


Fig. 4.1. Sculă pentru deformarea plastică la rece cu bilă de rulment

#### 4.1.3. Dinamometru KISTLER tip 9257B

Dinamometrul este compus din patru senzori de forță cu trei componente (după X, după Y și după Z) montați cu pretensionare mare între o placă de bază și o placă superioară. Fiecare senzor conține trei perechi de plăci din cuarț, una sensibilă la presiune exercitată pe direcția "Z" și alte două care răspund la solicitări de forfecare pe direcția "X" respectiv "Y". Componentele forțelor se măsoară practic fără deplasare. Ieșirile celor patru senzori de forță sunt încorporate în interiorul dinamometrului într-un mod care să permită efectuarea de măsurători multicomponente de forțe și momente. Cele opt semnale de ieșire sunt disponibile la mufa existentă pe corpul acestuia. Cei patru senzori sunt izolați față de masă. Dinamometrul are următoarele caracteristici tehnice:

- gabarit și dimensiuni pentru prindere pe suportul port-cuțit al strungului (fig. 4.2);
- domeniul de măsurare pentru forțele după axele "X" respectiv "Y" –  
 $F_x, F_y$  ..... 0 ... 500 [N];
- domeniul de măsurare pentru forța după axa "Z" -  $F_z$  ..... 0 ... 1000 [N];
- sensibilitate la măsurarea  $F_x, F_y$  ..... -7.5 [pC/N];
- sensibilitate la măsurarea  $F_z$  ..... -3.7 [pC/N];
- rezistența izolației (20°C) .....  $>10^{13}$  [Ω];

- masa dinamometrului .....7.3[kg].

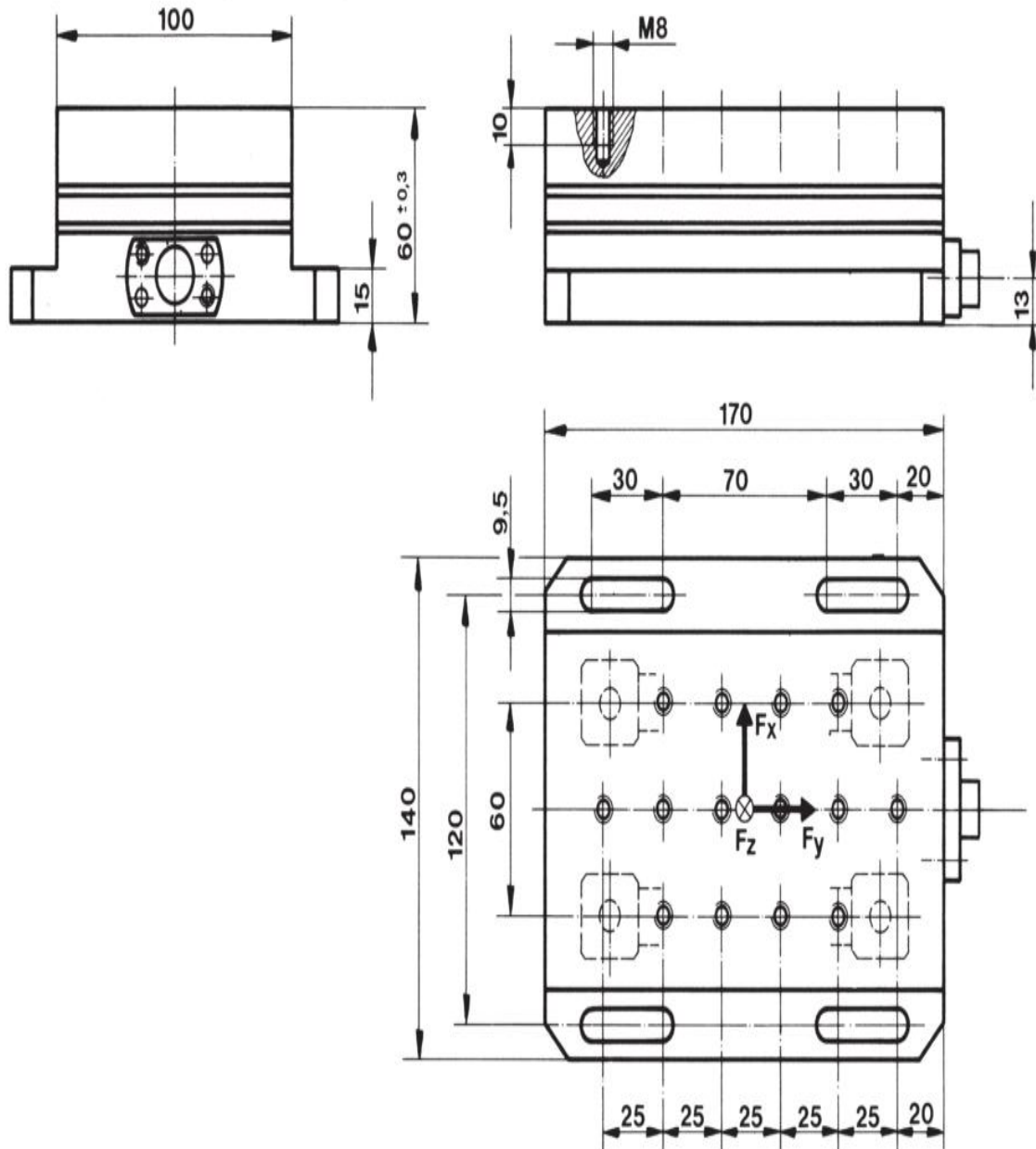


Fig. 4.2. Dimensiuni de gabarit și de prindere a dinamometrului KISTLER 9257B

#### 4.1.4. Amplificator electronic de semnal "Charge Amplifier type 5070"

Este un amplificator de semnal în versiunea cu 8 canale prevăzut cu un calculator pentru calculul forței rezultante, dar și a celor trei componente ale vectorului rezultat moment. Ca aplicație particulară este utilizat la măsurarea forțelor tăietoare rezultate în procesul de strunjire și măsurate cu dinamometrul KISTLER 9257B, iar datele prelucrate cu software-ul DynoWare Type 2825A-02.

Caracteristici tehnice:

- număr de canale ..... 8;
- domeniu de măsurare .....  $\pm 200 \dots 200.000$  [pC];
- tensiune de ieșire .....  $\pm 10$  [V];

- curent de ieşire ..... <2 [mA];
- abaterea de la măsurare la 25°C ..... <±0.05 [pC/s];
- abaterea de la măsurare la 50°C ..... <±0.2 [pC/s].

#### **4.1.5. Termocameră în infraroşu FLIR P660**

Utilizare: pentru determinarea temperaturilor de lucru în diverse procese de prelucrare mecanică.

Caracteristici tehnice:

- rezoluţie ..... 640x480 pixeli;
- sensibilitate termică ..... <30 mK;
- precizie de măsurare: ±2% sau ±2°C pentru sensibilitatea termică <0.04°C;
- precizie de măsurare: ±1% pentru sensibilitatea termică ..... <0.03°C;
- domeniu de măsurare ..... -40 ... +500°C;
- fişiere stocate în memorie ..... JPEG - imagine; MPEG – video;
- videocameră ..... 3.2 MP.



Fig. 4.3. Termocameră în infraroșu FLIR P660

#### **4.2. Descrierea procesului de deformare plastică la rece prin netezire și durificare cu bila de rulment**

Procedul de deformare plastică la rece prin netezire cu bila de rulment are ca obiectiv realizarea în zonele active ale pieselor de lucru a unor suprafețe de calitate mai bună și a unei durități superficiale sporite prin ecrusarea unui strat superficial de material. Aceste atribute conferă pieselor de lucru o durată de viață și caracteristici mecanice în zona de interes sporite.

Procesul tehnologic de deformare plastică la rece a fost realizat pe un strung universal KART E-2H. Semifabricatul (piesa de lucru) de formă cilindrică a fost fixat în universal prin intermediul bacurilor de fixare. Pentru realizarea unei coaxialități mai bune între piesa de lucru și axul strungului, aceasta a fost supusă unei strunjiri de centrare (de  $\sim 0.5$  mm pe rază) pe suprafața activă, la rugozitatea

impusă  $R_a$  (3.2 ... 6.3). După realizarea operației de strunjire de centrare a fost scos dispozitivul port-cuțit de pe căruciorul strungului și a fost fixat dinamometrul KISTLER 9257B, prin intermediul găurilor de prindere care se pot observa în figura 4.2. Pe partea superioară a dinamometrului a fost prinsă solidar cu ajutorul unor bride și șuruburi M8 scula de deformare plastică cu bila din figura 4.1. Înainte de începerea procesului de deformare plastică a fost efectuat un reglaj al poziției suprafeței active a sculei de deformare plastică în raport cu piesa (poziția 0 - realizarea tangenței dintre bilă și suprafața activă a piesei). Pe durata aplicării procedurii de deformare plastică, mandrina antrenează piesa de lucru în mișcare de rotație cu o viteză unghiulară constantă. Scula de deformare plastică trebuie să efectueze două mișcări: una de avans longitudinal în lungul axei strungului și una de avans radial pentru realizarea adâncimii stratului de material care urmează a fie ecruisat (fig. 4.4). În cazul pieselor cu suprafața activă cilindrică, nu este necesar să fie sincronizate cele două mișcări. La piesele de lucru cu forme mai complicate este nevoie de o sincronizare a celor două mișcări pentru ca bila din scula de deformare să urmărească perfect profilul pieselor. În timpul desfășurării procesului de deformare plastică la rece, la contactul dintre bilă și suprafața activă a piesei de lucru se dezvoltă forțe și momente pe cele trei direcții. Scula de deformare plastică, fiind legată solidar de dinamometru, face posibilă transmiterea eforturilor la senzorii care sunt încorporați în acesta. Prin urmare, aceștia generează semnale electrice care, prin intermediul unor cabluri cu conectori, sunt captate de un amplificator de semnal "Charge amplifier type 5070" care filtrează și amplifică semnalele primite de la dinamometru. Mai departe, aceste semnale sunt preluate de placa de achiziție montată într-unul din slot-urile desktopului computerului. După prelucrarea informațiilor cu ajutorul plăcii de achiziție rezultă pentru fiecare test câte un fișier Excel cu print screen-ul. Acesta surprinde, pe parcursul desfășurării procesului de deformare plastică, evoluția grafică a forțelor pe cele trei direcții (un fișier "Notepad" arată evoluția în timp a acelorași forțe). Pentru testul din lucrare au fost păstrate pentru studiu doar forțele de pe cele trei direcții, momentele nu au prezentat interes. Parametrii regimului de lucru sunt:

- turația la arborele principal al strungului;
- avansul radial (adâncimea);
- avansul longitudinal.

Au fost încercate pe un semifabricat mai multe regimuri de lucru obținute prin variația celor trei parametri până a fost obținut un regim de lucru optim (tabelul 4.1). De asemenea, pentru micșorarea efortului de deformare a fost utilizat și ulei de tip Shell Omala F.

Parametrii optimi ai regimului de lucru folosiți în procesul de deformare plastică la rece sunt centralizați în tabelul 4.1.

**Tabel 4.1. Parametrii regimului optim de lucru pentru realizarea procesului de deformare plastică**

Turația [rot/min]	380
-------------------	-----

Avansul longitudinal [mm/rot]	0.09
Avansul radial (adâncime) [mm]	0.2 (pe rază)

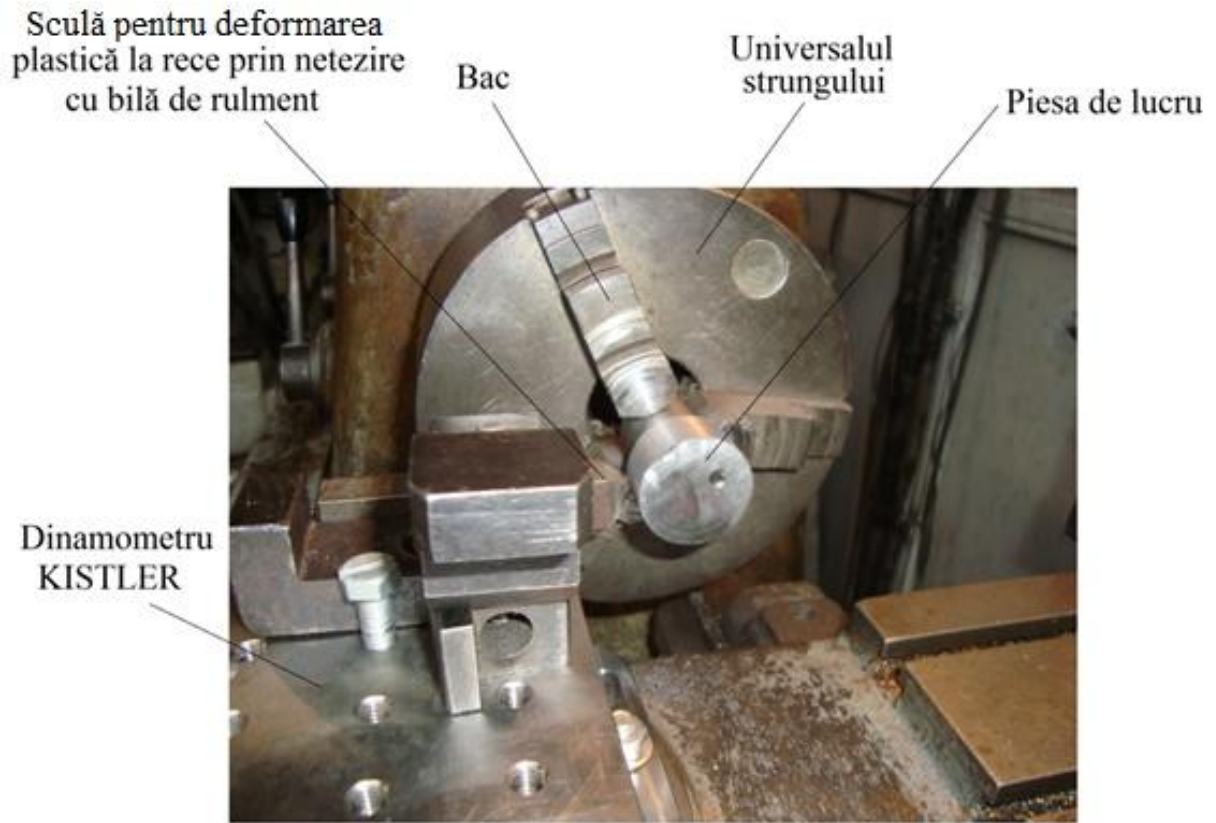


Fig. 4.4. Realizarea procesului de deformare plastică la rece prin netezire și durificare cu bilă pe un strung universal KART E-2H

Au fost supuse procesului de deformare plastică la rece prin netezire cu bila de rulment două piese de lucru. În figura 4.5 este reprezentată una din aceste piese după realizarea deformării plastice la rece b) comparativ cu o piesă strunjită a).

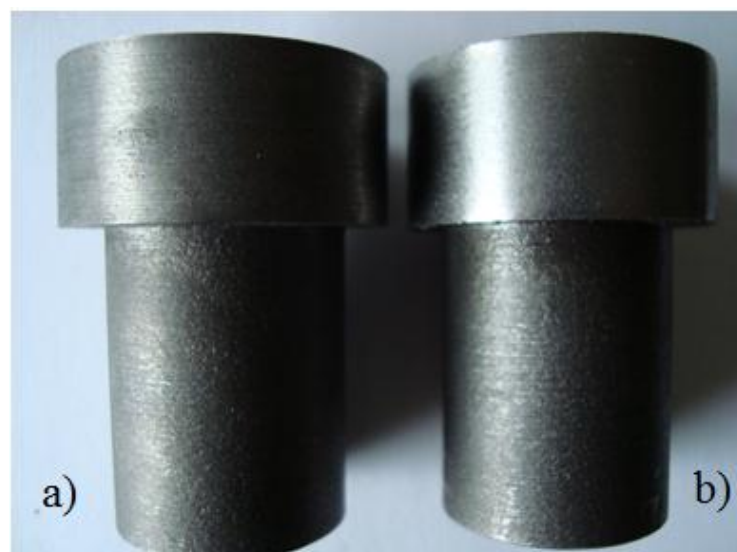




Fig. 4.5. Piese de lucru: a) strunjită; b) piesă de lucru după procesul de deformare plastică la rece prin netezire și durificare cu bila de rulment.

Utilizând o termocameră în infraroșu FLIR P660, au fost realizate imagini ale regimului termic al celor două piese supuse procesului de deformare plastică la rece prin netezire cu bilă (fig. 4.6).

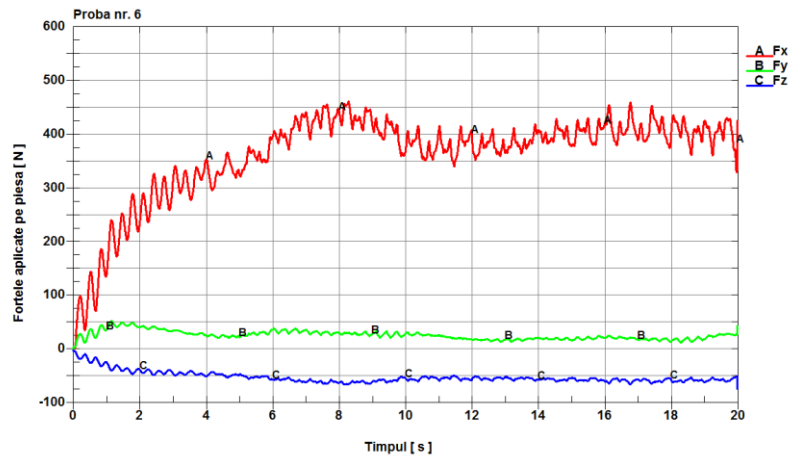


Fig. 4.6. Imagini ale regimului termic din timpul desfășurării procesului de deformare plastică la rece prin netezire și durificare cu bila de rulment

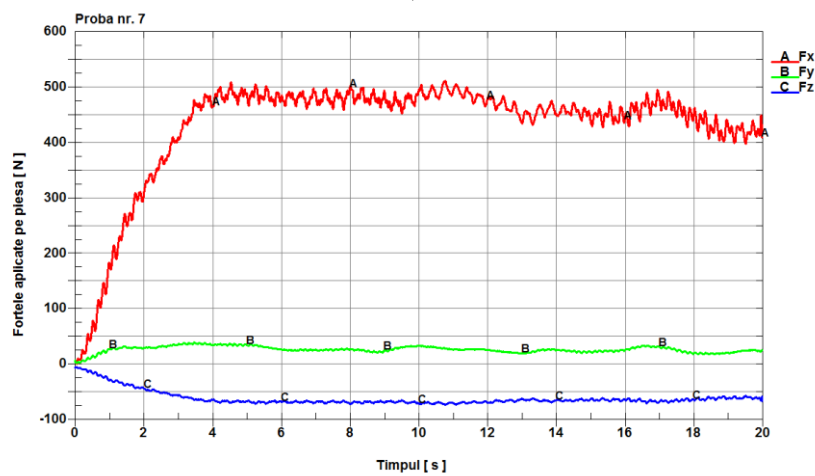


### 4.3 . Reprezentarea în formă grafică a forțelor care se dezvoltă pe parcursul derulării procesului de netezire prin deformare plastică la rece

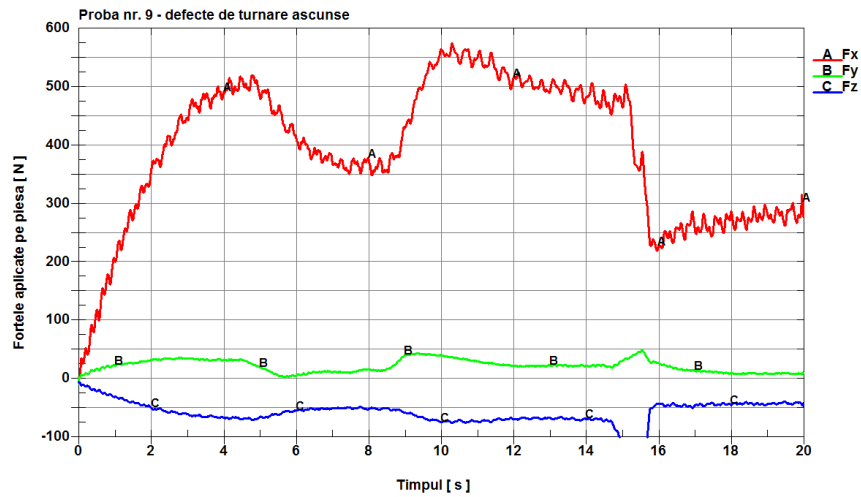
În urma testelor efectuate pe standul de testare reprezentat mai sus au fost obținute date referitoare la forțele (de pe cele trei direcții x, y și z) care apar în timpul procesului de netezire prin deformare plastică la rece cu bila de rulment. Au fost selectate datele obținute pentru câteva probe reprezentative (probele 6, 7, 9 și 12). După prelucrarea acestor date, s-au constituit graficele forțelor ce se dezvoltă în timpul prelucrării prin deformare a pieselor respective după cele trei direcții (fig 4.7).



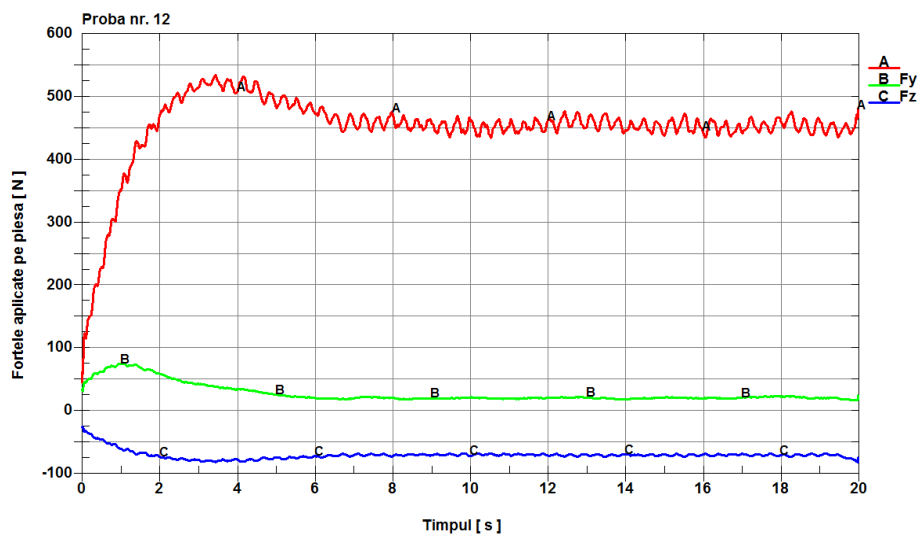
a)



b)



c)



d)

Fig. 4.7 Graficul forțelor care se dezvoltă în timpul procesului de netezire și durificare pentru: a) proba nr. 6; b) proba nr. 7; c) proba nr. 9 și d) proba nr. 12.

#### 4.4 Prezentarea rezultatelor rugozității obținute la aplicarea procesului de netezire și durificare prin DPS



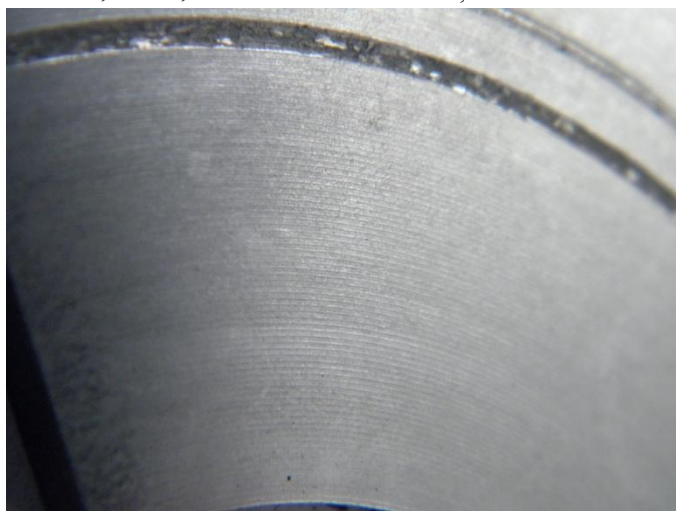
Fig 4.8. Epruvetele netezite pe strung normal

După simulările numerice și studiile elaborate a fost efectuat un număr mare de încercări de aplicare a procesului DPS.

Regimurile constante pentru toate testele efectuate sunt următoarele: forța de netezire este  $F=500\text{N}$  ce corespunde adâncimii reglate de  $0,05\text{-}0,06\text{ mm}$ ; turațiile arborelui principal corespunzător  $N=630\text{ rot/min}$ , rugozitatea inițială  $Rz\ 20$ .

Au fost folosite scule cu diamant tehnic cu vârful de raze  $r=2,5\text{ mm}$  și  $r=4,0\text{ mm}$  și regimuri de avans longitudinal

S=0,07...0,7 mm/rot. Au fost obținute următoarele date incluse în tabelul 4.2.



Tabelul 4.2

Nr. d/o	R=4		R=2,5	Corespondere procesului de prelucrare
	S	Ra	Ra	
1	0,07	0,63	0,64	șlefuire curată (în afară de datele în paranteze)
2	0,14	0,35	0,75	
3	0,28	0,4	(1,18-1,42)	
4	0,34	(0,72-1,0)	Nu reprezintă interesul practic	
5	0,43	(6,86-7,14)		
6	0,47	(0,96-1,49)		
7	0,52	0,58		
8	0,57	0,64		
9	0,61	0,88		
10	0,7	0,92		

#### 4.5 .Descrierea procesului de aplicare a peliculelor de grafit

Schema procesului tehnologic de depunere a grafitului însoțită de durificarea simultană a suprafeței active a plunjerului cu aplicarea DEI este reprezentată în figura 4.9.

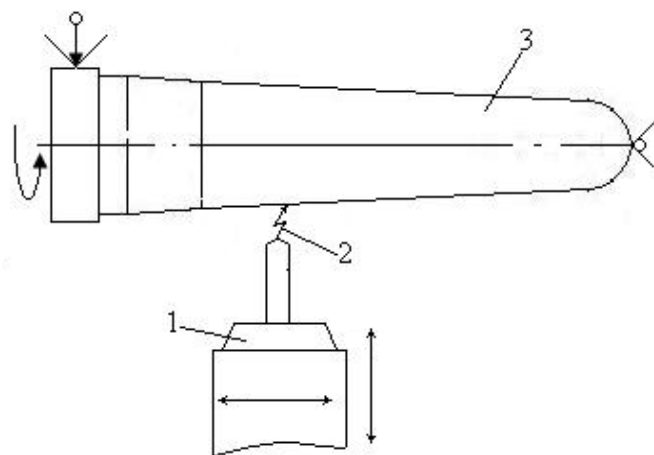


Fig.4.9. Schema de poziționare a electrozilor în procesul prelucrării cu DEI: 1 - electrod-sculă din grafit (catod); 2 - canalul de plasmă; 3 - piesa supusă prelucrării (plunjer, anod)

Mărimea interstițiului dintre electrodul-sculă și piesa supusă prelucrării a rămas constantă pe tot parcursul prelucrării ( $S = 1 \text{ mm}$ ). Electrodul-sculă are posibilitate de mișcare (după necesitate) în direcțiile reprezentate în figura 3. Anodul 3 reprezintă piesa (plunjer din figura 4.10, a) care a fost fixată și centrată în mandrina cu trei fălci și efectuează mișcarea de rotație sub acțiunea motorului electric al mașinii-unelte. În momentul când de la blocul de amorsare se aplică un impuls de tensiune înaltă, între electrodul-piesă și electrodul-sculă interstițiul se ionizează (este străpuns) și procesul este însoțit de formarea canalului de conductibilitate prin care se degajă energia impulsului de putere cu formarea canalului de plasmă. Ca rezultat al interacțiunii dintre canalul de plasmă și suprafața electrodului-sculă, grafitul erodează și este transferat la suprafața piesei cu formarea peliculei de grafit. Modificarea proprietăților fizico-chimice în stratul superficial prelucrat are loc simultan cu depunerea peliculei.

Materialul plunjerului formeii de turnare a sticlei este confecționat din fontă aliată, electrodul sculă reprezintă o bară cilindrică cu diametrul de 3 mm, confecționat din grafit electrotehnic de marcă MPG-6. Electrodul-sculă din grafit se conectează în calitate de catod, ținând cont de literatura de specialitate studiată și experiența personală [Paraschiv, 2005; Besliu, 2008; ]. Grafitul erodează mai puternic dacă este conectat în calitate de catod decât în cazul când este conectat ca anod. Aceasta conduce la creșterea cantității de carbon la formarea depunerii pe suprafața piesei, iar datorită energiei impulsurilor aplicate, aceasta difuzează în straturi superficiale, cauzând schimbările structurale. Cercetările anterioare efectuate pe suprafețele din oțeluri de construcție [Besliu, 2008] au arătat că microduritatea stratului afectat crește considerabil.

Cu scopul de a obține o rugozitate minimală (calitatea înaltă) a peliculei uniforme de grafit cu durabilitate înaltă a suprafeței plunjerului, au fost stabilite următoarele regimuri de prelucrare a generatorului de impulsuri: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri de putere  $U_c = 200 \text{ V}$ ; mărimea interstițiului  $S = 1 \text{ mm}$ ; capacitatea bateriei de

condensatoare  $C = 600 \mu\text{F}$ ; frecvența impulsurilor de putere  $f = 10 \text{ Hz}$ ; numărul de treceri  $n = 2$ ; energia acumulată în bateria de condensatoare  $W_c = 12 \text{ J}$ ; energia degajată în interstițiu  $W_s = 4,8 \text{ J}$ .

Nivelul uzurii a fost măsurat utilizând microscopul universal de tipul UIM-21, deoarece acesta permite măsurarea cu precizia de  $1 \mu\text{m}$ . La început au fost măsurate diametrele a două plunjoare noi în zece puncte stabilind astfel nivelul zero al măsurărilor. Suprafața unuia din plunjoare a fost acoperită cu peliculă de grafit și supusă măsurărilor dimensionale în aceleași zece puncte ca și pentru plunjorul nou confecționat. Procedura a fost repetată după ce plunjoarele au fost incluse în fluxul de fabricare a produselor din sticlă. Pentru plunjorul nou confecționat (proba 23), procesul a durat 39900 de cicluri (75 de ore). Frecvența ciclurilor constituia  $v=8,75$  cicluri/min. Temperatura picăturilor de sticlă era  $1129^\circ\text{C}$ ; marca sticlei folosite în procesul de producție BT-1, a cărei conținut chimic în conformitate cu standardul SM GOST R 52022-2004 este dat în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3.. Conținutul chimic a sticlei de marcă BT-1

Marca	Conținutul chimic, %					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO+MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
BT-1	72	2,5	11	14	< 0,5	< 0,1

#### 4.6 . Prezentarea rezultatelor și analiza lor

Analiza morfologică a suprafeței prelucrate a arătat că schimbările fizico-chimice pe suprafață nu depășesc dimensiunile micrometrice. Pe lângă componentele inițiale ale materialului supus prelucrării, în stratul superficial se atestă o cantitate considerabilă de carbon (circa 90% atomic).

Analiza microstructurii microșlifului transversal arată că o parte din carbon transferată pe suprafața piesei difuzează în adâncime cu formarea stratului alb cu adâncimi de ordinul micrometrilor. Putem presupune că în stratul de suprafață prelucrat se formează faze noi ce includ carburile componentelor de aliere a materialului de execuție a piesei și structuri grafitice. Aceasta conduce la modificarea proprietăților fizico-chimice și de exploatare a suprafeței piesei.



a) b)  
Fig. 4.10. Vederea generală a plunjoarelor formelor de turnare a sticlei: a) neprelucrat; b) prelucrat cu aplicarea DEI

În lucrare au fost prezentate rezultatele încercărilor în condiții reale de exploatare a plunjoarelor și s-a stabilit că plunjoarele formelor de turnare a sticlei cu suprafața activă acoperită cu peliculă de grafit au funcționat 57600 de cicluri fără modificarea formei și dimensiunilor lor.

Așadar, pentru compararea uzurii suprafeței de lucru a plunjoarelor formelor de turnare a sticlei au fost efectuate cercetări experimentale în cicluri tehnologice. Au fost supuse încercărilor două plunjoare: unul cu suprafața acoperită cu peliculă de grafit cu aplicarea DEI, altul – neprelucrat, reprezentat în figura 4.10.

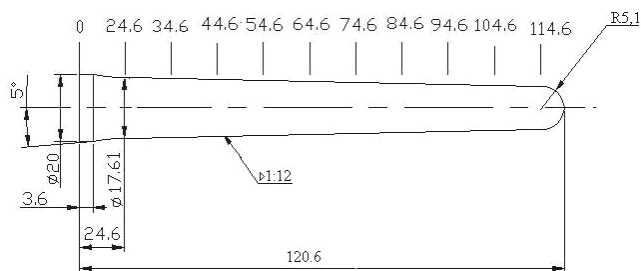


Fig. 4.11. Schița vedrea transversală și punctele măsurate.

După ce suprafața activă a piesei a fost acoperită cu peliculă de grafit, diametrul secțiunilor transversale ale plunzorului au crescut în medie cu aproximativ 35  $\mu\text{m}$  în comparație cu diametrul inițial. Așadar, ca rezultat obținem depuneri de grafit pe suprafața piesei supuse prelucrării unde grosimea medie este de circa 35  $\mu\text{m}$ .

Dacă studiem proba 19, suprafața căreia nu a fost prelucrată cu DEI, înainte și după funcționarea în ciclul tehnologic, observăm că diametrul ei în câteva puncte s-a micșorat cu aproximativ 11  $\mu\text{m}$ . Proba 23 este studiată de trei ori: în stare inițială, după aplicarea DEI și, în final, după ce a fost supusă încercărilor la uzură. După prelucrarea suprafeței active a plunzorului cu DEI datorită formării depunerilor de grafit, diametrul lui a crescut în limitele admisibile (figura 4.12, curba 3). Cercetând piesa după funcționarea în ciclul tehnologic descris mai sus observăm micșorarea diametrului lui inițial în toate punctele cercetate (figura 4.12, curba 2)

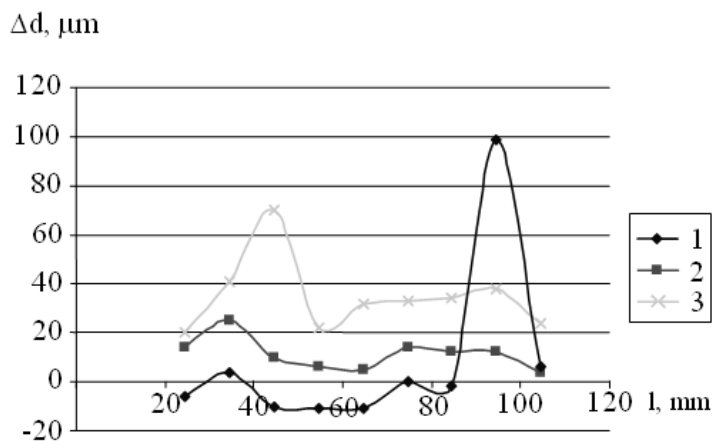


Fig. 4.12. Dependența schimbării diametrului secțiunii transversale a suprafeței active a plunzorului pe lungimea lui: 1 – proba 19 după funcționare în ciclul tehnologic; 2 – proba 23 după funcționare în ciclul tehnologic; 3 – proba 23 după formarea peliculei de grafit prin metoda DEI

După cum se arată în figura 4.12, curba 1, în afară de micșorarea diametrului secțiunii transversale a plunjorului neprelucrat cu DEI (proba 19), putem observa creșterea lui în unele puncte cercetate. Aceasta poate fi explicată prin aderența masei sticloase de suprafața activă a plunjorului. Acest fenomen practic nu a fost observat în cazul probei 23 acoperite cu peliculă de grafit. Aceasta dovedește că stratul de grafit depus pe suprafața activă a plunjorului îndeplinește mai multe funcții simultan: protecția antiuzură, exclude aderența masei sticloase pe suprafața plunjorului, este unguent în stare solidă și sporește refractabilitatea piesei. După măsurarea uzurii plunjorului acoperit cu pelicule de grafit după funcționarea lui în ciclul tehnologic (75 ore) observăm că dimensiunile de-alungul suprafeței lui active nu au atins nivelul inițial, în timp ce plunjorul 19 a depășit uzura-limită dimensională în câteva puncte cu aproximativ 11  $\mu\text{m}$ , iar în alte porțiuni dimensiunile inițiale au crescut datorită aderenței masei sticloase de suprafața prelucrată.

Comparând rezultatele obținute referitor la uzura dimensională a plunjoarelor cu și fără depuneri de grafit, putem afirma că cel cu depuneri de grafit are o anumită rezervă de funcționare înainte de a ajunge la dimensiunile inițiale și, desigur, o rezervă considerabilă înainte de a ajunge la valoarea admisibilă a uzurii tehnologice.

Tabelul 4.4. Mărima uzurii plunjoarelor supuse încercărilor de exploatare

Diametrul plunjorului, mm					Intervalul de măsurare, mm	$\Delta d_1$	$\Delta d_2$	$\Delta d_3$
înainte de prelucrare		după prelucrarea cu DEI	după funcționarea în ciclul tehnologic					
Nr.19	Nr.23	Nr.23	Nr.19	Nr.23				
17,61	17,586	17,606	17,604	17,6	24,6	-0,006	0,02	0,006
17,206	17,171	17,212	17,21	17,196	34,6	0,004	0,041	0,016
16,82	16,78	16,85	16,81	16,79	44,6	-0,01	0,07	0,060
16,42	16,387	16,409	16,409	16,393	54,6	-0,011	0,022	0,016
16,023	15,99	16,022	16,012	15,995	64,6	-0,011	0,032	0,027
15,61	15,586	15,619	15,61	15,6	74,6	0	0,033	0,019
15,22	15,19	15,224	15,218	15,202	84,6	-0,002	0,034	0,022
14,83	14,792	14,83	14,929	14,804	94,6	0,099	0,038	0,026
14,42	14,397	14,421	14,426	14,401	104,6	0,006	0,024	0,020

Informația dată în tabelul 4.4 arată că diferența dintre diametrele în punctele cercetate ale plunjorului neprelucrat după funcționare în ciclul tehnologic este puțin mai mică decât diferența dimensiunilor secțiunii transversale a plunjorului cu peliculă de grafit formată cu aplicarea DEI. Aceasta poate fi explicată prin faptul că la interacțiunea canalului de plasmă a descărcărilor electrice în impuls cu suprafața piesei apar microneregularități, ceea ce probabil conduce la creșterea uzurii în primele cicluri de funcționare. După o perioadă de interacțiune a suprafeței prelucrate cu masa sticloasă ele dispar, dar rămâne stratul superficial tratat fizico-chimic, cu proprietăți de exploatare sporite, care are rezistență înaltă la uzură.



## CONCLUZII LA CAPITOLUL 4

- Experimentele efectuate pe un stand din laboratoarele Facultății Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice din cadrul Universității “POLITEHNICA”, București, au permis a trage concluzia referitor la corectitudinea simulării efectuate cu modificări minime în utilajul existent.
- Folosirea utilajului complex și contemporan a permis executarea experimentului cu toată acuratețea și scoaterea în evidență a tuturor părților componente (temperaturii în zona de lucru, forțelor care se dezvoltă în timpul procesului de netezire și durificare).
- Folosirea stratului de separare a suprafețelor de contact în calitate de peliculă subțire de ulei Shell Omala F a asigurat realizarea procesului de ecrusare fără influența factorilor nedorți (ex. supraîncălzirea) și permite a concluziona că este suficientă pentru excluderea deplasării stratului de material.
- Utilizarea termocamerei în infraroșu FLIR P 660 denotă că în cazul acestui proces, temperatura ce apare este redusă ( $<30^{\circ}\text{C}$ ) și poate fi neglijată ca atare.
- În figura 4.7 se oferă vizualizarea datelor obținute ce permit a conchide că forțele care apar în timpul procesului de netezire și durificare prin deformare plastică la rece cu bila de rulment pot fi comparate cu cele simulate, demonstrând ca nu există abateri mai mari de 10%.

## **5. VALIDAREA EXPERIMENTALĂ A METODOLOGIEI DE SIMULARE NUMERICĂ PROPUȘĂ ȘI APLICATĂ ÎN CADRUL TEZEI DE DOCTORAT**

### **5.1. Necesitatea și scopul validării experimentale a metodologiei de simulare numerică**

Metodologia propusă în capitolul 2 pentru simularea numerică a proceselor tehnologice de netezire și durificare superficială prin deformare plastică are ca suport matematic metoda elementelor finite și încorporează o gamă largă de ipoteze de natură geometrică și fizică. Deși în general, metoda elementelor finite, când este aplicată corect unei probleme de mecanica solidelor vâscoelastoplastice conduce la rezultate satisfăcătoare, ipotezele constatate la conceperea modelelor supuse simulărilor pot afecta negativ soluțiile, în consecință, și nivelul de încredere în acestea.

Câteva din cauzele principale care pot diferenția soluția simulată numeric de soluția corectă sunt cele legate de următoarele:

- realizarea modelului procesului simulat;
- conceperea modelelor de material;
- discretizarea cu elemente finite a structurii analizate;
- determinarea regimurilor de funcționare;
- evaluarea condițiilor pe frontiere în forțe, deplasări sau viteze;
- formularea comenzilor pentru solver-ul programului de analiză folosit la simularea numerică.

În aceste condiții, pentru reducerea gradului de incertitudine și pentru creșterea încrederii în soluțiile date de simularea numerică, este necesară testarea metodologiei de simulare pe modele tipice, cu complexitate redusă și simplificate funcțional, dar care trebuie să păstreze toate proprietățile de bază ale modelelor supuse analizei.

Scopul operației de validare experimentală a metodologiei de simulare numerică propusă și aplicată în cadrul tezei de doctorat rezumă la evaluarea comparativă a calității soluțiilor simulate.

Validarea metodologiei de simulare numerică formulată în teza de doctorat este fundamentată pe două surse de date experimentale în care a fost implicat materialul de bază supus procedurii de netezire și durificare superficială prin procese de deformare plastică.

O primă sursă experimentală, dezvoltată pe larg în cadrul tezei de doctorat, conține date referitoare la proprietățile mecanice ale materialelor prelucrate, în care sunt incluse și duritățile Brinell, măsurate pe eșantioane extrase din cele trei loturi de fontă cenușie cu grafit lamelar avute la dispoziție (tabelul 3.1).

Procesul de deformare plastică care are loc în timpul încercării de duritate prin metoda Brinell este în mare măsură similar procesului de netezire și durificare superficială cu scule cu cap sferic.

Ambele procese se caracterizează prin deformări elastoplastice realizate prin pătrunderea, în material, pe o anumită adâncime, mai mică sau mai mare, a unui corp sferic (bila). Ambele procese conduc la stări de tensiune și deformație remanente, locale sau superficiale.

Deosebirile dintre cele două procese nu sunt de natură să afecteze similitudinea mecanică a deformărilor elastoplastice. Deosebirile definitorii sunt:

- regimul de aplicare al procedeelor este diferit. Încercarea de duritate Brinell se caracterizează printr-un regim static, aplicat local, în timp ce procesul de netezire și durificare are caracter amplu, fiind aplicat continuu, urmărind un anumit traseu care parcurge, după un program predefinit, întreaga suprafață de prelucrat;
- intensitatea deformărilor plastice și forțele care intervin în cele două procese sunt foarte diferite.

Cea de-a doua sursă de date experimentale a fost constituită din datele obținute în urma aplicării procedurii de netezire și durificare pe modele simple descris amplu în capitole 4.

Având la dispoziție sursele de date experimentale amintite, au fost stabilite două căi de validare experimentală a metodologiei de simulare numerică.

O primă validare are la bază compararea rezultatelor simulărilor numerice prin metodologia stabilită a testelor Brinell cu datele experimentale obținute la încercările de duritate. Cea de-a doua cale de validare vizează chiar procedeul în sine și constă în compararea unor mărimi simulate cu datele corespunzătoare măsurate în timpul aplicării procesului de netezire și durificare pe modele simple așa cum este descris în capitolul 4.

Baza de date experimentale disponibilă ar permite dezvoltarea suplimentară și a altor metode de simulare. Se consideră, însă, că cele două căi propuse sunt suficiente.

## **5.2 Validarea experimentală bazată pe încercarea de duritate brinell**

Simularea numerică a testului Brinell prin metodologia propusă a fost realizată, în teză, pentru prima dată din nevoia de verificare și validare a modelelor de material. Modelul fizic (fig. 2.9) stabilit rămâne valabil. Se păstrează condițiile testului principal de duritate Brinell HB 10/3000. S-a optat pentru această variantă, deoarece diametrul bilei,  $D = 10$  mm, este cel mai apropiat de diametrul capului sferic al sculei,  $D_s = 8$  mm.

La validarea prin această metodă se urmăresc două aspecte importante:

- convergența metodei de simulare;
- corespondența rezultatelor simulate cu cele simulate.

Pentru testul de convergență au fost folosite modele discretizate cu rețele diferite. În principiu, rețelele de discretizare sunt similare cu cele reprezentate în Figura 3.5, fiind diferite prin finețe. Au

fost utilizate cinci niveluri de finețe pentru rețelele de discretizare evaluate cu ajutorul numărului total de noduri în modelul pe sfert (1/4). Din figura 5.1 se poate constata finețea diferită a rețelelor în funcție de numărul general de noduri utilizate la discretizare. Reprezentarea din figura 5.1 este limitată la startul superior de material din zona de contact cu bila aparatului Brinell.

Assembly 1  
FEM Parts  
Geom Parts  
Part 1

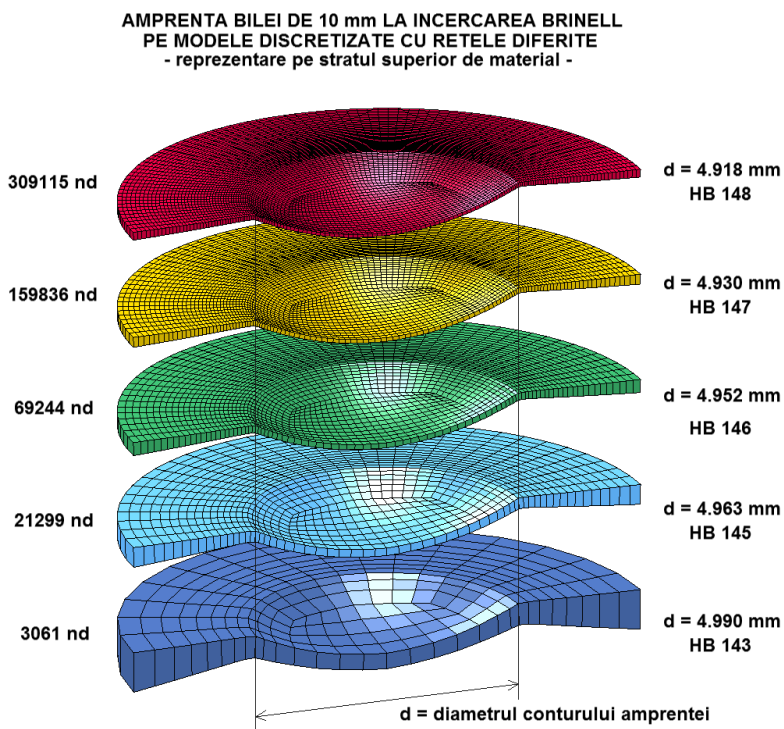


Fig. 5.1. Amprenta bilei de 10 mm la încercarea Brinell pe modele discretizate cu rețele diferite – reprezentare pe stratul superior de material.

Pentru urmărirea convergenței au fost simulate numeric toate cele cinci modele cu discretizări diferite. În aceste simulări numerice, modelul de material a fost unic – modelul Johnson-Cook – cu parametrii stabiliți pentru lotul nr. 2 de material.

Drept criteriu de convergență a fost folosit criteriul presiunii maxime de contact dintre bila aparatului Brinell și materialul testat, evaluată la sfârșitul perioadei de menținere.

Folosirea unui criteriu de convergență bazat pe o mărime derivată – presiunea de contact – garantează convergența soluției pentru problema simulată numeric.

În tabelul 5.1 sunt centralizați parametrii pe baza cărora se pot lua decizii privind convergența metodei și validarea metodologiei de simulare numerică. Tabelul conține, în plus, coloana cu datele rezultate ale simulării numerice din capitolul 3, efectuată pentru validarea modelului de material.

Analiza parametrilor selectați în tabelul 5.1 pune în evidență convergența soluțiilor obținute prin simulare numerică cu metodologia propusă în capitolul 3 al tezei de doctorat. Se constată că

toți parametrii de control, în primul rând presiunea maximă de contact, pe baza căreia s-a constituit criteriul de convergență, dar și parametrii primari ( $h$  – adâncimea amprenteii;  $d$  – diametrul conturului amprenteii; HB – duritatea Brinell) tind asimptotic spre valori-limită pe măsură ce finețea rețelei de discretizare crește. Comparând datele obținute pentru variantele de discretizare 4 și 5, foarte puțin diferite, se determină că soluția simulată pentru ultima variantă este soluția “exactă a problemei”. În ultima coloană a tabelului 5.1 sunt date erorile maxime pentru parametrii analizați, în raport cu soluția admisă ca „exactă”. Datele din această coloană justifică alegerea unei mărimi derivate – presiunea de contact – pentru formularea criteriului de convergență.

Se observă că mărimile derivate au o convergență mai slabă și din această cauză atenția trebuie orientată asupra lor.

**Tabelul 5.01. Parametrii simulații selectați pentru validare**

Varianta de discretizare	1	2	3	4	Test material	5	Er. max. %
Numărul de noduri	3061	21299	69244	159836	200802	309115	-
Presiunea maximă de contact [MPa]	1542	1561	1569	1570	-	1572	1.91
Adâncimea amprenteii [mm]	0.636	0.633	0.631	0.629	0.627	0.626	1.57
Diametrul amprenteii conturului [mm]	4.990	4.963	4.952	4.930	4.921	4.981	1.44
Duritatea Brinell HB	143	145	146	147	148	148	3.38

Deosebirile de convergență dintre duritatea Brinell și duritatea conturului amprenteii ca bază de calcul se justifică prin neliniaritatea dintre aceste două mărimi. Prin definiție, duritatea Brinell reprezintă raportul dintre forța aplicată (aici 3000 Kgf) și aria calotei sferice a amprenteii, dependentă în mare măsură de pătratul diametrului  $d$ , care determină dublarea aproximativă a erorii stabilite pentru duritatea Brinell în raport cu cea a diametrului conturului amprenteii.

O imagine sugestivă a convergenței metodei este dată în figura 5.2 cu ajutorul curbelor presiunii maxime de contact ca funcții de timp. S-a considerat, în concordanță cu simulările numerice și datele experimentale, că în orice moment al probei, cea mai mare presiune se realizează în centrul amprenteii. Astfel se justifică alegerea denumirii pentru acest parametru. Analizând curbele trasate pe graficul presiunii maxime de contact se constată, încă o dată, convergența foarte bună a soluțiilor obținute pe baza metodologiei de simulare numerică formulate în teza de doctorat.

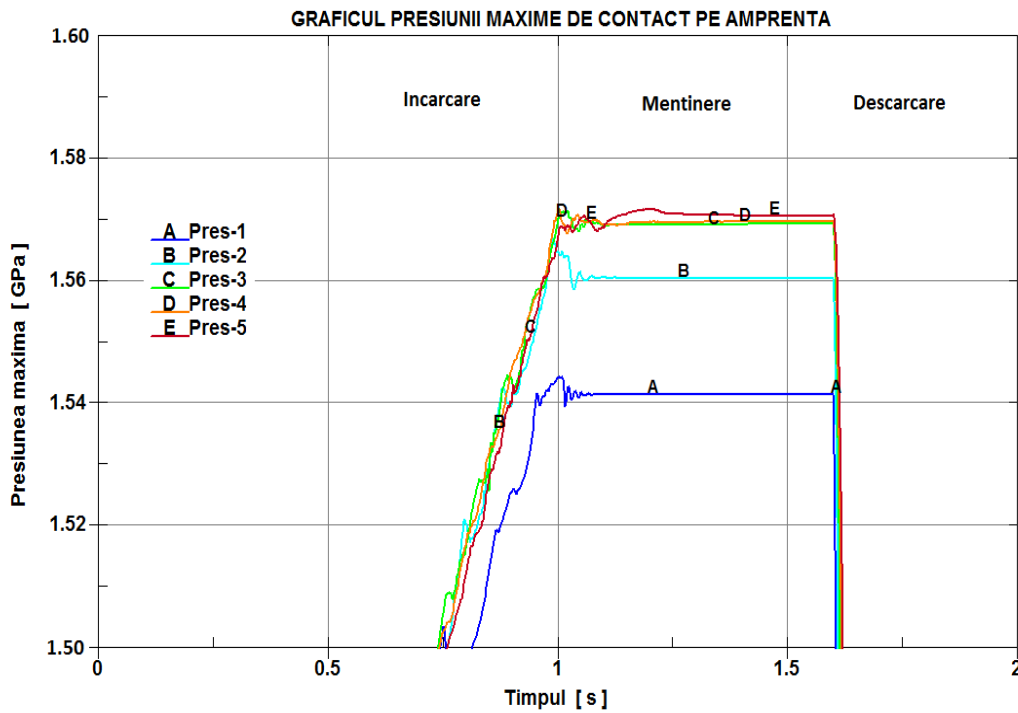


Fig. 5.2 Graficul presiunii maxime de contact pe amprentă

E de remarcat că ultimele trei curbe, C, D și E, ajung practic până la suprapunere. În urma acestei analize, concluzia care se impune constă în faptul că metodologia stabilită pentru simularea numerică a procesului tehnologic de netezire și durificare superficială prin deformare plastică a susținut foarte bine proba de convergență.

Cel de-al doilea aspect al operației de validare experimentală prin simularea numerică a testului Brinell și care se referă la compararea rezultatelor simulate cu cele experimentale se poate urmări în figura 5.1 și, în special, în figura 5.3. În figura 5.1 sunt reprezentate straturile superioare de material deformat – amprente – și elementele de comparare ( $d$  – diametrul conturului amprentei și HB – duritate Brinell) ca mărimi simulate numeric.

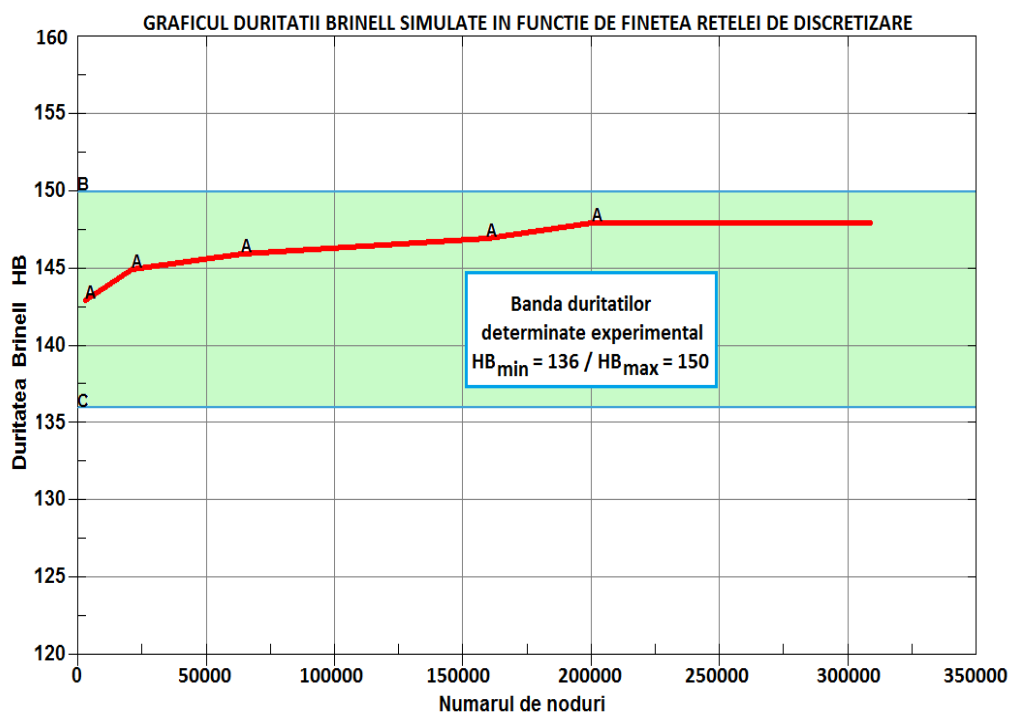


Fig. 5.3. Graficul durității Brinell simulată în funcție de finețea rețelei de discretizare

În figura 5.3 este trasată curba durității Brinell simulată și banda durităților determinate experimental pentru materialul din lotul nr. 2, folosit și la modelele simulate. Analiza reprezentărilor din figura 5.3 conduce la concluzia: *toate soluțiile simulate se încadrează în banda durităților experimentale și, în consecință, metodologia de simulare adoptată se poate considera validată experimental prin testul de duritate Brinell.*

În plus, pe baza datelor stabilite prin simulare numerică în urma analizei convergenței (tab. 5.1) se poate determina și finețea de discretizare în aplicațiile realizate cu ajutorul metodologiei de simulare numerică. Astfel, în cadrul unei precizii satisfăcătoare pentru aplicațiile incluse în teza de doctorat s-a considerat că o finețe de discretizare apropiată de cea realizată în varianta nr. 2 corespunde nevoilor de calcul. Pasul de referință al rețelei de discretizare, pe suprafața supusă operației de netezire și durificare prin deformare plastică, a fost stabilit, pe baza analizei de convergență, la valoarea de 0.25 mm, fără riscul de alterare soluțiilor simulate și de scoatere a lor din cadrul limitelor tehnice de precizie.

### 5.3. Validarea experimentală bazată pe datele obținute în timpul aplicării procedurii tehnologic de netezire și durificare pe modele simple

Ca referință experimentală au fost luate datele măsurate pe modelele de semifabricate cilindrice prelucrate în capitolul 4.

Confruntarea simulării numerice cu procesul de prelucrare se face în termenii forțelor de contact care se manifestă între capul sferic al sculei și materialul prelucrat pe durata unui ciclu. Forța predominantă a contactului este forța radială, notată cu  $F_x$ , și, din acest motiv, aceasta se reține ca termen de comparare.

Experimental, forța radială  $F_x$  a fost măsurată și înregistrată continuu, cu ajutorul dinamometrului KISTLER (fig. 4.3) la toate operațiile de prelucrare. Regimul de lucru la care au fost supuse piesele selectate pentru operația de validare experimentală este cel dat în tabelul 4.1, considerat, pe baza încercărilor, ca fiind optim în condițiile agregatului utilizat. Simulările pentru validare au fost făcute în aceleași condiții. Unele rezultate obținute prin simulare numerică sunt expuse în capitolul 3.

Ca înregistrări experimentale au fost folosite curbele forței  $F_x$  pentru probele nr. 6, 7 și 12 date în figura 4.6.

În figura 5.4 sunt centralizate curbele experimentale selectate și, în plus, conține și curba forței radiale obținută prin simulare numerică.

Fig. 5.4. Graficul forței radiale

Analiza curbelor trasate în figura 5.4 pune în evidență o concordanță satisfăcătoare a curbei simulate pe curbele probelor nr. 7 și 12. S-ar putea spune că după arajarea sculei în material, curbele se suprapun foarte bine.

Având în vedere calitatea materialului folosit, neomogen și uneori cu defecte de turnare, mai evidentă la proba nr. 9 (figura 4.6) din analiza comparativă proba nr. 6 se poate exclude.



Frecvența diferită a vibrațiilor suprapuse pe înregistrări este justificată prin faptul că modelul simulat este limitat față de agregatul folosit experimental.

*Trecând peste aspectul dinamic, concluzia care se desprinde din analiza situației prezentate în figura 5.4 constă în faptul că, și sub acest aspect, metodologia stabilită pentru simularea numerică a procesului de netezire și durificare superficială prin deformare plastică este validată experimental.*

## **CONCLUZII LA CAPITOLUL 5**

- În urma validării experimentale, luând în considerație rezultatele obținute, se poate trage concluzia că metodologia folosită și soluțiile simulate sunt corecte.
- Validarea experimentală efectuată prin două procedee de deformare plastică diferite pentru care s-au adunat date în lucrarea de doctorat: încercarea durtății Brinell cu bilă de 10 mm la forța maximă de 3000 Kgf și aplicarea experimentală a procedurii de netezire și durificare superficială pe modele simple permite a constata corectitudinea ipotezei.
- O problemă importantă a calculului numeric în general, convergența metodei, a fost elucidată folosind datele obținute la simularea numerică a probei Brinell în mai multe variante de discretizare. Metodologia de simulare numerică adoptată asigură o convergență rapidă a soluțiilor.
- Compararea datelor simulate cu cele experimentale, selectate la ambele procese de deformare plastică de referință, a evidențiat constatarea suprapunerii în bune condiții a acestora. Din acest motiv reiese că metodologia de simulare numerică a procesului de netezire și durificare superficială a proceselor din structura utilajelor pentru turnarea sticlei este validată experimental.
- Operațiunea de validare experimentală a metodologiei de simulare numerică a scos în evidență posibilitățile largi de folosire și în alte domenii mecanicii a solidului deformabil.

## CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI CONCLUZII GENERALE

### CONTRIBUȚII ORIGINALE

Având în vedere scopul tezei de doctorat și dezideratul de îndeplinire integrală a obiectivelor acesteia, studiile și cercetările teoretice și experimentale privind netezirea și ecrusarea superficială cu sculă cu cap sferic a suprafețelor pieselor executate din fontă cenușie cu grafit lamelar a permis formularea și concretizarea contribuțiilor proprii la dezvoltarea acestui domeniu.

Expunem în continuare principalele contribuții personale documentate în această lucrare:

1. Analiza și sinteza pertinentă a metodelor și tehnologiilor de netezire și durificare superficială a suprafețelor componentelor mecanice din structura ce intră în compunerea diferitelor utilaje industriale (cap. 1).
2. Pe baza analizei și sintezei tehnologiilor de netezire și durificare superficială a suprafețelor organelor de mașini s-au stabilit modalitățile de efectuare experimentală a testelor derulate în cadrul tezei de doctorat (§ 1.2.2, tab. 1.1, tab. 1.2).
3. Analiza experimentală completă a proprietăților mecanice ale materialelor folosite pentru executarea pieselor din structura agregatelor destinate turnării sticlei îmbunătățite prin netezire și durificare superficială (§ 1.2.2, tab. 1.3, tab. 1.4, tab. 1.5).
4. Prelucrarea datelor brute, obținute în urma testelor mecanice, cu acuratețea necesară creșterii preciziei soluțiilor simulate numeric, folosind metode proprii pentru compensarea erorilor inerente determinărilor experimentale și pentru construirea bazei de date reale în care sunt încorporate caracteristicile de material (§ 2.3.4.2, fig. 2.10–2.17). În acest sens, se poate specifica metoda originală de compensare a complianței mașinii de încercat (anexa 2.1) și o modalitate aproximativă de conversie a diagramelor constitutive pentru încercarea de compresiune (anexa 2.2).
5. Fundamentarea metodologiei pentru simularea numerică a proceselor tehnologice de netezire și durificare superficială a pieselor din compunerea agregatelor pentru turnarea sticlei. Metodologia de simulare concepută respectă în linii mari procedura de simulare numerică a proceselor mecanice, dar este structurată în condițiile particularizării la condițiile concrete ale obiectivelor tezei de doctorat (cap. 2).
6. O atenție specială a fost acordată acurateții modelului fizic al procesului, fără care succesul simulării numerice nu poate fi asigurat (§ 2.3.3, fig 2.7). Astfel, a fost conceput un model fizic, într-o configurație funcțională simplă, care însă păstrează toate caracteristicile importante ale tehnologiei simulate. Părților componente ale modelului fizic, exceptând semifabricatul, li s-au asociat proprietățile mecanice ale materialelor elastice reale.
7. Adaptarea și compararea unor modele de material pentru semifabricat, compatibile cu proprietățile mecanice determinate experimental pentru trei loturi de fontă cenușie cu grafit

lamelar, și analiza abaterii acestora de la comportarea reală a materialului, cu consecința alegerii pentru aplicațiile de simulare numerică a modelului Johnson-Cook (cap. 2, fig. 2.8, fig 2.24–2.27, fig. 2.31).

8. Conceperea și aplicarea unei metode de selecție comparativă și validare a modelelor de material propuse și analizate în lucrare, folosind datele experimentale obținute la încercările de duritate Brinell (§ 2.3.4.3, fig. 2.9, tab. 2.3, § 3.2, tab.3.1, fig. 3.05).
9. Acuratețea soluțiilor simulate, dar și economia de resurse de calcul a fost asigurată de construirea unui model discretizat cu elemente finite cu densitate variabilă în funcție de gradientii de câmp preevaluați (§ 3.1, fig. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4). Pe suprafața prelucrată rețeaua de discretizare are densitate maximă și a fost construită folosind concluziile de la simularea probei Brinell (§ 3.2, fig. 3.5).
10. Propunerea și utilizarea a două metode originale de validare experimentală: a metodologia de simulare numerică a procesului de netezire și durificare. Prima metodă este fundamentată pe similitudinea procesului studiat cu proba de duritate Brinell, în ambele procese deformarea plastică realizându-se cu corpuri de formă sferică. Această metodă de validare se aplică prin simularea numerică, cu ajutorul elementelor finite, a procesului de deformare elastoplastică produs la proba Brinell, în condițiile materialului modelat. Criteriul de validare compară parametrii caracteristici comportării materialului simulat cu cei ai materialului real (§ 5.2, fig. 5.1, tab. 5.1, fig. 5.2, fig. 5.3). A doua metodă de validare experimentală se bazează pe compararea rezultatelor obținute prin simulare numerică cu baza de date achiziționate în timpul experimentării procesului de netezire și durificare pe standul utilizat pentru aplicarea acestui procedeu (§ 5.3, fig. 5.4, § 4.1, fig. 4.4).
11. Metodologia de simulare numerică a fost aplicată pentru două variante tehnologice de control al procesului de deformare: control în deplasări sau control în forțe. O analiză comparativă susține alegerea procedeuului de control în funcție de complexitatea mașinilor-unelte disponibile (fig. 3.6–3.12).
12. Simularea numerică pe baza metodologiei stabilite s-a aplicat și altor procese abordate în teza de doctorat: interpretarea realistă a probelor de compresiune; validarea experimentală a metodologiei (fig. 2.28).
13. Împreună cu cadrele didactice de la Universitatea “POLITEHNICA”, București, am stabilit schema de principiu și am ales utilajul necesar pentru aplicarea practică a procedeuului de netezire și durificare superficială (cap. 4, fig. 4.1–4.6).
14. Procedeu de netezire și durificare a suprafețelor a fost aplicat pe unele modele simple de semifabricate, cu suprafețe de revoluție (cap 2, fig. 2.8), cu regimuri de lucru diferite, urmărindu-se în special evoluția în timp a parametrilor mecanici principali și a temperaturii

dezvoltate pe suprafețele prelucrate (cap. 4 , fig. 4.7 a), b), c), d). Drept consecință a aplicării experimentale a procedurii în regimuri de lucru diferite a rezultat un regim considerat optim (cap. 4, tab. 4.1).

15. În cadrul validării experimentale a metodologiei de simulare numerică, un loc special a fost lăsat procedurii de verificare a convergenței de metodă și de calibrare a parametrilor rețelei de discretizare cu elemente finite (§ 5.2, fig. 5.1, tab. 5.01, fig. 5.2, fig. 5.3).
16. Ca metodă comună de validare experimentală s-a folosit metoda comparării rezultatelor simulate cu datele măsurate în timpul aplicării experimentale a procesului tehnologic de netezire și durificare superficială pe semifabricate cu forme simple (cap. 3 și 4).
17. Validarea experimentală, prin ambele metode specificate anterior, a condus la concluzia unică, favorabilă, privind metodologia de simulare numerică elaborată și aplicată în teza de doctorat (cap. 3, tab. 3.1, cap. 4).
18. Prin validarea experimentală a metodologiei de simulare numerică au fost eliminate incertitudinile privind autenticitatea rezultatelor simulate și a mărit încrederea și siguranța în soluțiile simulate numeric pe această cale (§ 5.3, fig. 5.4, cap. 3).
19. Metodologia de simulare numerică formulată, având un caracter de aplicabilitate general, poate fi extinsă cu ușurință la o gamă largă de procedee tehnologice de prelucrare prin deformare plastică.
20. Conceperea metodologiei de simulare numerică și aplicarea acesteia în aplicații de mecanica solidului elastoplastic deformabil aduce o contribuție importantă în domeniul tehnologiilor mecanice moderne, monitorizate prin software-uri profesionale de analiză numerică.

## CONCLUZII FINALE ȘI RECOMANDĂRI

1. Reducerea poluării mediului ambiant sub aspect social, medical și economic este o cerință stringentă impusă de necesitatea îmbunătățirii calității vieții umane. În acest context, înlocuirea procedeelelor de rectificare și lustruire cu cele de netezire devine tot mai actuală.

2. În general s-a conceput o metodologie de simulare numerică bazată pe metoda elementelor finite, aplicată proceselor de prelucrare prin deformare plastică. S-a insistat asupra realizării unui model fizic fidel, în care sunt incluse corpurile principale ce participă la proces și a cărui funcționare corespunde tehnologiei aplicate [15, 20].

3. Comportarea fontei cenușii cu grafit lamelar la deformări plastice a fost încadrată în mai multe tipuri de modele de material. Dintre acestea, două realizează o aproximare foarte bună: modelul poliliniar și modelul experimental. Studiile efectuate au justificat o corecție de  $\varepsilon_{pl}$  (a curbei caracteristice plastice) o extensie de 60% în condițiile de operație de netezire + compresiune în cele trei direcții [16].

4. Rezultatele obținute în urma simulărilor numerice ale proceselor de netezire și durificare a pieselor din fontă cenușie cu grafit lamelar confirmă capacitatea acestor metode de a aborda fenomenele complexe care se produc în materialele deformate plastic, și anume, întărirea materialului pe suprafața prelucrată cu forța de 500N asigură creșterea tensiunii de curgere de aproximativ 2 ori (215-400 Mpa), iar cu forța de 1000N practic nu modifică aceste rezultatele (420MPa).

5. Compararea datelor simulate cu cele experimentale, selectate la ambele procese de deformare plastică de referință, a evidențiat constatarea suprapunerii în bune condiții a acestora. Din acest motiv se consideră că metodologia de simulare numerică a procesului de netezire și durificare superficială a proceselor din structura utilajelor pentru turnarea sticlei este validată experimental [21, 20, 19].

6. Tehnologia de netezire a suprafețelor formelor din fontă cenușie cu grafit lamelar elaborată în lucrare permite obținerea durității suprafeței până la HB 148, în cazul dacă sunt respectate regimurile optime de prelucrare: viteza  $V = 45\text{m/min}$ ;  $s = 0.09\text{ rot/min}$ ; avansul radial  $= 0,2\text{ mm}$ , cu o rază la vârf a sculei de 4 mm și cu aplicarea unei forțe de 500 N [16, 20].

7. Procedeele constructiv-tehnologice brevetate permit reducerea temperaturii în zona de formare a produsului din sticlă în etapa de proiectare a formei de turnare printr-o răcire mai optimă sau prin aplicarea pe suprafața matricei peliculelor de protecție de grafit [18, 109].

## BIBLIOGRAFIE

1. Alighin V., Bliumenștein V., Vasiliev A. Tehnologhiceskie i ekspluatationnîe metodi obespecenia kacestva mașin. ISBN: 978-985-08-1238-4, Izdateliskii dom «Belorusskaia nauka», 2014. – 111 s.
2. Balakșcin B. C. Teoria i practika tehnologhii mașcinostroenia: V 2-c kN. – M.: Mașcinostroenie, 1982. - 218 kn.
3. Barciukov D., Lavrentiev A., Melnikov I. Vîbor ciuguna dlea izgotovlenia stekloform. Novie materialî i tehnologhii v mașcinostroenii: sb. Nauc. Tr. Po itogam mejdunarodnoi naucno-tehnicescoi konferenții. Vîp. 13. Breansk: BGITA, 2011, s. 3-6.
4. Berish R. Raspîlenie pod vozdeistviem bombardirovki ceastitami. M.: Mir, 1998.- 519 s.
5. Bikbulatova V., Hairetdinov E. Osnovî mehaniki plasticeskoi deformații i razrușenia v metallah: Ucebnoe posobie. Ufa. UGATU. 2012. – 162 s. ISBN: 978-5-4221-0297-6 / 9785422102976
6. Birgher I. Ostatocinîe napreajenia. M.: Lenand, ISBN: 978-5-9710-1560-4, 2015. – 234 s.
7. Boguslaev V., Borisevici V. Borisevici V i dr. Obrabotka metallov davleniem. Prokatka, kovka, ștampovka. Harikov HAI. 2002. – 419 s.
8. Boițov A.G., Mașcov V.N., Smolențev V.A., Hvorostuhin L.A. Uprocinenie poverhnostei detalei combinirovannîmi sposobami – M.: Mașcinostroenie, 1991. — 144 c. — ISBN 5-217-01247-1.
9. Boltov U. Konstruktionnîe materialî: metallî, splavî, polimerî, keramika, kompozitî. Spravocinik. M.: Dodeka. 2007. – 320 s.
10. Botvenco S. Tehnologhiceschie ostatocnîe napreajenia i deformații. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing ISBN: 978-3-659-30383-8, 2013. – 168 s.
11. Braslavskii B. M. Tehnologhia obcatki krupnîh detalei rolikami. - M.: Mașcinostroenie, 1975. - 159 s.
12. Bronz L. D. Tehnologhia i obespecenie resursa samoliotov. M.; Mașcinostroenie, 1986. - 184 s.
13. Carpov E.A., Shirladze A.G., Boriskin V.P. Organizația proizvodstva i menedjmenta. ISBN: 978-5-94178-137-9 Starîi Ocol, Izd-vo TNT, 2014. – 768 s.
14. Cernîșov G. I dr. Ostatocnîe napreajenia v deeformiruemîh tverdîh telah. M.: Fizmatlit, 1996. – 240 s.
15. Cherecheș T., Lixandru P., Mazuru S., Cosovschi P., Dragnea D. Numerical Simulation of Plastic Deformation Process of the Glass Mold Parts, „Applied Mechanics and Materials”, 2014.
16. Cherecheș T., Lixandru P., Mazuru S., Cosovschi P., Dragnea D. Numerical Simulation of Plastic Deformation Processes from Cast Iron Parts, Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2014.
17. Ciumacenco E., Smirnov O., Țepin M. Sverhplasticnosti. Materialî, teoria, tehnologhii. Izd-vo Librocom, 2009. – 320 s. ISBN: 978-5-397-00782-5.
18. Cosovschi P. Îmbunătățirea răcirii componentelor seturilor de forme pentru formarea sticlelor//Buletinul Institutului Politehnic din Iași,-2008, vol LIV,p.45-48. ISSN: 1011-2855.
19. Cosovschi P. Presentation of Results for Surface Plastic Deformation by Laminar Graphite Cast iron// Meridian Ingineresc, vol. 4(55),p.54-57,2014, ISSN 1683-853x.
20. Cosovschi P. Simularea numerică a procedeeleor de netezire și de durificare// Fizica și Tehnică, 2013, vol.2, p.28-33, or.Balți, ISSN 1857-0437.
21. Cosovschi P.G. Issledovanie vliianieia proșessa vîglajivanieia almaznîm instrumentom na cacestvennîe pokazateli poverhnosti leghirovannîh ciugunov. ”Mașcinostroenie i tehnosfera XXI veka”, tom2, s.88-91, 2011, ISSN 2079-2670.

22. Diomkin N. B., Rîjov E. V. Kacestvo poverhnosti i kontakt detalei maşcin. – M.: Maşcinostroenie, 1981. - 227 s.
23. Doleţkii V. A. Uvelicenie resursa maşcin tehnologhiceskimi metodami. - M.: Maşcinostroenie, 1978. -215 s.
24. Draghici. G. Ingineria integrată a produselor. Editura Eurobit Timişoara, 1999, ISBN 973 - 96065-7-1.
25. Ekonomika i organizaţia proizvodstva v diplomnîh proiectah: Uceb. Posobie dlea maşcinostroitelnîh vuzov / K.M. Velikanov, E.G. Vasilieva, V.F. Vlasov i dr.: Pod obşc. red. K.M. Velikanova. – 4 – e izd., pererab. I dop. – L.: Maşcinostroenie. Leningr. otd-nie, 1986. – 285 s.: il
26. Ekonomika maşcinostroienia: Ucebnik dlea studentov maşcinostroitelnîh speţialnostei vuzov/ E.M. Karlik, K. M. Velikanov, V. F. Vlasov, A.P. Gradov A i dr.; Pod red. E.M. Karlika. – 2 – e izd., pererab. i. Dop. – L.: Maşcinostroenie. Leningr. otd-nie, 1985. – 392 s.: il.
27. Ekonomika maşcinostroitelnogo proizvodstva: Uceb. Dlea maşcinostr. speţ. vuzov/ Iu. A. Abramov, I. E. Berzini, N.N. Zastrojnova i dr.; Pod red. I.E. Berzinea, V.P. Kalinina. – M.: Vîsş.Şk., 1988. – 304 s. ISBN 5-06-001213 – 1.
28. Evdochimov V.D., Climenco L.P., evdochimova A.N. Tehnologhia uprocnenia maşcinostroitelnîh materialov. Odessa Nicolaev: Izd-vo NGGU im. Petra Movilî, 2005. – 352 s.
29. Fadeev L., Albagaciev A. Povîşenie nadiojnosti detalei maşin, ISBN: 5-217-01975-1, – M.:Maşcinostroenie , 1993. – 96 s.
30. Gorlenco O. A. Tehnologhiceskoe upravlenie geometriceskimi parametrami kontaktiruiuşcîh poverhnostei. – Breansk: Priokskoe knijnoe izdatelstvo,1975. – 198 s.
31. Guloian Iu., Tehnologhia stekla i stecloizdelii. Vladimir. Tranzit-X, 2003 480 s.
32. Hasui A. Tehnika napîlenia / Per. S iaponscogo. M.: Maşcinostroenie,1975. 287 s.
33. Hmelevskaia V., Leonitiev L. Povîşenie nadejnosti sudovogo oborudovania. Sovremennîe metodî uprocnenia i vosstanovlenia detalei. Tom 1, ISBN: 5-8044-0356-X, Vladivostok, Izd-vo Dalinauka, 2003. – 283 s.
34. Holodkova A. Obşeaia tehnologhia maşcinostroenia. Ucebnoe posobie. M.: Akademia, ISBN: 978-5-7695-6571-7, 2009 – 224 s.
35. Hramkov V., Guloean V., Laptev V. Formirovanie izdelii iz stecla. M.:Legcaia industria 1980. – 176 s.
36. Hromov V. Vosstanovlenie i uprocinenie detalei maşin i instrumenta. Termoplasticescoe deformirovanie metalla. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN: 978-3-659-25718-6, 2012. – 280 s.
37. Hvorostuşkin L.A., Şişkin C.V., Şmakov R.A. Povîşenie nesuşcei sposobnosti detalei maşcin poverhnostnîm uprocneniem. – M.: Maşcinostroenie, 1988. - 376 s.
38. Iaroslavcev V.M. Konstruktivnie osobennosti uprociniaiusih ustroistv dlea tocenia s operejaiusim plasticeskîm deformirovaniem. /ISSN 1994-0448,2014. – S.15-29.
39. Iaroşevic V.K., Genkin Ia.S., Vereşceaghin V.A. Elektrokontaktnoie uprocnenie. M.: Nauka i tehnika. 1982. 256 s.
40. Iaşeriţin P., Felidştein E. Teoria rezania. Minsk: Novoe izdanie. ISBN: 985-475-195-3 2006. 512 s.
41. Iaţenco V. K., Zaiţev G.Z., Pritcenko V.F. Povîşenie nesuşcei sposobnosti detalei maşcin almaznîm vîglajivaniem. –M.: Maşcinostroenie,1985. -232 s.
42. Ivanov I., Socolov A., Socolov V., Şelest A. Osnovî teorii obrabotki metallov davleniem. Izd-vo Forum, 2007. – 144 s. ISBN: 978-5-91134-126-8.
43. Kaledin B.A., Ceba P.A. Povîşenie dolgovecnosti detalei poverhnostnîm deformirovaniem. – Minsk: Nauka i tehnika, 1974. – 398 s.
44. Klepikov V.V., Bodrov A.I. Tehnologhia maşcinostroenia: Ucebnik. – M.: Forum: Infra –

- M., 2004. – 860 c.: il. – (seriia „professionalnoe obrazovanie”) , ISBN 5 – 8199 – 0078 – 2.
45. Kojevnikov N., Zubkova A., Ladîghina A. Ekonomika i upravlenie v maşinostroenii, ISBN: 5-7695-1536-8, M.: Akademia 2004. – 208 s.
46. Kolmogorov V.L. Mehanica obrabotki metallov davleniem: ucebnik dlea vuzov. M.: Metallurghia. 1986. 688 s.
47. Kostrjiţkii A.I., Lebedinskii O.V. Mnogokomponentnîe vakuumnîe pokrîtia. M.: Maşinostroenie. 1987. 208.s.
48. Kovalenco V. S. Tehnologhia i oborudovanie elektrofiziceskih i electrohimiceskih metodov obrabotki materialov. K.: Vişcea şcola. Golovnoe izd-vo, 1983. 176 s.
49. Kroha V.A. Uprocnenie metallov pri holodnoi plasticeskoi deformaţii: Sprovocnik.-M.: Maşinostroenie, 1980. – 109 s.
50. Kudreavţev I.V., Naumcenko N.E., Savvina N. M. Ustalosti krupnîh detalei maşcin. M.: Maşinostroenie. 1981.237 s.
51. Kuscov V.N. Vosstanovlenie i uprocnenie detalei oborudovania pererabativaiuşih proizvodstv. Tiumeni: Izd-vo Vector Buk., ISBN: 5-914091-01-6, 2009 – 179 s.
52. Kustovskii V.N., Gudîm L. N., Kninsberg Ţ.Z. Opît vnedreniia cistovoi obrabotki zubceatîh profilei plasticeskim deformirovanie // Vestnik maşinostroenia. -1995.-№10.-C34-40.
53. Kuzneţov N.D., Ţeitlin V. I., Volkov B.I. Tehnologhiceskie metodî povîşenia nadiojnosti detalei maşcin: Spravocnik. M. : Maşinostroenie. 1992. 304 s.
54. Lerner P. Obrabotka metallov davleniem: segodnea i zavtra. M.: vîşşaiia şkola. 1990. – 128 s.
55. Leuşin I., Cisteakov D. Analiz proţessov treşennoobrazovania v detaliah ciugunnîh stecloform. Metallî. 2014. № 5. s. 101-105
56. Leuşin I., Cisteakov D. Issledovanie cnhernehyj-morfologhiceskih sostoeaniigrafita na primere ciugunnîh otlivok stecloform. Liteişik Rossii. 2014. № 9. C. 35-39.
57. Leuşin I., Cisteakov D. Teplofiziceskie parametrî expluataţii detalei ciugunnîh stekloform Izv. Vuzov ciornaia metallurghia. 2013 №13 s 50-52.
58. Leuşin I., Cisteakov D. Vliianie strukturoobrazovania i fazovogo sostava ciugunnîh otlivok stekloform na expluataţionnîe svoistva gotovîh izdelii. Izv. Vuzov ciornaia metallurghia 2013. №5. S. 19-23.
59. Leuşin I., Cisteakov D. Vliianie strukturî ciuguna na obrazovanie expluataţionnîh defectov stekloformuiuşei osnastki. Nauka i obrazovanie. MGTU im. Baumana. 2015. – 111-123 s.ISSN 1994-0408.
60. Lugovskii V.V. Vliianie obrabotki poverhnostnîm plasticeskim deformirovanie na korrozionnuiu stoicosti stalei austenitnogo klassa // Vestnik maşinostroenia.-1990.-№12. - C.20-24.
61. Malîghin B.V. Magnitnoie uprocnenie instrumenta i detalei maşcin. M.: Maşinostroenie. 1989. 112 s.
62. Mariina N. Differentîrovannoe ghidrodrobestruinoe uprocnenie kolenceatîh valov DVS. ISBN: 978-3-843-32233-1, Saarbrükken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 152 s.
63. Matalin A. A. Tehnologhia maşinostroenia: Ucebnik dlea maşcinostroitelnîh vuzov po speţialnosti „tehnologhia maşinostroenia, metallorejuşcie stanchi i instrumentî”. – L.: Maşinostroenie, Leningr. Otd-nie,1985. 496 s., il.



64. Matalin A. Tehnologhiia maşinostroenia. M.: Lani, ISBN 978-5-8114-0771-2, 2015. – 512 s.
65. Matlin M., Morgunova I. Lebskii S. Prognozirovanie parametrov uprocnenia detalei maşin putem poverhnostnogo plasticescogo deformirovania. – Izvestia VolgGTU, 2005. – C52-55.
66. McGrow D.A. Heat transfer of the glass mould interface.- Gastechnische Berichte, 1973, N5, S.89-91.
67. McGrow D.A. Transfer of heat in glass during forming. Journal the American Ceramic Society, 1961, N44, N7, p.353-363.
68. Mişarin Iu. A. Vliianie şerohovatosti poverhnosti na konstruktionnuu procnosti stali: Dis... kand. tehn. nauk. – Moskva,1984.-150 s.
69. Mitin B.S. Poroškovaia metallurghia i napîlionnîe pokrîtia. M.: Metallurghia. 1987. 792 s.
70. Moskvitin G. Sovremennîe tehnologii modifiţirovania poverhnosti detralei maşin. ISBN: 978-5-9710-0660-2, 2013. – 400 s.
71. Mostalîghin G.P. ,Tolmacevskii N.N. Tehnologhia maşinostroeniia. – M.: Maşinostroenie, 1990: Ucebnik dlea VUZov po injinerno-ekonomiceskimi speţialnosteam – 288 s.: il., ISBN 5-217-01011-8.
72. Naughton T.J., McGrow D.A. Analises of heat transfer in glass. Advances in Glass technology, 1962, p.603-606.
73. Odiņov L.G. Uprocnenie i otdelka detalei poverhnostnîm plasticeskim deformirovanîem: Spravocnik. M.: Maşinostroenie. 1987. 328 s.
74. Oleinik N.V., Klîcin V.P., Lugovskii A. L. Poverhnostnoie dinamiceskie uprajnenia detalei maşcin. Kiev. Tehnika. 1984. 150 s.
75. Osnovî tehnologhii maşinostroenia. 1982. 367 s., il.
76. Pamela Sloane. The existing technological ways of processing of the gears // CM&.-1999.- №7.-P. 23-30.
77. Papşev D. D. Uprocnenie detalei obkatkoî şarikami. – M.: Maşinostroenie,1978. 225 s.
78. Pavlov V.A. Cistovaia uprocneaiuşceaia obrabotka zubiev krupnomodulinîh zubcatîh kolios: Dis... kand. tehn. nauk. – Breansk, 1973.-187s.
79. Pelih A, Barannikov M. Ekonomika maşinostroenia, ISBN: 5-222-04389-4, Rostov na Donu Izd-vo Fenix, 2004. – 416 s.
80. Perepicka E. V. Ocistnouprocneaiuşceaia obrabotca izdelii şcetkami. M.: Maşinostroenie. 1989. 134 s.
81. Petrusевичi A. I., Danilov V. D. Vliianie prirabotki kontaktiruiuşcih poverhnosti na ih protivozadirnuiu stoikosti pri kacenii so scolijenîem // Vestnik maşinostroenia.-1975.- № 5. – C.12-19.
82. Polevoi S.N., Evdokimov V. D. Uprocnenie metallov. Spravocnik. - M. :Maşinostroenie. 1994. - 396 s.
83. Poliacov A.N. Metodî uprocinenia poverhnosti detalei maşin, 2008 ISBN 978-5-396-00003-2, 400 s.
84. Povîşenie nesuşsei sposobnosti detalei maşcin poverhnostnîm uprocnenîem/ L.A. Hovorostuhin, S.V. Şcişcin, I. P. Kovalev, R. A. Işmakov, M.: Maşinostroenie.1988. 144 s.
85. Proscureacov Iu. G. Tehnologhia uprocneaiuşce-kalibruiuşcei i formo-obrazuiuşcei obrabotki metallov. – M.: Maşinostroenie. 1981. – 221 s.
86. Pruteanu O.V. Tehnologia construcţiei de maşini. Partea I, carte editată cu sprijinul Autorităţii Naţionale pentru Cercetare Ştiinţifică, editura junimea, Iaşi, 2005. ISBN 937 – 37 – 1123 – 3.
87. red. Denisov A.S. i dr. Soverşenstvovanie tehnologhii vosstanovlenia i uprocnenia detalei maşin. Saratov SGTU, ISBN: 5-7433-0988-4, 2002. – 82 s.
88. Red. Garkunov D.Dolgovecinosti truşihsea detalei maşin. Sbornik naucinîh statei 4 vîpusk. M.:Maşinostroenie 1990 – 351 s.
89. red. Pimenova A. Obrabotka davleniem metalliceskih materialov. M.:Nauka. ISBN: 5-02-

006062-3. 1990. 239 s.

90. Ren Martin. The quality of the surface and the serviceability of the gear // CM&M.-1990.- №4. -P.9-17.

91. Ritchie R.O., Lankford J. Small fatigue cracks – a statement of the problem and potential Solutions // Materials Science and Engineering. B.W. -1986.- P. 11-16.

92. Rîciov B., Paniaev V., Gonciarova I. Deformaționnoe uprocinenie i dilatația serogo ciuguna. Priminenie conțepții scolijenia i razrîhlenia. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN: 978-3-659-92206-0, 2016. – 84 s.

93. Rîkovskii B. I dr. Mestnoe uprocinenie detalei poverhnostnîm naklepom. M.: Mașinostroenie, 1985. – 152 s.

94. Schiller S., Panzer S. Thermal surface Modification bu HF- deflected Electron Beam, Proc. Intern. Conf. „The Laser vs the Electron Beam in Welding, Cutting and Surface Treatment, Reno, Nevada/USA, Nov.” 1985 ,15 p.

95. Sîzranțev V., Golofast S. Izmerenie țicliceskih deformații i prognozovanie dolgovecinosti detalei po pokazaniam daticov deformații integralinogo tipa. Novosibirsk: Nauka. 2004. – 206 s.

96. Smeleanskii V. M. Mehanika uprocneniia detalei poverhnostnîm plasticeskim deformirovanie M.: Mașinostroenie, 202. – 300 s.

97. Sokolițin S.A. Kuzin B. I. Organizația i operativnoie upravlenie mașinostroitelnîm proizvodstvom: Ucebnik dlea vuzov po spețialnosti „ Ekonomika i organizația mașinostroitelnoi promîșlennosti ” – L.: Mașinostroenie. Leningr.otd – nie, 1988 – 527 s.: il. ISBN 5 – 217 – 00017-

98. Stepanov I.E., Gladștein I.E. Konstruirovanie form dlia stekleannîh izdelii. M; 1974.

99. Stepanova T. Tehnologhii poverhnostnogo uprocnenia detalei mașin: ucebnoe posobie. Ivan. gos. him.-tehnol. un-t.-Ivanovo, 2009.- 64s.- ISBN – 5-9616-0315-4.

100. Stepanskii P. Prognozovanie nadejnosti tehnologhiceskih proțessov, instrumenta i mașin v obrabotke metallov rezaniem. izd-vo TriMag, 2015. – 288 s. ISBN: 978-5-9907099-0-4.

101. Suminov I., Belkin P., Elelifelid A. Plazmenno-electroliticeskoe modifițirovanie poverhnosti metallov i splavov. Izd-vo: Tehnosfera. 2011. – 512 s. ISBN: 978-5-94836-268-7

102. Supov A.V. i dr. Termiceskaia i termomehaniceskaia obrabotka stali i ciuguna / - ISBN: 978-5-89594-141-6, 2007. – 919 s.

103. Suslov A. T. Kacestvo poverhnostnogo sloia detalei mașcin. –M.: Mașci-nostroenie. 2000. - 317 s.

104. Șepelenko G.I. Ekonomika, organizația i planirovanie proizvodstva na predpriiatii. ISBN: 978-5-222-16271-2, Rostov na Donu, Izd-vo Fenix Mart, 2010. – 600 s.

105. Șlegeli A. Povîșenie stoikosti rabocih cromok ciugunnîh stecloform na osnove lazernogo neprerîvnogo uprocnenia: avtoref. Dis. Cand. Tehn. Nauk. M., 2011. 20 s.

106. Șmid W. Modelltechnische Unterzuchung des Fliessvorganges in flaschen – Vorformen mit besonderen berucksichtigung der Speise – Wellenenstenung. – glastechn.Ber., 1970, Bd.43, N 11-12.

107. Șneider Iu. G. Ekspluataționnîe svoistva detalei s regulearnîm mikroreliefom. 2-e izd.pererab. i dop. L.: Mașinostroenie. Leningr. otd-nie. 1982. 248 s.

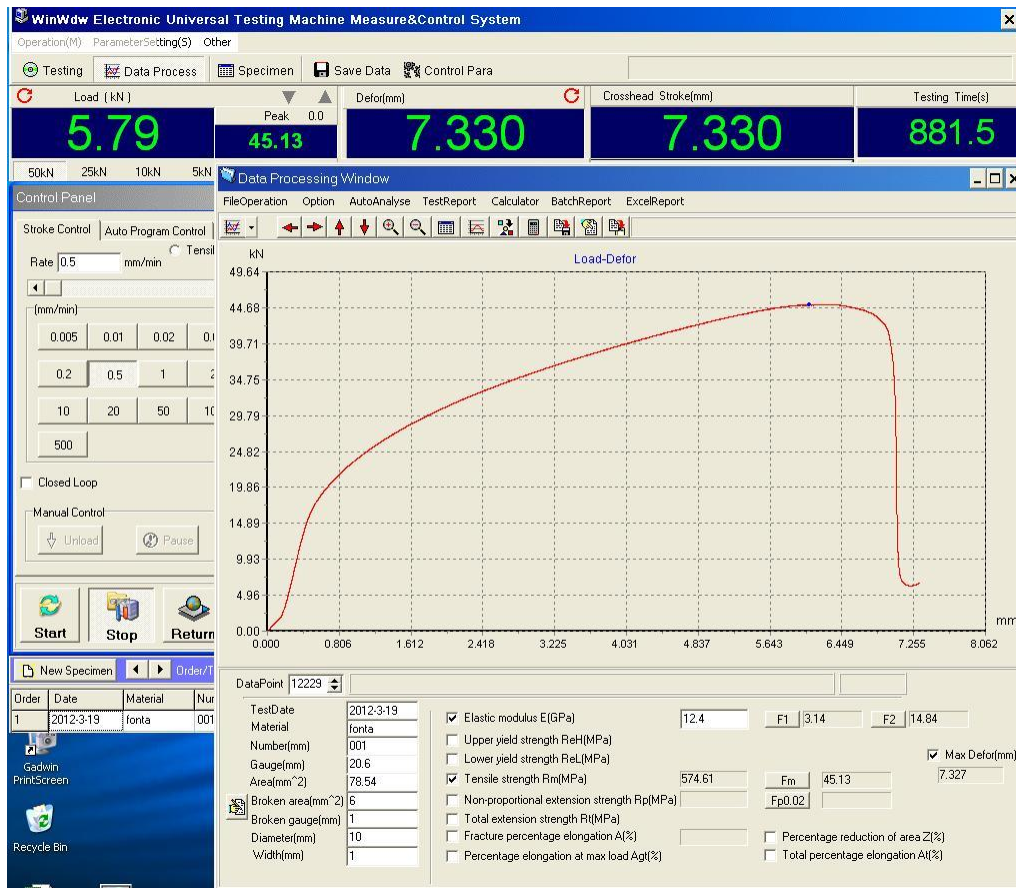
108. Tehnologiceskie osnovî obespecenia kacestva mașcin / K.S. Kolesnikov, G.F. Balandin, A.D. Daliskii i dr.; Pod obșc. Red. K. S. Kolesnikova. M.: Mașinostroenie.1990. 256 s.

109. Besliu Vitalie., Mazuru Sergiu, Cosovschi Pavel, Ojegov Alexandr Application of Edi in Increasing Durability of Glass Moulding Forms Poansons// „Modtech 2011”, ISN 2069-6736

110. Topoleanskii P. Uvelicenie sroka slujbî formokomplektov v uslovieah stecloformnîh zavodov.Stekleannaea tara. 2009. № 3. s. 14-18.

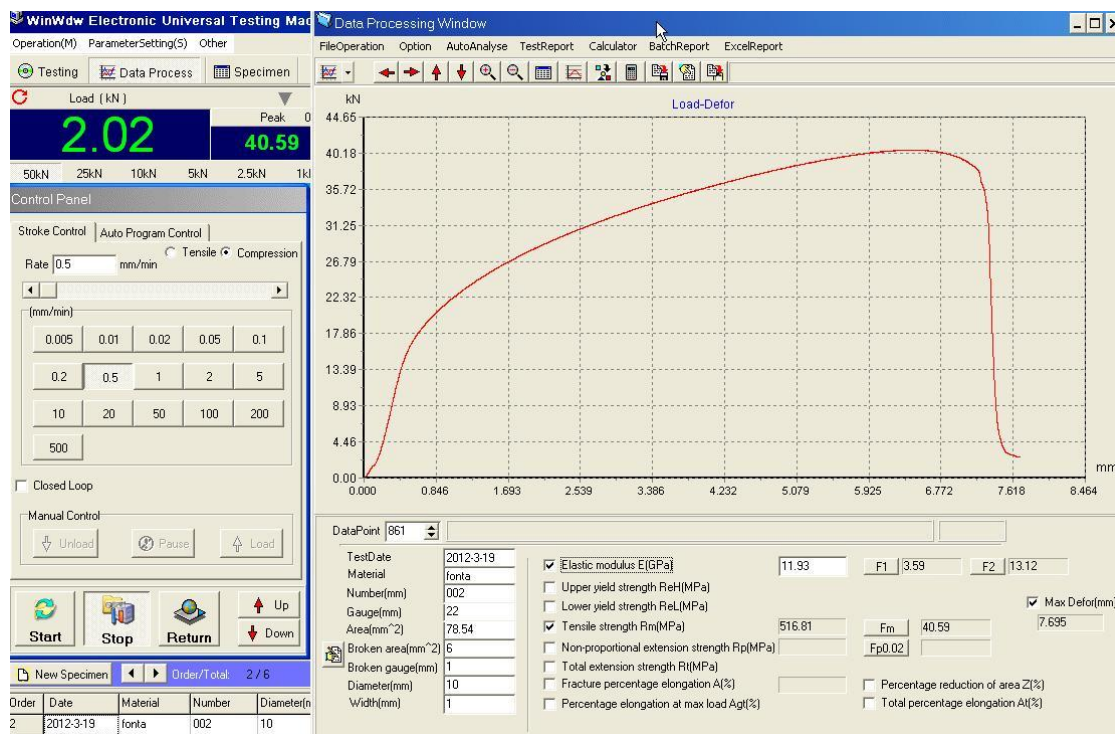
111. Trnka J. Sklarske formy.-Praha, 1972, s.270.
112. Tuşinskii L.I. Teoria i tehnologhia uprocnenia metallicheskih splavov. Novosibirsk: Nauka. 1990. 301 s.
113. Vasilieva A. G. Deformaţionnoe uprocnenie zakalionnîh konstrukcionnîh stălei.- M.: Maşinostroenie, 1981. -350 s.
114. Vlase A. Tehnologia construcţiilor de maşini, editura tehnică, bucureşti, 1996. ISBN 973 - 310777 – 8.
115. Vlasov V.M. Rabotosposobnosti uprocniionnîh truşihsea poverhnostei. M.: Maşinostroenie, 1987. 304 s.
116. Voronţov A. Teoria rascetov proţessov obrabotki metallov davleniem. izd-vo MGTU im. Baumana, 2014. – 848 s. ISBN: 978-5-7038-3918-8.
117. Werner S. Modelltechnische Unterzuchung des Fliessvorganges in flaschen – Vorformen mit besonderen berucksichtigung der Speise – Wellenenstenung. – glastechn.Ber., 1970, Bd.43, N11, s.443-449.

**PROBA DE COMPRESIUNE 1**  
 Loc desfășurare teste – Universitatea Tehnică ”Gh. Asachi”, Iași  
 Data 19.03.2012



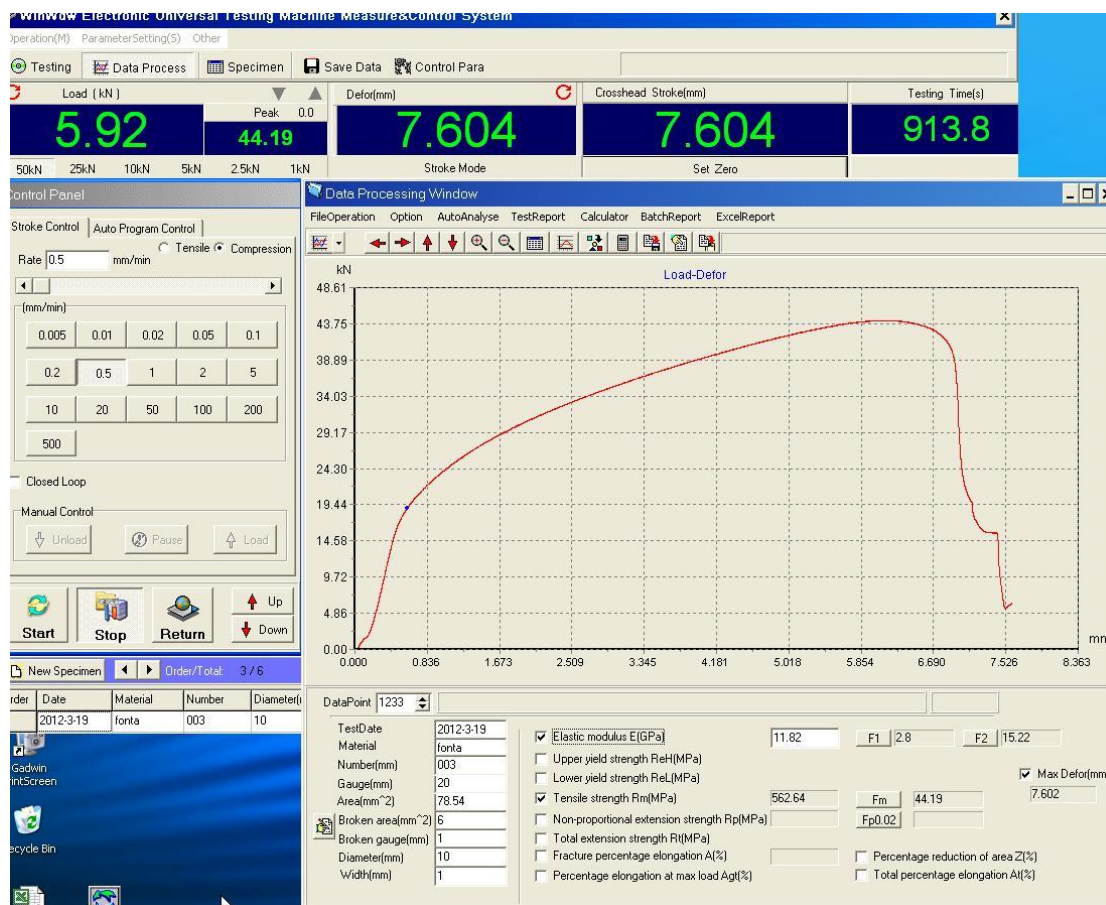
Nr. Crt.	Load [kN]	Deform. [mm]	Stroke [mm]	Time [s]
1	0.0000	0.0000	0.000	0.055
2	0.0000	0.0000	0.000	0.115
.	.	.	.	.
11434	44.6000	5.6887	5.689	686.035
11435	44.5800	5.6900	5.690	686.095
11436	44.5700	5.6900	5.690	686.155
11437	44.5600	5.6900	5.690	686.215
11438	44.5600	5.6900	5.690	686.275
11439	44.5600	5.6912	5.691	686.335
11440	44.5700	5.6912	5.691	686.395
11441	44.5700	5.6925	5.692	686.455
.	.	.	.	.
14690	6.6600	7.3275	7.327	881.395
14691	6.6700	7.3287	7.329	881.455

**PROBA DE COMPRESIUNE 2**  
 Loc desfășurare teste – COMOTI SA București  
 Data 19.03.2012



Nr. Crt.	Load [kN]	Deform. [mm]	Stroke [mm]	Time [s]
0	0.0000	0.0000	0.000	0.000
1	0.0000	0.0000	0.000	0.055
2	0.0000	0.0000	0.000	0.115
.	.	.	.	.
11850	40.1800	5.9050	5.905	710.995
11851	40.1700	5.9050	5.905	711.055
11852	40.1600	5.9050	5.905	711.115
11853	40.1500	5.9062	5.906	711.175
11854	40.1400	5.9062	5.906	711.235
11855	40.1400	5.9062	5.906	711.295
11856	40.1400	5.9075	5.907	711.355
11857	40.1400	5.9075	5.907	711.415
11858	40.1400	5.9075	5.907	711.475
11859	40.1500	5.9088	5.909	711.535
11860	40.1500	5.9088	5.909	711.595
11861	40.1500	5.9088	5.909	711.655
11862	40.1500	5.9100	5.910	711.715
11863	40.1600	5.9100	5.910	711.775
.	.	.	.	.
15408	2.5400	7.6950	7.695	924.475
15409	2.5400	7.6950	7.695	924.535

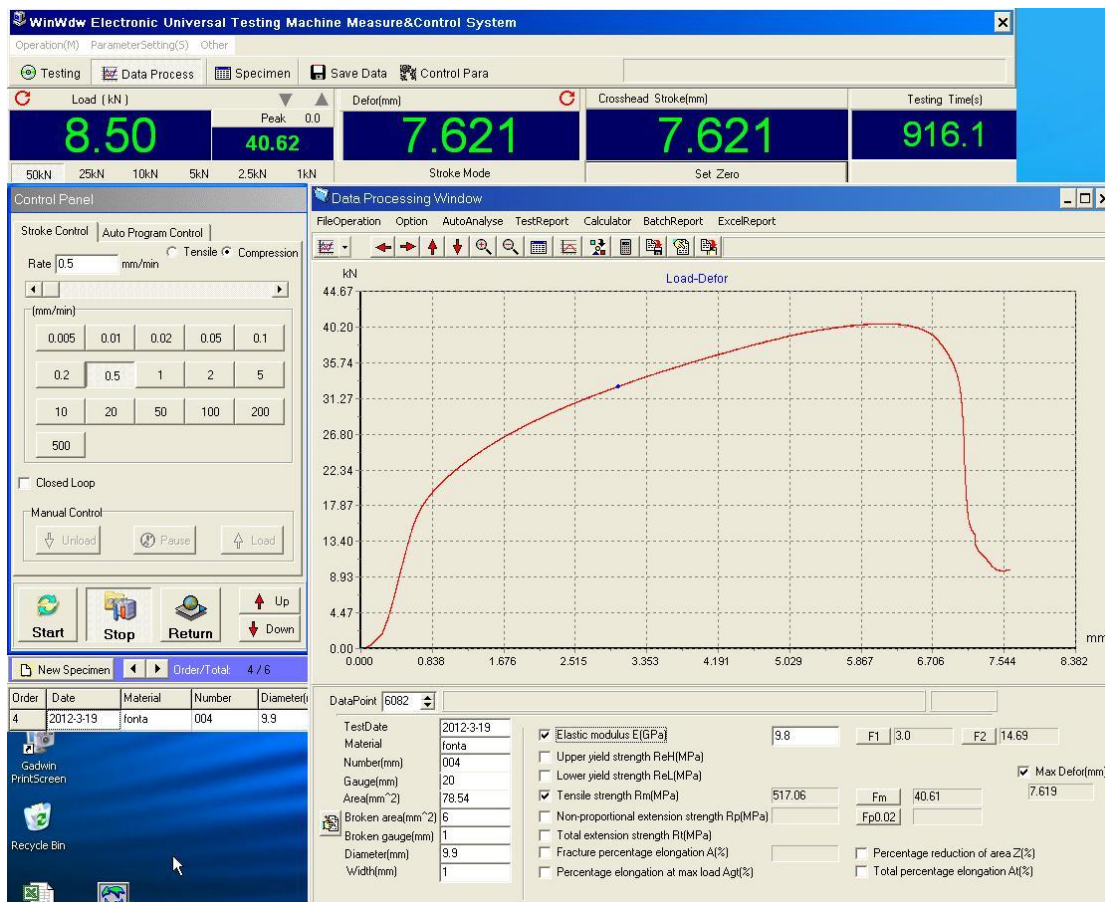
**PROBA DE COMPRESIUNE 3**  
 Loc desfășurare teste – COMOTI SA București  
 Data 19.03.2012



Nr. Crt.	Load [KN]	Deform. [mm]	Stroke [mm]	Time [s]
1	0.0000	0.0000	0.000	0.055
2	0.0000	0.0000	0.000	0.115
.	.	.	.	.
11417	43.7500	5.6825	5.682	685.015
11418	43.7400	5.6825	5.682	685.075
11419	43.7200	5.6825	5.682	685.135
11420	43.7300	5.6837	5.684	685.195
11421	43.7300	5.6837	5.684	685.255
11422	43.7300	5.6837	5.684	685.315
11423	43.7300	5.6850	5.685	685.375
11424	43.7300	5.6850	5.685	685.435
11425	43.7200	5.6850	5.685	685.495
11426	43.7200	5.6862	5.686	685.555
.	.	.	.	.
15231	6.2000	7.6012	7.601	913.855
15232	6.2000	7.6025	7.602	913.915
15233	6.2000	7.6025	7.602	913.975

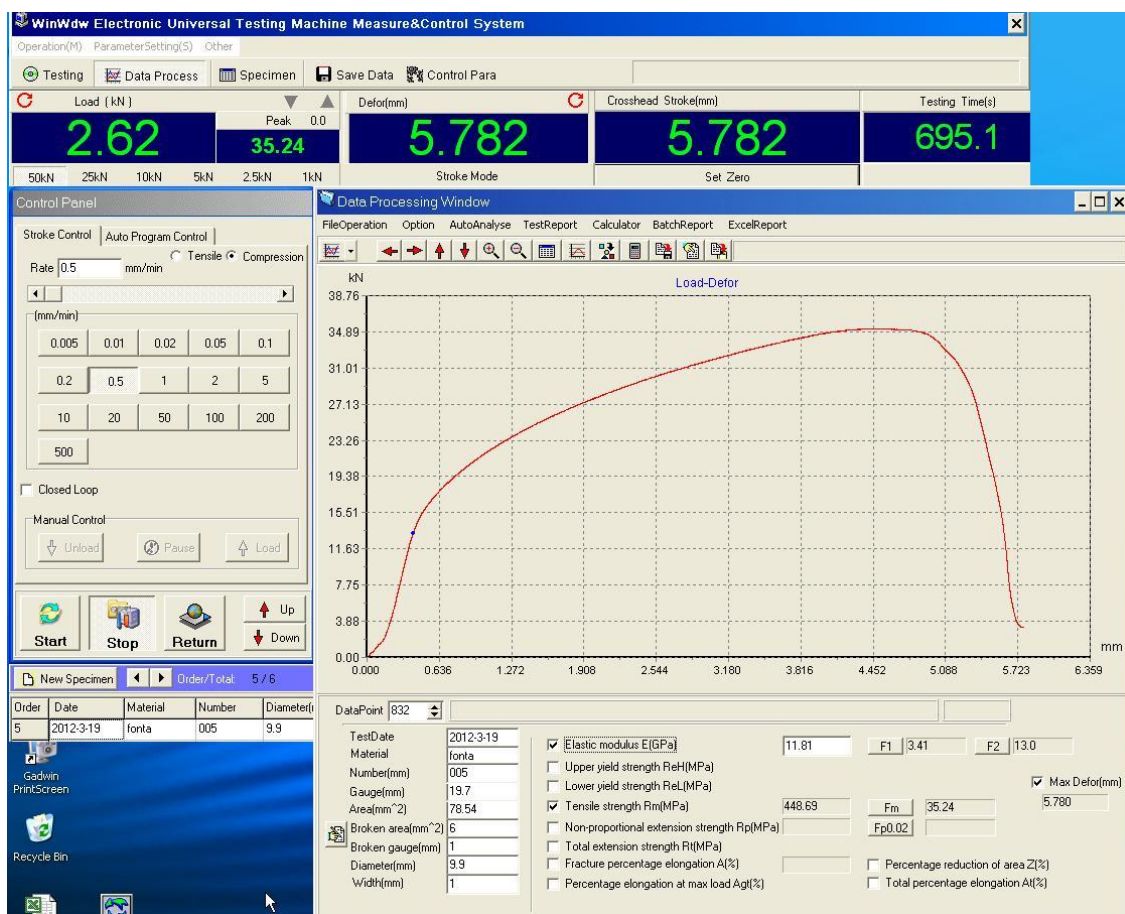


**PROBA DE COMPRESIUNE 4**  
**Loc desfășurare teste – COMOTI SA București**  
**Data 19.03.2012**



Nr. Crt.	Load [kN]	Deform. [mm]	Stroke [mm]	Time [s]
1	0.0000	0.0000	0.000	0.055
2	0.0000	0.0000	0.000	0.115
.	.	.	.	.
11396	40.2800	5.6725	5.672	683.755
11397	40.2700	5.6737	5.674	683.815
11398	40.2600	5.6737	5.674	683.875
11399	40.2500	5.6737	5.674	683.935
11400	40.2400	5.6737	5.674	683.995
11401	40.2300	5.6750	5.675	684.055
11402	40.2300	5.6750	5.675	684.115
11403	40.2300	5.6762	5.676	684.175
11404	40.2500	5.6762	5.676	684.235
11405	40.2600	5.6775	5.677	684.295
.	.	.	.	.
15268	9.8400	7.6187	7.619	916.075
15269	9.8400	7.6200	7.620	916.135

**PROBA DE COMPRESIUNE 5**  
 Loc desfășurare teste – COMOTI SA București  
 Data 19.03.2012



Nr. Crt.	Load [kN]	Deform. [mm]	Stroke [mm]	Time [s]
1	0.0000	0.0000	0.000	0.055
2	0.0000	0.0000	0.000	0.115
.	.	.	.	.
8299	34.9300	4.1275	4.128	497.935
8300	34.9200	4.1287	4.129	497.995
8301	34.9100	4.1287	4.129	498.055
8302	34.9100	4.1287	4.129	498.115
8303	34.9000	4.1300	4.130	498.175
8304	34.9000	4.1300	4.130	498.235
8305	34.9000	4.1312	4.131	498.295
8306	34.9000	4.1312	4.131	498.355
8307	34.9000	4.1312	4.131	498.415
8308	34.8900	4.1325	4.132	498.475
.	.	.	.	.
11586	3.2200	5.7800	5.780	695.155
11587	3.2200	5.7812	5.781	695.215





Loc desfășurare: Universitatea POLITEHNICA București: data 15.07.2013

Aspecte microstructurale ale fontei cenușii cu grafit lamelar surprinse pe microscopul electronic

**1. Echipament:** Microscop electronic cu baleiaj, cu emisie in camp, marca FEI Inspect F50, dotat cu sistem de microanaliza de raxe X dispersiva in energie (EDS), tip EDAX.

**2. Proba:** fonta cenusie turnata, pregatita metalografic prin slefuire, lustruire si atac chimic cu reactivul Nital 2%

### Aspecte microstructurale si microcompozitionale

-microstructura, sub aspectul sau general, este tipica pentru o fonta cenusie cu grafit lamelar, turnata, avand matricea feritica, cu mici cantitati de perlita (sub 5%); lamelele de grafit sunt distribuite uniform si prezinta dimensiuni cuprinse între 100 si 400  $\mu\text{m}$ ;

-examinarea microscopica a evidentiat prezenta a numeroase incluziuni de silicati, sulfuri si numeroase insule de eutectic fosforos; identificarea acestora s-a efectuat prin microanaliza calitativa de raxe X (EDS);

-cele mai numeroase sunt sulfurile dar care din punct de vedere compozitional sunt atipice (cunoscut fiind faptul ca in fonte este frecvent intalnita sulfura de mangan); asa cum se observa din imaginile de distributie din figura 4 si din spectrul EDS din figura 5, sulfurul este insotit in aceste formatiuni de **titan** si pe alocuri de fier; au mai fost detectate, de asemenea, elementele **Cr si Mo**;

-incluziunile de silicati sunt si ele frecvente si sunt nucleate pe lamelele de grafit;

-ponderea mare pe care o au aceste formatiuni in microstructura, conduc la concluzia utilizarii la elaborarea fontei a deseurilor din oteluri sau fonte aliate.

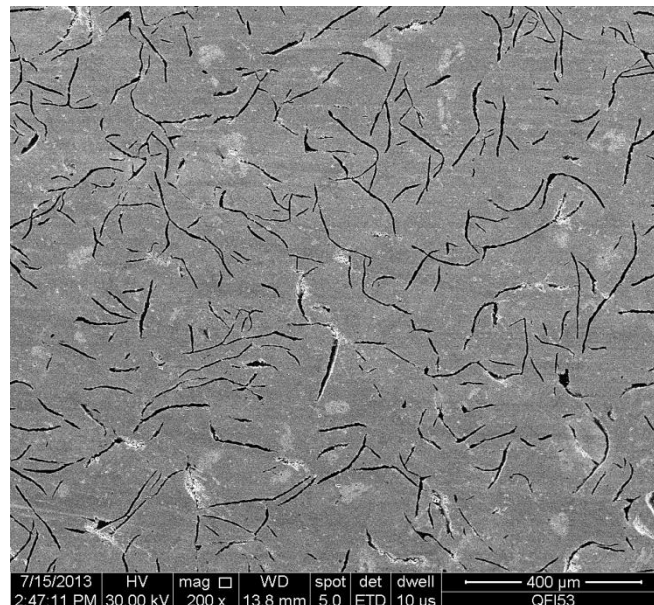


Fig.1. Aspectul general al microstructurii probei 1 (x200). Grafit lamelar in matricea ferito-perlitica (ferita 95%/perlita 5%)

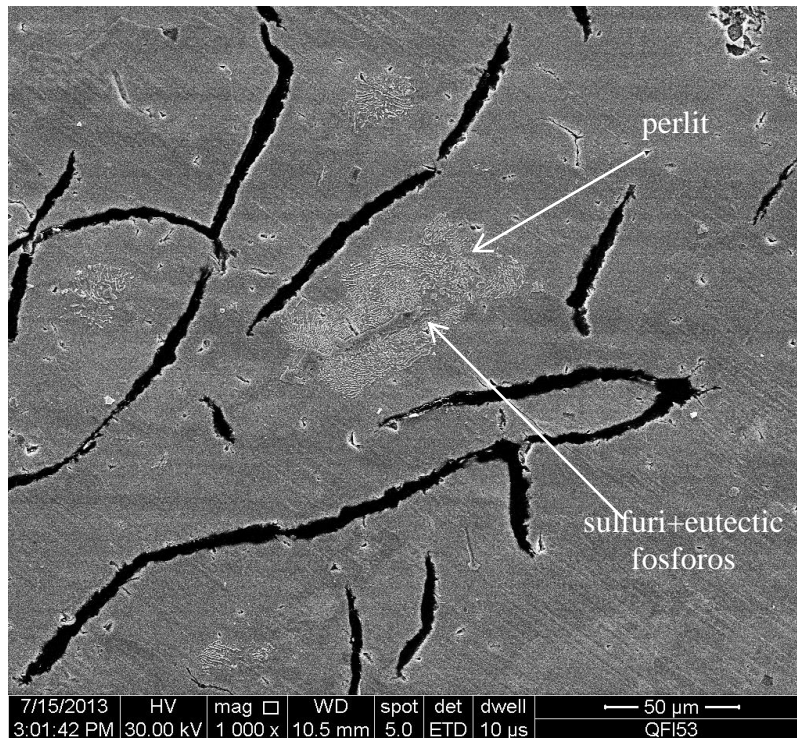


Fig.2. Detaliu evidentiind o insula de perlit lamelara si o insula ce contine sulfuri si eutectic fosforos (x1000)

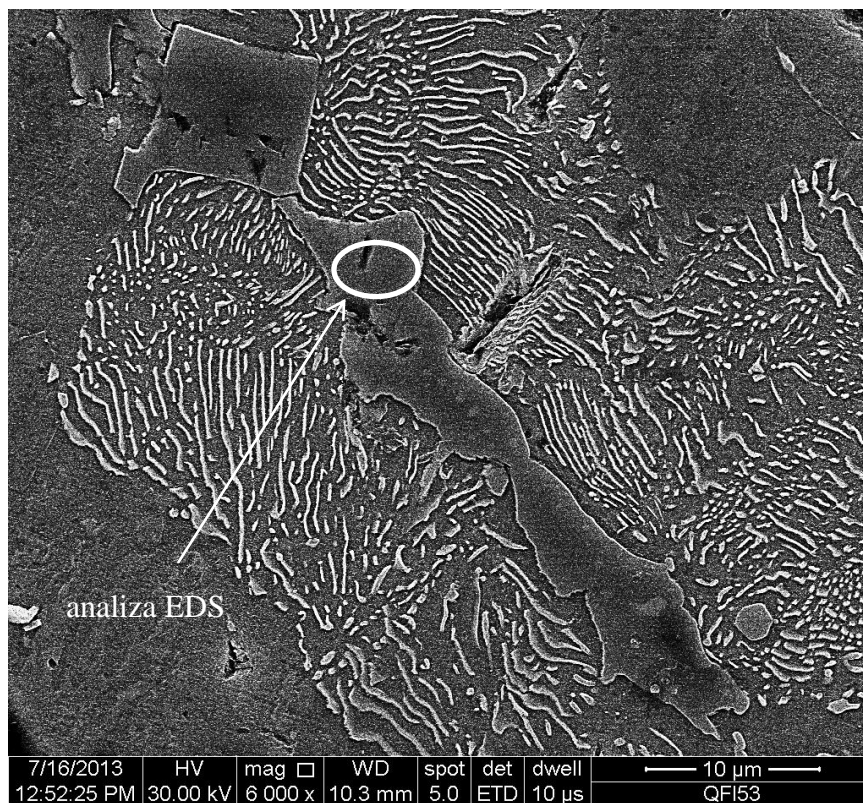


Fig.3. Microzona de pe proba 1 pe care s-a efectuat microanaliza calitativa de raze X (EDS), intr-o imagine de electroni secundari (x6000); vezi spectrul EDS (fig.5) si distributia de elemente pe intreaga microzona (fig.4)

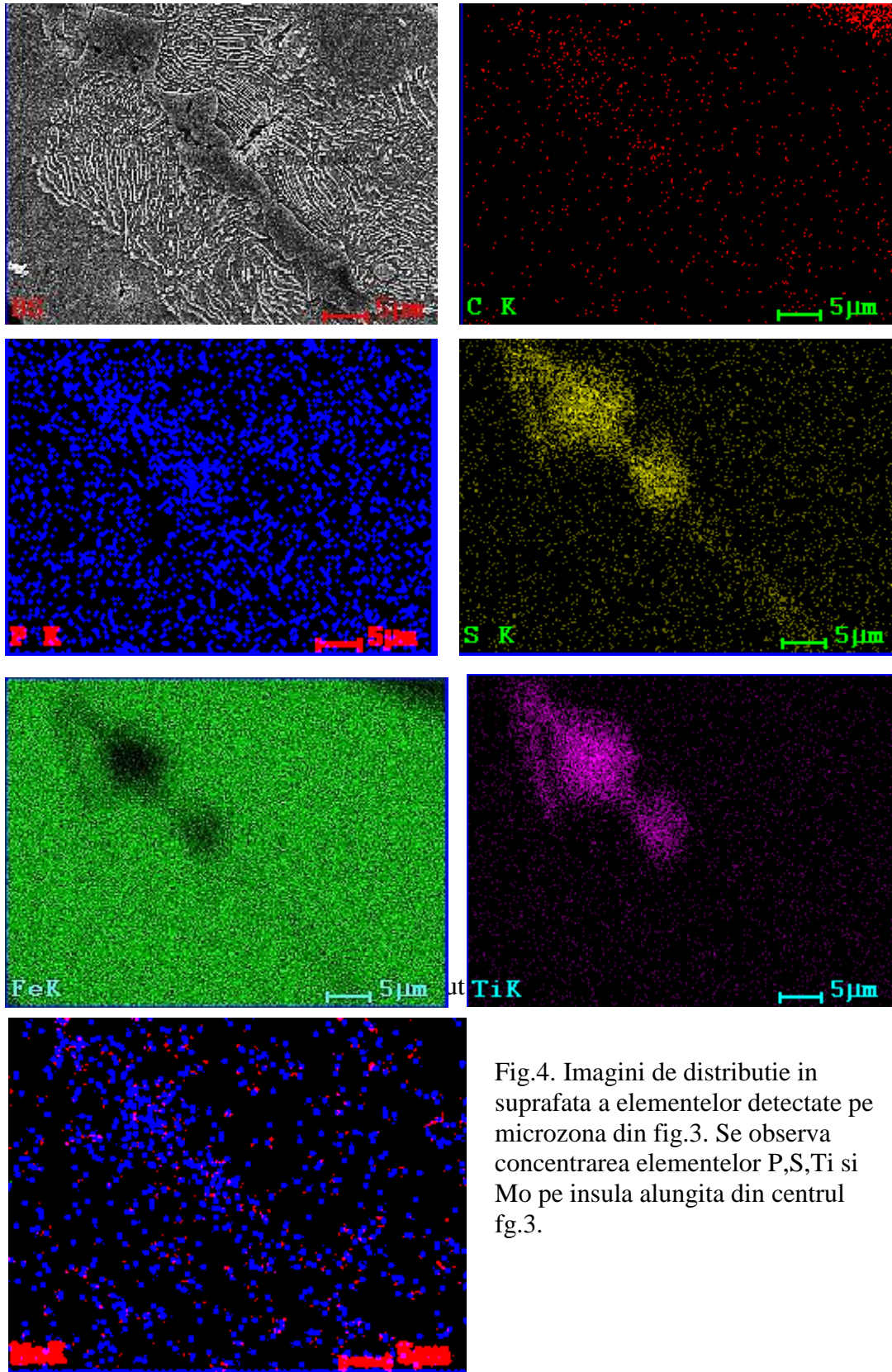


Fig.4. Imagini de distributie in suprafata a elementelor detectate pe microzona din fig.3. Se observa concentrarea elementelor P,S,Ti si Mo pe insula alungita din centrul fig.3.



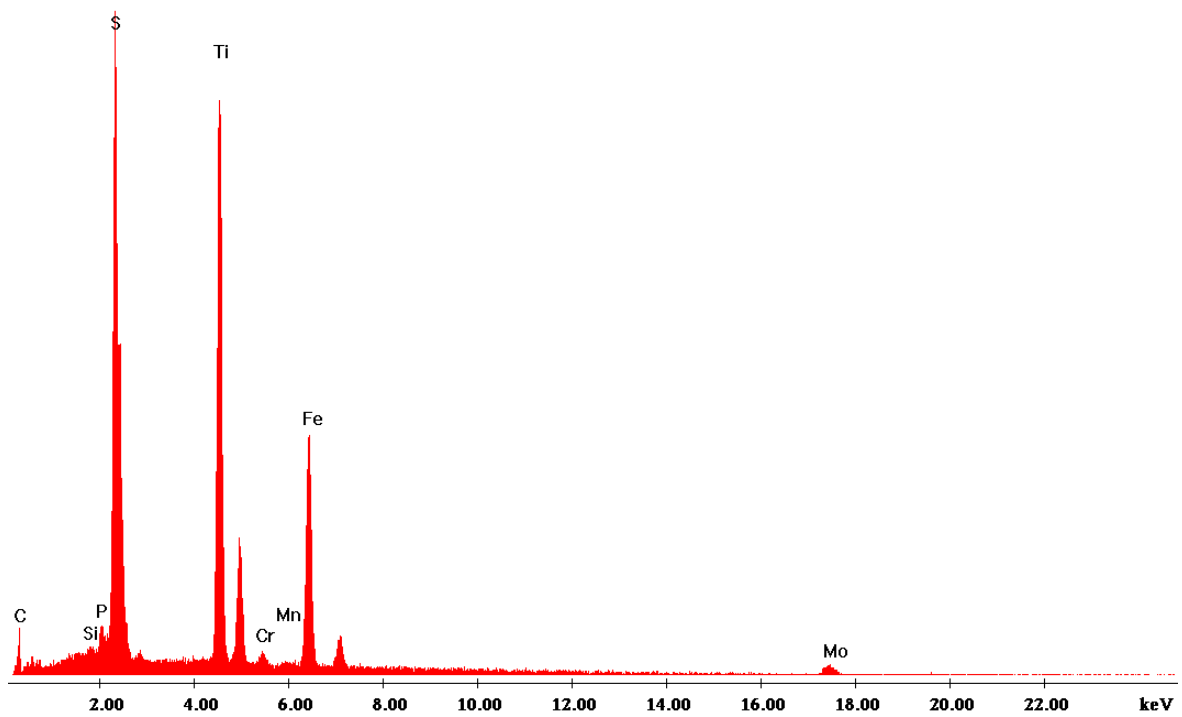
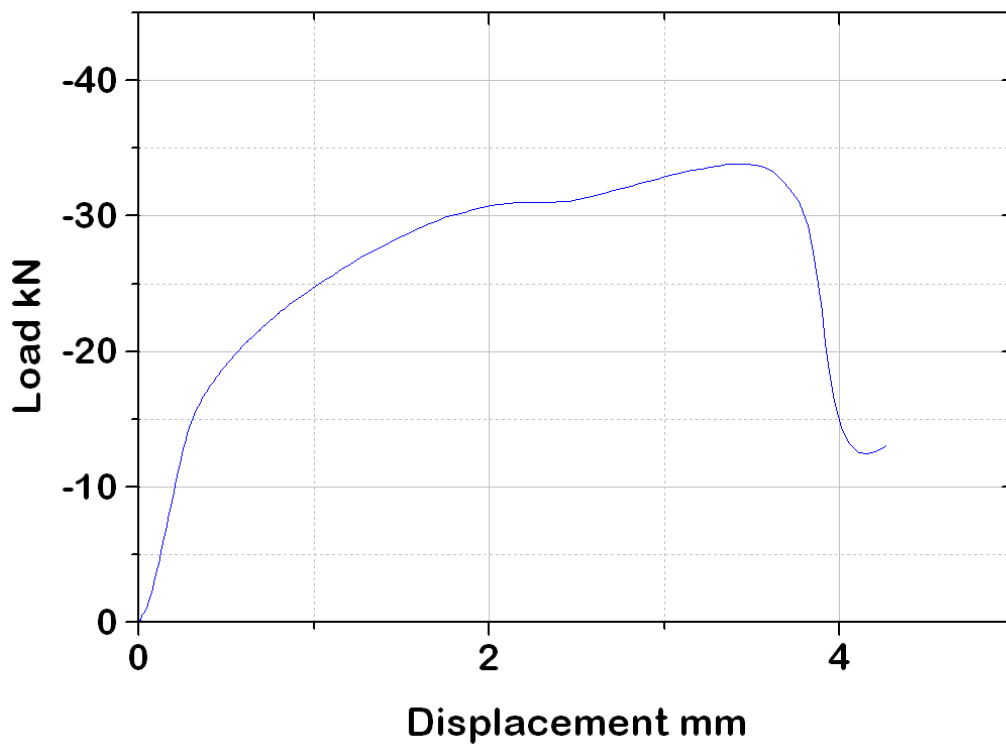


Fig.5. Spectrul EDS obtinut pe zona marcata in figura 3.

PROBA DE COMPRESIUNE 1

Epruvetă  $\Phi$  10 mm

Loc desfășurare teste – COMOTI SA București; data: 15.07.2013



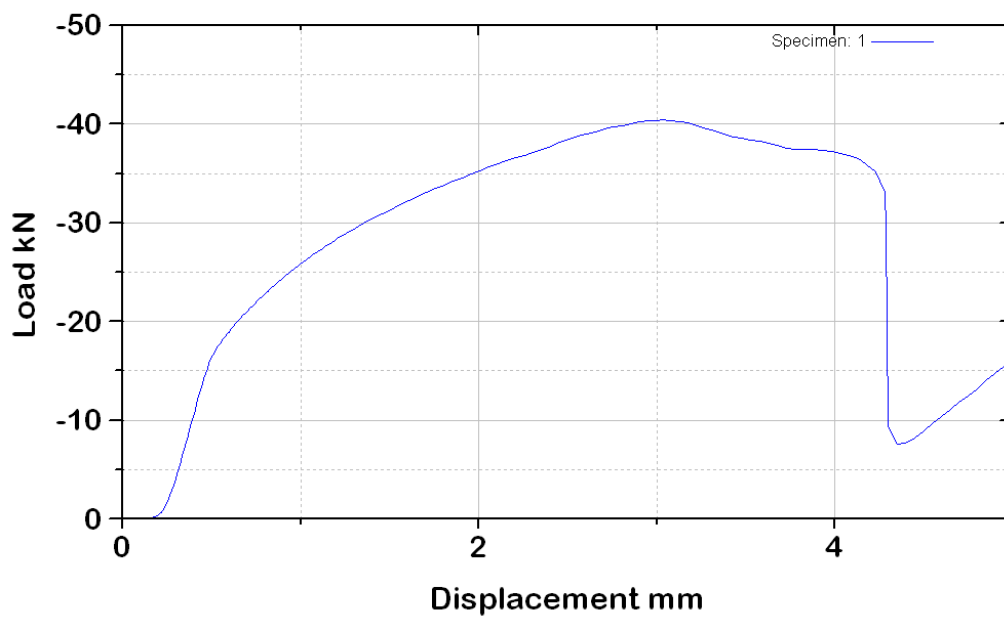
Sp No	DIAMETER (mm)	MAX.LOAD (kN)	MAX.DISP (mm)	MAX.STR (MPa)
1	10.01	33.87	3.420	430.4

Point no.	Position [mm]	Load, [KN]
1	0.0000	-0.1611
2	0.0100	-0.1665
3	0.0200	-0.5101
.	.	.
138	3.4100	-33.8040
139	3.4200	-33.8360
140	3.4700	-33.7930
141	3.5200	-33.7710
.	.	.
159	4.2600	-12.9770
160	4.2700	-13.0630

PROBA DE COMPRESIUNE 2

Epruvetă  $\Phi$  10 mm

Loc desfășurare teste – COMOTI SA București; data: 15.07.2013

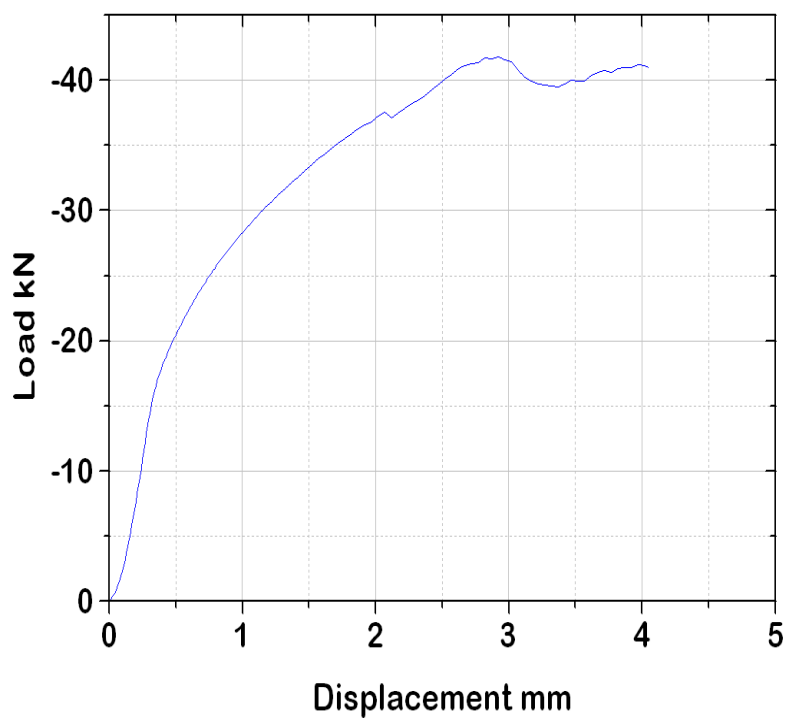


Sp No	DIAMETER (mm)	MAX.LOAD (kN)	MAX.DISP (mm)	MAX.STR (MPa)
1	10.00	40.43	3.030	514.8

Point no.	Position, [mm]	Load, [KN]
1	0.0000	-0.0054
2	0.0075	-0.0107
3	0.0175	-0.0054
.	.	.
.	.	.
159	3.0275	-40.4020
160	3.0775	-40.3220
161	3.1275	-40.2410
162	3.1775	-40.1070
163	3.2275	-39.7850
164	3.2775	-39.5430
.	.	.
.	.	.
219	5.9500	-29.2080
220	6.0000	-29.7120
221	6.0100	-29.7980

PROBA DE COMPRESIUNE 3  
Epruvetă  $\Phi$  10 mm

Loc desfășurare teste – COMOTI SA București; data: 15.07.2013



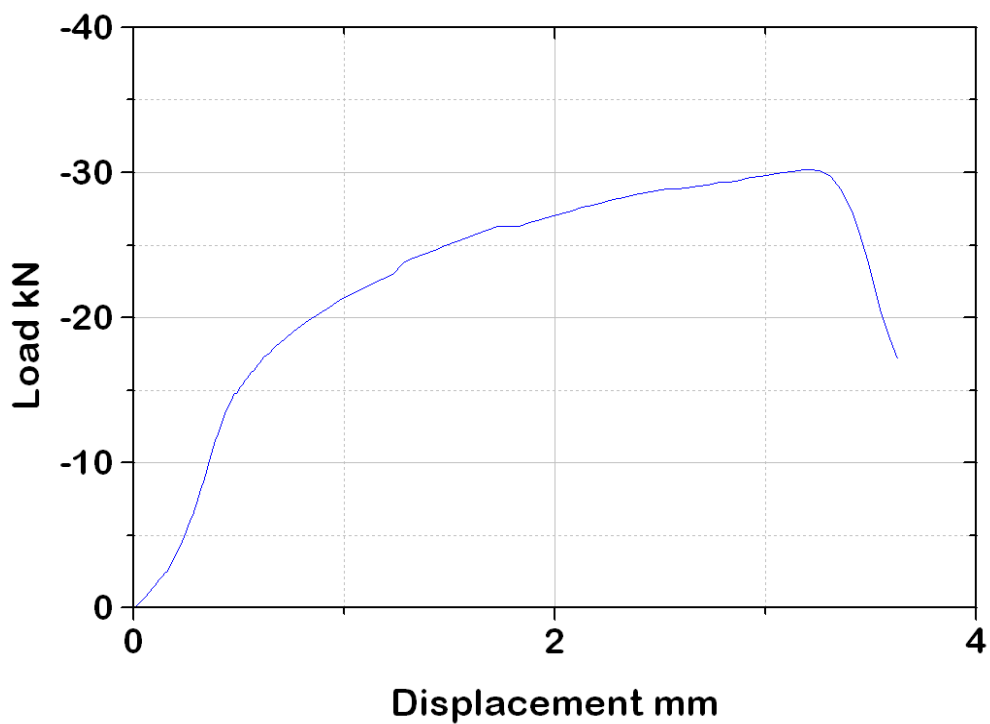
Sp No	DIAMETER (mm)	MAX.LOAD (kN)	MAX.DISP (mm)	MAX.STR (MPa)
1	10.00	41.77	2.940	531.8

Point no.	Position, [mm]	Load, [kN]
1	0.000	-0.129
2	0.010	-0.129
.	.	.
.	.	.
124	2.870	-41.700
125	2.920	-41.800
126	2.970	-41.600
.	.	.
.	.	.
147	4.020	-41.100
148	4.050	-41.000

PROBA DE COMPRESIUNE 4  
Epruvetă  $\Phi$  10 mm



Loc desfășurare teste – COMOTI SA București; data: 15.07.2013

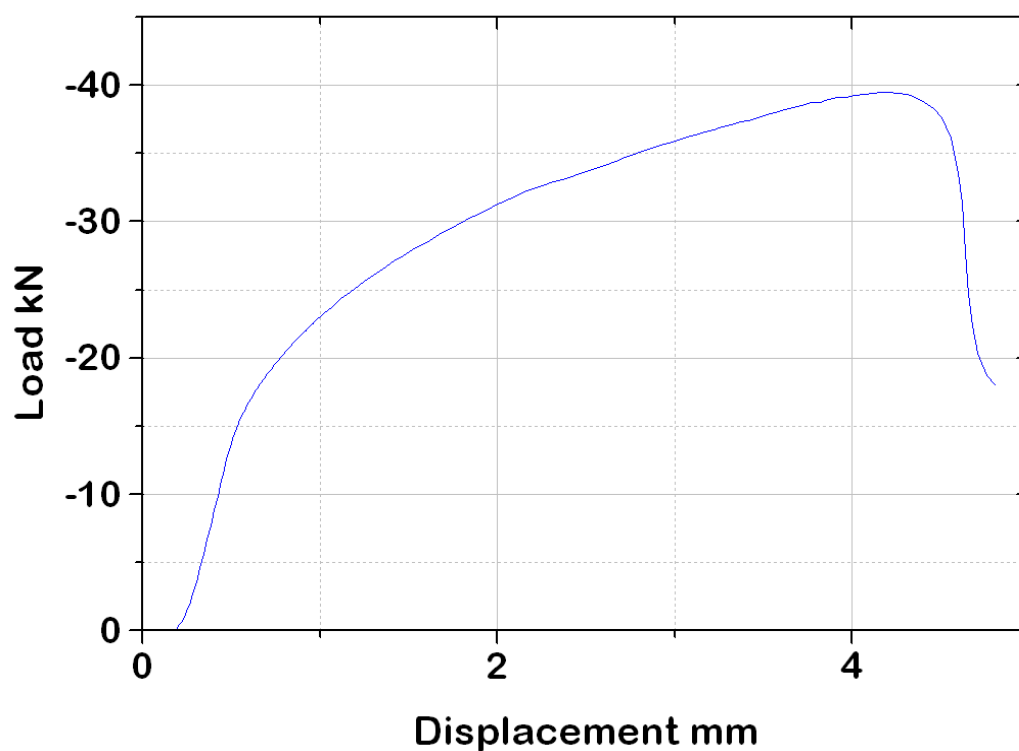


Sp No	DIAMETER (mm)	MAX.LOAD (kN)	MAX.DISP (mm)	MAX.STR (MPa)
1	9.930	30.23	3.210	390.3

Point no.	Position, [mm]	Load, [KN]
1	0.000	-0.081
2	0.010	-0.081
3	0.020	-0.231
.	.	.
.	.	.
124	3.210	-30.200
125	3.260	-30.100
126	3.310	-29.700
.	.	.
.	.	.
133	3.590	-18.500
134	3.630	-17.200

PROBA DE COMPRESIUNE 5

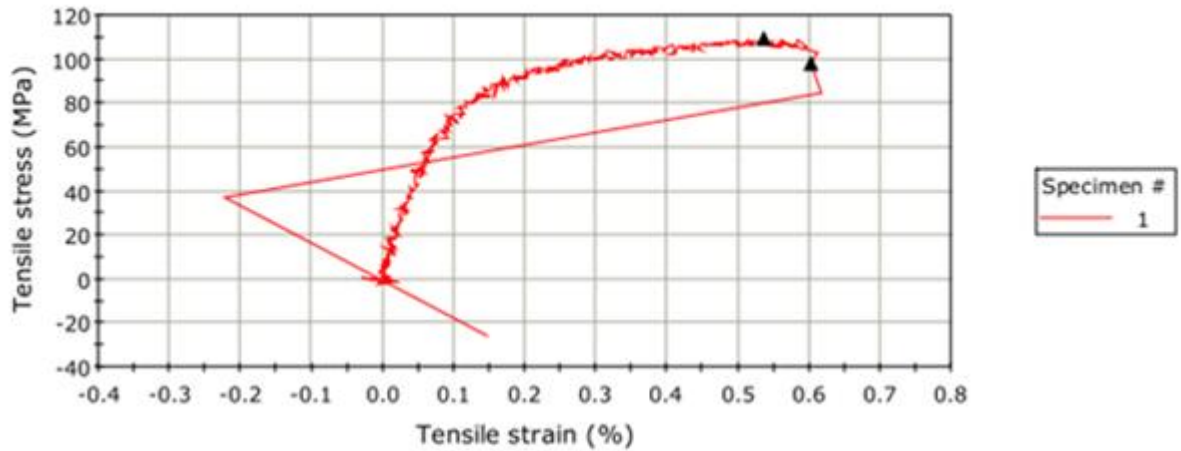
Epruvetă  $\Phi$  10 mm



Sp No	DIAMETER (mm)	MAX.LOAD (kN)	MAX.DISP (mm)	MAX.STR (MPa)
1	10.00	39.54	4.200	503.4

Point no.	Position, [mm]	Load, [KN]
1	0.0000	-0.0054
2	0.0075	-0.0054
3	0.0175	0.0000
.	.	.
.	.	.
163	4.2100	-39.4890
164	4.2600	-39.4360
165	4.3100	-39.3020
.	.	.
.	.	.
177	4.7600	-18.6740
178	4.8100	-17.9860

PROBA DE TRACȚIUNE 1  
Epruetă  $\Phi$  8 mm  
Loc desfășurare: COMOTI SA București; data: 16.07.2013



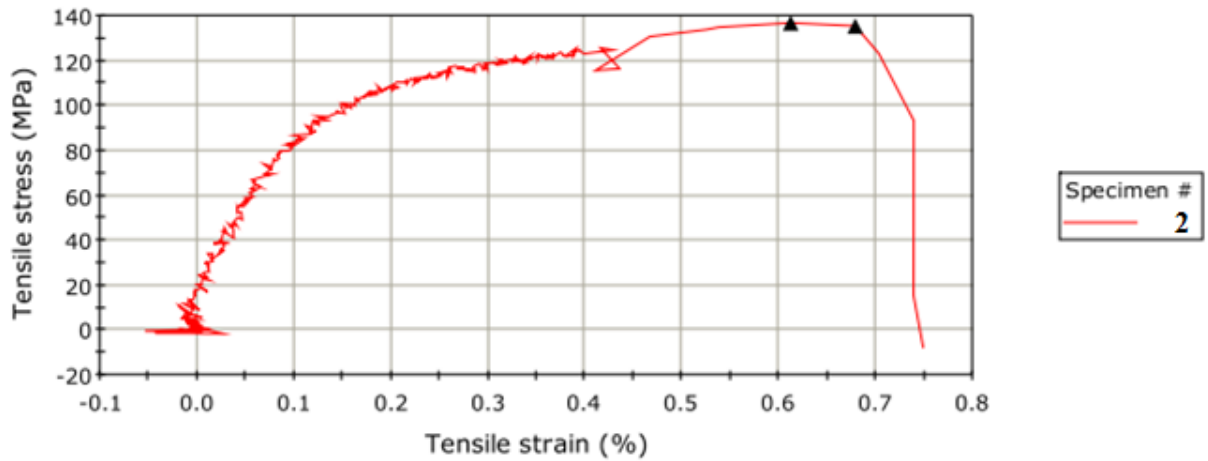
	Extension at Break (Standard) (mm)	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Time at Break (Standard) (sec)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)
1	-68.84	97.96	33.80	109.32

	Load at Tensile Strength (kN)	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Modulus (Young's Tensile stress 20 MPa - 200 MPa) (GPa)
1	5.49	-----	-----

Time	Extension	Load	Strain 1	Stress
[s]	[mm]	[N]	[mm/mm]	[MPa]
0.00E+00	-6.93E+01	-4.15E+01	1.60E-04	-8.27E-01
8.00E-04	-6.93E+01	-5.46E+01	2.10E-04	-1.09E+00
1.00E-01	-6.93E+01	4.44E+01	-3.00E-04	8.85E-01
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
2.22E+01	-6.90E+01	5.15E+03	3.12E-03	1.03E+02
2.23E+01	-6.90E+01	5.05E+03	3.08E-03	1.01E+02
2.24E+01	-6.90E+01	5.10E+03	3.14E-03	1.02E+02
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
3.39E+01	-6.88E+01	4.25E+03	6.16E-03	8.47E+01
3.39E+01	-6.88E+01	1.87E+03	-2.22E-03	3.73E+01
3.39E+01	-6.88E+01	-1.28E+03	1.47E-03	-2.55E+01

PROBA DE TRACȚIUNE 2

Epruvetă  $\Phi$  8 mm  
 Loc desfășurare: COMOTI SA București; data: 16.07.2013



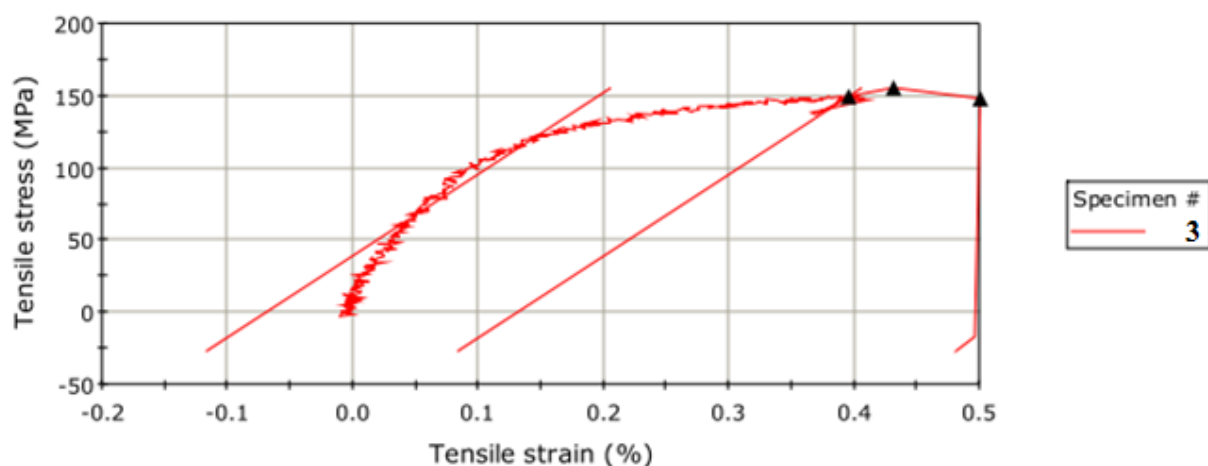
	Extension at Break (Standard) (mm)	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Time at Break (Standard) (sec)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)
1	-68.95	135.14	62.74	136.45

	Load at Tensile Strength (kN)	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Modulus (Young's Tensile stress 20 MPa - 200 MPa) (GPa)
1	6.86	-----	-----

Time	Extension	Load	Strain 1	Stress
[s]	[mm]	[N]	[mm/mm]	[MPa]
0.00E+00	-6.96E+01	-4.70E+01	-4.30E-04	-9.37E-01
8.00E-04	-6.96E+01	-4.62E+01	-8.00E-05	-9.19E-01
1.00E-01	-6.96E+01	-6.30E+01	2.80E-04	-1.26E+00
2.00E-01	-6.96E+01	3.73E+01	8.00E-05	7.42E-01
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
6.25E+01	-6.90E+01	6.71E+03	1.11E-01	1.34E+02
6.25E+01	-6.90E+01	6.77E+03	1.11E-01	1.35E+02
6.26E+01	-6.90E+01	6.86E+03	1.11E-01	1.37E+02
6.27E+01	-6.90E+01	6.79E+03	1.11E-01	1.35E+02
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
6.28E+01	-6.89E+01	7.89E+02	1.11E-01	1.57E+01
6.28E+01	-6.89E+01	-3.78E+02	1.11E-01	-7.54E+00

PROBA DE TRACȚIUNE 3

Epruvetă  $\Phi$  8 mm  
 Loc desfășurare: COMOTI SA București; data: 16.07.2013



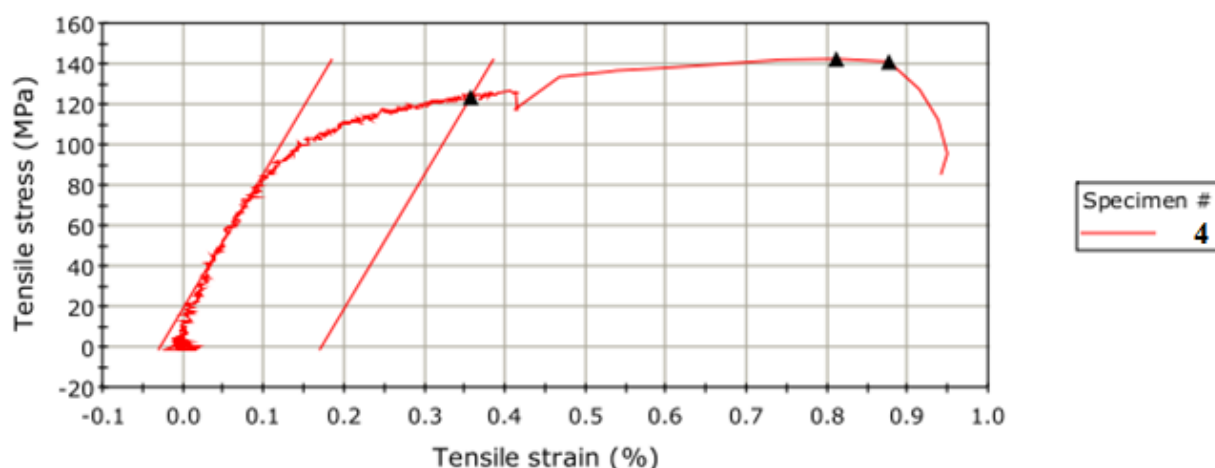
	Extension at Break (Standard) (mm)	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Time at Break (Standard) (sec)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)
1	-68.61	147.89	67.22	155.34

	Load at Tensile Strength (kN)	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Modulus (Young's Tensile stress 20 MPa - 200 MPa) (GPa)
1	7.81	149.50	56.41

Time [s]	Extension [mm]	Load [N]	Strain 1 [mm/mm]	Stress [MPa]
0.00E+00	-6.91E+01	1.40E+01	-3.00E-05	2.80E-01
8.00E-04	-6.92E+01	5.73E+01	-8.00E-05	1.14E+00
1.00E-01	-6.92E+01	-1.07E+02	-1.00E-04	-2.12E+00
2.00E-01	-6.91E+01	-4.18E+01	1.00E-05	-8.32E-01
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
3.06E+01	-6.87E+01	7.43E+03	3.77E-03	1.48E+02
3.07E+01	-6.87E+01	7.51E+03	3.78E-03	1.50E+02
3.08E+01	-6.87E+01	7.46E+03	3.81E-03	1.49E+02
3.09E+01	-6.87E+01	7.51E+03	3.89E-03	1.50E+02
3.10E+01	-6.87E+01	7.37E+03	3.86E-03	1.47E+02
3.11E+01	-6.87E+01	7.46E+03	3.91E-03	1.49E+02
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
6.72E+01	-6.86E+01	-8.21E+02	1.57E-03	-1.64E+01
6.72E+01	-6.86E+01	-1.33E+03	1.62E-03	-2.65E+01

PROBA DE TRACȚIUNE 4

Epruvetă  $\Phi$  8 mm  
 Loc desfășurare: COMOTI SA București; data: 16.07.2013



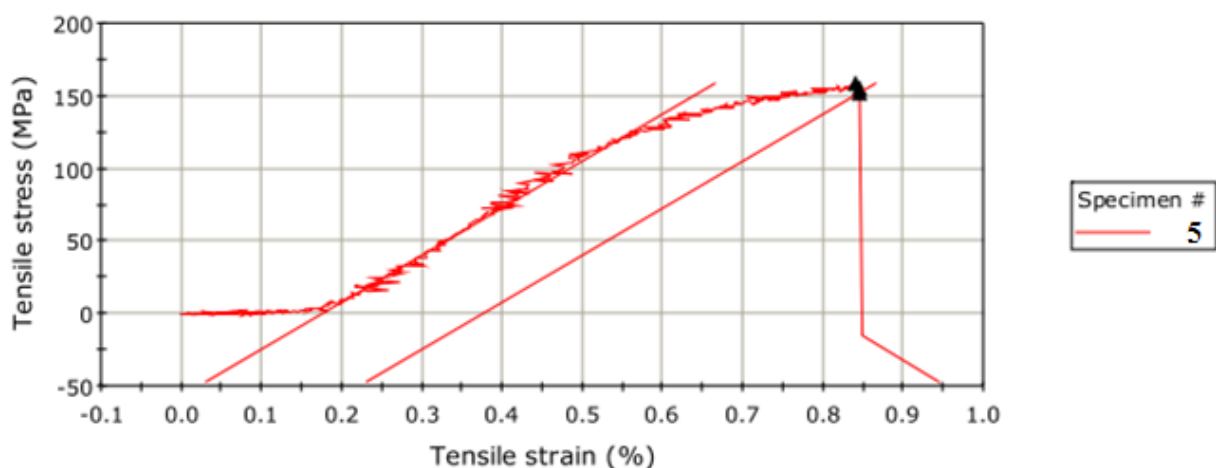
	Extension at Break (Standard) (mm)	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Time at Break (Standard) (sec)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)
1	-66.06	140.81	55.97	142.30

	Load at Tensile Strength (kN)	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Modulus (Young's Tensile stress 20 MPa - 200 MPa) (GPa)
1	7.15	123.48	66.49

Time [s]	Extension [mm]	Load [N]	Strain 1 [mm/mm]	Stress [MPa]
0.00E+00	-6.68E+01	9.06E+00	1.00E-04	1.81E-01
8.00E-04	-6.68E+01	5.04E+01	-1.40E-04	1.00E+00
1.00E-01	-6.68E+01	5.10E+01	2.00E-04	1.02E+00
2.00E-01	-6.68E+01	-4.97E+01	6.00E-05	-9.89E-01
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
5.54E+01	-6.63E+01	6.83E+03	1.00E-01	1.36E+02
5.55E+01	-6.63E+01	6.86E+03	1.00E-01	1.37E+02
5.56E+01	-6.62E+01	6.94E+03	1.00E-01	1.38E+02
5.57E+01	-6.62E+01	7.03E+03	1.00E-01	1.40E+02
5.58E+01	-6.61E+01	7.13E+03	1.00E-01	1.42E+02
5.59E+01	-6.61E+01	7.15E+03	1.00E-01	1.43E+02
5.60E+01	-6.61E+01	7.08E+03	1.00E-01	1.41E+02
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
5.61E+01	-6.60E+01	4.81E+03	1.00E-01	9.57E+01
5.61E+01	-6.60E+01	4.29E+03	1.00E-01	8.55E+01

PROBA DE TRACȚIUNE 5

Epruvetă  $\Phi$  8 mm  
 Loc desfășurare: COMOTI SA București; data: 16.07.2013



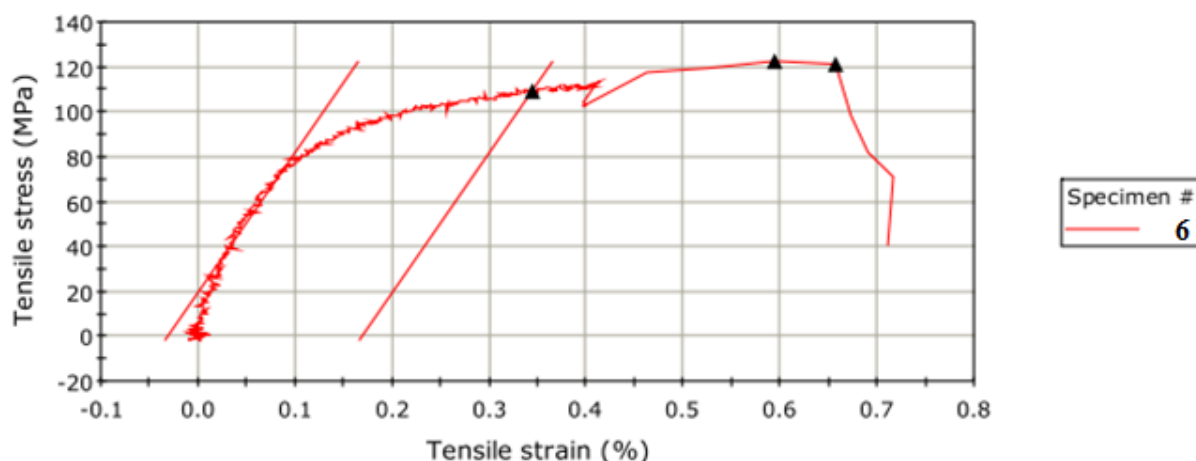
	Extension at Break (Standard) (mm)	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Time at Break (Standard) (sec)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)
1	-69.02	155.34	33.40	158.77

	Load at Tensile Strength (kN)	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Modulus (Young's Tensile stress 20 MPa - 200 MPa) (GPa)
1	7.98	152.09	32.29

Time	Extension	Load	Strain 1	Stress
[s]	[mm]	[N]	[mm/mm]	[MPa]
0.00E+00	-6.95E+01	4.86E+01	7.00E-05	9.68E-01
8.00E-04	-6.95E+01	3.13E+00	1.70E-04	6.23E-02
1.00E-01	-6.95E+01	3.39E+01	4.10E-04	6.76E-01
2.00E-01	-6.95E+01	2.31E+01	9.00E-05	4.61E-01
3.26E+01	-6.90E+01	7.85E+03	2.76E-03	1.56E+02
3.27E+01	-6.90E+01	7.82E+03	2.77E-03	1.56E+02
3.28E+01	-6.90E+01	7.79E+03	2.73E-03	1.55E+02
3.29E+01	-6.90E+01	7.80E+03	2.78E-03	1.55E+02
3.30E+01	-6.90E+01	7.94E+03	2.81E-03	1.58E+02
3.31E+01	-6.90E+01	7.93E+03	2.83E-03	1.58E+02
3.32E+01	-6.90E+01	7.98E+03	2.88E-03	1.59E+02
3.33E+01	-6.90E+01	7.85E+03	2.87E-03	1.56E+02
3.34E+01	-6.90E+01	7.81E+03	2.92E-03	1.56E+02
3.34E+01	-6.90E+01	-7.18E+02	1.69E-03	-1.43E+01
3.34E+01	-6.90E+01	-2.33E+03	7.65E-03	-4.64E+01

PROBA DE TRACȚIUNE 6

Epruvetă  $\Phi$  8 mm  
 Loc desfășurare: COMOTI SA București; data: 16.07.2013



	Extension at Break (Standard) (mm)	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Time at Break (Standard) (sec)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)
1	-68.43	121.08	47.94	122.43

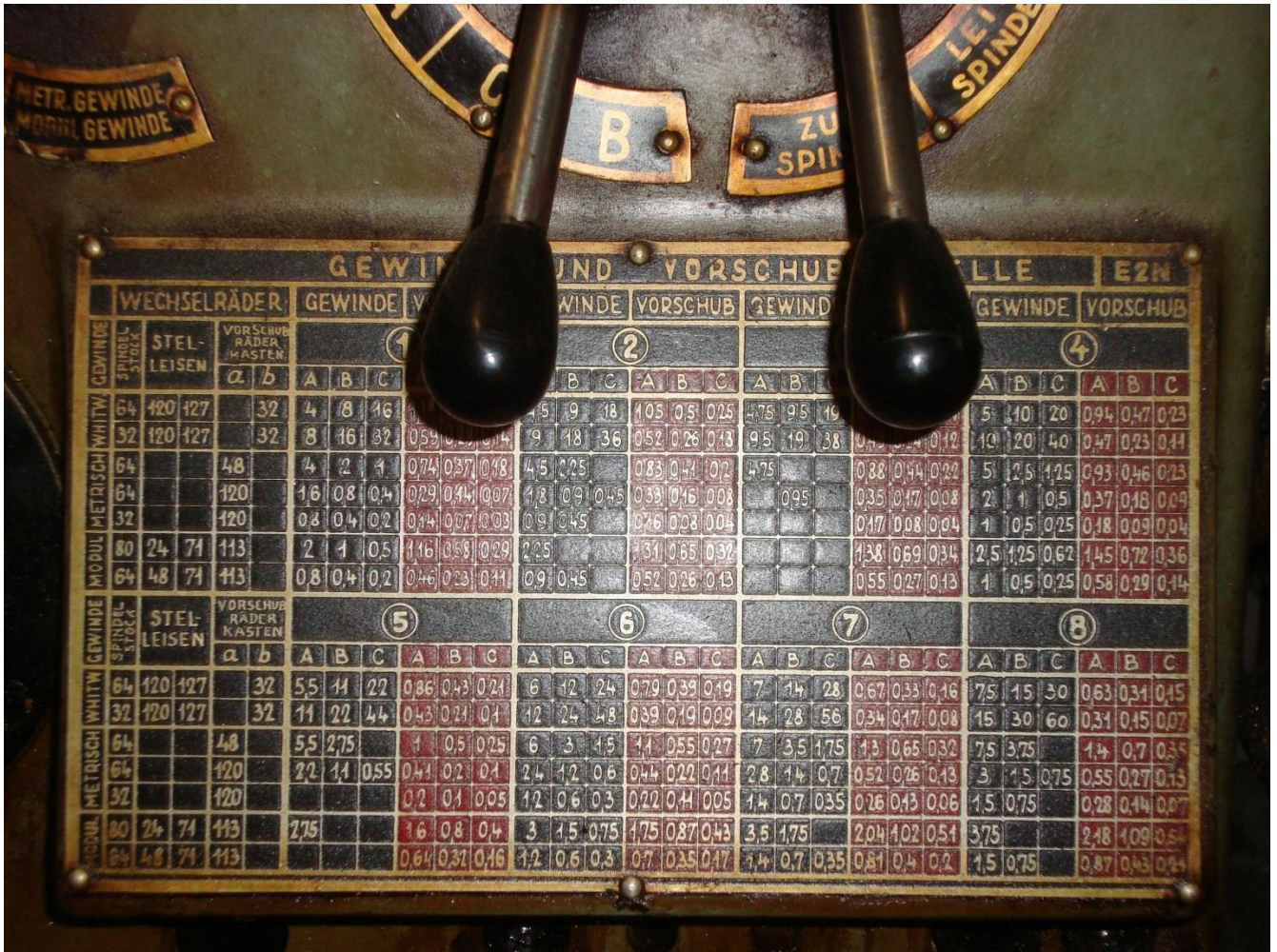
	Load at Tensile Strength (kN)	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Modulus (Young's Tensile stress 20 MPa - 200 MPa) (GPa)
1	6.15	109.23	62.18

Time [s]	Extension [mm]	Load [N]	Strain 1 [mm/mm]	Stress [MPa]
0.00E+00	-6.91E+01	7.25E+01	-7.00E-05	1.45E+00
8.00E-04	-6.91E+01	2.64E+01	-2.00E-05	5.25E-01
1.00E-01	-6.91E+01	7.00E+00	2.00E-05	1.40E-01
2.00E-01	-6.91E+01	-4.98E+01	-1.00E-04	-9.93E-01
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
4.75E+01	-6.86E+01	5.15E+03	-1.91E-02	1.03E+02
4.76E+01	-6.86E+01	5.91E+03	-3.22E-02	1.18E+02
4.77E+01	-6.85E+01	6.00E+03	-3.41E-02	1.20E+02
4.78E+01	-6.85E+01	6.15E+03	-3.68E-02	1.23E+02
4.79E+01	-6.84E+01	6.09E+03	-3.54E-02	1.21E+02
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
4.80E+01	-6.84E+01	3.58E+03	-3.63E-02	7.13E+01
4.80E+01	-6.84E+01	2.04E+03	-3.64E-02	4.07E+01



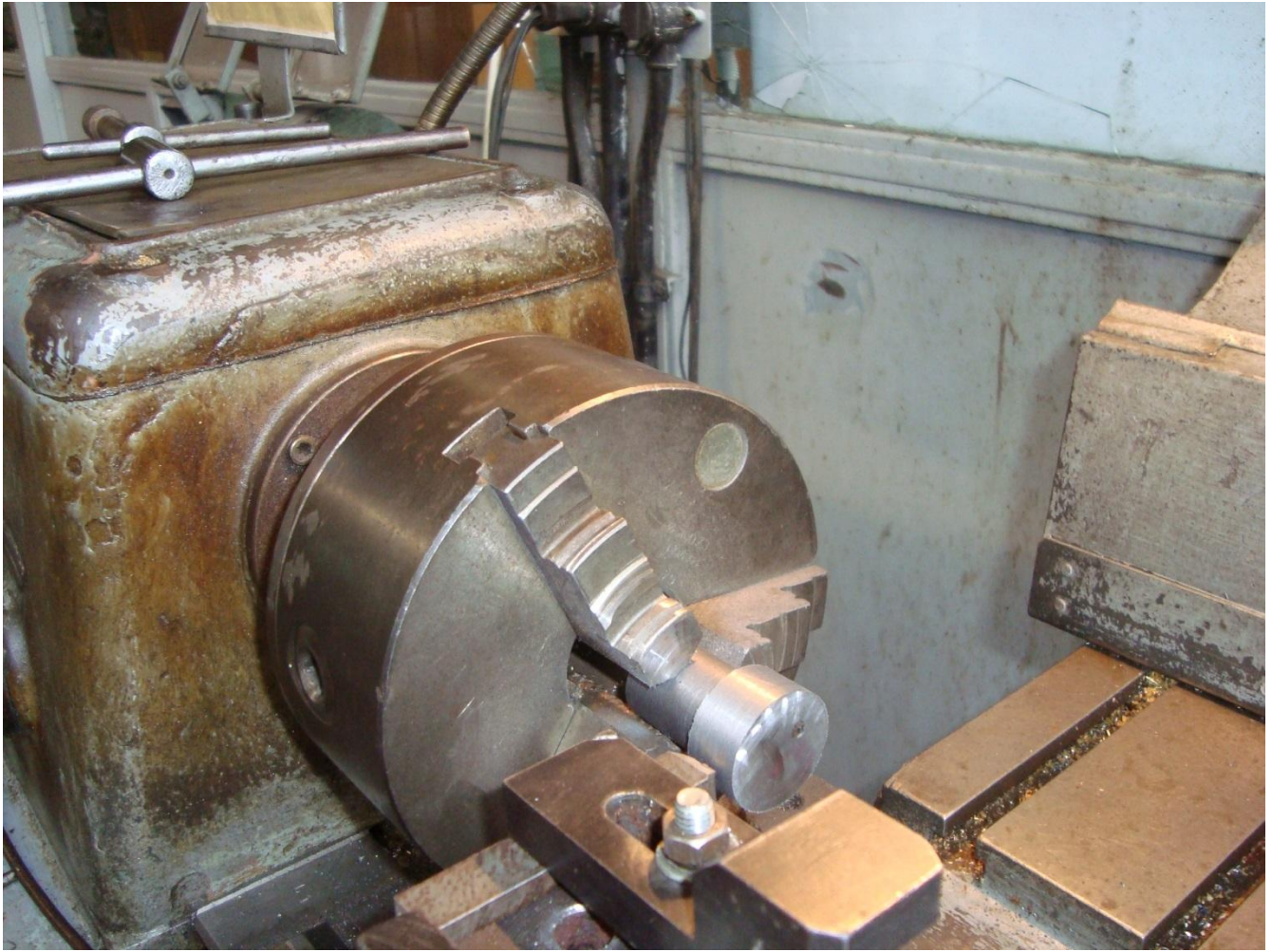
# ANEXA nr. 2.08

Strung KART – E2H – informații despre avansuri  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



Strung KART – E2H – fixare proba in universal si strunjire de centrare  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



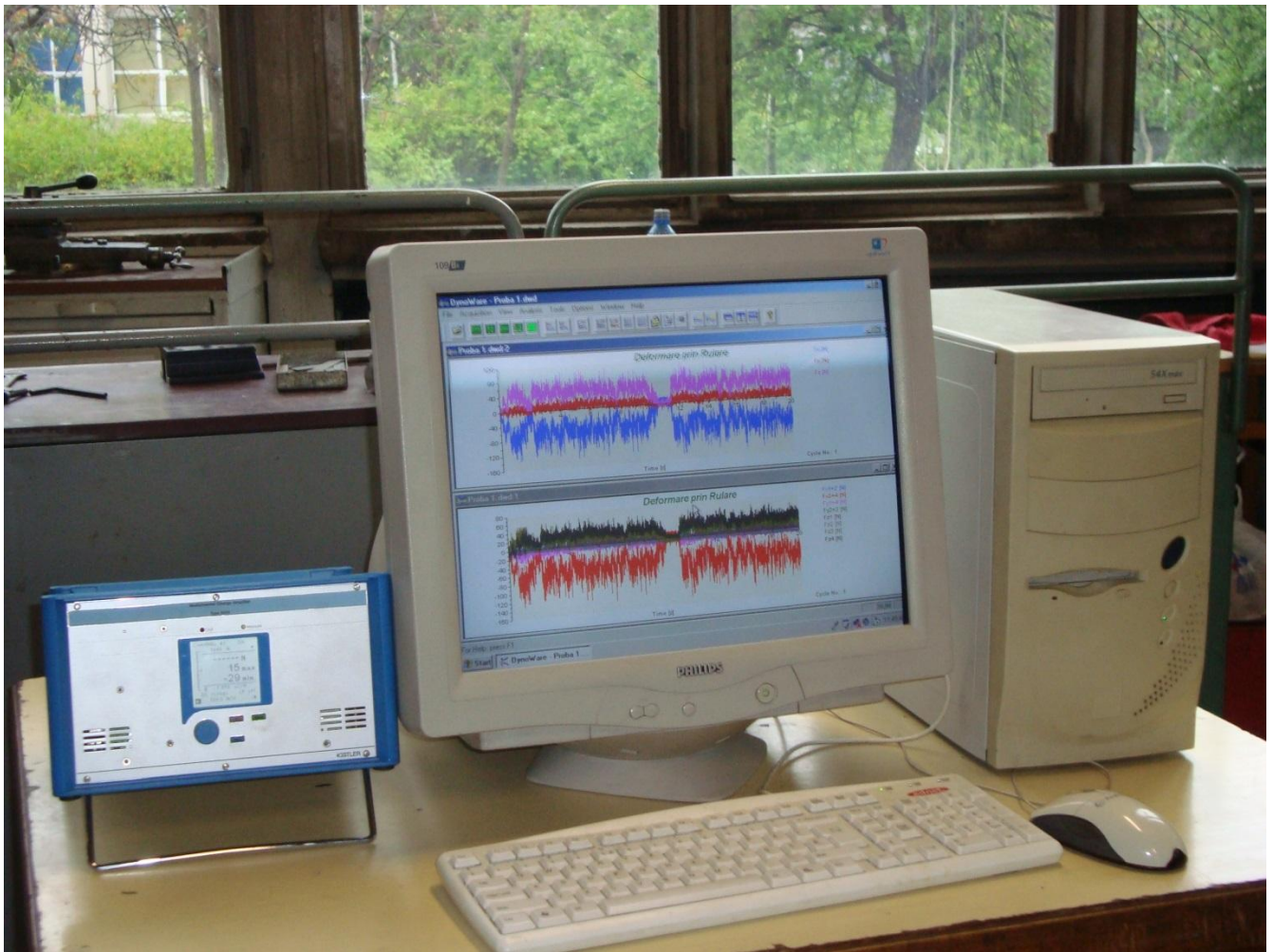


Strung KART – E2H – pregătirea pentru operația de netezire prin deformare plastică  
Universitatea POLITEHNICA București  
Data 16 -17.03. 2014



Aparatură necesară pentru achiziția de date  
Universitatea POLITEHNICA București  
Data 16 -17.03. 2014





Desfășurarea testărilor de netezire prin deformare plastică  
Universitatea POLITEHNICA București  
Data 16 -17.03. 2014

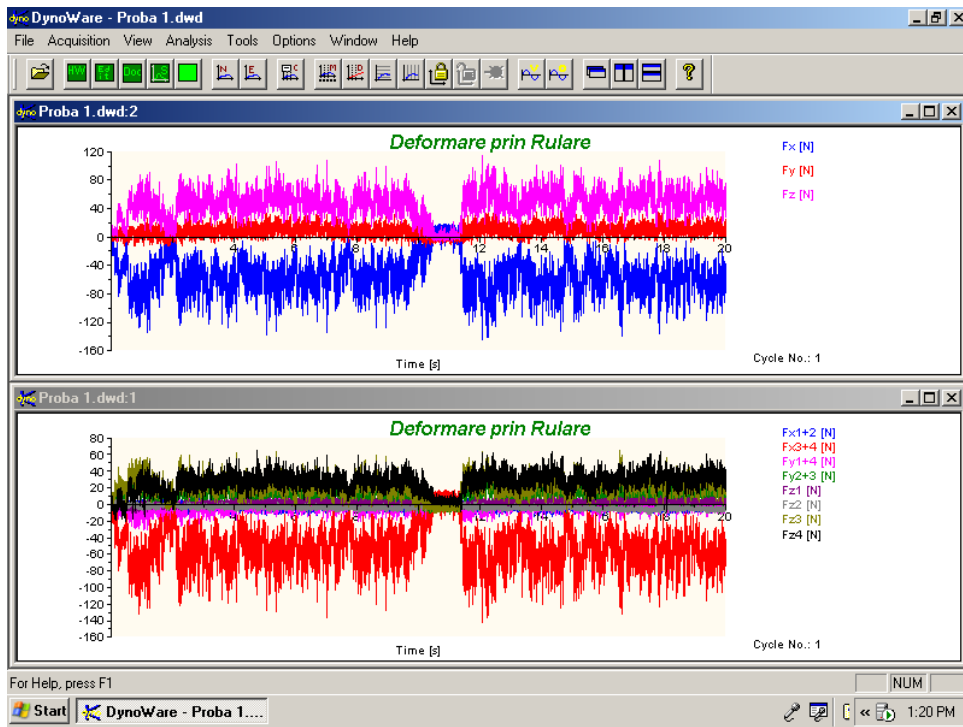


Rezultatul testărilor – imagine stânga-probă după operația de strunjire de centrare; imagine dreapta-proba după operația de netezire prin deformare plastică  
Universitatea POLITEHNICA București  
Data 16 -17.03. 2014

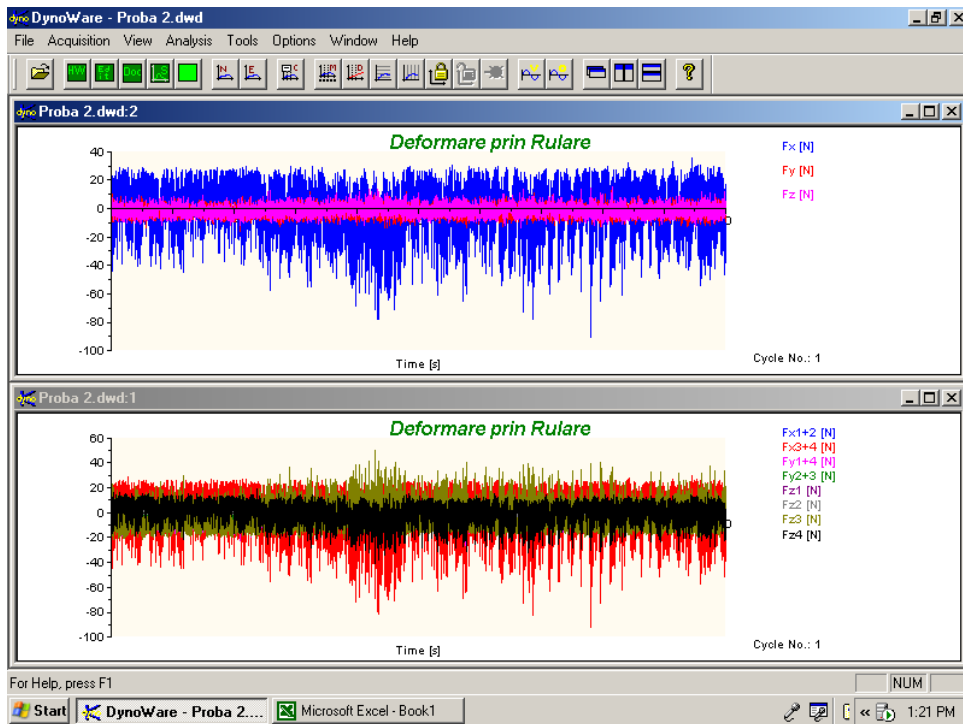




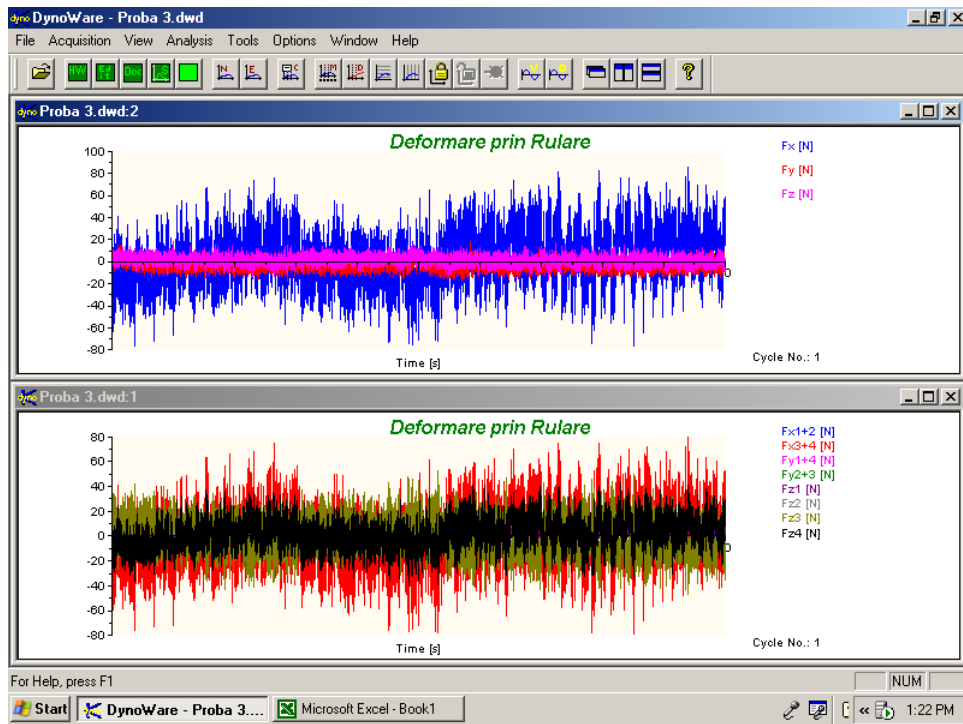
Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 1  
Universitatea POLITEHNICA București  
Data 16 -17.03. 2014



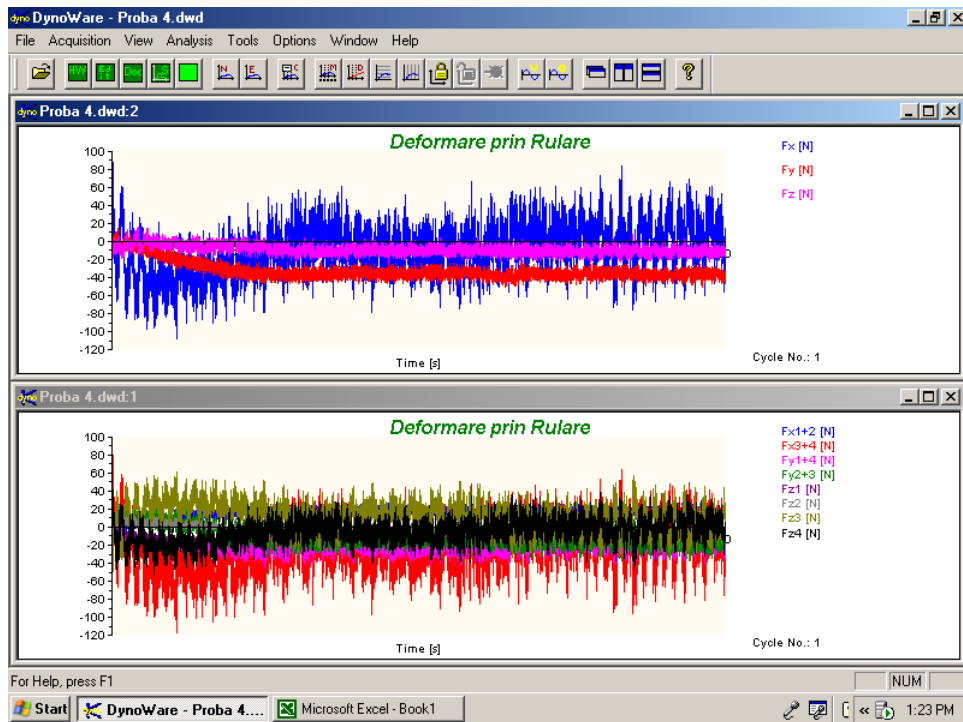
Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 2  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 3  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014

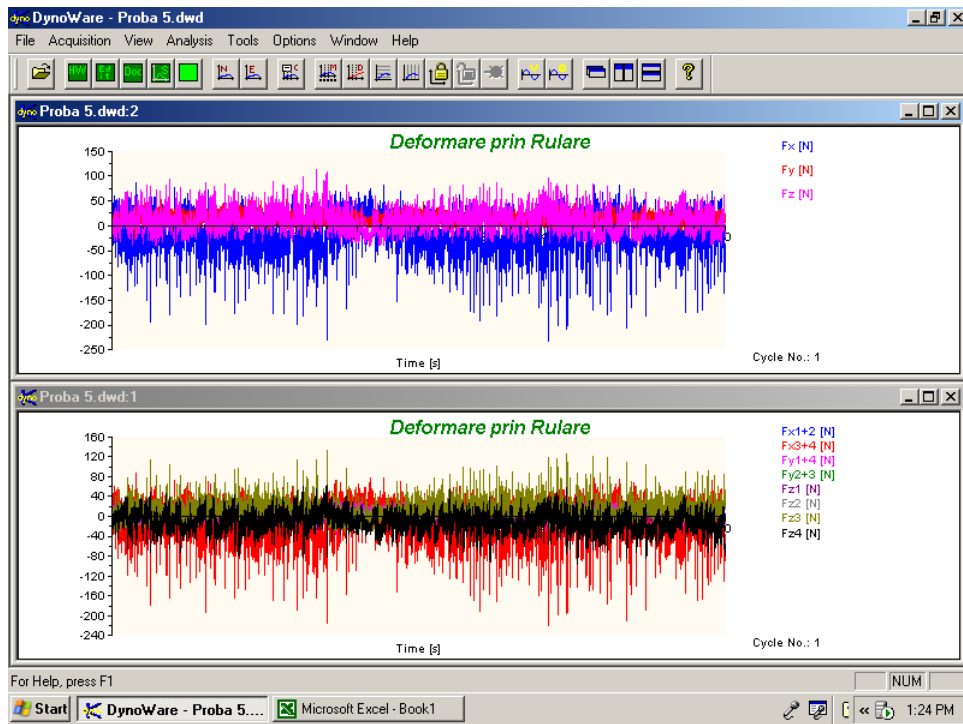


Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 4  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014

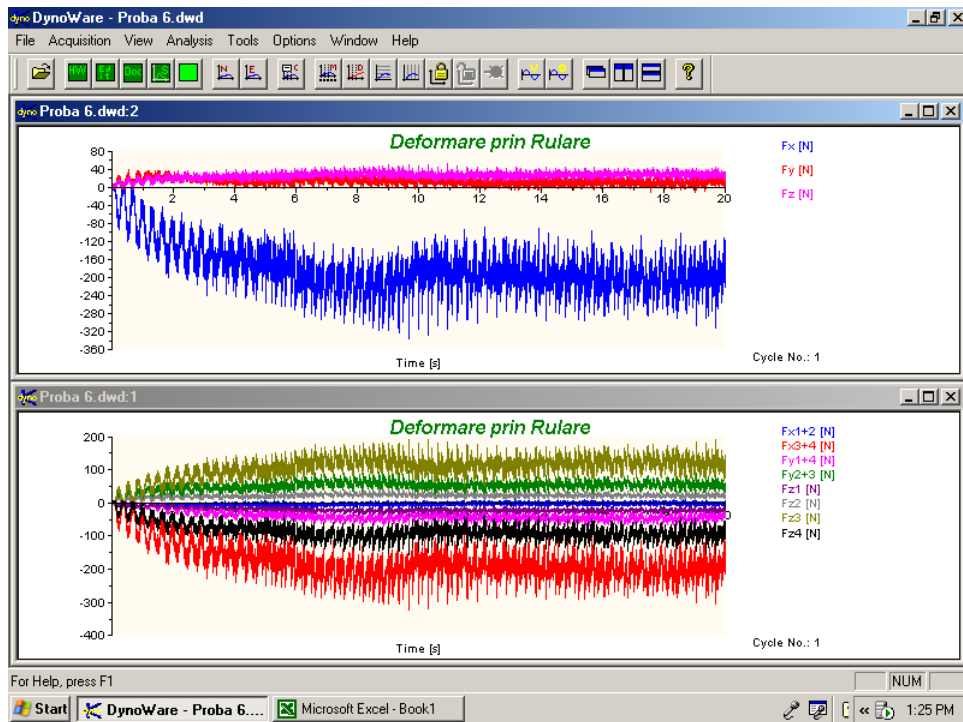


Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 5  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014

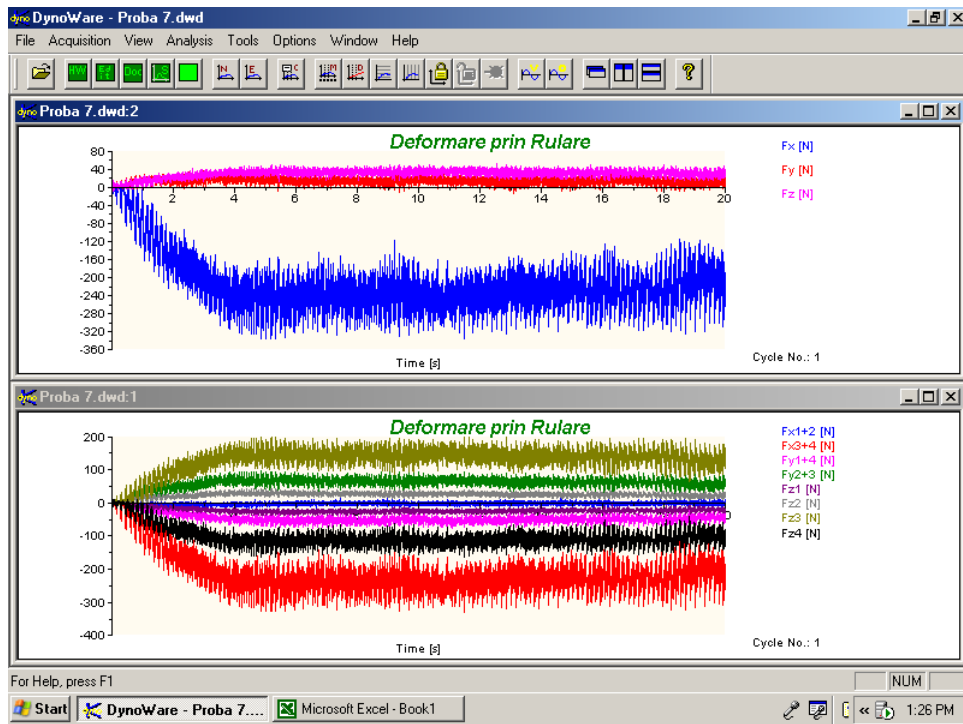




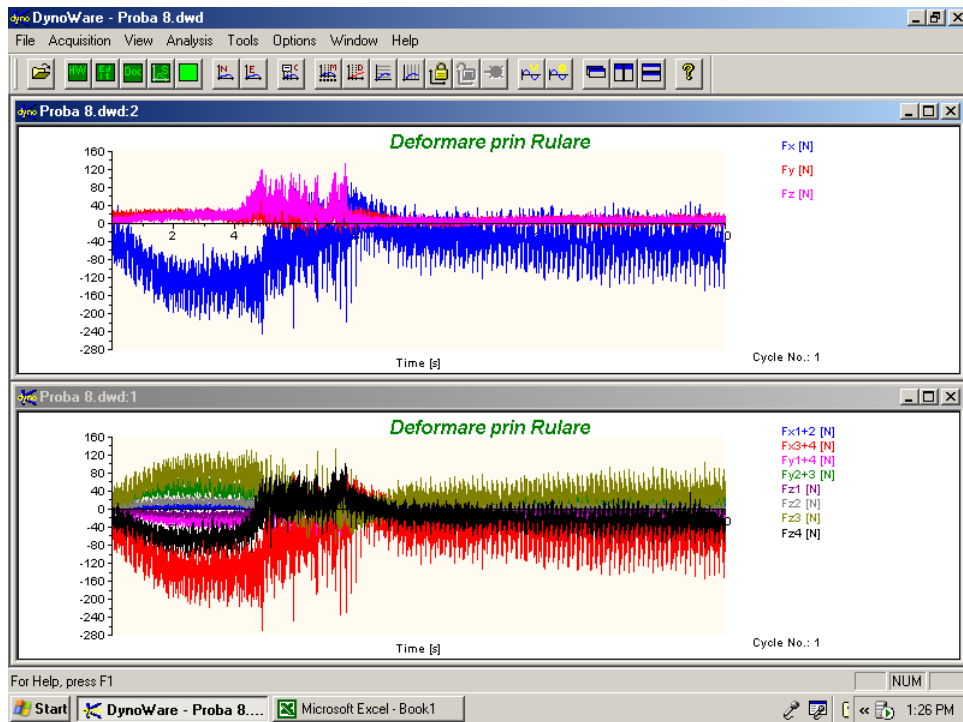
Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 6  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



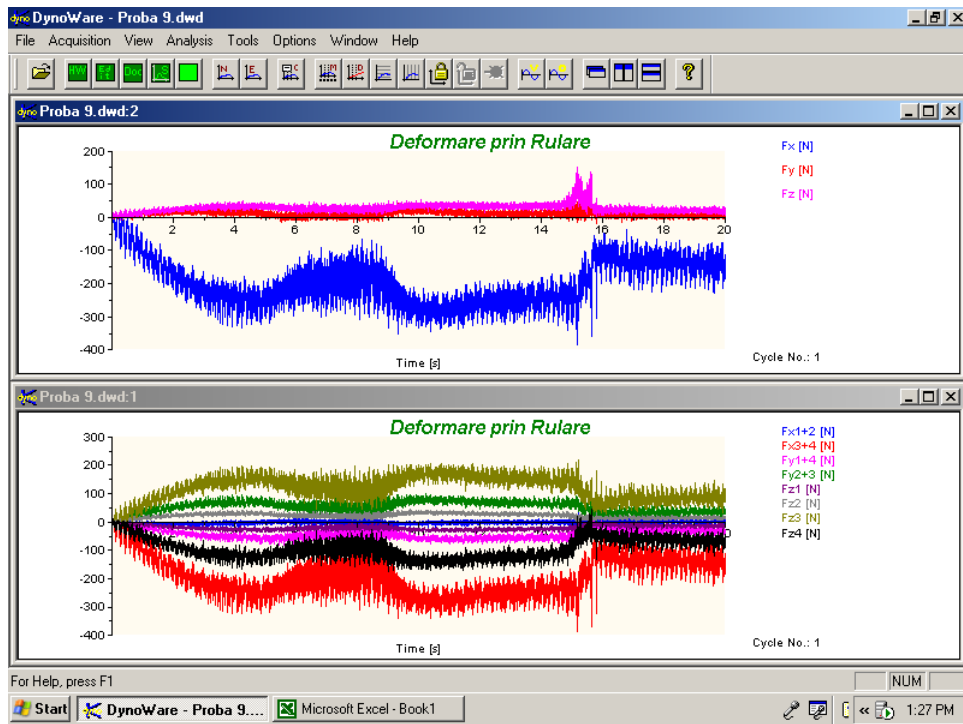
Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 7  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



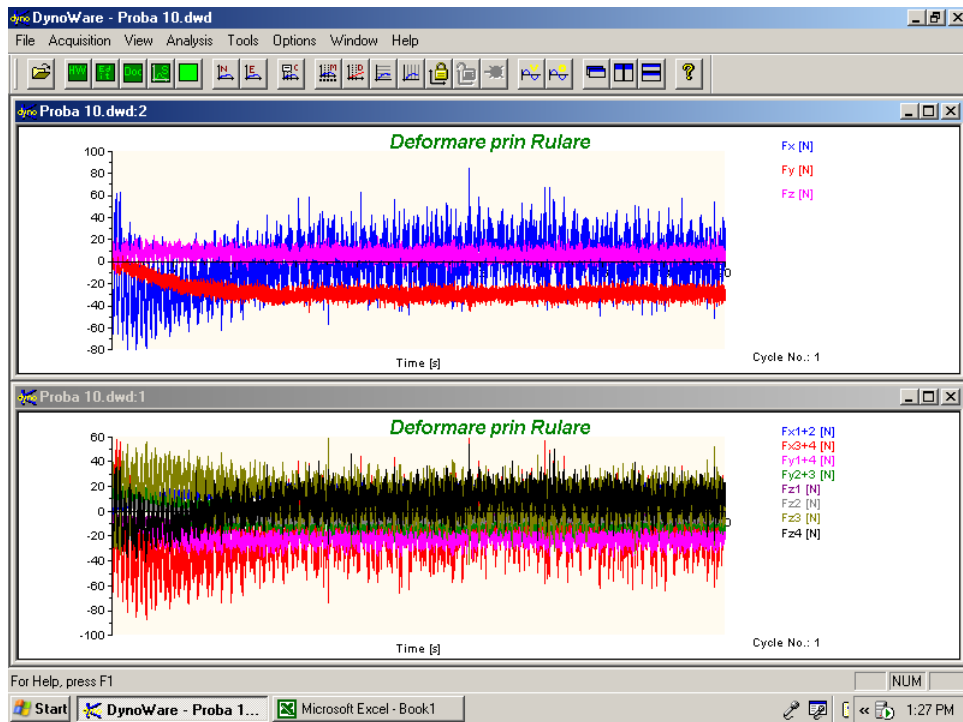
Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 8  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



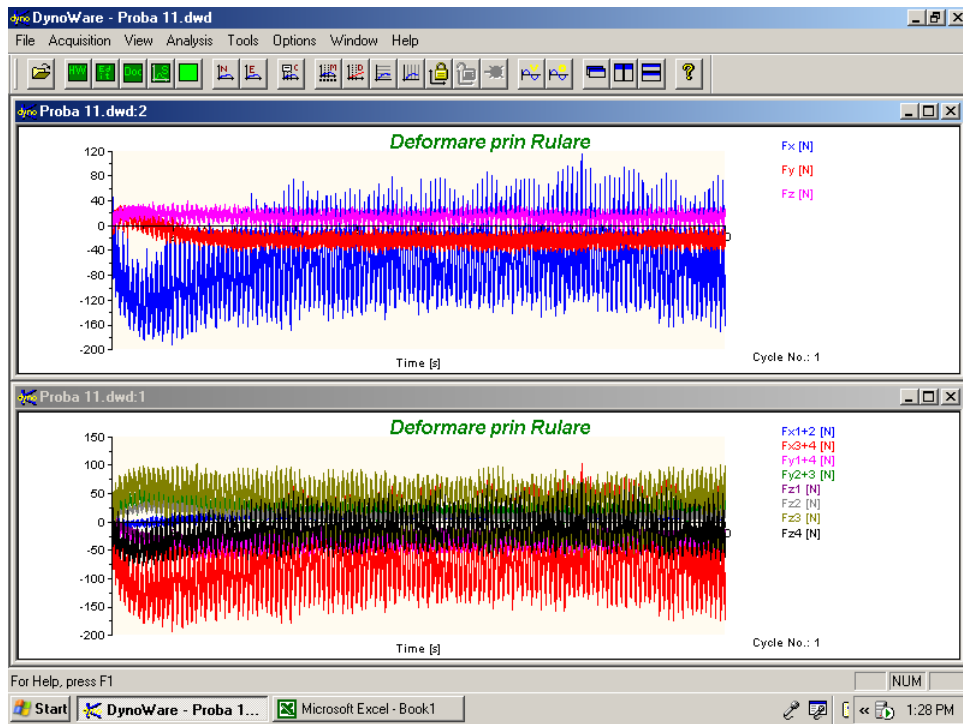
Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 9  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 10  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 11  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



Print-Screen cu forțele de apăsare după cele trei axe pentru Proba 12  
 Universitatea POLITEHNICA București  
 Data 16 -17.03. 2014



NATIONAL INSTITUTE OF  
INVENTICS, JASSY, ROMANIA

# Diploma

## GOLD MEDAL

### The Hamangia Thinker

Offered Mr / Ms

Besliu Vitalie,  
Mazuru Sergiu, Cosovschi Pavel

PROCESS FOR HARDENING OF METAL SURFACES  
„Alecus Russo” State University of Baltsy, Moldova

THE XVII-TH INTERNATIONAL EXHIBITION  
OF RESEARCH, INNOVATION AND  
TECHNOLOGICAL TRANSFER

“INVENTICA 2013”

IASI, ROMANIA  
19- 21 JUNE 2013

General Manager  
Prof. Boris Plahteanu Ph.D







REPUBLICA MOLDOVA

**AGPI** AGENTIA DE STAT  
PENTRU  
PROPRIETATEA  
INTELECTUALA

# BREVET DE INVENȚIE

Nr. **4184**

ÎN TEMEIUL LEGII PRIVIND PROTECȚIA INVENȚIILOR, AGENTIA DE STAT PENTRU  
PROPRIETATEA INTELECTUALĂ ELIBEREAZĂ PREZENTUL BREVET DE INVENȚIE

**Procedeu de durificare a suprafețelor metalice**

**Titulari:** MAZURU Sergiu, MD;  
BEȘLIU Vitalie, MD; COSOVSCI Pavel, MD

**Data depozit:** 2011.05.31

DESCRIEREA INVENȚIEI, REVENDICĂRILE ȘI DESENELE CONSTITUIE PARTE  
INTEGRANTĂ A PREZENTULUI BREVET DE INVENȚIE

CONFIRM PRIN SEMNARE ȘI APLICAREA SIGILIULUI

DIRECTOR GENERAL



CHIȘINĂU



REPUBLICA MOLDOVA

**AGPI** AGENȚIA DE STAT  
PENTRU  
PROPRIETATEA  
INTELECTUALĂ

# BREVET DE INVENȚIE DE SCURTĂ DURATĂ

Nr. **358**

ÎN TEMEIUL LEGII PRIVIND PROTECȚIA INVENȚILOR, AGENȚIA DE STAT PENTRU  
PROPRIETATEA INTELECTUALĂ ELIBEREAZĂ PREZENTUL BREVET DE INVENȚIE  
DE SCURTĂ DURATĂ

Echipament de prefasonare pentru mașina automată de formare a  
produselor din sticlă cu gât îngust

Titular: UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI,  
MD

Data depozit: 2010.09.16

DESCRIEREA INVENȚIEI, REVENDICĂRILE ȘI DESENELE CONSTITUIE PARTE  
INTEGRANTĂ A PREZENTULUI BREVET DE INVENȚIE DE SCURTĂ DURATĂ

CONFIRM PRIN SEMNARE ȘI APLICAREA SIGILIULUI

DIRECTOR GENERAL



CHIȘINĂU



MD 4143 B2 2011.12.31

REPUBLICA MOLDOVA



(19) Agenția de Stat  
pentru Proprietatea Intelectuală

(11) **4143** (13) **B2**  
(51) Int.Cl.: C03B 9/00 (2006.01)  
C03B 9/20 (2006.01)  
C03B 9/24 (2006.01)  
C03B 9/30 (2006.01)  
C03B 9/335 (2006.01)  
C03B 9/38 (2006.01)

MD 4143 B2 2011.12.31

(12) BREVET DE INVENȚIE

<b>Hotărârea de acordare a brevetului de invenție poate fi revocată în termen de 6 luni de la data publicării</b>	
(21) Nr. depus: a 2010 0052 (22) Data depus: 2010.04.14 (41) Data publicării cererii: 2011.10.31, BOPI nr. 10/2011	(45) Data publicării hotărârii de acordare a brevetului: 2011.12.31, BOPI nr. 12/2011
(71) Solicitant: UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI, MD (72) Inventatori: MAZURU Sergiu, MD; COSOVSCI Pavel, MD (73) Titular: UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI, MD	

(54) Dispozitiv pentru turnarea produselor din sticlă prin metoda de aspirație cu vacuum

(57) Rezumat:

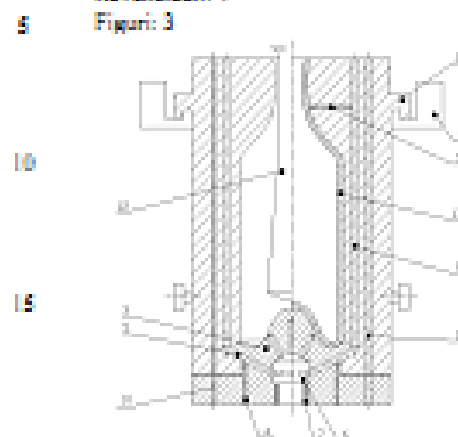
Invenția se referă la industria sticlei și poate fi utilizată la crearea utilajului pentru turnarea produselor din sticlă prin metoda de aspirație cu vacuum.

Dispozitivul pentru turnarea produselor din sticlă prin metoda de aspirație cu vacuum conține o formă (2), montată pe un suport (1), și o paletă (3), amplasată coaxial cu forma (2). În paletă (3) sunt executate canale pentru răcire (4) și o gaură centrală, în care este fixat un cap de aspirație (6), care este unit cu o magistrală de vacuum (7) și comunică cu niște canale înfundate pentru răcire și canale pentru răcire cu vacuum (5), executate în paletă (3), care comunică, la rândul lor, cu canale cu vacuum (8), ce comunică cu canale cu vacuum de dimensiuni mai mici (9). Canalele (8, 9) sunt executate în formă (2). Canalele pentru răcire cu vacuum (5) sunt dotate cu câte o supapă și comunică cu canalele pentru răcire (4). În paletă (3) sunt executate canale axiale (10), care comunică cu canale pentru răcire (11), executate în formă (2). Numărul canalelor înfundate pentru răcire și canalelor pentru

răcire cu vacuum (5) este selectat în funcție de greutatea și configurația părții de jos a produsului (13).

Revendicări: 1

Figuri: 3





## DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII

Subsemnatul, declar pe proprie răspundere că materialele prezentate în teza de doctorat, se referă la propriile activități și realizări, în caz contrar urmând să suport consecințele, în conformitate cu legislația în vigoare.

Cosovschi Pavel

Semnătura

Data:

10.09.2018

## CURRICULUM VITAE

PRENULELE,  
NUMELE  
LOCUL ȘI DATA  
NAȘTERII:

PAVEL COSOVSKI

ADRESA:

or. CHIȘINĂU, MOLDOVA,  
29.12.1984.  
Str. G.Latină, 9 bl 1, ap.47,  
2044 MD, Chișinău,  
MOLDOVA.  
Căsătorit, 1 copil.

STAREA FAMILIARĂ

### STUDII ȘI NIVELUL OBȚINUT:

2007 – Diplomă de licență, profilul – mecanică, specializarea – Tehnologia Construcției de Mașini, Universitatea Tehnică a Moldovei, facultatea de Construcții de Mașini, nota medie – 8.83.

2008 – Diplomă de Master, profilul – mecanică, specializarea Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Universitatea Tehnică a Moldovei, facultatea de Construcții de Mașini, nota medie – 9,54.

### ACTIVITATEA PROFESIONALĂ:

Septembrie 2007 – septembrie 2008, Masterand, Universitatea Tehnică a Moldovei, catedra – “Tehnologia Construcțiilor de Mașini”;

Septembrie 2008- – septembrie 2013 – lector asistent, lector universitar, catedra “Tehnologia Construcțiilor de Mașini”;

Martie 2007 – prezent, inginer-mecanic, inginer sectorului de repararea formelor, proiectant - șef, IS Fabrica de Sticlă din Chișinău.

### DOMENIILE DE ACTIVITATE ȘTIINȚIFICĂ

domeniul principal: **Sporirea durabilității formelor de turnare prin procedee tehnologice și metode constructive**

### PUBLICAȚII (cărți, monografii, etc.):

Publicații: 7

Invenții: 3

### PARTICIPĂRI LA FORURI ȘTIINȚIFICE INTERNAȚIONALE

1. Conferința internațională „MODTECH 2010”
2. Conferința internațională „MODTECH 2011”
3. Международная научно-техническая конференция "Машиностроение и Техносфера XXI Века", Донецк – 2011
4. Conferința internațională „MODTECH 2015”

### BREVETE DE INVENȚIE:

1. MAZURU S., COSOVSKI P., Brevet Nr. 4143 MD, Dispozitiv pentru turnarea produselor din sticlă prin metoda de aspirație cu vacuum, I. cl. C03B9/00, B9/20, B9/24, B9/30, B9/335, B9/38 Publ. BOPI, nr. 11/2012.
2. MAZURU S., COSOVSKI P. MARDARI Alexandru, Brevet Nr. 358 MD, Echipament de prefasonare pentru mașina automată de formare a produselor din sticlă cu gât îngust, I. cl. C03B9/32, 9/36, Publ. BOPI, nr. 4/2011.

3. **BESLIU V., MAZURU S., COSOVSCI P.** Brevet Nr.4184 MD, Procedeu de durificare a suprafețelor metalice, I. cl. C23H1/00, H1/06, H9/00, Publ. BOPI, nr. 11/2012.

**PUBLICAȚII:**

1. **COSOVSCI P.** Îmbunătățirea răcirii componentelor seturilor de forme pentru formarea sticlelor//buletinul institutului politehnic din Iași. -2008, vol liv.p.45-48.
2. **BESLIU VITALIE,, MAZURU SERGIU, COSOVSCI PAVEL, OJEGOV ALEXANDR** application of edi in increasing durability of glass moulding forms poansons// „modtech 2011”.
3. **КОСОВСКИЙ П.Г.** исследование влияния процесса выглаживания алмазным инструментом на качественные показатели поверхности легированных чугунов. “Машиностроение и техносфера XXI века”, том 2, с.88-91, 2011.
4. **CHERECHEȘ T., LIXANDRU P., MAZURU S., COSOVSCI P., DRAGNEA D.** NUMERICAL SIMULATION OF PLASTIC DEFORMATION PROCESS OF THE GLASS MOLD PARTS// „Applied Mechanics and Materials”, vol 657, pp126131, 2014 Trans Tech Publications, Switzerland.
5. **CHERECHEȘ T., LIXANDRU P., MAZURU S., COSOVSCI P., DRAGNEA D.** NUMERICAL SIMULATION OF PLASTIC DEFORMATION PROCESSES FROM CAST IRON PARTS, Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2014, vol.12, ISSUE2 p.29-36.
6. **COSOVSCI P.** SIMULAREA NUMERICĂ A PROCEDEELOR DE NETEZIRE ȘI DE DURIFICARE// Fizica și tehnica, 2013, vol.2, p28-33, Bălți.
7. **COSOVSCI P.** PRESENTATION OF RESULTS FOR SURFACE PLASTIC DEFORMATION BY LAMINAR GRAPHITE CAST IRON// Meridian Ingineresc, vol. 4(55),p.54-57, 2014.

**PREMII ȘI MENȚIUNI:**

- Premiul Senatului UTM. Domeniul creativității studenților UTM:Compartimentul – Laureat la anului în domeniul creativității tehnice 2006, **gradul I.**
- International Conference ModTech 2010, Slanic Moldova, 20-22 may 2010, **I-st SCIENTIFIC AWARD.**

DATE DE CONTACT tel.  
(373 22) 60-47-98  
tel.mob (373 67) 1-80-911,  
e-mail: c.pashag@gmail.com

Data: 10.04.19

Semnătura: \_\_\_\_\_

Aprob

Directorul Î.S. «Fabrica de Sticlă din Chișinău»

I. Cîrstea



Aprob

Prorectorul pe cercetări științifice a UTM

prof.univ. dr.hab. V.Dorogan

2017



#### Act de implementare

Noi, subsemnații reprezentanți a UTM, director al departamentului TCM, conf.univ. S.Mazuru și doctorandul P.Cosovschi pe de o parte și reprezentanții Î.S. «Fabrica de Sticlă din Chișinău», director de producere N.Rotari și șeful departamentului proiectării A.Djalo, prin prezentul act confirmă, că propunerile făcute în baza cercetărilor experimentale comune pozitive a procedurii de netezire cu diamant a fontei cenușii formelor de turnare a sticlei elaborate de UTM, sunt acceptate spre implementare în producere la Î.S. «Fabrica de Sticlă din Chișinău». La fel, spre implementare este acceptată tehnologia și metodologia de alegere a regimurilor de netezire.

Directorul de producere

N.Rotari

Directorul departamentului TCM

conf.univ. S.Mazuru

Șeful departamentului proiectării

A.Djalo

Doctorandul

P.Cosovschi

Aprob

Directorul Î.S. «Fabrica de Sticlă din Chișinău»

I. Cîrstea



Aprob

Prorectorul pentru activitatea științifică și  
relații internaționale al USARB

conf. univ., dr. V. Prițcan



### Act de implementare

Noi, subsemnații reprezentanți ai USARB, Președintele Consiliului Științific, dr. hab., prof. univ. P. Topală, doctoranzii N. Pinzaru, L. Marin, D. Guzman și doctorandul UTM Cosovschi P. pe de o parte și reprezentanții Î.S. «Fabrica de Sticlă din Chișinău», director de producere Brînzilă G. și director tehnic Baburin A., prin prezentul act confirmă, că propunerile făcute în baza cercetărilor experimentale comune pozitive a procedurii de formare a depunerilor de grafit pe suprafețele active ale formelor de turnare a sticlei în scopul sporirii proprietăților anti-aderență și anti-uzură, sunt acceptate spre implementare în producere la Î.S. «Fabrica de Sticlă din Chișinău». La fel, spre implementare este acceptată tehnologia și metodologia de formare a depunerilor de grafit cu aplicarea electrozilor-scule special elaborați.

Directorul de producere

G. Brînzilă

Handwritten signature of G. Brînzilă in blue ink over a horizontal line.

Directorul tehnic

A. Baburin

Handwritten signature of A. Baburin in blue ink over a horizontal line.

Președintele Consiliului Științific,

dr. hab., prof. univ. P. Topală

Handwritten signature of P. Topală in blue ink over a horizontal line.

Doctoranzii

N. Pinzaru

Handwritten signature of N. Pinzaru in blue ink over a horizontal line.

L. Marin

Handwritten signature of L. Marin in blue ink over a horizontal line.

D. Guzman

Handwritten signature of D. Guzman in blue ink over a horizontal line.

P. Cosovschi

Handwritten signature of P. Cosovschi in blue ink over a horizontal line.