

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE MECANICA

ION POPOVICI

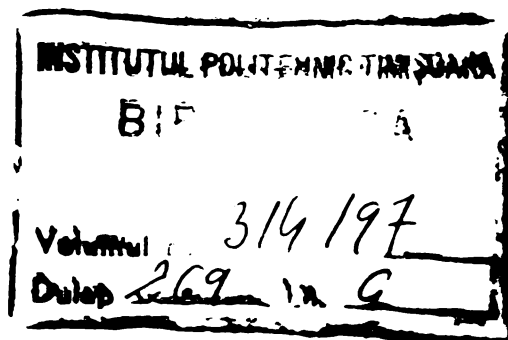
CONTRIBUTII LA STUDIUL COMPORTARII OTELURILOR
CARBON DE CALITATE LA DEFORMAREA PLASTICA LA
RECE CU VITEZE MARI DE IMPACT PRIN METODA
PNEUMOMECANICA

- TEZA de DOCTORAT -

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUȚATOR ȘTIINȚIFIC:
Prof. dr. doc. ing. AUREL NANU

TIMIȘOARA
1976



C U P R I N S

Cap.1. INTRODUCERE	4
1.1. Considerații generale	
1.2. Situația la zi a cercetărilor și perspectivele de dezvoltare ale metodei	6
1.3. Concluzii	14
Cap.2. MASURATORI SI REZULTATE EXPERIMENTALE	16
2.1. Instalația experimentală. Caracteristici constructive și de lucru ale instalației	
2.2. Determinarea vitezei de impact	20
2.3. Alegerea materialelor pentru experimentare și a metodei de deformare	24
2.4. Stabilirea vitezelor de impact și a gradelor de deformare	25
2.5. Măsurători experimentale	27
2.5.1. Măsurarea durității	
2.5.2. Alte măsurători	32
2.6. Concluzii	33
Cap.3. DETERMINAREA TENSIUNILOR INTERNE	34
3.1. Apariția tensiunilor interne la deformare	
3.2. Considerații asupra măsurării tensiunilor interne prin metode mecanice	36
3.3. Determinarea tensiunilor interne cu ajutorul razelor X	40
3.3.1. Interpretarea rezultatelor	47
3.4. Concluzii	51
Cap.4. EVOLUTIA GRANULATIEI SI ROLUL LIMITELOR DE GRAUNTI IN PROCESUL DE DEFORMARE	52
4.1. Influența granulației asupra caracteristicilor mecanice ale materialului	
4.2. Influența limitei grăunților în procesul de deformări	65
4.2.1. Influența limitei grăunților asupra lubecării	
4.2.2. Influența limitei grăunților asupra efectului de complicare a deformării	69
4.3. Concluzii	70
Cap.5. INFLUENȚA VITEZEI DE IMPACT ASUPRA DEFORMĂRII	71
5.1. Considerații teoretice	
5.2. Interpretarea rezultatelor experimentale	81

5.3. Concluzii	105
Cap.6. INFLUENTA MATERIALULUI	107
6.1. Influența conținutului în carbon	
6.2. Concluzii	126
Cap.7. INTERPRETAREA MATEMATICĂ A REZULTATELOR EXPERI- MENTALE	128
7.1. Analiza statistică	
7.1.1. Determinarea parametrilor statistici principali ai distribuției empirice	129
7.1.2. Interpretarea rezultatelor	130
7.1.3. Regresia liniară	149
7.2. Calculul variației $HB = f(\xi)$ la deformarea plastică la rece pentru deformarea la presa cu frecțiune și cu viteza de impact de 58 m/s	154
7.2.1. Aproximarea matematică a curbelor expe- rimentale	
7.2.2. Considerații asupra metodei utilizate	163
7.3. Concluzii	165
Cap.8. CONSIDERAȚII FINALE, CONCLUZII	166
BIBLIOGRAFIE	172

.....

C A P I T O L U L 1

1. INTRODUCERE

1.1. Considerații generale

În condițiile actuale ale dezvoltării industriale impetuoase a țării noastre, problema introducerii unor noi metode de prelucrare care să înlocuiască sau să completeze metodele clasice, constituie o sarcină pentru fiecare tehnician indiferent de domeniul de activitate.

La recentul Congres al XI-lea al P.C.R. s-a arătat: "societatea socialistă multilateral dezvoltată și comunismul nu pot fi edificate decât pe baza celor mai înaintate cuceriri ale științei și tehnicii". În acest sens "vor trebuie să fie perfecționate tehnologiile și să fie descoperite altele noi, în vederea reducerii substanțiale a consumurilor specifice, creșterii randamentului și simplificării procesului de producție. Știința trebuie să ajute la producerea de noi utilaje tehnologice, mașini-unelte, mijloace electronice de conducere a activității de producție și economice".

Dând curs acestor principii, lucrarea își propune tratarea din punct de vedere teoretic și experimental a prelucrării materialelor metalice prin deformare plastică la rece cu viteze mari de impact, domeniu foarte nou în tehnica prelucrării materialelor. Dezvoltarea rapidă a tehnicii a pus problema găsirii unor procedee noi de prelucrare care să rezolve în același timp două desiderate: primul, de prelucrare propriu-zisă, pe al doilea de îmbunătățire a proprietăților mecanice ale materialelor.

Paralel cu cercetările științifice cu caracter aplicativ sau fundamental se desfășoară și o intensă activitate pentru conceperea și realizarea de noi utilaje de prelucrare prin deformare plastică capabile să dezvolte viteze de deformare cu mult peste cele ale utilajelor clasice. Se poate afirma că cercetările se desfășoară în două direcții diferite și anume:

a). Prelucrarea materialelor cu viteze de deformare mai mari de 10^4 s^{-1} cu scopul mai ales de cercetare;

b). Prelucrarea materialelor cu viteze de deformare mai mici de 10^4 s^{-1} care îmbină aspectul cercetării cu cel al prelucrării propriu-zise.

Lucrarea se încadrează în acest ultim aspect, tratând problema prelucrării plastice la rece cu viteze mari de impact a oțelurilor carbon de calitate prin metoda pneumatică. Față de

tendința de extindere industrială a procedeului, cercetările privind influența diverșilor factori asupra comportării materialelor în timpul prelucrării sînt rămase în urmă sau au un caracter unilateral. Această situație împiedecă valcrificarea superioară și limitează perspectivele de dezvoltare ale procedeului. De aceea, rezolvarea unor probleme legate de stabilirea interdependenței care există între comportarea materialelor la deformare și diverși factori de influență, ca viteza de deformare, conținutul în carbon, tensiuni interne, granulație etc. în vederea stabilirii unor condiții optime de prelucrare este deosebit de importantă.

Pentru soluționarea celor de mai sus se impune abordarea fondului fenomenelor și stabilirea condițiilor concrete de lucru pentru categoria de materiale luate în studiu. Studiarea unor aspecte ale procesului de prelucrare prin deformare plastică la rece cu viteze mari de impact au fost abordate în munca de cercetare științifică a catedrei de Tehnologie mecanică și concretizate în lucrarea de față. Cercetările efectuate în prezenta lucrare au avut la bază în primul rînd, modificarea parametrilor fundamentali ai prelucrării - viteza de impact, conținutul de carbon și gradul de deformare - și în al doilea rînd, studiul altor parametri ai prelucrării - granulație, tensiuni, limite de grăunți etc.

Nu există pînă la ora actuală o fundamentare teoretică a procesului de prelucrare prin deformare plastică la rece cu viteze mari de impact a oțelurilor în condițiile utilizării unei game largi de viteze de impact și conținuturi în carbon.

În acest sens, lucrarea tratează în mod sistematic comportarea la deformare a oțelurilor carbon de calitate pentru conținuturi în carbon variînd între 0,1...0,6 % și pentru viteze de impact cuprinse între 25...60 m/s. Fenomenele surprinse în curbe de variație sînt fundamentate în final prin tratarea matematică a acestora.

Lucrarea cuprinde aproximativ 80 % cercetări originale. Literatura de specialitate este redată în cap.1 partea 1.2., cap.3, partea 3.2. și parțial în alte capitole pentru a putea face legătură cu partea originală a lucrării.

Autorul, consideră prezenta lucrare ca o modestă contribuție la fundamentarea teoretică și aplicativă a procedeului de prelucrare prin deformare plastică cu viteze mari de impact a oțelurilor carbon de calitate.

La elaborarea lucrării, autorul s-a bucurat de îndrumarea competentă a prof.dr.doc.șt.ing. Aurel Nanu, conducător științific și șeful catedrei de Tehnologie mecanică, de la care a primit tot spri-

jinul necesar și care a contribuit direct la canalizarea activității spre acest domeniu de cercetare. Pentru toate acestea autorul exprimă pe această cale cele mai calde mulțumiri.

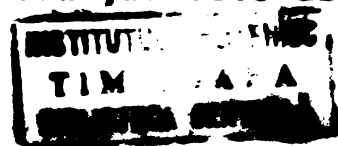
De asemenea, autorul aduce mulțumiri tuturor colegilor care l-au ajutat și în special tov. prof. dr. ing. Marin Trușculescu pentru competența și amabilitatea de care a dat dovadă ori de câte ori a fost solicitat.

1.2. Situația la zi a cercetărilor și perspectivele de dezvoltare ale metodei

Față de procedeele clasice de prelucrare a metalelor prin deformare plastică, procedeele de prelucrare cu puteri și viteze mari constituie un domeniu relativ nou. Caracterizate prin forțe care acționează cu viteze mari deci în durate scurte de timp, aceste procedee aduc cu ele în tehnica prelucrării metalelor prin deformare plastică, noi posibilități legate de avantaje incontestabile în ce privește: eficacitatea, simplitatea, cerințe minime de utilaj, raționalizarea tehnologiei, consumul de materiale și manoperă, prețul de cost al produselor etc. Gama lor de aplicare este foarte largă din punct de vedere al procedeelelor, dar deosebită, limitată din punct de vedere al produselor întrucât prețul de cost al utilajelor este foarte mare. Se precizează de altfel, că aceste procedee nu înlocuiesc pe cele clasice, ci le completează.

Dintre noile metode de prelucrare a metalelor prin deformare plastică cu puteri și viteze mari fac parte: ambutisarea tablelor, prelucrarea corpurilor tubulare, tăierea, perforarea, matrițarea, extrudarea etc.

Fiecare procedeu se caracterizează printr-un anumit principiu de lucru, care presupune un anumit tip de utilaj, acționat cu un anumit fluid de lucru (explosiv, forțe de natură electromagnetică, gaze sub presiune etc.). Având în vedere tendința de creștere pe plan mondial a produselor obținute prin forjare și matrițare (fig. 1.1), de o largă răspândire se bucură mai ales utilajele acționate prin destinderea unui gaz (aer sau azot sub presiune) care deși nu realizează viteze foarte mari se pretează cel mai bine la acest tip de operații. După cum se vede din fig. 1.1. în URSS volumul pieselor realizate prin forjare și matrițare crește continuu, astfel că de la un volum de 56 % în 1960 se ajunge la un volum de 71 % în 1975 și respectiv 77 % în 1980. Și în celelalte țări situația este asemă-



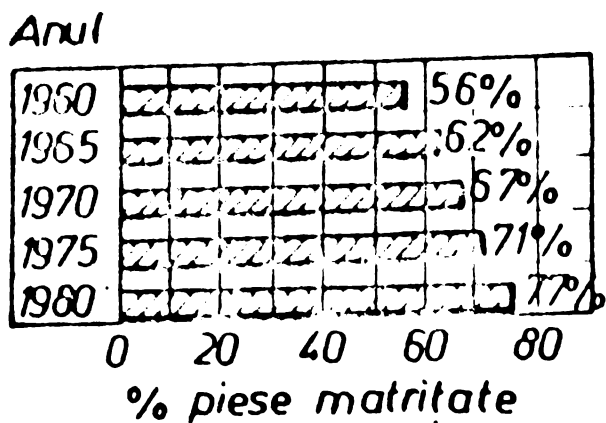


Fig.1.1.

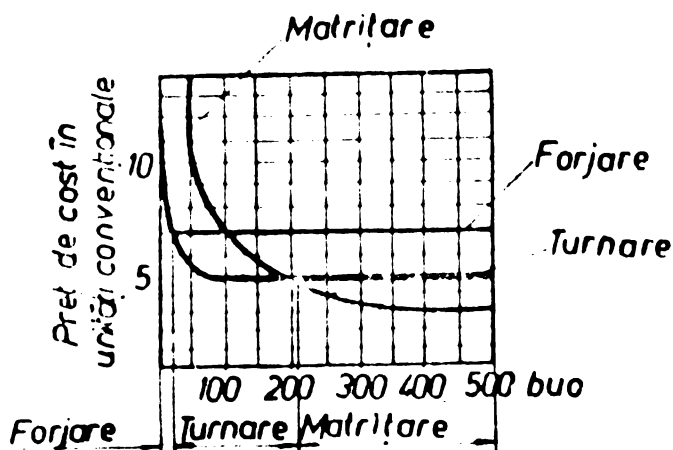


Fig.1.2.

zintă repartizarea investițiilor, iar în fig.1.4 structura investițiilor pe grupe de utilaje de matritare în forjele din R.S.R. pe perioada 1966 - 1971 [72], [110].

nătoare, astfel că din totalul pieselor realizate prin deformare plastică sint prelucrate prin matritare în RFG 67 %, în Anglia 64 % și în SUA 77,5 % [72], [110], [117]. Acest lucru se justifică prin indicii tehnico-economi superiori realizați (fig.1.2).

Rezultă clar că o dată cu creșterea numărului de piese se mărește foarte mult decalajul care există între prețul de cost realizat prin turnare și forjare, față de matritare. Aceeași tendință se manifestă și la noi în țară. Pentru ilustrarea acestui lucru, în fig.1.3, se prezintă

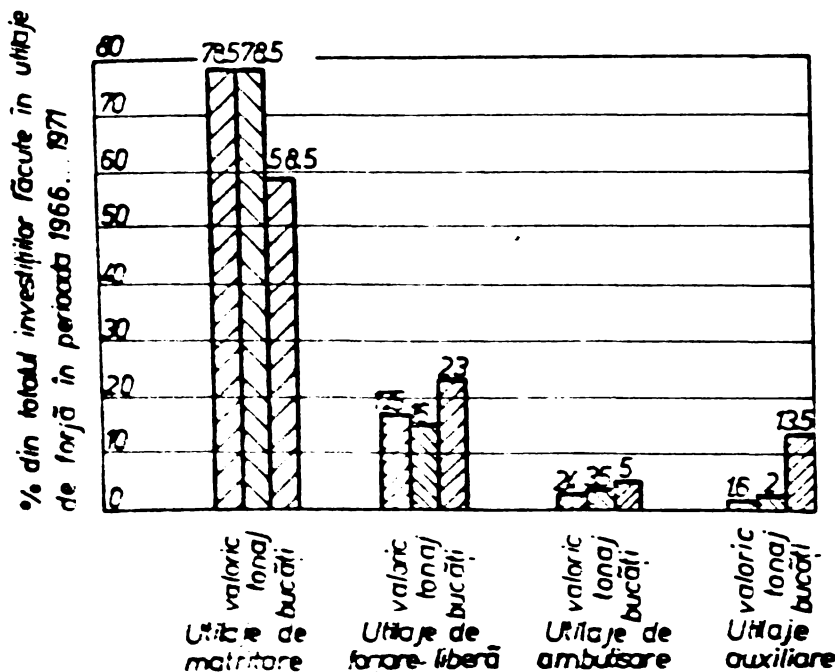


Fig.1.3.

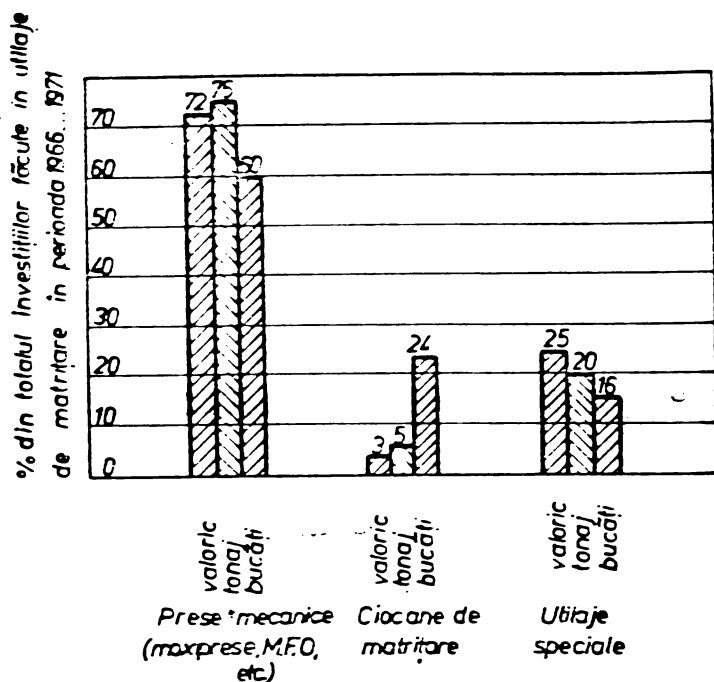


Fig.1.4.

Se observă apariția pentru prima dată la noi în țară a tendinței de repartizare a cotei părți din investiții spre utilaje speciale.

Din informațiile de pînă acum și a unor studii recent încheiate se pare, că nu s-au făcut pași prea mari în direcția schimbării structurii prezentate. Utilajele speciale au încă o pondere slabă în operațiile de matritare la noi în țară. Această tendință se va menține un timp încă îndelungat datorită pe de o parte, existenței unei mari eterogenități în ceea ce privește dotarea cu utilaje a secțiilor de forjă la ora actuală și pe de altă parte, a lipsei unei concepții proprii în execuția de utilaje specializate. Revine cercetării sarcina de a face ea și în acest domeniu să se întreprindă acțiuni care să ducă la utilizarea secțiilor de forjă cu utilaje moderne și în același timp originale. Acest lucru cu atât mai mult cu cât pe plan mondial se constată o creștere a rolului vitezei de deformare [51], [85], [110] ca parametru tehnologic al prelucrării prin deformare plastică.

Întrebuințarea procedurilor de deformare plastică cu viteze mari de deformare impune în mod obligatoriu specializarea și concentrarea industriei de piese prelucrate, precum și aplicarea tehnologiilor de grup, ceea ce face posibilă mecanizarea, raționalizarea și chiar automatizarea muncii de concepție la întocmirea tehnologiilor și proiectelor de SDV [25], [85].

In mod obișnuit alături de proiectarea și execuția utilajelor ultrarapide se proiectează și normative tehnice de scule și tehnologii de matrițarea cu viteze mari.

Cercetările în domeniul prelucrării cu viteze mari de deformare se desfășoară obișnuit în două direcții și anume:

- a). Cercetarea, proiectarea și realizarea de utilaje;
- b). Cercetarea prin metoda experimentării a factorilor de influență a prelucrării.

In ceea ce privește utilajul de lucru, acesta trebuie să asigure în toate cazurile viteze foarte mari de deformare. Sursele energetice pentru provocarea deformării plastice cu viteze mari sînt în mod obișnuit: explozia, șocul provocat de undele electromagnetice, șocul provocat de descărcările electrice în apă, detenta gazelor (aer sau azot) etc. Dezvoltarea metodei, respectiv a utilajelor de deformare impune o reconsiderare a clasificării procedeelor de deformare plastică după viteza respectiv utilajul de deformare (fig.1.5).

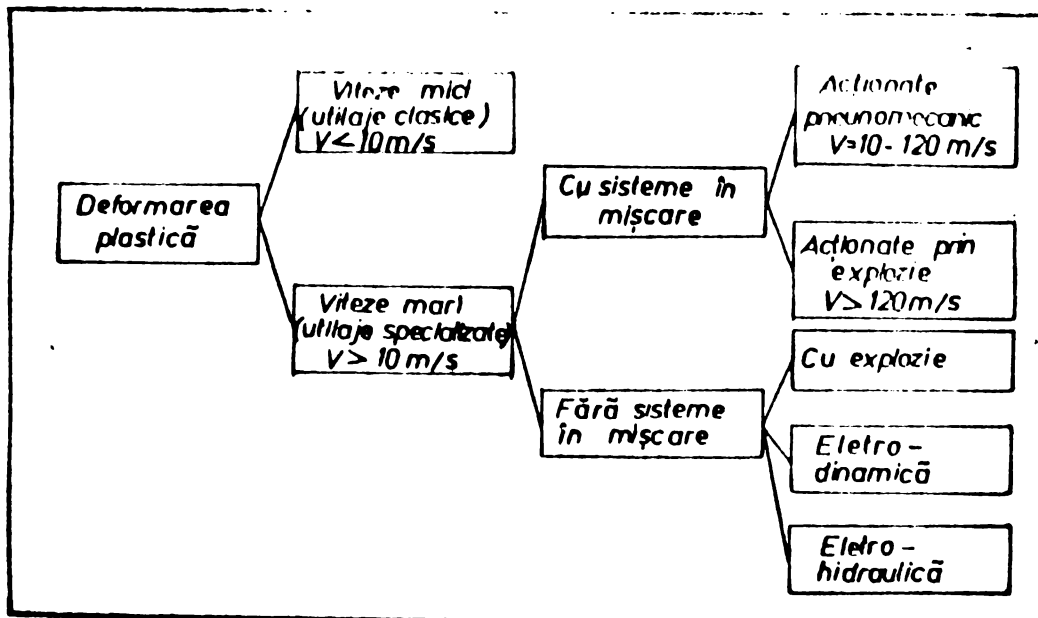


Fig.1.5.

In general, utilajele sînt specializate pe operații (ambutisări, profilări, matrițări etc.). Aproape în totalitate în operațiile de forjare și matrițare cu viteze mari de deformare se utilizează utilajele cu sisteme în mișcare acționate fie prin explozie, fie pneumomecanic [28]. Datorită siguranței mai mari în exploatare, precum și a prețului de cost mai scăzut o dezvoltare din ce în ce mai mare o are acționarea pneumomecanică.

La utilajele în exploatare, viteza de deplasare a părții mobile este cuprinsă obișnuit între 15...30 m/s, rar depășind această valoare. În schimb, instalațiile pentru cercetare au ajuns la viteze de pînă la 300 m/s [5], [85], [102]. Indiferent de viteza realizată ele oferă cîteva avantaje indiscutabile astfel:

- masa mașinii raportată la unitatea de lucru prin șoc este redusă (1 kg la 1 kgf);
 - acționarea cu dublu efect care elimină transmiterea șocului în fundație;
 - comanda pneumatică determină un randament ridicat.
- Din categoria dezavantajelor se remarcă:
- numărul redus de lovituri;
 - zonă de lucru limitată.

Ciocanele obișnuite sînt realizate cu contralovitură totală sau parțială. Energia de lovire este reglabilă după dorință făcînd să varieze presiunea aerului în organul de expansiune. Dezavantajul numărului redus de curse este parțial compensat de faptul că deformarea se produce în mod obișnuit printr-o singură lovitură.

Referitor la studiul factorilor de influență ai prelucrării, majoritatea autorilor [5], [66], [85], [89], [102] se ocupă în principal de influența vitezei de deformare. Indiferent de experimentările sînt efectuate pe materiale moi (Al, Cu) sau dure (oțeluri cu conținut scăzut de carbon) și indiferent că deformarea se produce la rece sau la cald, toți cercetătorii sînt de acord cu faptul că viteza de deformare influențează net desfășurarea procesului de deformare plastică, care diferă esențial de procesele care au loc la matrițarea clasică. Au loc modificări importante ale proprietăților de material, creștînd în mod obișnuit rezistența la deformare, duritatea și altele ceea ce conferă pieselor proprietăți mecanice îmbunătățite. Se încearcă chiar, o clasificare a proprietăților după sensibilitatea la viteza de deformare.

Astfel, rezistența la deformare, plasticitatea, structura, mecanismul de deformare etc. sînt dependente de viteză, în timp ce modulul de elasticitate, anumite proprietăți termofizice etc. nu sînt sensibile la viteza de deformare. Cele mai sensibile la variațiile de viteză sînt metalele cu temperatură joasă de topire (fig. 1.6) [44].

La alegerea materialului pentru experimentare s-a ținut cont tocmai de această sensibilitate la viteza de deformare.

Începutul cercetărilor s-a făcut pe epruvete confecționate din Pt, Zn, Al. Mai tîrziu, o dată cu producerea de noi utilaje s-a

trecut la utilizarea și a altor materiale. Este vorba în special de oțeluri și din categoria acestora, mai ales cele cu conținut scăzut de carbon. Alegerea materialelor era dictată în mare măsură de instalațiile și utilajele întrebuințate pentru experimentare. Acestea puteau dezvolta viteze foarte mari la energii mici de impact și respectiv grade mici de deformare. Pentru obținerea unor grade diferite de deformare în afara alegerii unor materiale noi, se varia corespunzător și dimensiunile epruvetelor. Alegerea oțelului drept material pentru experimentare a condus la necesitatea unor energii mari pentru deformare. Pentru evitarea acestui lucru majoritatea cercetărilor sînt axate pe deformarea la cald, care permite utilizarea unor energii mai mici și respectiv obținerea unor grade mai mari de deformare. Foarte rar apar referiri la deformarea la rece a oțelului. Pentru lămurirea multiplelor probleme care apar în acest caz s-a ales pentru studiu deformarea la rece cu viteze mari de impact a oțelurilor cu conținut variabil în carbon. Metoda este foarte indicată în cazul prelucrării pieselor mici, de serie mare prezentînd avantajul unei productivități sporite și obținerea unor proprietăți superioare față de deformarea clasică.

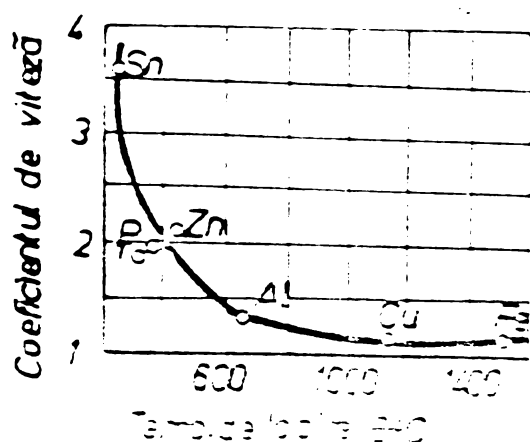


Fig.1.6.

Deși impune condiții de deformare mai grele s-a ales drept material de experimentare oțelul, pentru că deocamdată are încă o gamă largă de utilizare în toate domeniile construcției de mașini. În general, la oțeluri condițiile de deformare la rece se consideră atinse cînd deformarea se produce sub temperatura de recristalizare. Această definiție nu poate cuprinde condițiile limită

ale procesului de deformare plastică la rece.

Astfel, în [110] se definește procesul de deformare la rece, atunci când apare ecruisarea metalului. Indiferent de definiția considerată, cert este, că în cazul deformării plastice la rece se produc modificări esențiale ale proprietăților de material care influențează comportarea acestora în exploatare. Așa se face că în ultimul timp acest mod de prelucrare capătă o dezvoltare din ce în ce mai mare. După unii autori [60] ponderea în construcția mașinilor destinate deformării plastice la rece pe plan mondial a atins 60 %. Afirmațiile se referă la deformările clasice și mai ales la ambutisări, profilări etc. și mai puțin la forjare și matrițare.

Această dezvoltare se datorește următoarelor avantaje, recunoscute abia în ultimi ani:

- productivitate mărită realizată prin productivitatea utilajelor și a reducerii personalului auxiliar;
- utilizarea eficientă a materialului prin reducerea la minim a pierderilor de material prin prelucrare;
- îmbunătățirea proprietăților mecanice ale pieselor realizate;
- realizarea unor piese cu rugozitate redusă și precizie dimensională bună;
- economii ale prețului de cost prin renunțarea la orice formă de încălzire;
- protecția corespunzătoare a matrițelor care nu vin în contact direct cu piesele calde.

În plus, dacă deformarea se face cu viteze mari, există posibilitatea obținerii unor piese cu pereți subțiri de multe ori dintr-o singură lovitură. Eforturile reziduale conferă pieselor proprietăți mecanice comparabile cu cele obținute în urma tratamente termice sau alte prelucrări suplimentare.

Amploarea deformării plastice la rece impune însă următoarele:

- elaborarea unui număr cât mai redus de oțeluri cu destinație universală;
- îmbunătățirea unor mărci existente și folosirea lor pentru deformarea plastică la rece;
- elaborarea unor oțeluri cu destinație specială;
- standardizarea oțelurilor destinate prelucrării plastice la rece;
- elaborarea unor oțeluri speciale pentru construcția sculelor de deformare mult mai puternic sollicitate;

- modificarea formelor constructive ale seulelor de lucru astfel încât acestea să permită scurgerea ușoară a materialului și evitarea fisurării acestuia.

După cum se observă deformarea plastică la rece cu viteze mari ridică probleme complexe a căror rezolvare atrage după sine nu numai modificări în ceea ce privește elaborarea materialului, și și a tehnologiei de lucru, respectiv a utilajelor necesare.

Dacă asupra influenței vitezei de deformare respectiv asupra influenței materialului (în speță a conținutului de carbon al oțelurilor) rezultatele cercetărilor sînt încă neclare, se pare că în ceea ce privește gradul de deformare nu sînt probleme deosebite. Majoritatea cercetărilor arată că o dată cu creșterea gradului de deformare, crește rezistența la deformare indiferent dacă deformarea se produce la rece sau la cald. La deformarea la cald, curbele au totuși un maxim după care rezistența la deformare scade. Această scădere în cazul vitezelor mari de deformare este pusă pe seama efectului termic al vitezei de deformare. Pentru grade mari de deformare creșterea de temperatură poate atinge 80...100°C, ceea ce justifică scăderea rezistenței la deformare.

Pentru determinarea temperaturii datorită efectului termic al vitezei de deformare se întîlnesc diferite formule de calcul.

Astfel, după [44], [102] :

$$\Delta \theta = \frac{\varphi_n \cdot K_{FM}}{427 \cdot c \cdot \gamma} 10^6 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.1.)$$

în care:

$\varphi_n = \ln \frac{h_1}{h_0}$ - gradul logaritmic de deformare;

c - căldura specifică kcal/kg $[^{\circ}\text{C}]$

γ - densitatea kg/m³

$K_{FM} = \frac{1}{\varphi} \int_0^{\varphi} K_F d\varphi$ - rezistența opusă deformării $[\text{kgf/mm}^2]$

Coeficientul K_{FM} este cu atît mai mare, cu cît viteza de deformare este mai mare. În mod cu totul simplificat [84] dă următoarea formulă de calcul:

$$\Delta \theta = K_T \cdot p \quad (1.2)$$

în care: K_T - coeficient (tab.1.1) și p - presiunea specifică de deformare - cu atît mai mare - cu cît viteza de deformare este mai mare.

TABELUL 1.1.

Material	Coefficient K_T
Plumb	5,5
Aluminiu și aliaje de aluminiu	3,2
Cupru	2,4
Alame	2,5
Oțel	2,2

1.3. Concluzii

- Pe plan mondial se constată tendința de creștere a ponderei deformărilor plastice cu viteze mari de deformare prin forjare și matrițare.

- Se preferă deformarea la cald a oțelurilor cu conținut scăzut de carbon.

- În practică vitezele utilizate nu depășesc decât rareori intervalul 15...30 m/s.

- Este necesară o reconsiderare a clasificării procedeelor de deformare plastică după viteza, respectiv utilajul de deformare.

- Cercetările privind influența diferiților factori asupra comportării materialului sînt rămase în urma dezvoltării industriale a procedeului.

- Sistematizarea problemelor care privesc deformarea plastică se poate urmări în fig.1.7.

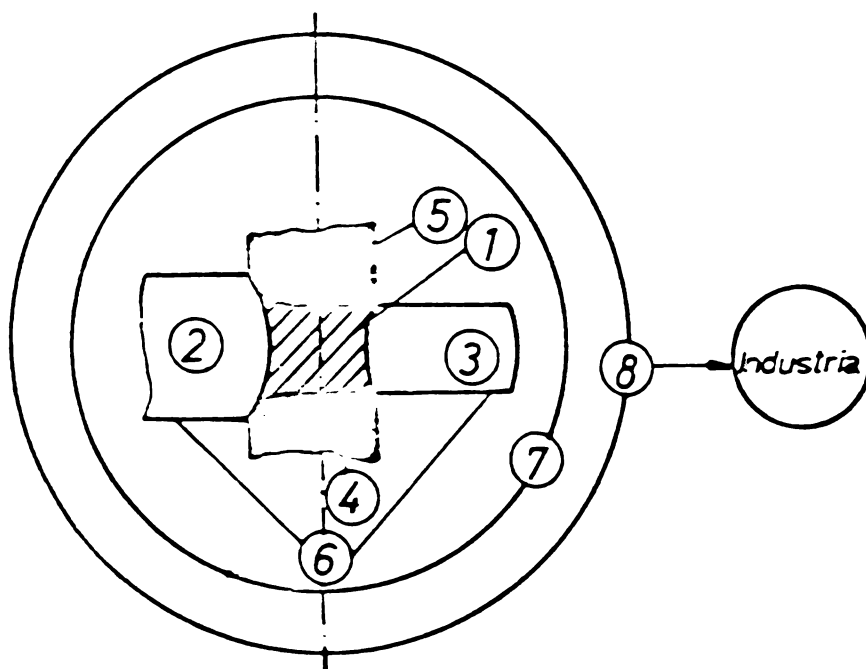


Fig.1.7.

In fig.1.7 se notează: 1-cercetările comportării metalului în stare plastică, forțele de deformare, starea de tensiuni, dislocații, repartizarea căldurii etc.; 2-studiul proprietăților materialelor înainte de deformare; 3-proprietățile pieselor după deformare, precizie, calitate, suprafață, stare de tensiuni etc.; 4-relația sculă-piesă, frecare, lubrifiere, elasticitate, plasticitate, tehnologii în paralel etc.; 5-multitudinea problemelor legate de scule, geometria lor, materiale etc.; 6-zona din afara regiunii sculă-piesă; 7-utilaje și caracteristicile lor; 8-factorii de exploatare.

- Din multitudinea de probleme pe care le cuprinde deformarea plastică lucrarea își propune rezolvarea următoarelor:

- realizarea unei instalații de laborator originale care să permită dezvoltarea unor viteze de impact cuprinse în domeniul 10...100 m/s;

- determinarea într-un montaj propriu a vitezelor de impact întrebuintate în procesul de deformare;

- deformarea unei game largi de oțeluri carbon de calitate cu conținut în carbon în limitele 0,1...0,6 %;

- determinarea tensiunilor interne în principalele probe deformate;

- studiul evoluției granulației și al rolului limitelor de grăunți în procesul deformării;

- studiul influenței vitezei de impact asupra deformării;

- studiul influenței conținutului în carbon asupra proprietăților de material;

- analiza matematică a rezultatelor experimentale.

.

C A P I T O L U L 2

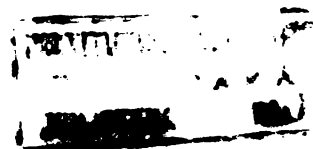
MASURATORI SI REZULTATE EXPERIMENTALE

2.1. Instalația experimentală. Caracteristici constructive și de lucru

La realizarea instalației experimentale s-a pornit de la necesitatea obținerii unor viteze de impact mai mari decât la utilajele clasice cunoscute și întrebuințate în procesul de deformare plastică prin forjare sau matrițare. S-a plecat de asemenea, de la ideea realizării unei siguranțe corespunzătoare în exploatare, precum și de la posibilitatea obținerii ușoare a fluidului de lucru. Astfel, între varianta ciocan pneumomecanic sau ciocan cu explozie s-a ales varianta primă la care fluidul de lucru, aerul comprimat se găsește îmbuteliat la presiunea de 80...100 daN/cm² în butelii de aer comprimat. Deși ciocanele cu explozie ar permite obținerea unor caracteristici de lucru mai mari (viteză de impact respectiv forță de deformare) realizarea lor este pretențioasă atât din punct de vedere al explozivului utilizat, cât mai ales a siguranței în exploatare care impune luarea unor măsuri deosebite.

Calcululele preliminarilor au dus la concluzia că, confecționarea unor pistoane cu greutate de 1...3 kg sînt suficiente pentru realizarea unor forțe de impact de 100...1000 daN, necesare pentru deformarea unor epruvete cilindrice a căror dimensiuni să fie de 10...12 mm diametru și 15...18 mm înălțime.

În literatura de specialitate se găsesc indicații vagi asupra unor astfel de ciocane. În totalitate ele se bazează pe destinderea aerului aflat sub presiune într-o cameră de compresie și acționarea unui piston spre direcția epruvetei de încercat. Variantele constructive sînt limitate. Pentru obținerea unor viteze mari se preferă greutatea mică ale pistonului care este accelerat de-a lungul unor curse utile lungi (2...6 m) [42]. Întrucît alte date concrete de calcul nu s-au întîlnit, s-a ales pentru construcție o variantă originală mergînd pe principiul măririi presiunii în camera de compresie și reducerea în același timp a cursei utile a pistonului. Instalația a cărei schemă de principiu se dă în fig. 2.1. a fost construită în două variante diferite:



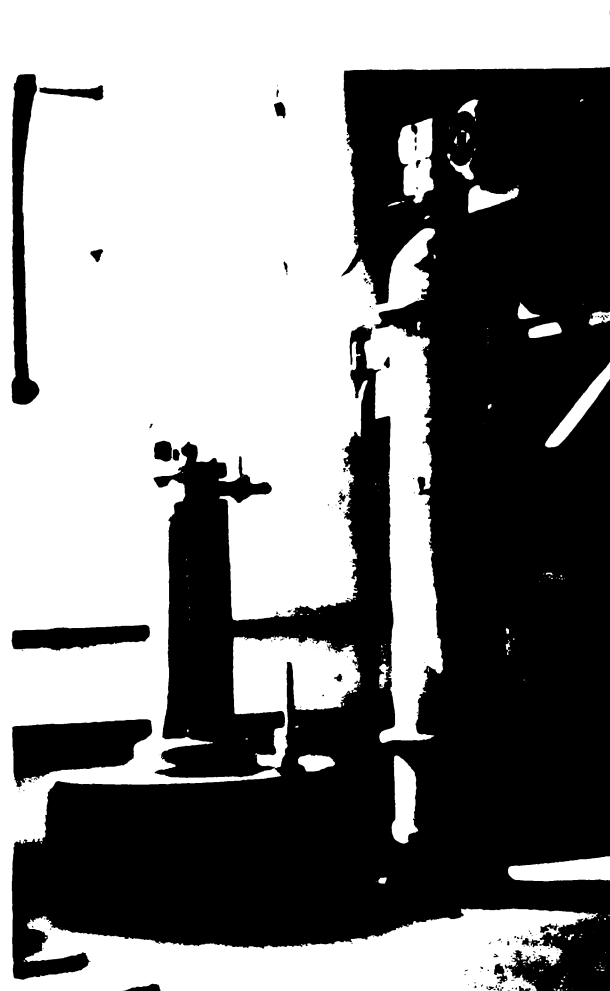
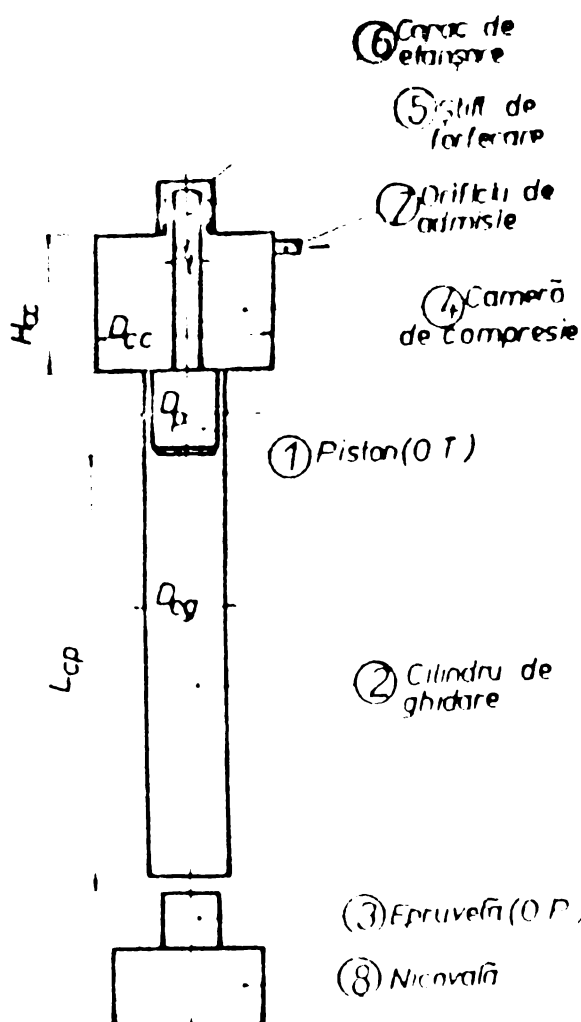


Fig.2.1.

- cu piston cu tijă lungă corespunzător cursei de lucru;
- cu piston cu tijă scurtă corespunzătoare cu înălțimea camerei de compresie.

Primul tip de piston prezenta dezavantajul că la lovire tija avînd o greutate apreciabilă se deforma sub acțiunea greutății proprii, astfel încît nu mai putea trece prin dispozitivul de etanșare prevăzut. Din acest motiv s-a ales tipul al doilea de piston cu tijă scurtă, care prezintă avantajul unei greutăți mai mici a întregului ansamblu tijă-piston și astfel posibilitatea de realizare a unor caracteristici mai mari de lucru.

O problemă importantă a constituit-o alegerea dispozitivului de reținere a pistonului pînă în momentul atingerii în camera de compresie a presiunii de declanșare. În literatura de specialitate se citează reținerea cu ajutorul unor prezoane sudate atît în piston cît și în capacul superior al camerei de compresie. La atingerea presiunii necesare prezonul se rupe și pistonul este expulzat cu o anumită viteză spre obiectul supus prelucrării.

Soluția micșora foarte mult ciclul de lucru și ridică probleme în ceea ce privește confecționarea și prinderea prezoanelor. Din acest motiv s-a ales o variantă originală de prindere a pistonului prin intermediul unor știfturi de forfecare din materiale

cu caracteristici mecanice cunoscute, care se pot confecționa și schimba foarte ușor.

Principalele caracteristici ale ciocanului realizat sînt:

$$\begin{aligned} D_{cc} &= 100 \text{ mm}; & H_{cc} &= 50 \text{ mm}; \\ D_p &= 60 \text{ mm}; & D_{cg} &= 60,1 \text{ mm}; \\ d_{tp} &= 18 \text{ mm}; & L_{cp} &= 320 \text{ mm} \end{aligned}$$

Pentru dimensionarea camerei de compresie s-a considerat presiunea maximă admisibilă de 100 daN/cm^2 și s-a calculat grosimea pereților pentru cazul tuburilor cu pereți groși [10], [58].

Forța de impact corespunde cu forța necesară pentru forfecarea știftului de reținere și se calculează cu relația:

$$F = 2 \cdot \tau \cdot A \quad (2.1)$$

în care: τ - rezistența la forfecare a știftului [daN/mm^2]

$$A = \frac{\pi d_{sf}^2}{4} \text{ - secțiunea de forfecare a știftului } [\text{mm}^2]$$

Cum $\tau \approx 0,8 \sigma$ relația (2.1) se poate scrie:

$$F = 2 \cdot 0,8 \cdot \sigma \cdot A = 1,6 \sigma \cdot A$$

în care $\sigma = 50 \text{ daN/mm}^2$ pentru materialul din care sînt confecționate știfturile de forfecare.

Pentru $d_{sf} = 2,5; 3,25$ și 4 mm se obține:

$$A_1 = 4,92 \text{ mm}^2; A_2 = 8,35 \text{ mm}^2 \text{ și } A_3 = 12,56 \text{ mm}^2$$

și deci:

$$F_1 = 1,6 \cdot 50 \cdot 4,92 = 396 \text{ daN}$$

$$F_2 = 1,6 \cdot 50 \cdot 8,35 = 674 \text{ daN}$$

$$F_3 = 1,6 \cdot 50 \cdot 12,56 = 1005 \text{ daN}$$

La realizarea acestor forțe, asupra pistonului acționează o presiune specifică p [daN/cm^2] care se calculează cu relația:

$$p = \frac{F}{A_{ap}} \quad (2.2)$$

în care: A_{ap} este suprafața activă a pistonului din camera de compresie egală cu

$$A_{ap} = \frac{\pi}{4} (D_p^2 - d_t^2) = \frac{\pi}{4} (6^2 - 1,8^2) = 25,75 \text{ cm}^2$$

și astfel se obține:

$$p_1 = \frac{396}{25,75} = 15,4 \text{ } [\text{daN/cm}^2]$$

$$P_2 = \frac{674}{25,75} = 26 \text{ [daN/cm}^2\text{]}$$

$$P_3 = \frac{1005}{25,75} = 39 \text{ [daN/cm}^2\text{]}$$

Pentru obținerea unei game mari de viteze fără a mări prea mult presiunea specifică p din camera de compresie s-au confecționat două pistoane având fiecare masa de 1,200 kg și respectiv 2,680 kg.

Pistoanele (fig.2.2) s-au confecționat din oțel (fig.2.2,a) respectiv bronz (fig.2.2,b) fiind prevăzute la partea de lovire

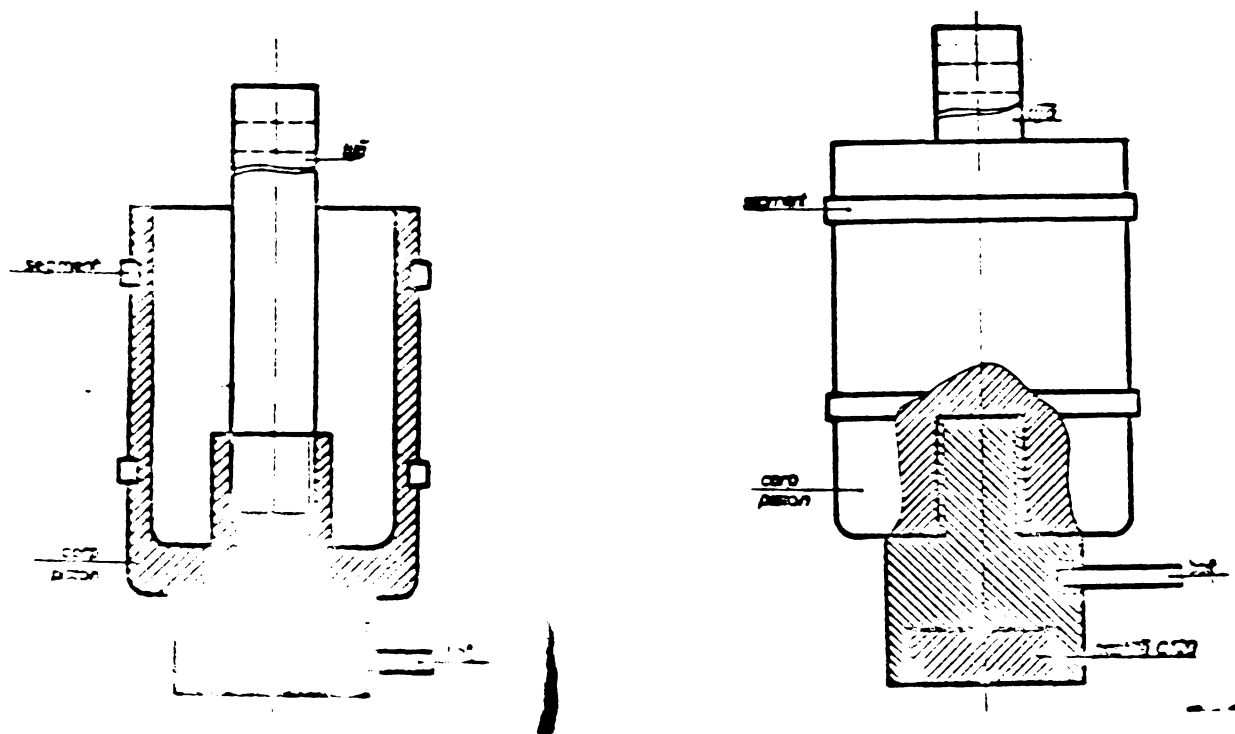


Fig.2.2.

cu o pastilă din oțel C 120 tratată termic cu mare rezistență la șoc.

Etanșarea camerei de compresie spre cilindrul de ghidare s-a făcut prin montarea pe piston a unor segmenti, iar în spre tija pistonului prin aplicarea unui capac filetat (fig.2.3) care în același timp asigură și protecția corespunzătoare pentru operator în momentul forfecării știfturilor.

Capacul superior al camerei de compresie este montat prin stringere prin intermediul a 8 șuruburi de \varnothing 10 mm. Între capac și camera de compresie se așază o garnitură de aluminiu care asigură o etanșare corespunzătoare. În acest fel, scăpările de aer sînt minime și ele nu influențează asupra forței de forfecare întrucît știfturile se foarfecă numai în momentul atingerii forței necesare.

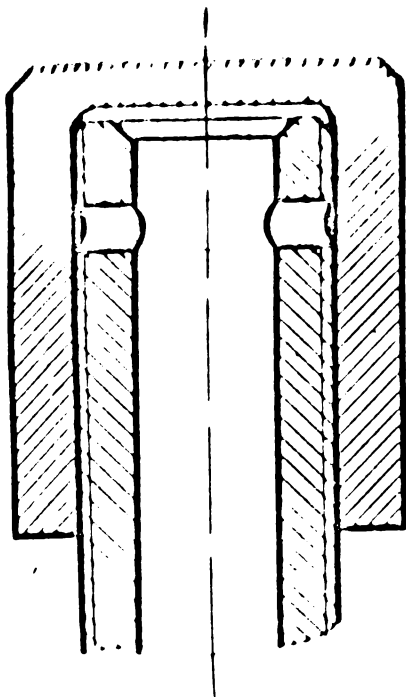


Fig.2.3.

Cilindrul de ghidare este prevăzut cu un canal de lățime 8 mm prin care se poate deplasa un bolt înșurubat în pistonul de lucru și care servește pentru ridicarea pistonului în poziția sa inițială.

Aționarea ciocanului se face astfel: se aduce pistonul 1 în poziția lui superioară și se blochează cu ajutorul unui știft de forfecare 5 de diametrul dorit. Se montează capacul de etanșare 6 și se începe alimentarea cu aer comprimat prin orificiul 7. La atingerea presiunii specifice necesare pentru realizarea forței de forfecare în camera de compresie, știftul se foarfecă și pistonul este împins cu viteză mare spre epru-

veta 3 supusă prelucrării. Amortizarea loviturii este preluată de nișoara 8 de masă mult mai mare decât restul instalației. Ridicarea pistonului în poziție de funcționare se face cu ajutorul boltului prins în piston.

2.2. Determinarea vitezei de impact

Viteza de deplasare a pistonului, echivalentă cu viteza de impact este elementul de bază la deformarea plastică cu viteze mari de deformare. Ea este cea care determină de fapt, viteza de deformare. Din această cauză calcularea sau determinarea experimentală a vitezei de deplasare a pistonului, se apreciază ca una din părțile importante ale lucrării de față. În bibliografia de specialitate [28] se dau relații din care se poate calcula această viteză. Astfel, la un ciocan pneumomecanic greutatea părții căzătoare se poate calcula cu relația:

$$G = 2K \frac{L \cdot g}{v^2} \quad [tf] \quad (2.3)$$

în care: L - energia nominală de lovire tfm;

g - accelerația gravitațională m/s^2 ;

v - viteza de impact m/s;

K - raportul între cantitățile de energie cedată de cele două părți în mișcare (la un ciocan cu contralovitură).

Din relația (2.3) se poate deduce expresia pentru calculul vitezei de impact, considerând celelalte elemente cunoscute:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot L \cdot g}{G}} \quad [m/s] \quad (2.4)$$

Inconvenientul în cazul instalației experimentale prezentate constă în imposibilitatea aprecierii corespunzătoare a valorii coeficientului K care în fond, este randamentul instalației. Aprecierea empirică a acestuia ar duce la erori de calcul pentru viteza de impact.

Din această cauză, pentru determinarea vitezei medii a pistonului s-a întrebuințat metoda oscilografierii pe ecranul osciloscopului a diagramei spațiu-timp, între două repere bine determinate pe cilindrul de ghidare al pistonului. Pentru aceasta pe piston a fost fixat prin înșurubare un bolț de oțel prevăzut la exterior cu o bușă subțire de cupru, care asigură un contact electric corespunzător. În timpul deplasării pistonului spre epruveta de încărcat, bolțul trece prin șase perechi de contacte electrice așezate echidistant pe distanța de 300 mm din cursa activă (fig.2.4).

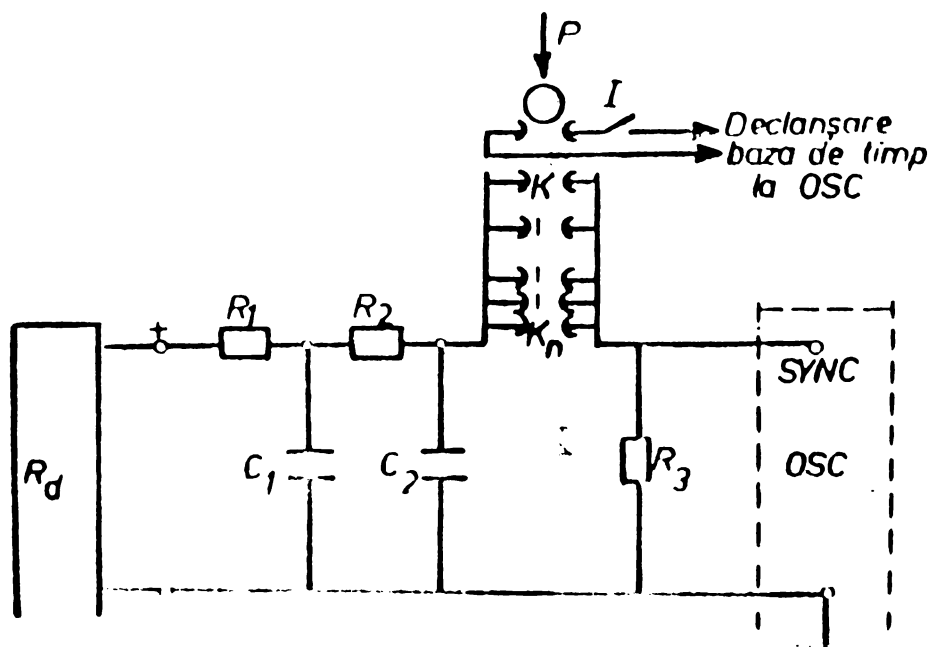


Fig.2.4.
chema electrică a montajului de oscilografierie a vitezei de impact

Contactele sînt prinse într-o carcasă de masă plastică transparentă și au posibilitatea să revină în poziția inițială prin intermediul unor resoarte.

Inregistrarea s-a făcut la un osciloscop catodic cu două spoturi de tip Krizik D.581. Etalonarea bazei de timp a osciloscopului s-a efectuat cu un generator de semnal de înaltă frec-

vență tip Tesla BN.344 cu $f = 20 \text{ Hz} \dots 2 \text{ kHz}$. Înainte de utilizare osciloscopul a fost încălzit cca. 30 minute pentru a ajunge în regim staționar în vederea micșorării la limită a erorilor de înregistrare. Tot în același scop alimentarea cu energie electrică a ansamblului de aparate de măsură și control s-a făcut cu tensiunea stabilizată cu ajutorul unui stabilizator electronic de tensiune alternativă de tip SF 2000-4 C.S.R. Oscilogrammele de variație spațiu-timp, în timpul procesului de lucru s-au obținut prin fotografierea imaginilor corespunzătoare de pe ecranul osciloscopului cu un dispozitiv special construit în acest scop (fig.2.5).



Fig.2.5.

Intrucât deplasarea pistonului în momentul destinderii aerului din camera de compresie este foarte rapidă, reținerea imaginii spațiu-timp pe pelicula fotografică fără o aparatură corespunzătoare nu este simplă. Se menționează că la data înregistrării lipseau din dotare osciloscops cu memorie. În plus, osciloscopul utilizat nu era prevăzut cu

un dispozitiv care să permită fotografierea unor procese rapide. Pentru aceasta s-a folosit instalația și metoda realizată la Institutul politehnic "Traian Vuia" din Timișoara, catedra Tehnologie mecanică [35], [71]. Procedeu care a permis vizualizarea și fotografierea fenomenelor produse într-un interval de timp se bazează pe îmbinarea într-un montaj corespunzător, a unui aparat foto și a sistemului de declanșare a bazei de timp a osciloscopului catodic. Declanșarea bazei de timp nu se face în același timp cu a aparatului foto [35] ci mai întâi se declanșează aparatul foto pe poziția B stabilă (timp infinit) și apoi se acționează asupra bazei de timp la atingerea de către bolț a primei perechi de contacte. Impulsul de declanșare a bazei de timp se obține conform metodei prin descărcarea unui condensator pe o rezistență. Amplitudinea maximă precum și polaritatea impulsului de declanșare a bazei de timp depinde de tipul osciloscopului utilizat. Pentru o etalonare riguroasă a duratei procesului s-au folosit ambele spoturi ale osciloscopului a căror deplasare pe orizontală sînt comandate de baza de timp comună, în timp ce deplasările pe verticală, la un spot au fost comandate de procesul de studiat, iar la celălalt spot de un generator etalon. Amplificarea pe orizontală

a bazei de timp a celor două spoturi a fost astfel reglată încât lungimea liniilor horizontale obținute pe ecranul osciloscopului să fie riguros egale. Pentru ca pelicula foto să nu fie impresionată de punctele luminoase de pe ecran ale celor două spoturi în stare de repaus, când nu este declanșat generatorul bazei de timp, aceste puncte au fost deplasate în afara ecranului. Pentru a face posibilă fotografierea la lumina zilei, obiectivul aparatului foto și ecranul osciloscopului s-a introdus într-o cameră obscură de formă cilindrică telescopică pentru a putea varia corespunzător distanța focală. Cu ajutorul intrerupătorului I_1 (fig. 2.4) se poate vizualiza procesul, dând impulsuri de declanșare a bazei de timp (atingerea periodică a contactelor inițiale) fără ca aparatul foto să funcționeze. După reglare se acționează pistonul P care prin intermediul contactelor $K_1 \dots K_n$ vizualizează impulsurile și durata lor (I închis).

Fotografierea s-a făcut cu un aparat tip Contax D Zeiss I. Kon V. .I. Timpul de expunere nelimitat (poz. B), diafragma 1/8 și distanța focală 500 mm. S-a utilizat film Orwo 22 DIN 36 mm. Din oscilogramele fotografiate (fig. 2.6) s-a scos timpul parcurs de piston pentru un spațiu dat și de aici viteza medie de deplasare în m/s.

Baza de timp a fost de 1,5 kHz, iar etalonul 500 Hz. Din studiul oscilogramelor rezultă că pentru spațiul mic de deplasare a pistonului nu se constată o accelerare a acestuia, astfel încât viteza determinată se poate considera egală cu viteza de impact.

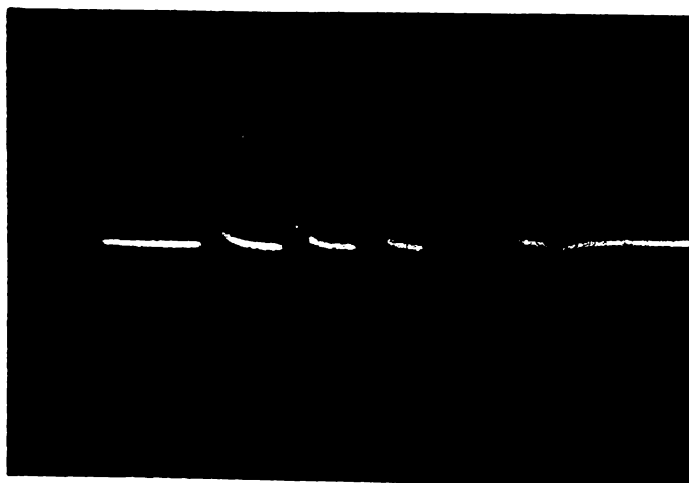


Fig. 2.6.

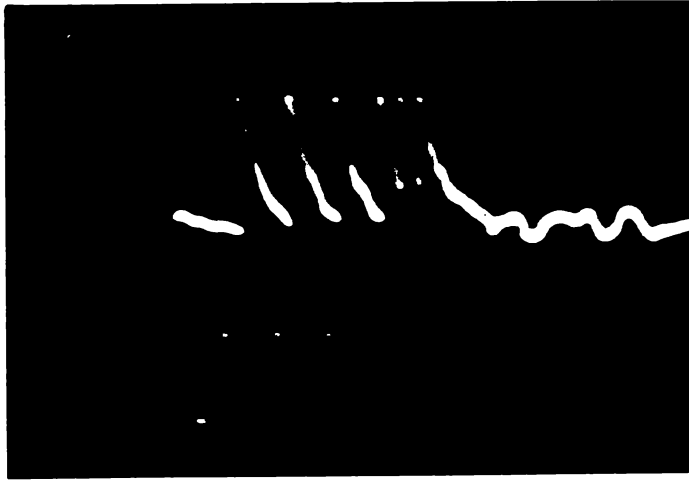


Fig.2.6.

2.3. Alegerea materialului și a metodei de deformare

Din cercetarea bibliografiei de specialitate rezultă că deformarea plastică cu viteze mari de impact prin matrițare se studiază cu precădere pe materiale moi Al, alamă, Cu sau oțeluri cu conținut scăzut de carbon. În ceea ce privește oțelurile din punct de vedere structural [39], [88] recomandă ca gradul de globulizare al perlitei să fie mare, iar S și P să nu depășească 0,035 %. Cu creșterea conținutului în C, plasticitatea oțelurilor scade în general, iar rezistența la deformare crește. Se indică întrebuintarea cu precădere a oțelurilor de cementare și de îmbunătățire. În cazul oțelurilor de cementare nealiante, granulația grosolană implică o rezistență la deformare minimă. Aceasta are efect favorabil asupra forțelor de deformare și asupra durabilității sculelor. În schimb, la structura cu granulație mare tendința de ecruisare este mai accentuată, ceea ce reduce din capacitatea de deformare plastică a materialelor.

În cazul utilizării a două sau trei mărci de oțeluri diferite observațiile asupra rezultatelor obținute se fac individualizat pentru fiecare marcă studiată fără a se face o legătură înlănțuită asupra influenței conținutului în C.

Din această cauză s-a ales pentru experimentare și cercetare o gamă largă de oțeluri carbon la care constituentul principal variabil este considerat carbonul. Întreaga gamă de CIG aleasă (CIG 10, 15, 25, 35, 45 și 60) se încadrează în categoria oțelurilor prelucrabile prin deformare plastică și au o pondere mare de utilizare în construcția de mașini [39], [104]. În plus, le se elaborează în modul cel mai îngrijit astfel încât există o garanție a compoziției chiar fără o analiză chimică a lor.

Conținutul variat de carbon permite studiul influenței carbonului asupra comportării la deformare plastică la rece a oțelurilor utilizate. Pentru asigurarea uniformității comportării la deformare, materialele au fost supuse inițial unui tratament termic de normalizare respectiv recacere de înmuiere conform STAS 880-66 și STAS 791-66. S-au obținut granulații diferite în funcție de starea inițială a materialului. Metoda de încercare a fost determinată de condițiile de lucru, astfel [26] arată că încercarea la tracțiune prin șoc provoacă distribuția neuniformă a tensiunilor și deformațiilor în lungul probei. Încercarea prin torsiune limitează vitezele de deformare. În literatură se recomandă întrebuintarea încercării prin refulare a probelor cilindrice care permite realizarea gradelor și vitezelor de deformare necesare. Metoda este conform cu STAS 165-66 și STAS 2223-61. Pentru evitarea frecărilor la suprafața de contact (sculă-probă) mai ales pentru grade mari de deformare se recomandă lubrifierea. Drept lubrifiant s-a utilizat uleiul care permite realizarea unui strat uniform repartizat pe suprafețele de lucru.

2.4. Stabilirea vitezelor de impact și a gradelor de deformare

După cum s-a amintit vitezele de impact sînt funcție de masa pistonului și respectiv de diametrul știftului de forfecare. În urma măsurării exacte a acestora a rezultat posibilitatea alegerii unui număr de 6 viteze diferite pentru cele două pistoane și respectiv 3 știfturi de forfecare utilizate. Avînd în vedere că ele se încadrează în valorile practic întrebuintate în procesul de deformare, întrucît la instalațiile în exploatare nu se depășește obișnuit viteza de 15...30 m/s, se consideră aceste 6 valori suficiente pentru a observa influența vitezei de impact asupra comportării la deformare plastică a oțelurilor alese. Acest lucru cu atît mai mult, cu cît interpretarea matematică a rezultatelor experimentale permite extrapolarea acestora peste și sub limitele considerate. În acest fel, există posibilitatea efectuării unui număr limitat de încercări și obținerea unei cantități maxime de informații.

În ceea ce privește gradul de deformare literatura de specialitate prezintă două situații diferite. Dacă preluorarea se face la rece de obicei gradele de deformare întrebuintate sînt de valori mici [38]. Se variază obișnuit viteza sau calitatea mate-

rialului utilizat. In cazul deformării la cald, gradele de deformare alese, au valori mari [102] și se încadrează în capacitatea de deformare plastică a materialului utilizat. Din acest punct de vedere în lucrare se combină cele două principii și se studiază comportarea oțelurilor carbon de calitate la deformarea plastică la rece cu viteze mari de impact și grade mari de deformare. Se aleg cinci grade de deformare diferite, gradul maxim ales fiind foarte apropiat de capacitatea maximă de deformare plastică a oțelului considerat. Gradul de deformare ξ se calculează conform STAS 2233-61 cu relația:

$$\xi = \frac{h_0 - h_f}{h_0} 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

Pentru obținerea gradelor de deformare corespunzătoare epruvetele au avut dimensiunile $\phi = 10$ mm și $h = 15$ mm respectiv $\phi = 12$ mm și $h = 18$ mm. S-a ales raportul $h/\phi = 1,5$ pentru a se evita flambarea probelor în timpul deformării. S-au întrebuințat numai două dimensiuni ale epruvetelor întrucît literatura de specialitate consideră că dimensiunile acestora influențează comportarea la deformare. In cazul deformării la rece însă, se apreciază că influența este foarte mică și deci pentru probe apropiate ca dimensiuni se poate neglija. Pentru acest caz de deformare indiferent de viteza utilizată rezultatele obținute pe probe mici se pot mai ușor extrapola la probe mari. Această posibilitate rezidă din faptul că în cazul prelucrării la rece condițiile de deformare (temperatura, presiuni specifice) se mențin constante sau foarte apropiate.

Pentru a avea posibilitatea de comparație între comportarea oțelurilor la deformarea cu viteze mari de impact și comportarea la deformarea pe utilajele clasice întrebuințate, deformarea s-a făcut în paralel pe o presă cu fricțiune la care viteza de impact este sub 5 m/s și forța de impact de cea. 5000 daN și pe ciocanul pneumomecanic cu caracteristicile de bază amintite.

Prelucrarea s-a făcut în general liber. Pentru fiecare caz de deformare în parte utilizându-se 5 probe deformate la 5 grade de deformare diferite. Primul grad de deformare obținându-se dintr-o singură lovitură, al doilea din două ș.a.m.d. cel de al cincilea din 5 lovituri consecutive.

In lucrare se utilizează noțiunea de viteză de impact întrucît este o valoare constantă. Viteza de deformare se calculează cu relația: [55], [102]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{h} \quad [s^{-1}] \quad (2.6)$$

in care: v este viteza de impact m/s și h - înălțimea inițială a epruvetei în m. Dacă se utilizează un singur grad de deformare și un singur tip de epruvetă, atunci noțiunea de viteză de deformare calculată cu relația (2.6) își găsește justificarea. Pentru grade diferite de deformare, se modifică de fiecare dată înălțimea inițială a epruvetei astfel încât la fiecare lovitură aplicată, deformarea se produce practic cu altă viteză de deformare. Din această cauză se calculează viteza de deformare cu titlu informativ dar se utilizează pentru interpretare numai noțiunea de viteză de impact, mai proprie pentru practica deformării. Pe de altă parte, măsurarea vitezei de deformare propriu-zisă este greoaie și necesită instalații complexe care nu justifică rezultatele obținute.

2.5. Măsurători experimentale

2.5.1. Măsurarea durității.

După deformarea întregului set de epruvete în condițiile antintite, s-a măsurat duritatea la fiecare probă corespunzător gradelor de deformare obținute. Duritatea s-a măsurat prin metoda Brinell cu un aparat tip W.P.M. cu cadran de măsurare a amprentelor. S-a ales bila cu diametru de $\phi = 2,5$ mm și forța de apăsare de 187,5 daN. Pentru obținerea unei durități medii cât mai apropiate de realitate s-au făcut câte 5 determinări pentru fiecare din cele două suprafețe plane ale epruvetei deformate, calculându-se apoi media măsurătorilor. S-a ales metoda Brinell deoarece există posibilitatea de a face legătura între valoarea rezistenței la deformare σ și duritatea Brinell prin relația:

$$\sigma_d = 0,35 HB \quad (2.7)$$

Pentru că măsurarea durității nu implică aparatură specială și se poate determina foarte ușor, se consideră că aprecierea comportării materialului prin acest factor poate exprima corespunzător evoluția și a rezistenței la deformare a materialului cercetat atât în funcție de viteza de impact, cât și în funcție de conținutul în carbon.

Pentru evitarea unor erori de calcul în plus, curbele de variație exprimă evoluția durității în funcție de factorii care interesează.

Rezultatele experimentale sînt trecute în tabelul 2.1.

TABELUL 2.1.

Rezultatele măsurătorilor experimentale

Nr. ort.	Material	HB ₁ daN/mm ²	ε %	HB _f daN/mm ²	v ₁ m/s	ξ s ⁻¹	F ₁ daN	Dimensiunea epruvetei mm
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	OLC 10	120	35,8	190	deform. presă cu fric- țiune		5000	12 x 18
			53,3	209				
			62,8	216				
			69,5	224				
			74,5	231,5				
2			22,5	173	24	1,6.10 ³	396	12 x 18
			38,1	185,5				10 x 15
			52,3	200				10 x 15
			58,5	207				10 x 15
			67,5	211				10 x 15
3			28,2	182	31,6	2,1.10 ³	674	12 x 18
			47,6	201				10 x 15
			58,5	209,5				10 x 15
			71,2	219,5				10 x 15
			75,1	224,5				10 x 15
4			35,2	199,5	38,7	2,6.10 ³	1005	12 x 18
			41,0	205				12 x 18
			56,2	214,5				12 x 18
			62,5	219,5				10 x 15
			75,6	228				10 x 15
5			26,2	178,5	36	2,4.10 ³	396	12 x 18
			42,5	192,5				10 x 15
			57,0	204,0				10 x 15
			64,1	208,5				10 x 15
			76,6	220,5				10 x 15
6			31,5	176,0	47,4	3,2.10 ³	674	12 x 18
			43,1	188,5				12 x 18
			53,3	202,5				10 x 15
			65,2	219				10 x 15
			74,8	236,5				10 x 15
7			42,1	209	58	3,9.10 ³	1005	12 x 18
			54,2	222				12 x 18
			65,3	232				10 x 15
			70,1	238,5				12 x 18
			76,6	247				10 x 15
8	OLC 15	138	29,4	197,5	deform. la pre- sa cu fricțiune		5000	12 x 18
			49,1	217,5				
			57,8	228,0				
			65,5	240,0				
			70,5	241,0				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
9	OLC	15	138	20,1 35,1 51,4 56,0 65,2	172 200,5 219,0 222,5 234,5	24	$1,6 \cdot 10^3$	396	12x18 10x15 10x15 10x15 10x15
10				26,3 45,5 56,1 69,0 72,8	191,5 219,0 233 249 251	31,6	$2,1 \cdot 10^3$	674	12x18 10x15 10x15 10x15 10x15
11				31,2 39,5 54,2 58,1 71,4	203 220,5 236,5 238 250	38,7	$2,6 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 12x18 10x15 10x15
12				24,1 40,5 54,7 59,0 70,4	183 204 219 224,5 231	36	$2,4 \cdot 10^3$	396	12x18 10x15 10x15 10x15 10x15
13				28,7 40,2 49,6 63,0 72,4	184,5 203,5 209,5 232,0 245	47,4	$3,2 \cdot 10^3$	674	12x18 12x18 10x15 10x15 10x15
14				37,6 52,1 62,0 67,0 73,0	208 230 242 246 258	58	$3,9 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 10x15 12x18 10x15
15	OLC	25	176	27,6 43,0 53,1 61,4 67,2	208,5 218,0 231,0 247,5 248,0	deform. la pre- sa cu frietune		5000	12x18
16				25 34,1 45,8 53 62,4	210,5 220,5 230 233,5 241,5	24	$1,6 \cdot 10^3$	396	10x15 10x15 10x15 10x15 10x15
17				23,9 42,5 54 64,1 71,4	205,0 226 242,0 251 256	31,6	$2,1 \cdot 10^3$	674	12x18 10x15 10x15 10x15 10x15
18				28,3 37,2 50,2 54,6 69,1	217,5 228,5 240 245 258,5	38,7	$2,6 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 12x18 10x15 10x15

1	2	3	4	5	6	7	8	9
19	OLC25	176	22,4 38,1 51,2 56,1 67,8	198,5 217 231,5 235 251,5	36	$2,4 \cdot 10^3$	396	12x18 10x15 10x15 10x15 10x15
20			25,9 37,7 46,6 56 69,6	205 220,5 226 240,5 251	47,4	$3,2 \cdot 10^3$	674	12x18 12x18 10x15 10x15 10x15
21			34,8 49,7 58,6 63,2 70,8	225 238 248,5 259 266	58	$3,9 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 10x15 12x18 10x15
22	OLC 35	183	24,2 40,3 50,4 58,6 65,3	205 221 228,5 244 251,5	deform. la pre- sa cu frioțiune		5000	12x18
23			25 33 44,9 52 61,5	210,5 217,5 233,5 238 247	24	$1,6 \cdot 10^3$	396	10x15 10x15 10x15 10x15 10x15
24			22,1 39,6 52,9 61,6 69,7	205 226 240,5 250,5 258,5	31,6	$2,1 \cdot 10^3$	674	12x18 10x15 10x15 10x15 10x15
25			26,5 36,1 48,3 54 68,6	217 227,5 226,5 241 263	38,7	$2,6 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 12x18 10x15 10x15
26			20,9 36,9 51,2 55,3 66,5	209 221 225 239,5 248,5	36	$2,4 \cdot 10^3$	396	12x18 10x15 10x15 10x15 10x15
27			24,2 36,1 44,8 54,1 69,6	217 225 234 241,5 265	47,4	$3,2 \cdot 10^3$	674	12x18 12x18 10x15 10x15 10x15

1	2	3	4	5	6	7	8	9
28	OLC35	183	32,7 48,5 58,5 62,6 69,8	222,5 241 248 256 270	58	$3,9 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 10x15 12x18 10x15
29	OLC	45 205	22,5 38,2 47,9 54,4 60,3	213 231,5 244 255 258	deform. la presă ou fric- țiune		5000	12x18
30			25 30,1 42,9 48 59	221 230 241 246,5 260	24	$1,6 \cdot 10^3$	396	10x15 10x15 10x15 10x15 10x15
31			25 38,1 47,3 60,4 65,1	226 237,5 249,5 260,5 267,5	31,6	$2,1 \cdot 10^3$	674	10x15 10x15 10x15 10x15 10x15
32			23,1 31,5 44,1 52,1 65,3	228 236 249,5 257,5 269	38,7	$2,6 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 12x18 10x15 10x15
33			25 34,1 47,5 52 63	214,5 233 242 252,5 263,5	36	$2,4 \cdot 10^3$	396	10x15 10x15 10x15 10x15 10x15
34			21,3 34,9 42,9 50,3 67,5	222,5 235,5 243 259,5 281,5	47,4	$3,2 \cdot 10^3$	674	12x18 12x18 10x15 10x15 10x15
35			29,6 44,3 56,6 59,7 67,8	239,5 255 268 277,5 290,5	58	$3,9 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 10x15 12x18 10x15
36	CIC	60 259	17,6 30 39,9 47,5 52,3	269,5 280 296 298,5 311,5	deform. la presă ou fric- țiune		5000	12x18

1	2	3	4	5	6	7	8	9
37	OLC 60	259	20 25,3 38,3 42,2 53,4	291,5 300 311 314 322	24	$1,6 \cdot 10^3$	396	10x15 10x15 10x15 10x15 10x15
38			25 32,2 42,5 52,2 61,1	300 305,5 319 325 334	31,6	$2,1 \cdot 10^3$	674	10x15 10x15 10x15 10x15 10x15
39			20 28,5 45,1 47,8 60,4	295 308,5 325,5 328,5 336	38,7	$2,6 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 12x18 10x15 10x15
40			20 28,3 41 45,7 57	282,5 295,5 310 315,5 323,5	36	$2,4 \cdot 10^3$	396	10x15 10x15 10x15 10x15 10x15
41			20 27,8 36,3 46,7 62,1	290 301 312,5 323,5 341	47,4	$3,2 \cdot 10^3$	674	10x15 12x18 10x15 10x15 10x15
42			25,1 38,7 48,6 54,9 62,5	302,0 318 331 341 351	58	$3,9 \cdot 10^3$	1005	12x18 12x18 10x15 12x18 10x15

2.5.2. Alte măsurători.

La majoritatea probelor deformate s-au făcut microfotografiile la microscopul optic cu ordin de mărire de 400 X pentru a putea observa modificările survenite în structură sau apariția unor procese deosebite în timpul deformării. De asemenea, pentru justificarea rezultatelor obținute, la un număr de 20 probe s-au determinat tensiunile interne de ordinul I prin metoda iradierii cu raze X.

Pentru a intra cât mai intim în structura materialului la un număr de 5 probe au fost efectuate microfotografiile la microscopul electronic tip BS 613 Tesla la un ordin de mărire de 3700 X. La toate probele deformate la presa cu fricțiune s-a măsurat și calculat mărimea grăunților obținuți după deformare. Asupra acestor măsurători se va reveni pe parcurs.

2.6. Concluzii

- S-a proiectat și s-a realizat o instalație pneumomecanică originală care permite obținerea unor viteze de impact în limitele 10...100 m/s cu o capacitate de încărcare de 100...2000 daN.

- Gama largă de viteze, precum și conținutul variat de carbon în limita a 6 mărci de oțeluri satisface exigențele în ceea ce privește stabilirea interdependenței între factorii fundamentali ai deformării și modificarea proprietăților de material.

- Deformarea prin compresiune este cea mai indicată în cazul prelucrării cu viteze mari de impact întrucât asigură cele mai bune condiții de deformare.

- Noțiunea de viteză de impact se consideră mai proprie decât cea de viteză de deformare.

- S-au efectuat o gamă largă de măsurători care permit o interpretare riguros științifică a rezultatelor obținute.

.

C A P I T O L U L 3

DETERMINAREA TENSIUNILOR INTERNE

3.1. Apariția tensiunilor interne la deformare

Tensiunile interne ca rezultat al deformărilor plastice suferite de epruvetele supuse încercărilor sînt cu atît mai mari cu cît deformarea este mai neuniformă. Obişnuit, aceste tensiuni sînt de sens opus deformației plastice care le-a produs. Astfel, în cazul probelor refulate, fibrele de la suprafață sînt supuse unei stări de tensiuni remanente de întindere, iar cele din centrul piesei unei tensiuni remanente de compresiune. Avînd în vedere modul în care se desfășoară deformarea prin compresiune se poate afirma că tensiunile remanente sînt mai mici la suprafața de impact și de sprijin a epruvetei și mai mari în centrul acesteia unde deformarea este maximă (fig.3.1). După [20], [86] o epruvetă

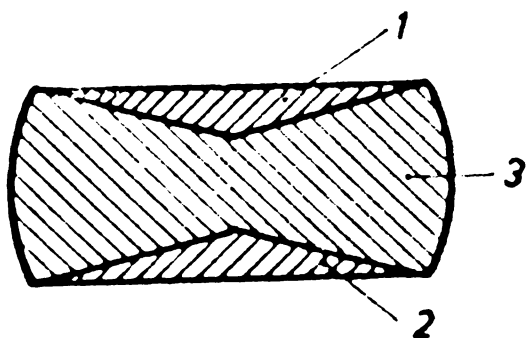


Fig.3.1.

deformată prin compresiune prezintă trei zone distincte. Zonele 1 și 2 nedeformate sau slab deformate datorită frecărilor cu scula de lucru respectiv nicovala, și zona 3 de deformare maximă. Măsurarea durității în zonele 1 și 2 a confirmat forma conică a acesteia, duritatea avînd valori mai mici în centrul epruvetei și mai mari la

marginea și. Au apărut diferențieri ale durității și între cele două zone. Astfel, duritățile măsurate în zona 1 au fost mai mari decît cele măsurate în zona 2. Valorile durităților, mult mai mari decît cele inițiale contrazic afirmația că aceste zone nu s-ar deforma deloc, acceptîndu-se totuși ideea că ele suferă deformații mai mici decît zona mediană a epruvetei. Diferența de duritate dintre zonele 1 și 2 dovedește faptul că zona 1 suferă o deformare mai pronunțată decît zona 2. lucru explicabil prin faptul că zona 2 prezintă o oarecare întîrziere la deformare, intrusit nicovala stă pe loc, ea generînd numai forța de reacțiune care are o anumită întîrziere față de forța activă de impact. Această întîr-

ziere este cu atât mai mare cu cât viteza de impact este mai mare. Acest lucru este dovedit de [5], [85], [86] și de măsurătorile realizate asupra epruvetelor deformate. Se constată astfel că o dată cu creșterea vitezei de impact se schimbă forma epruvetei deformate (fig.3.2). Diametrul d_1 al părții superioare (lovite) este mai

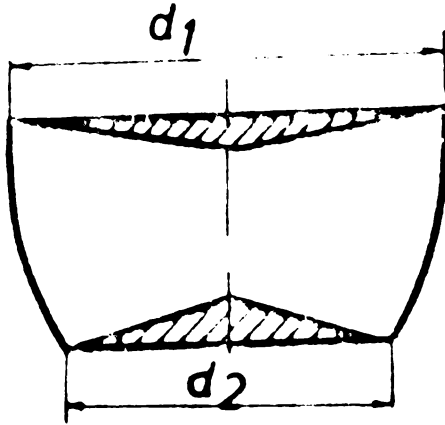


Fig.3.2.

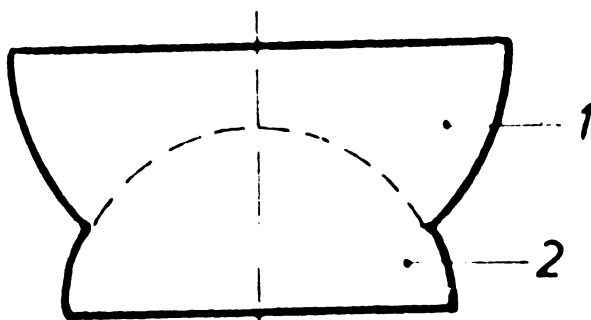


Fig.3.3.

mare decât diametrul d_2 a părții inferioare (de sprijin). Această diferență crește cu creșterea vitezei de impact și a gradului de deformare [5], [85] arată că pentru un oțel cu 0,45 % C la o viteză de impact de 320 m/s și un grad de deformare $\epsilon = 59,7\%$ epruveta are forma din fig.3.3. Intre cele două zone 1 și 2 au loc ruperi de fibraj spărdind discontinuități. Cea mai intensă curgere de material se produce în zona suprafeței de contact sculă-epruvetă. Se confirmă astfel și experimental că o dată cu creșterea vitezei de impact zona 1 va suferi deformații mai mari decât zona 2 și deci diferențele de duritate măsurate se pot considera normale.

Deformările suferite de epruvetele supuse încercărilor de compresiune vor genera tensiuni corespunzătoare cu atât mai mari, cu cât gradul de deformare este mai mare și cu cât viteza de impact este mai mare.

Sistemul de forțe produs de către tensiunile interne (remanente) trebuie să fie în echilibru static, adică forța totală ce acționează asupra unui plan carecare din corpul supus deformării și momentul total al deformării trebuie să fie nule. În cazul epruvetelor supuse refulării obișnuite spectrul de tensiuni se prezintă ca în fig.3.4.

Conform celor de mai sus rezultă că suprafața de sub porțiunea de curbă care reprezintă variația tensiunilor la compresiune trebuie să fie egală cu suprafața de sub porțiunea de curbă care corespunde tensiunilor remanente de întindere. În cazul de-

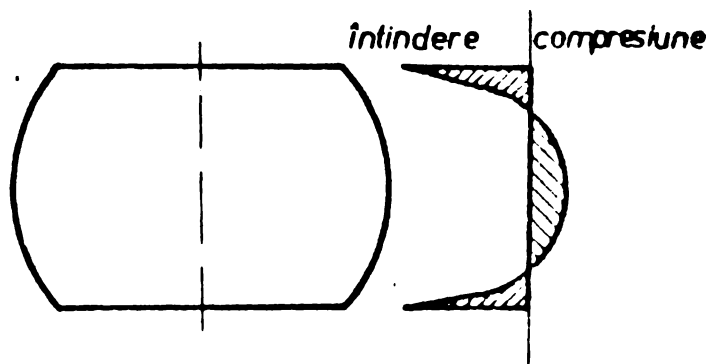


Fig.3.4.

formării cu viteze mari de impact este de așteptat ca spectrul acestor tensiuni să se schimbe radical mergând chiar pînă la inversarea repartiției.

Tensiunile remanente nu trebuie să depășească limita de elasticitate a materialului intrucît la o depășire a acesteia, fără să existe

forțe externe care să se opună tensiunii, aceasta ar fi preluată de deformarea plastică a materialului, pînă va atinge valcarea limitei de curgere. Din această cauză determinarea tensiunilor interne pentru un material deformat este o operație foarte importantă avînd în vedere că ele influențează asupra principalelor proprietăți de material.

Astfel, tensiunile interne favorizează tendința spre fragilizare, fisurare și coroziune a oțelurilor, modifică duritatea și rezistența la oboseală a oțelurilor etc. Aprecierea mărimii acestora permite luarea lor în considerare la proiectarea pieselor în construcția de mașini, astfel încît să se asigure ansamblelor o siguranță maximă în exploatare.

Pentru determinarea tensiunilor interne în literatura de specialitate se citează mai des două metode: Metoda mecanică și metoda de iradiere cu raze X. Ele prezintă anumite caracteristici legate atât de procedeu cît și de natura pieselor asupra cărora se fac măsurătorile.

3.2. Considerații asupra măsurării tensiunilor interne prin metode mecanice

Utilizarea metodelor mecanice de măsurare este legată de distrugerea totală sau parțială a pieselor, iar rezultatele obținute depind în mare măsură de metoda de tăiere și de forma piesei. În [20] se prezintă cazul determinării tensiunilor pe baza măsurării deformațiilor produse cînd corpul este secționat sau găurit și tensiunile existente în interiorul său sînt eliberate. În primul caz tensiunile interne dintr-un cilindru se aseamănă cu un sistem de arcuri (fig.3.5), presupunîndu-se că bara conține tensiuni remanente de compresiune în centru. Prin analogie arcurile din

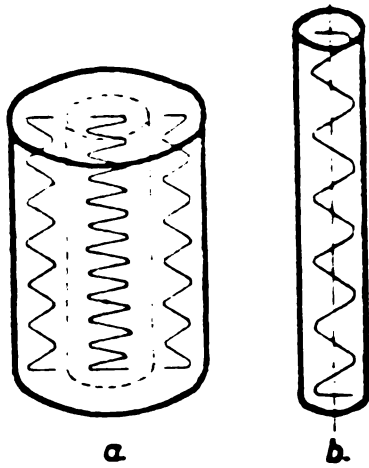


Fig.3.5.

central sînt comprimate, iar cele din exterior întinse (fig.3.5,a). Dacă echilibrul static al forțelor este deranjat prin îndepărtarea arcurilor exterioare, arcurile comprimate din centru se alungesc (fig.3.5,b).

Mărimea alungirilor pe care le suferă arcurile din centru este direct propor-

țională cu forța exercitată asupra lor de către arcurile din exterior.

Alungirea zonei centrale este:

$$d\varepsilon_1 = \frac{dL_1}{L} \quad (3.1)$$

în care dL_1 este lungimea deformată a elementului.

Tensiunile eliberate prin această deformare $\sigma_{rem.}$ sînt legate de legea lui Hooke prin relația:

$$\sigma_{rem} = E \cdot d\varepsilon_1 \quad (3.2)$$

Deoarece cilindrul a fost inițial în echilibru forța din zona centrală a piesei trebuie să echilibreze forța din materialul îndepărtat, adică:

$$P_c = P_{ext} \quad (3.3)$$

Dacă A_0 este aria inițială, A_1 aria rămasă și dA_1 aria îndepărtată, echilibrul forțelor de mai sus se poate scrie:

$$A_1 E \cdot d\varepsilon_1 = \sigma_{ext} \cdot dA_1 \quad (3.4)$$

de unde:

$$\sigma_{ext} = \frac{A_1 \cdot E \cdot d\varepsilon_1}{dA_1} \quad (3.5)$$

Si presupunînd că se îndepărtează succesiv mai multe straturi după același procedeu, rezultă:

$$\sigma_{ext 2} = \frac{A_2 \cdot E \cdot d\varepsilon_2}{dA_2} - E d\varepsilon_1 \quad (3.6)$$

$$\sigma_{ext n} = \frac{A_n \cdot E \cdot d\varepsilon_n}{dA_n} - E(d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + \dots + d\varepsilon_{n-1}) \quad (3.7)$$

și diferențiînd relația (3.7) rezultă:

$$\bar{V} = E \left(A \frac{d\varepsilon}{dA} - \int d\varepsilon \right) = E \left(A \frac{d\varepsilon}{dA} - \varepsilon \right) \quad (3.8)$$

Si astfel ecuația (3.8) poate fi utilizată pentru determinarea tensiunilor remanente longitudinale de pe orice punct de pe raza barei.

O altă metodă aplicabilă la corpurile cilindrice la care tensiunile remanente variază în direcție radială, dar sînt cunoscute pe direcțiile longitudinală și circumferențială este redată în [20] [77]. În acest caz, se execută pentru început un orificiu axial în bară. După aceea cu ajutorul unui burghiu se îndepărtează straturi succesive de material de la interiorul cilindrului gol, avînd însă grijă deosebită pentru evitarea supraîncălzirii. Între două măsurători ale deformației trebuie îndepărtat aproximativ 5 % din aria secțiunii transversale. Pentru a elimina efectele de capăt, lungimea epruvetei trebuie să fie cel puțin de 3 ori mai mare decît diametru. După ce se îndepărtează fiecare strat de la interior se fac măsurători ale lungimii longitudinale ε_L și circumferențiale ε_t :

$$\varepsilon_L = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_t = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (3.10)$$

Variațiile lungimii L și diametrului D pot fi măsurate cu ajutorul micrometrului sau pentru o precizie mai mare cu ajutorul traductorilor tensometrici rezistivi [21], [47], lipiți pe direcțiile longitudinale și circumferențiale ale barei.

Dacă se notează după [77] cu:

$$\Delta = \varepsilon_L + \mu \varepsilon_t \quad (3.11)$$

$$\square = \varepsilon_t + \mu \varepsilon_L \quad (3.12)$$

atunci tensiunile longitudinale, circumferențiale și radiale pot fi exprimate cu relațiile:

$$\bar{V}_L = E' \left[(A_0 - A) \frac{d\Delta}{dA} - \Delta \right] \quad (3.13)$$

$$\bar{V}_t = E' \left[(A_0 - A) \frac{d\square}{dA} - \frac{A_0 + A}{2A} \square \right] \quad (3.14)$$

$$\sqrt{r} = E' \left(\frac{A_0 - A}{2A} \theta \right) \quad (3.15)$$

unde:

$$E' = \frac{E}{1-\mu^2}; \quad A_0 = \text{aria inițială a cilindrului}; \quad A = \text{aria}$$

porțiunii din cilindru îndepărtat prin găurire; μ - coeficient de contracție transversală.

Pentru a se utiliza ecuațiile prezentate este convenabil să se reprezinte parametrii deformației θ și \wedge în funcție de aria suprafeței îndepărtate prin găurire.

Pantele curbelor rezultate sînt utilizate în ecuațiile de mai sus. Pentru determinarea tensiunilor din lungul axei barei sau din interiorul tubului, precum și tensiunile pe suprafața exterioară a barei este necesar să se extrapoleze curbele $\wedge = f(A)$ și $\theta = f(A)$ pînă la $A = 0$ respectiv $A = A_0$.

Metodele amintite prezintă însă unele inconveniente determinate atît de forma epruvetelor cît și de mijloacele de măsurare. În ceea ce privește forma și mărimea epruvetelor în cazul deformării prin compresiune acestea se aplatizează puternic astfel păstrarea unui anumit raport între lungime și diametru devine greoale sau imposibil. Acest lucru datorită și faptului că de exemplu, în cazul încercării prin refulare, raportul optim între lungime și diametru este de 1,5, un raport mai mare prezentînd pericolul de flambaj. Ori, în cazul ultimei metode prezentate pentru evitarea efectului de capăt semnalat, lungimea epruvetei trebuie să fie de cel puțin de 3 ori mai mare decît diametrul ei.

Metodica măsurării deformațiilor apărute este de asemenea foarte greoale și în plus, poate introduce multe erori.

Execuția aparatului foarte complexă necesară pentru asigurarea unei precizii maxime, o problemă aparte în cazul refulării, o constituie variațiile mici ale deformațiilor care pot apărea pentru grade apropiate de deformare respectiv conținuturi apropiate în C, elemente de care depind în mod deosebit tensiunile interne.

Verificarea mărimii tensiunilor interne în funcție de factorii mai sus amintiți și în plus, și în funcție de modul de deformare (presă cu fricțiune sau diferite viteze de impact), ridică foarte mult numărul de probe asupra cărora trebuie să se execute măsurătorile astfel încît, practic, utilizarea metodelor expuse devine nerațională.

3.3. Determinarea tensiunilor interne cu ajutorul razelor X

Mai simplă și mai eficientă în același timp este metoda de determinare a tensiunilor interne cu ajutorul razelor X. În acest caz obiectul de cercetat rămâne intact și măsurarea poate fi realizată în orice punct de pe suprafața obiectului întrucît baza de măsurare este foarte mică iar tensiunile se determină într-un strat foarte subțire.

Măsurarea tensiunilor remanente cu ajutorul razelor X utilizează spațiul interatomic a unora dintre planele rețelei ca lungime etalon pentru măsurarea alungirilor. În esență, se determină spațiul interatomic, pentru un anumit plan al rețelei, în situația în care corpul este nesolicitat și apoi determinarea se face pentru materialul care conține tensiuni remanente. Variația spațiului interatomic al rețelei este legat de mărimea tensiunilor remanente. Deoarece razele X pătrund în interiorul materialului pe o adîncime foarte mică prin metoda bazată pe razele X se măsoară tensiunile remanente de la suprafață. Întrucît în mod obișnuit nu există tensiuni normale pe o suprafață liberă, metoda permite determinarea numai a tensiunilor liniare sau plane. Deoarece proba rămîne intactă metoda permite examinarea ulterioară a pieselor ce s-au rupt în exploatare. Suprafața de măsurare este localizată deoarece fasciculul de raze X acoperă o zonă cu diametrul de oca. 3 mm. Cum metoda se bazează în esență pe o măsurare foarte exactă a modificării poziției razei X, reflectată de o serie de plane ale rețelei, din cauza prezenței lungirii elatice este necesar să se repereze exact liniile de difracție. Utilizarea filmului pentru înregistrarea razelor X reflectate cere ca epruveta să aibă linii de difracție clare dacă se urmărește măsurarea cu precizie a lungirilor în rețea. Întrucît materialul deformat puternic la rece dă linii largi de difracție, tensiunile remanente în această importantă categorie de produse se determină cu o carecare aproximație.

Pentru calcul se pornește de la legea lui Bragg [53], [99] care exprimă relația ce există între distanța d , dintre o serie dată de plane, lungimea de undă λ a razelor X, ordinul de difracție n și unghiul de difracție măsurat θ :

$$n \lambda = 2d \sin \theta \quad (3.16)$$

Măsurarea constă în determinarea valorilor pentru o tensiune liniară sau suma tensiunilor principale $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$. În cazul

metodei propusă de [77], [95] se fac două determinări cu ajutorul razelor X ale interspațiilor din cadrul rețelei, d, orientind fasciculul de raze X normal pe suprafața piesei. O măsurare se face pentru determinarea valorii d, corespunzătoare suprafeței tensionate, în timp ce prin a doua se determină valoarea d_0 ce corespunde situației în care materialul este lipsit de tensiuni. Constanta rețelei corespunzătoare materialului nesolicitat se obține scoțind un mic dop de metal din epruvetă, fie detensionind epruveta pe cale termică. Lungirea normală la suprafața, care se măsoară cu ajutorul razelor X este ϵ_3 :

$$\epsilon_3 = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad (3.17)$$

Ținind cont de teoria elasticității lungirea pe direcția normală la o suprafață liberă poate fi exprimată sub forma:

$$\epsilon_3 = - \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)\mu}{E} \quad (3.18)$$

Prin urmare suma tensiunilor principale aflate în zona suprafeței epruvetei este dată de :

$$\sigma_1 + \sigma_2 = - \frac{E(d_1 - d_0)}{\mu d_0} \quad (3.19)$$

O ecuație mai generală pentru determinarea tensiunilor principale pe o suprafață cu ajutorul razelor X, se obține luind în considerare cazul general ce corespunde tensiunii principale.

Starea generalizată corespunzătoare tensiunilor principale ce acționează pe suprafață poate fi reprezentată în trei dimensiuni, printr-un elipsoid (fig.3.6). Tensiunea normală

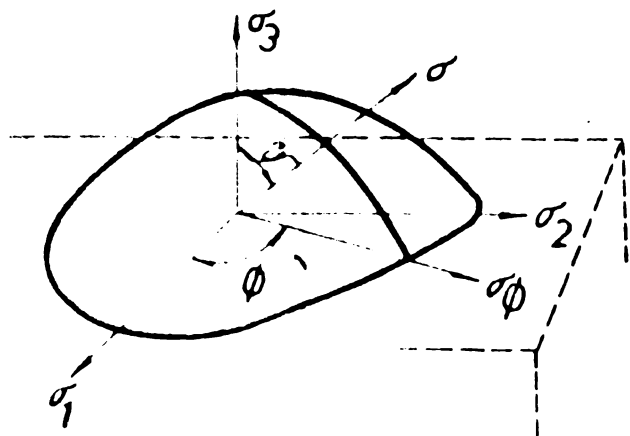


Fig.3.6.

dată de către coordonatele ψ și φ poate fi exprimată în funcție de cele trei dimensiuni principale și de cosinusurile lor directe l, m și n și prin relația:

$$\sigma = l^2 \sigma_1 + m^2 \sigma_2 + n^2 \sigma_3 \quad (3.20)$$

în care:

$$l = \sin \psi \cos \varphi; \quad m = \sin \psi \sin \varphi;$$

și $n = \cos \psi$.

Deoarece metoda bazată pe razele X permite numai determinarea tensiunilor remanente din zona suprafeței, $\sigma_3 = 0$. Ținând seama de fig. 3.6, aceasta cere ca $\psi = 90^\circ$. Prin urmare ecuația (3.20) se simplifică pentru obținerea tensiunilor după direcția φ :

$$\sigma_\varphi = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi \quad (3.21)$$

Analog se poate scrie ecuația și pentru lungirile principale:

$$\varepsilon = l^2 \varepsilon_1 + m^2 \varepsilon_2 + n^2 \varepsilon_3 \quad (3.22)$$

Dacă se înlocuiește în relația (3.22) valorile cosinurilor directoare împreună cu valorile lui ε_1 și ε_2 în funcție de tensiunile principale se obține:

$$\varepsilon - \varepsilon_3 = \frac{1 + \mu}{E} \sin^2 \psi (\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi) \quad (3.23)$$

Inlocuind (3.21) în (3.23) obținem:

$$\sigma_\varphi = \frac{\varepsilon - \varepsilon_3}{\sin^2 \psi} \cdot \frac{E}{1 + \mu} \quad (3.24)$$

Dar:

$$\varepsilon - \varepsilon_3 = \frac{d_\psi - d_0}{d_0} - \frac{d_1 - d_0}{d_0} - \frac{d_\psi - d_1}{d_0} \quad (3.25)$$

în care: d_0 este spațiul interatomic în cazul în care metalul nu este solicitat; d_1 - spațiul interatomic pe direcția definită de unghiurile ψ și φ .

Deoarece precizia ecuației (3.25) este determinată în primul rând de către precizia cu care este cunoscut numărătorul, se poate înlocui la numitor d_0 prin d_1 fără ca prin aceasta rezultatul să fie mult modificat. Această înlocuire simplifică mult procedura experimentală deoarece elimină necesitatea efectuării de măsurători pe epruvete detensionate. Prin urmare, tensiunile la suprafața epruvetei pentru orice orientare având unghiul de azimut φ , este legată de măsurările spațiilor interatomice ale rețelei efectuate cu ajutorul razelor X prin următoarea ecuație:

$$\sigma_\varphi = \frac{d_\psi - d_1}{d_1} \cdot \frac{E}{1 + \mu} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi} \quad (3.26)$$

Numărul necesar de determinări făcute cu ajutorul razelor X depinde de informațiile ce se cunosc. Pentru un unghi φ cunoscut se fac două expuneri pentru determinarea tensiunii pe direcția φ . Una dintre expuneri se face normal pe suprafață $\varphi = 0$, pentru a se obține d_1 ; cea de a doua expunere se face pentru aceeași valoare a lui φ dar înclinând fasciculul cu unghiul ψ față de normală. În general, se utilizează unghiul $\psi = 45^\circ$ pentru a doua expunere, pe baza căreia să se obțină valoarea d_ψ . Dacă se cunosc direcțiile celor două tensiuni principale σ_1 și σ_2 de la suprafața piesei, așa cum este deseori cazul pentru tensiunile remanente produse prin operația de deformare plastică, este suficient să se facă trei expuneri pentru a se determina complet starea plană de tensiune din punctul respectiv al suprafeței. Pe baza expunerii cu fasciculul de raze perpendicular se determină d_1 , a doua expunere cu $\psi = 45^\circ$ în direcția φ_1 permite determinarea lui σ_1 , pe baza ecuației (3.20) în timp ce a treia expunere cu $\psi = 45^\circ$ pe cea de a doua direcție principală φ_2 permite determinarea lui σ_2 din aceeași ecuație. Tensiunea σ_3 este nulă, deoarece măsurările se fac pe o suprafață liberă. Dacă este necesar să se determine atât mărimea cât și direcția lui σ_1 și σ_2 , sînt necesare patru expuneri. Trebuie determinate trei componente arbitrare ale tensiunii pe trei direcții cunoscute φ , la care se adaugă o expunere cu fascicul de raze normale pe suprafață pentru a determina pe d_1 . Se obișnuiește să se facă aceste expuneri la unghiurile φ , $\varphi + 60^\circ$ și $\varphi - 60^\circ$, luînd $\psi = 45^\circ$ pentru fiecare valoare a lui φ .

În afara dificultăților legate de măsurarea precisă a valorilor spațiilor interatomice în cazul metalelor deformate puternic se mai semnalează faptul că există o oarecare imprecizie și în legătură cu valorile modului de elasticitate E și a coeficientului de contracție transversală μ care trebuie utilizate în ecuația (3.26). Acest lucru, datorită faptului că aceste constante variază sensibil în funcție de direcția cristalografică astfel încît utilizarea valorilor lor medii determinate prin încercări la tracțiune este problematică. Cu toate deficiențele semnalate, se apreciază totuși că metoda cu raze X este cea mai eficientă. Majoritatea cercetătorilor care au utilizat metodele bazate pe razele X pentru determinarea tensiunilor remanente consideră că utilizarea unor valori medii pentru E și μ nu introduce erori mari. Majorarea preciziei de măsurare prin determinarea concretă a constantelor E și μ pentru fiecare material în parte complică metoda și rezultatele obținute nu justifică

cercetările suplimentare.

În lucrare s-a ales metoda de determinare a tensiunilor prin metoda razelor X din următoarele considerente:

- posibilitatea practică de aplicare a metodei datorită epruvetelor puternic aplatizate;
- posibilitatea investigării unui număr nelimitat de epruvete întrucât acestea rămân intacte, asupra lor putându-se efectua și alte măsurători;
- precizia măsurătorilor mai bună în cazul metodei bazate pe raze X;
- existența unui laborator pentru determinarea tensiunilor în cadrul catedrei de Fizică de la Universitatea din Timișoara.

Pentru testarea diferiților factori de influență (grad de deformare ϵ , conținut în C, viteză de impact) s-au făcut următoarele măsurători:

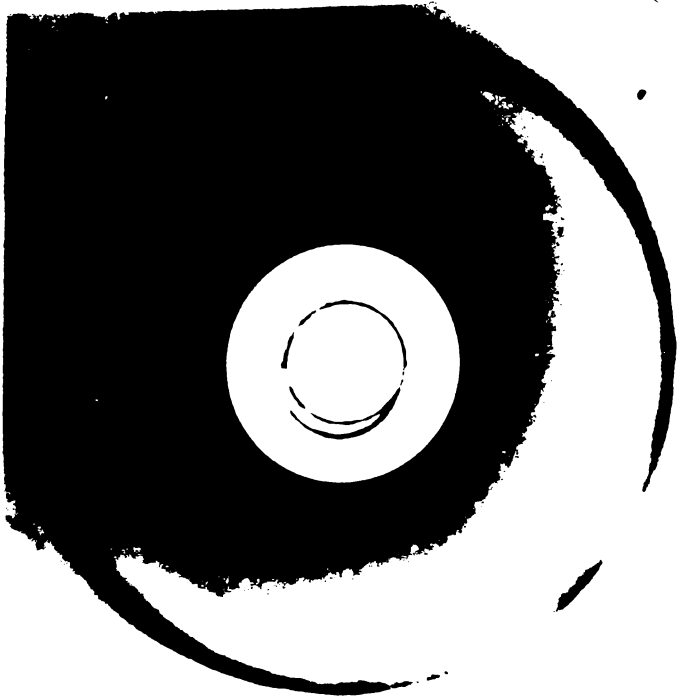
- determinarea tensiunilor remanente pentru OLC 35 deformat la presiune cu fricțiune pentru 5^{te} de deformare diferite $\epsilon_1 \dots \epsilon_5$;
- determinarea tensiunilor remanente pentru OLC 10; 15; 25; 35; 60 pentru același grad de deformare ϵ , deformat la presa cu fricțiune;
- determinarea tensiunilor remanente pentru OLC 35; 45 și 60 deformat cu viteza de impact de 38,7 m/s și masa pistonului 2,680 kg și viteza de impact de 58 m/s și masa pistonului 1,200 kg;

În mod concret s-a determinat componenta în plan σ_{ψ} a tensiunii în punctul în care s-a făcut iradierea. Pentru calculul tensiunii σ_{ψ} s-a folosit relația (3.26) făcându-se două röntgenografii, una normală pe suprafața probei pentru determinarea componentei d_1 și a doua înclinată cu unghiul $\psi = 40^\circ$ față de normală pentru determinarea lui d_{ψ} .

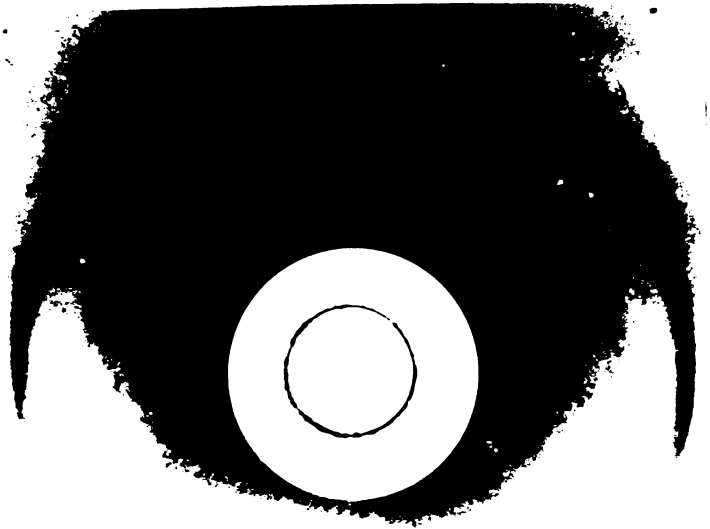
Unghiul $\psi = 40^\circ$ care complică calculele efectuate în loc de $\psi = 45^\circ$ a fost impus de condițiile concrete de măsurare, care datorită formei epruvetei nu permitea alegerea poziției la $\psi = 45^\circ$.

Pentru obținerea imaginilor de difracție s-a folosit într-un montaj simetric metoda refluxului înapoi. Pentru iradiere s-a folosit o instalație de raze X tip TUR 100 cu anticatod de fier ($\lambda = 1,93597 \text{ \AA}$). Înregistrarea s-a făcut pe un film röntgen Ferrania de mare sensibilitate, ceea ce a permis reducerea foarte pronunțată a timpului de expunere. Prin încercări succesive s-a ajuns ca valoarea acestui timp să fie de maximum 4 ore.

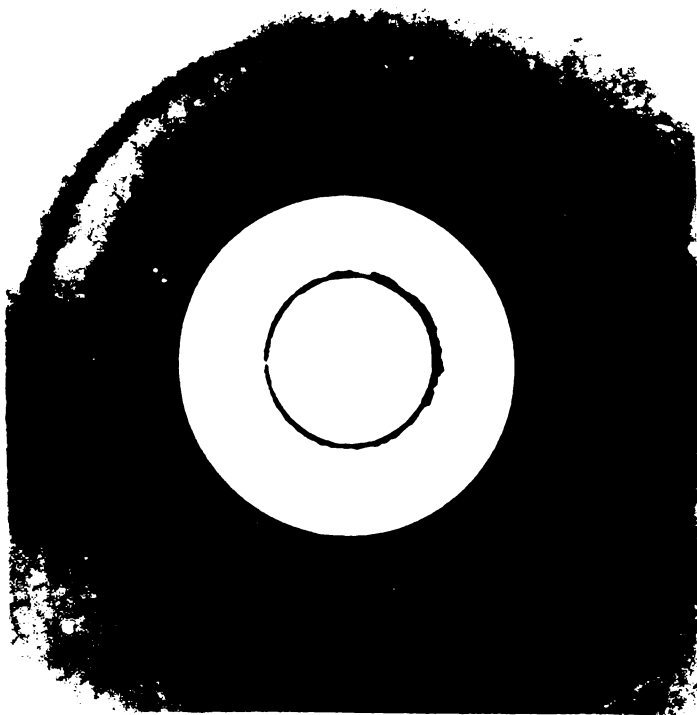
Imaginile de difracție obținute se dau în fig. 3.7. Determinarea cu ajutorul unui microfotometră a razei R a cercurilor de difracție



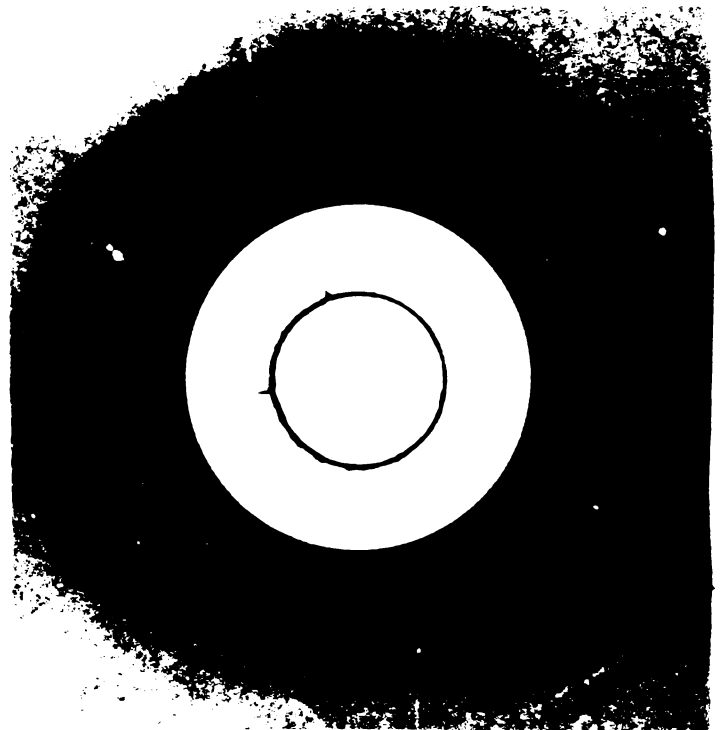
OLC 35 $\Sigma = 28,6\%$
 $\psi = 0$



OLC 35 $\Sigma = 28,6\%$
 $\psi = 40^\circ$

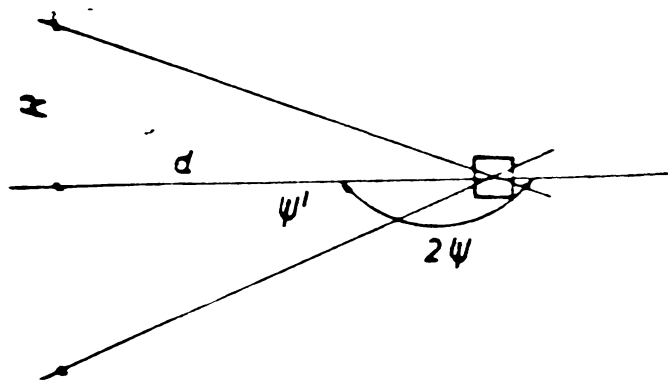


OLC 35 $\Sigma = 64\%$
 $\psi = 0$



OLC 35 $\Sigma = 64\%$
 $\psi = 40^\circ$

obținute pe fila și avind în vedere fig.3.8 se obține:



$$\sin \psi' = \frac{R}{d}$$

$$\psi' = \pi - \frac{\psi}{2}$$

și utilizind relația de difracție a lui Bragg obținem valorile corespunzătoare pentru $d\psi$ și d_1 avind în vedere că sînt două imagini de difracție. Introducînd valorile obținute în relația (3.26) obținem corespunzător

Fig.3.8.

valoarea tensiunii σ_{ψ} . Condițiile de măsurare, precum și rezultatele obținute în urma calculelor efectuate sînt date în tab.3.1.

Condițiile de măsurare și valorile σ_{ψ} : TABELUL 3.1.

Nr. ort.	Material	Gradul de deformare ϵ %	Condițiile de deformare		Tensiunea σ_{ψ} daN/cm ²
			Presă cu fricțiune	Viteză de impact v m/s	
1.	OLC 35	28,6			24,6
2.	OLC 35	46,4			51,9
3.	OLC 35	57,0	P.F.		78,8
4.	OLC 35	61,0			102,1
5.	OLC 35	64,4			173,8
6.	OLC 10	53,3			45,4
7.	OLC 15	53,3			62,8
8.	OLC 25	53,3	P.F.		81,5
9.	OLC 35	53,3			100,7
10.	OLC 60	53,3			196,0
11.	OLC 35	54,0		38,7	143,2
12.	OLC 35	58,5		58,0	190,5
13.	OLC 45	52,1		38,7	60,2
14.	OLC 45	56,6		58,0	126,9
15.	OLC 60	50,5		38,7	215,0
16.	OLC 60	54,0		58,0	248,2

Pentru constantele μ și E s-au utilizat valorile medii $\mu = 0,28$ și $E = 20.000 \text{ daN/mm}^2$ conform STAS pentru materialele utilizate.

3.3.1. Interpretarea rezultatelor.

Cu ajutorul valorilor obținute se trasează graficul de variație a tensiunii $\bar{\sigma}_\psi$ în funcție de gradul de deformare ϵ pentru OLC 35 (fig.3.9) și a variației tensiunii $\bar{\sigma}_\psi$ în funcție de % C pentru același grad de deformare $\epsilon = 53,3\%$ (fig.3.10).

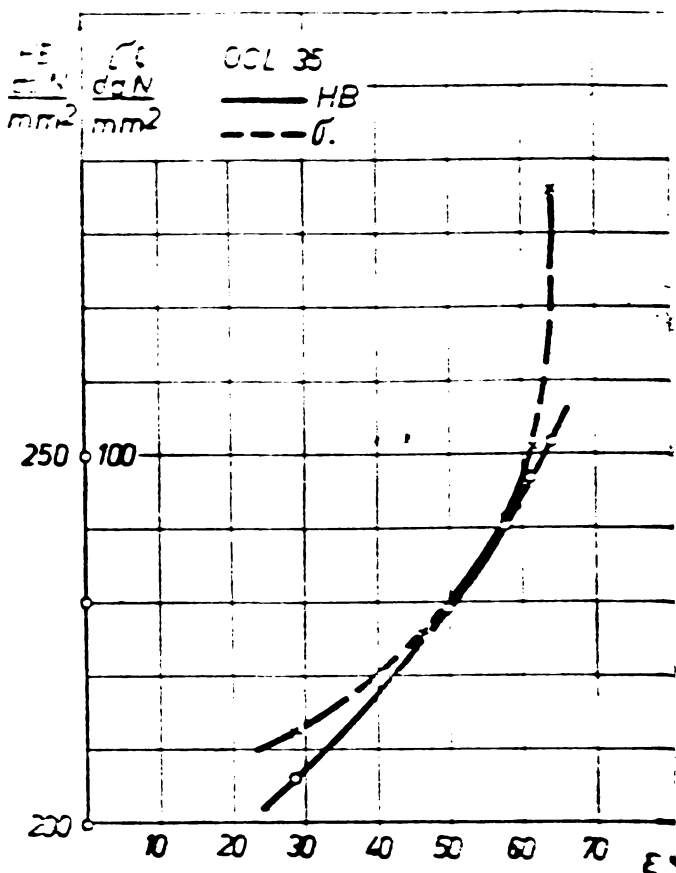


Fig.3.9.

Pe aceleași grafice s-a trasat variația durității HB în funcție de aceiași factori.

Luată separat tensiunea variază normal ascendent o dată cu creșterea gradului de deformare. Se observă totuși o influență pronunțată a gradului de deformare ϵ pentru valori ale acestuia mai mari de 50 % (fig.3.9). Din analiza relației (3.26) rezultă că factorii de variație sînt d_ψ și d_1 . O dată cu creșterea gradului de deformare apare normală atât creșterea lui d_ψ cît și a lui d_1 . Pentru grade de deformare ϵ mai mari de 50 % conform relației (3.26) și respectiv fig.3.9 se constată o creștere mai pronunțată pentru d_ψ întrucît mărirea valorii lui $\bar{\sigma}_\psi$ impune mai ales creșterea diferenței $d_\psi - d_1$. Se deduce că gradul de deformare influențează mai ales asupra creșterii distanței interatomice definită de unghiul ψ . În ceea ce privește conținutul în C se observă că acesta se face simțit pentru

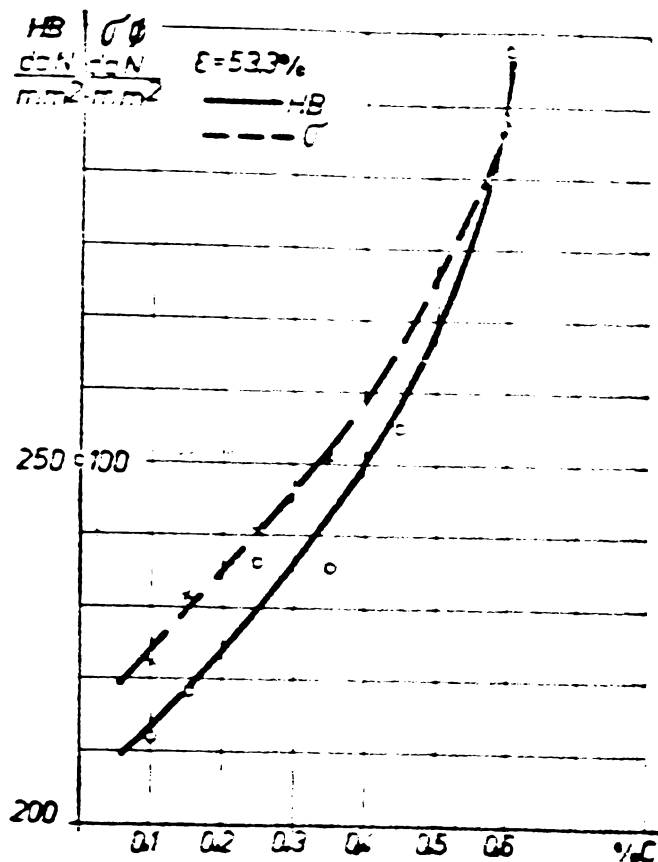
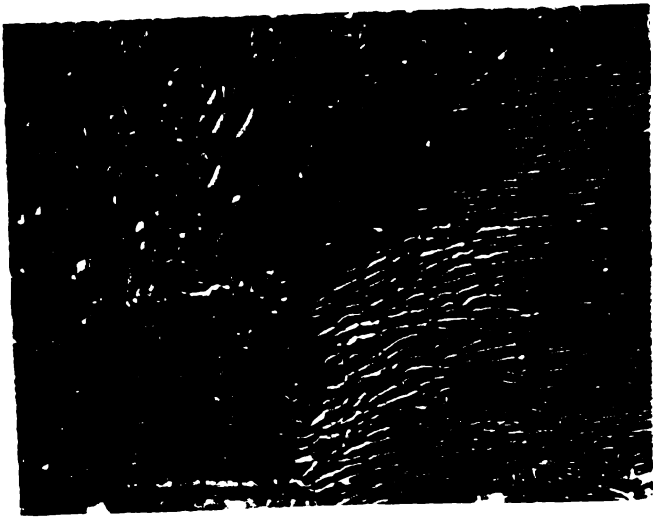


Fig.3.10.

procente mai mari de 0,45 % oind curba de variație se abate de la variația aproape liniară pentru o cantitate de C = 0,1...0,35 % la o variație parabolică pentru procentaje mai mari de 0,45 % C (fig.3.10).

Dacă se urmărește influența tensiunii asupra durității se observă că tensiunea influențează hotărâtor asupra durității pentru grade de deformare mai mici de 40 % și mai mari de 60 %. Bineînțeles că ea se cumulează factorilor suplimentari care intervin (creșterea numărului de dislocații, influenței limitei grăunților, apariția scadelor etc.). Din fig.3.10 rezultă că tensiunea variază aproape paralel cu duritatea pînă la un conținut în C mai mic de 0,45 %. După această valoare duritatea are tendința să crească mai mult decît tensiunea. Acest lucru dovedește că pentru procentaje mai mari de 0,45 % C, conținutul în C este factorul principal care influențează duritatea. Aceasta datorită mai ales structurii mai fine care se obține precum și carburilor care iau naștere și care se dispersează mai fin în masa metalului de bază. Creșterea valorii tensiunilor interne, pe măsura ridicării conținutului în C, în cazul deformării cu același grad de deformare se explică prin ridicarea cantității de perlită din structură și în consecință și a fazelor dure care suferă fragmentări și orientări noi [100] (fig.3.11).

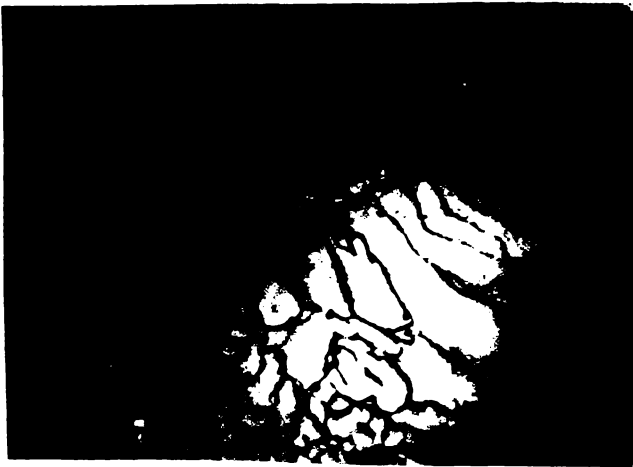




OLC 35 × 3800
Deformare presă
 $\Sigma = 57\%$



OLC 35 × 3800
Deformare presă
 $\Sigma = 64\%$



OLC 35 × 3800
Deformare $v_i = 58 \text{ m/s}$
 $\Sigma = 58\%$



OLC 45 × 3800
Deformare $v_i = 58 \text{ m/s}$
 $\Sigma = 58,6\%$

Fig.3.11.

Din fig.3.11 care reprezintă microstructuri realizate la microscopul electronic pentru câteva situații specifice de deformare, se observă de asemenea că pentru cazurile prezentate nu apar faze noi după deformare.

Măsurarea tensiunilor interne permite evidențierea și a influenței vitezei de impact asupra caracteristicilor deformării. Astfel, la deformarea cu viteza de impact de 38,7 m/s și 58 m/s tensiunile măsurate sînt net superioare celor de la deformarea cu presa cu fricțiune pentru aproximativ același grad de deformare Σ .

Acest lucru rezultă clar din tab.3.2.

TABELUL 3.2.

Valoarea tensiunii σ în funcție de viteza de impact pentru OLC 35 și OLC 60

Material	Deformare Presă cu fricțiune		38,7 m/s		58 m/s	
	ϵ	σ	ϵ	σ	ϵ	σ
OLC 35	53,3	100,7	54	143,2	58	190,5
OLC 60	53,3	196	50,5	215,0	54	248,2

Se confirmă în că o dată oă viteza de impact duce la creșterea caracteristicilor mecanice a materialului și oă această creștere este proporțională cu viteza de impact aplicată.

Din tabelul 3.1 prezentat se constată anumite abateri ale măsurătorilor efectuate. Astfel, la OLC 35 se obțin două valori diferite ale tensiunii σ_p pentru același utilaj de deformare și aproximativ același grad de deformare (poz.3 respectiv 9 tab.3.1). Faptul acesta confirmă în plus neomogenitatea deformării plastice în general. Cum epruvetele au fost diferite și poziția punctelor în care s-a făcut măsurarea arbitrară rezultă ca normală posibilitatea obținerii valorilor de mai sus .

O comportare ieșită din comun se constată la OLC 45. Pentru acesta nu s-au putut determina valorile tensiunilor la deformarea cu presa cu fricțiune iar la deformarea cu viteze mari de impact valorile obținute sînt mai mici decît cele obținute pentru OLC 35 în aceleași condiții de deformare (poz.13,14 respectiv 11 și 12 din tab.3.1).

Pentru cazul deformării la presa cu fricțiune, imposibilitatea măsurării tensiunilor remanente se poate datora liniilor largi de difracție prezentate de material în stare deformată. La viteze mari de impact se pare oă se constată o apropiere a liniilor de difracție ceea ce permite măsurarea tensiunilor remanente. Valorile mai mici obținute trebuie puse pe seama altor factori.

Urmărind evoluția granulației se observă oă aceasta variază în limite foarte mici $2,2 \dots 1,3 \text{ mm} \cdot 10^{-2}$. Cum grăunții influențează direct asupra tensiunilor residuale, rezultă oă în cazul nostru influența este slabă și oă valorile mai mici obținute se justifică. Constatarea este confirmată și teoretic. Se afirmă astfel, oă la o granulație fină (în cazul nostru OLC 45) gradul de ecruisare resul-

tat este mai mic.

3.3. Concluzii

- Deformarea plastică este însoțită întotdeauna de apariția tensiunilor interne, cu atât mai mari cu cât conținutul în C respectiv viteza de impact sînt mai mari.

- Metodele mecanice de determinare a tensiunilor interne sînt greoaie și impun condiții speciale de mărime a probelor.

- Metoda de determinare a tensiunilor cu raze X se pretează pentru orice fel de probe, asupra acestora putîndu-se efectua și alte măsurători.

- Prin reducerea la maximum a timpilor de expunere datorită măririi sensibilității filmelor röntgen, poate crește foarte mult numărul de probe asupra cărora se execută măsurarea. În felul acesta se obține un volum mare de date pentru interpretarea exactă și corectă a fenomenelor apărute.

- Eventualele neconcordanțe apărute se justifică prin condițiile de deformare și de măsurare a tensiunilor.

.

C A P I T O L U L 4

EVOLUTIA GRANULATIEI SI ROLUL LIMITELOR DE GRAUNTI
IN PROCESUL DE DEFORMARE

4.1. Influența granulației asupra caracteristicilor
mechanice ale materialului

Studiul evoluției granulației este necesar întrucât mărimea grăunților influențează direct proprietățile mecanice ale metalului. Astfel, este influențată duritatea, limita de curgere, caracterul de deformare plastică a oțelurilor etc. După [12], [116] în faza inițială de deformare a policristalului grăunții se comportă fiecare ca un monocristal separat și această comportare este cu atât mai liberă cu cât dimensiunile lor sînt mai mici. Duritatea în grăunte variază în funcție de mărimea acestuia conform cu diagrama reprezentată în fig.4.1. Duritatea medie este cu atât mai mare cu

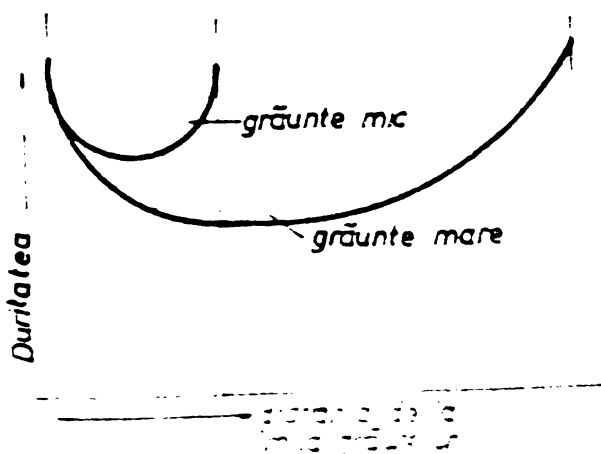


Fig.4.1.

cît este mai mic grăuntele. Mărimea grăuntelui influențează de asemenea limita de curgere a materialului. În acest sens se dau diferite relații de calcul a lui σ_0 în funcție de dimensiunea d a grăuntelui.

Astfel, [20] , [64] dă relația:

$$\sigma_0 = \sigma_1 + k_y \cdot d^{-1/2} \quad (4.1)$$

în care:

σ_0 - limita de curgere; d -diametrul mediu al grăuntelui; σ_1, k_y - constante.

O altă relație întilnită [110], [117] este:

$$\sigma_p = \sigma_{0(p)} + k_p \cdot d^{-1/2} \quad (4.2)$$

în care: σ_p este rezistența la deformare plastică pentru oțelurile cu conținut mediu de C. Se admite $k_p = 1/2 k_y$.

În general, se consideră că rezistența la deformare plastică este o consecință a rezistenței limitei grăunților care frînează

curgerea plastică și conduce la apariția unor eforturi critice concentrate necesare propagării deformației de la un grăunțe la altul [116].

Alți autori arată că rezistența la deformare este dependentă atât de mărimea grăuntelui, cât și de densitatea de dislocații ρ din grăunte. În acest sens pentru calculul rezistenței la deformare se propune relația [110]:

$$\sigma_d = \sigma_{10} + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho} \quad (4.3)$$

în care: G - modulul de elasticitate transversal; b - vectorul Bürgers de dislocații; α - constantă; σ_{10} - efortul unitar la forfecare intergranulară.

sau:

$$\sigma_d = k \cdot \epsilon^n \quad (4.4)$$

în care: k - constantă; ϵ - gradul de deformare; n - constantă care depinde atât de ρ cât și de σ_{10} .

Mărimea grăunților are de asemenea influență asupra capacității de deformare plastică și respectiv asupra mărimii gradului de ecruisare. Coeficientul de ecruisare C se poate determina în funcție de mărimea grăuntelui cu relația [110], [117]:

$$C = \frac{5}{10 + \frac{1}{\sqrt{d}}} \quad (4.5)$$

Se observă că pe măsura creșterii diametrului grăuntelui, creșterea coeficientului de ecruisare al materialului și ca atare se indică limitarea gradelor de deformare plastică a materialului. Adică, pentru grade mici de deformare se recomandă ca structura inițială a metalului să aibă grăunți cât mai mari. Acest lucru se obține printr-un tratament de recoacere la temperaturi ridicate. Din relația (4.5) se deduce logic că pe măsură ce grăunții au dimensiuni mai mici coeficientul de ecruisare scade și deci există posibilitatea obținerii unor grade mai mari de deformare pentru o structură inițială fină. Un factor important de influență a mărimii grăunților este duritatea, a cărei evoluție caracterizează corespunzător comportarea la deformare a materialului. Pentru ilustrarea acestui fapt s-a măsurat evoluția granulației pe microfotografiile obținute pentru toate oțelurile luate în studiu la diferite grade de deformare atât la deformarea cu presa cu fricțiune cât și la deformarea cu diferite viteze de impact.

Se precizează că nu au existat deosebiri esențiale în ceea ce privește mărimea grăunților la probele deformatate la presa cu fricțiune și cele deformatate la diferite viteze de impact. Din acest motiv rezultatele măsurătorilor efectuate sînt trecute în tab.4.1. numai pentru cazul de deformării la presa cu fricțiune ele fiind variabile și pentru celelalte cazuri de deformare utilizate.

TABELUL 4.1.

Evoluția mărimii grăunților $d = f(\varepsilon)$

Nr. crt.	Material	Duritatea inițială daN/mm ²	Grad de deformare ε %	Duritatea ₂ HB daN/mm ²	Diametrul mediu al grăunțului mm.10 ⁻²
1	2	3	4	5	6
1.	OLC 10	120	35,8	190	5,4
2.			53,3	213,5	3,1
3.			62,8	216	2,6
4.			69,5	224	2,25
5.			74,5	231,5	2,2
6.	OLC 15	138	29,4	197,5	3,3
7.			49,1	217,5	2,35
8.			57,8	228	2,1
9.			65,65	240	1,7
10.			70,85	241	1,7
11.	OLC 25	176	27,65	208,5	3,6
12.			43	218	3,0
13.			53	231	2,5
14.			61,4	246,3	2,25
15.			67,2	248	2,25
16.	OLC 35	183	24,17	209	4,0
17.			40,30	221	3,0
18.			50,4	228,5	2,5
19.			58,6	244	2,3
20.			65,25	251,5	2,0
21.	OLC 45	205	22,5	213	2,2
22.			38,15	231,5	1,85
23.			47,9	244	1,5
24.			54,4	254	1,4
25.			60,25	259	1,3

1	2	3	4	5	6
26.	OLC 60	259	17,55	269,5	10
27.			30	280	8,5
28.			39,85	296	7,25
29.			47,5	296,5	6,25
30.			52,3	311,5	6,1

Cercetările metalografice scot de asemenea în evidență faptul că apare o orientare a granulației perpendiculară pe direcția de prelucrare.

Făcîndu-se cîte două microfotografii, una în zona centrală și alta în zona laterală a probei deformată, se confirmă și în acest fel neomogenitatea deformării plastice suferite de material. Obişnuit la refulare se deformează mai mult zonele laterale și mai puțin zona centrală. Acest lucru se poate urmări în fig.4.2...4.7 unde se observă deosebiri între forma și mărimea grăunților obținuți la diferite grade de deformare.

Pentru corelarea rezultatelor obținute în diagramele din fig.4.8 și 4.9 se trasează curbele de variație ale durității HB în funcție de mărimea grăunților d . Pentru o mai mare claritate diagramele se trasează pentru cîte trei oțeluri grupate în ordinea conținutului în C,

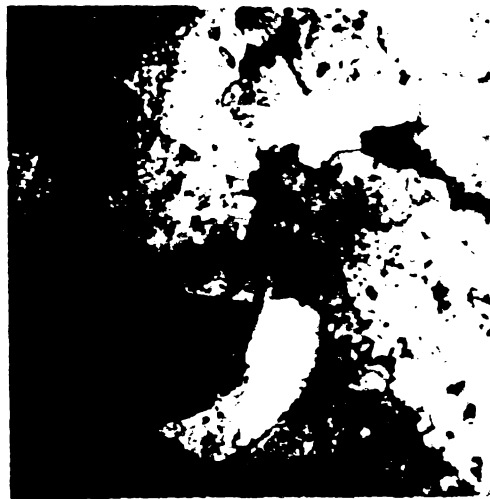
Atît din tab.4.1 cît și din fig.4.8 și 4.9 rezultă că asupra evoluției mărimii grăunților o influență importantă o are structura inițială. Așa se explică evoluția neomogenă a mărimii grăunților pentru cele șase sorturi de oțeluri încercate.

Pentru fiecare oțel în parte există totuși o corelare în ceea ce privește variația durității și respectiv a mărimii grăunților funcție de gradul de deformare. Astfel, se vede clar că o dată cu micșorarea mărimii grăunților crește evident duritatea materialului deformat. Se observă de asemenea, că micșorarea grăunților are loc mai ales în prima fază a deformării pentru grade de deformare care nu depășesc valoarea $\epsilon = 50\%$. Se confirmă în acest fel că dimensiunea grăunțelului are cea mai mare influență asupra proprietăților care sînt legate de primele faze ale deformării, în cazul nostru asupra durității și după cum s-a arătat anterior asupra tensiunilor reziduale.

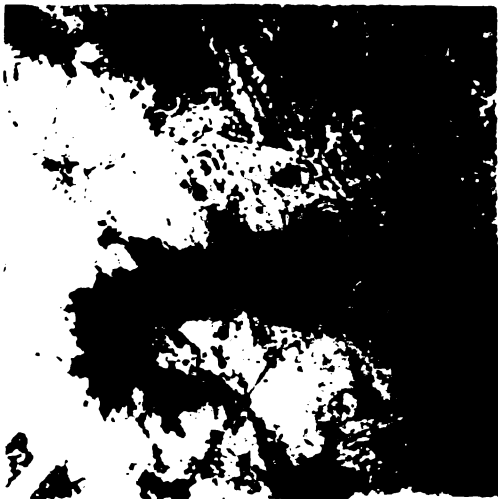
Aceasta pentru că obstacolele constituite la limita grăunților exercită o influență maximă. Conform celor de mai sus rezultă că dimensiunea grăunților are o influență sporită și asupra limitei de curgere, mai mult decît asupra rezistenței la rupere



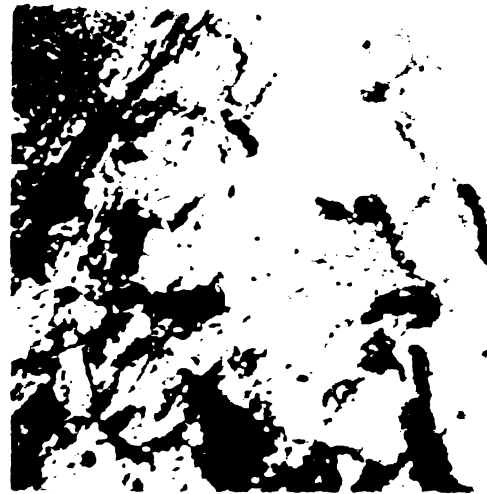
OLC 10 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 35,8\%$ zonă centrală



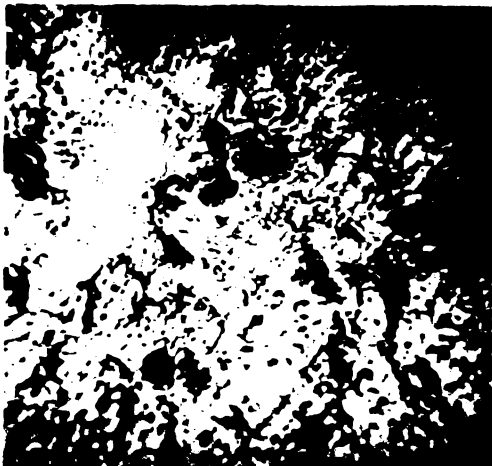
OLC 10 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 35,8\%$ zonă laterală



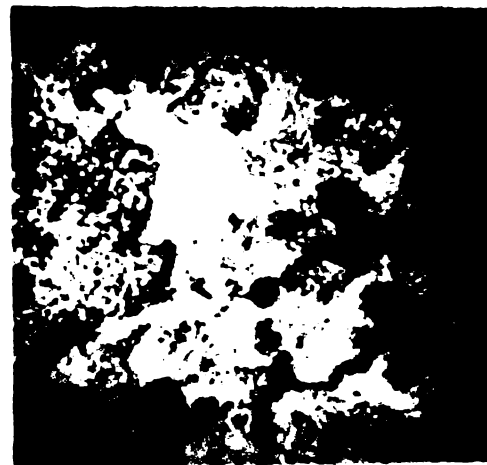
OLC 10 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 69,5\%$ zonă centrală



OLC 10 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 69,5\%$ zonă laterală



OLC 10 ×400
Deformare: $V_f = 58\%$
 $\Sigma = 65,3\%$ zonă centrală

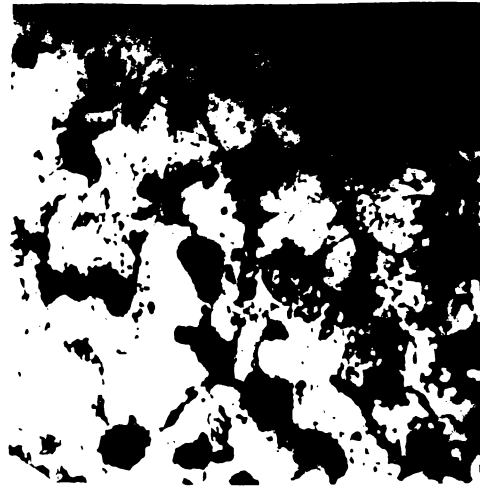


OLC 10 ×400
Deformare: $V_f = 58\%$
 $\Sigma = 65,3\%$ zonă laterală

Fig.4.2.



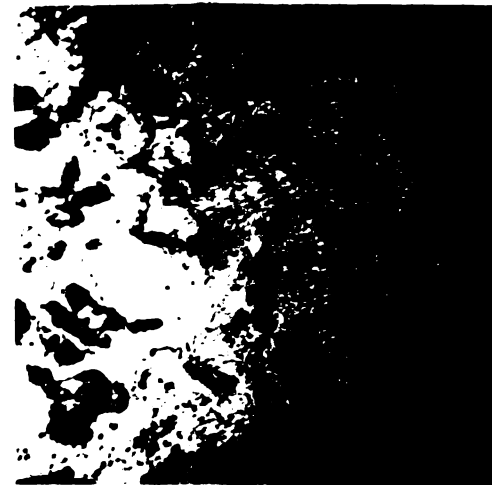
OLC15 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 29,5\%$ zonă centrală



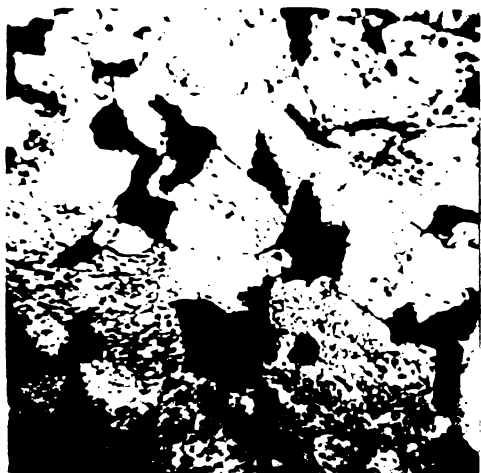
OLC15 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 29,4\%$ zonă laterală



OLC15 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 65,65\%$ zonă centrală



OLC15 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 65,65\%$ zonă laterală



OLC15 ×400
Deformare $V_i = 58\%$
 $\Sigma = 62\%$ zonă centrală



OLC15 ×400
Deformare $V_i = 58\%$
 $\Sigma = 62\%$ zonă laterală

Fig.4.3.

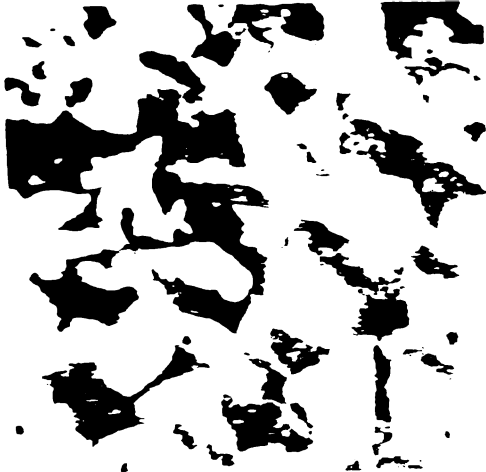


Figure 1. SEM image of the porous structure of the membrane prepared by the phase inversion method.

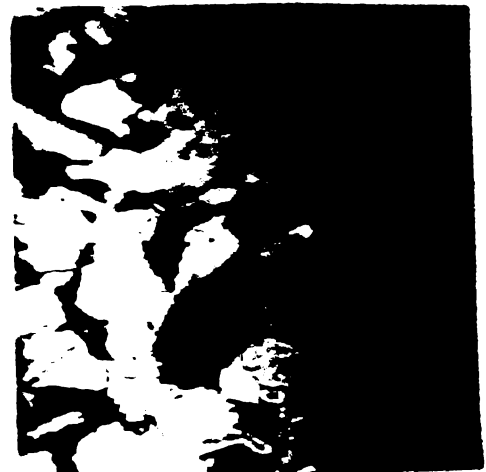


Figure 2. SEM image of the porous structure of the membrane prepared by the phase inversion method.



Figure 3. SEM image of the porous structure of the membrane prepared by the phase inversion method.

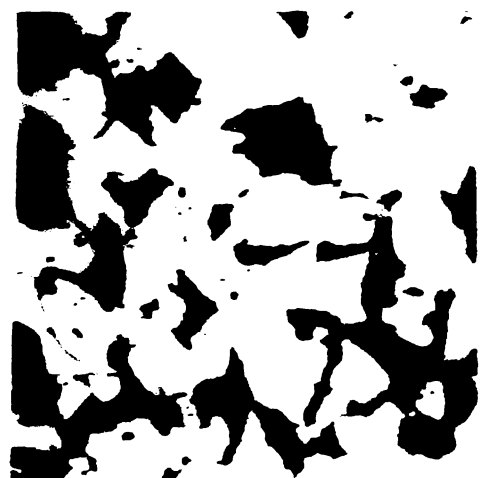


Figure 4. SEM image of the porous structure of the membrane prepared by the phase inversion method.

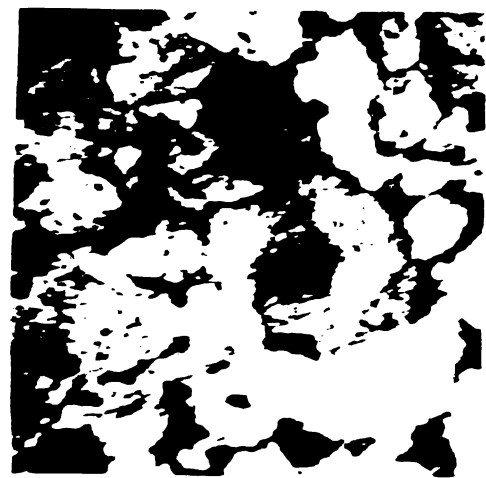


Figure 5. SEM image of the porous structure of the membrane prepared by the phase inversion method.

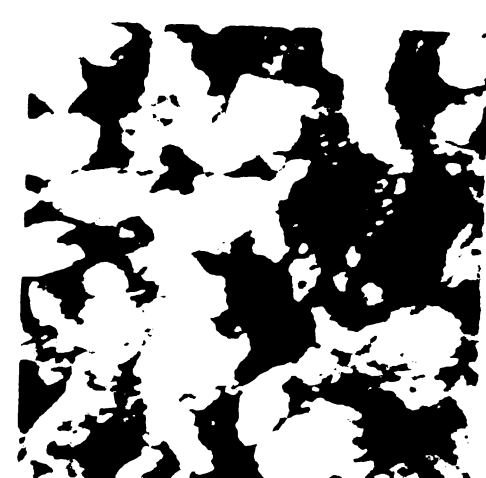
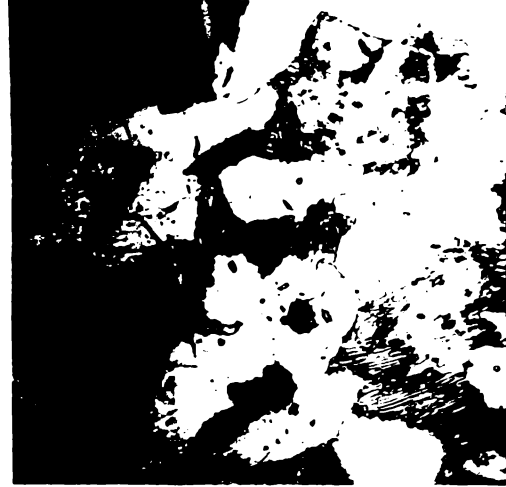


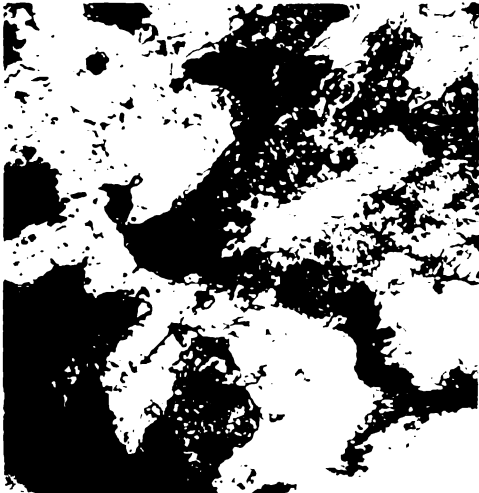
Figure 6. SEM image of the porous structure of the membrane prepared by the phase inversion method.



OLC 35 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 24,17\%$ central



OLC 35 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 24,17\%$ lateral



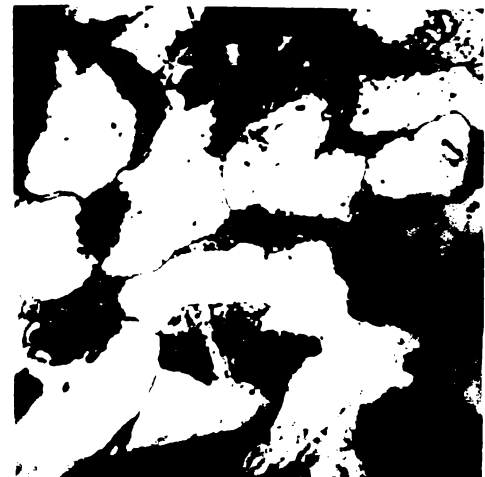
OLC 35 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 58,6\%$ central



OLC 35 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 58,6\%$ lateral

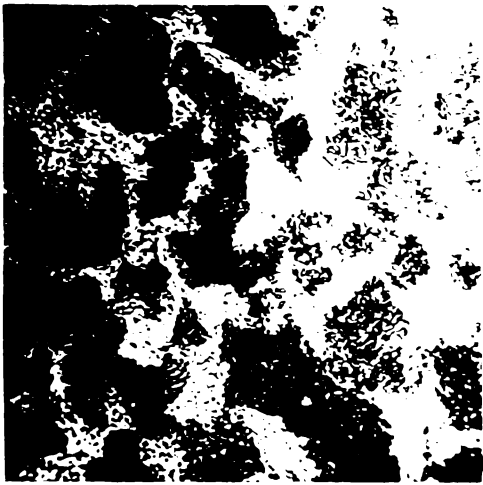


OLC 35 ×400
Deformare $V_i = 58\%$
 $\Sigma = 58,5\%$ central

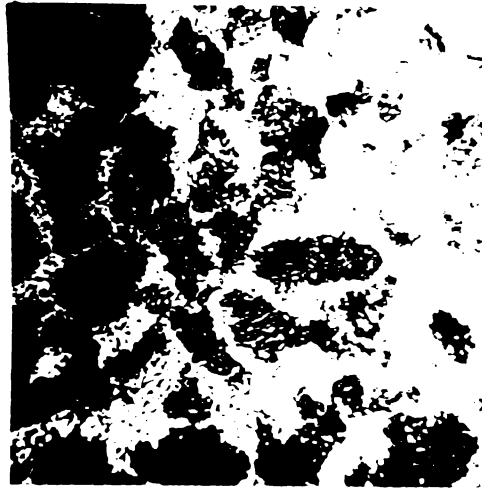


OLC 35 ×400
Deformare $V_j = 58\%$
 $\Sigma = 58,5\%$ lateral

ci. 4.5.



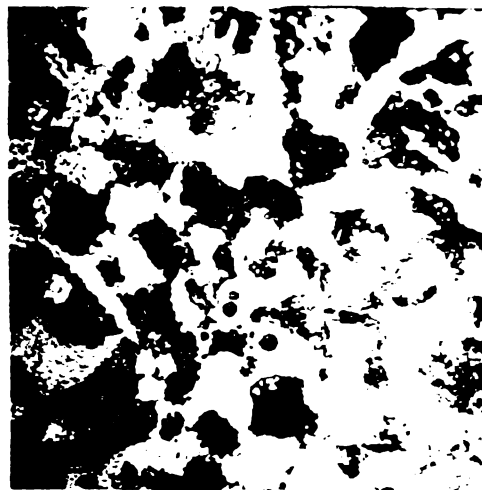
OLC45 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 38,15\%$ central



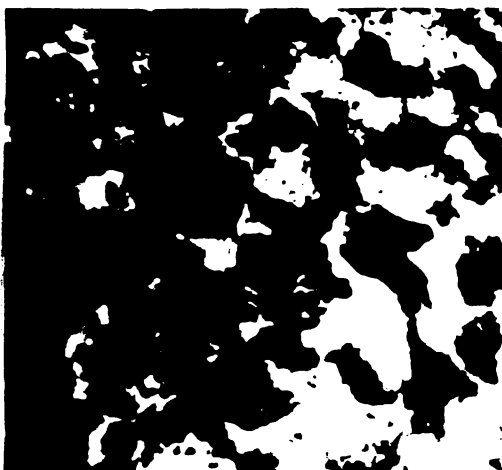
OLC45 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 38,15\%$ lateral



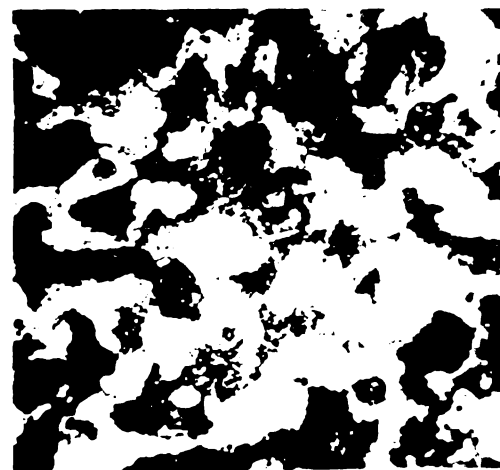
OLC45 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 54,4\%$ central



OLC45 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 54,4\%$ lateral



OLC45 ×400
Deformare $V_i = 58\%$
 $\Sigma = 56,6\%$ central



OLC45 ×400
Deformare $V_i = 58\%$
 $\Sigma = 56,6\%$ lateral



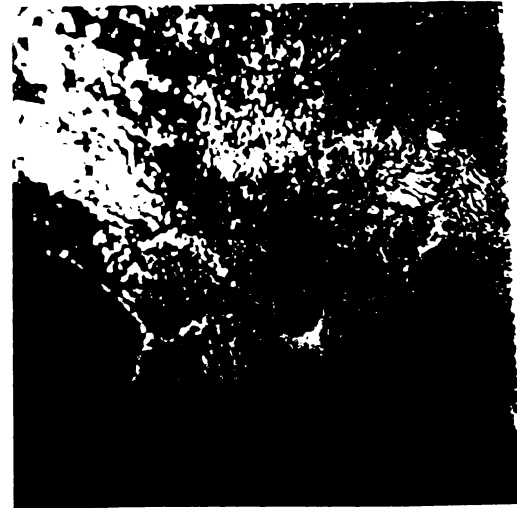
OLC 60 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 17,55\%$ central



OLC 60 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 17,55\%$ lateral



OLC 60 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 47,5\%$ central



OLC 60 ×400
Deformare presă
 $\Sigma = 47,5\%$ lateral



OLC 60 ×400
Deformare $V_i = 58\%$
 $\Sigma = 48,6\%$ central



OLC 60 ×400
Deformare $V_i = 58\%$
 $\Sigma = 48,6\%$ lateral

Fig. 4.7.

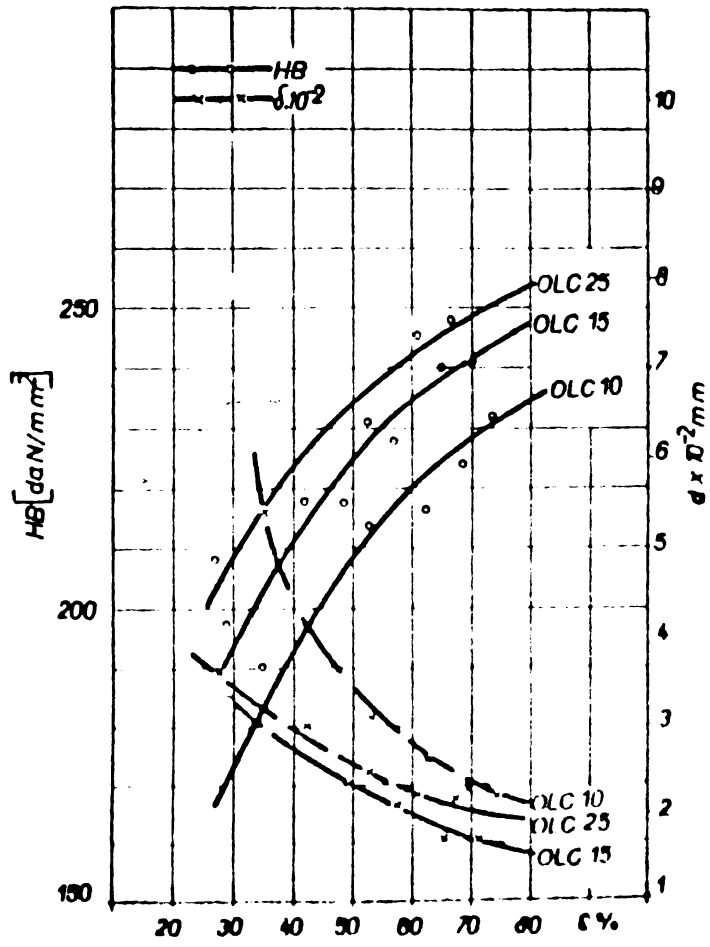


Fig.4.8.

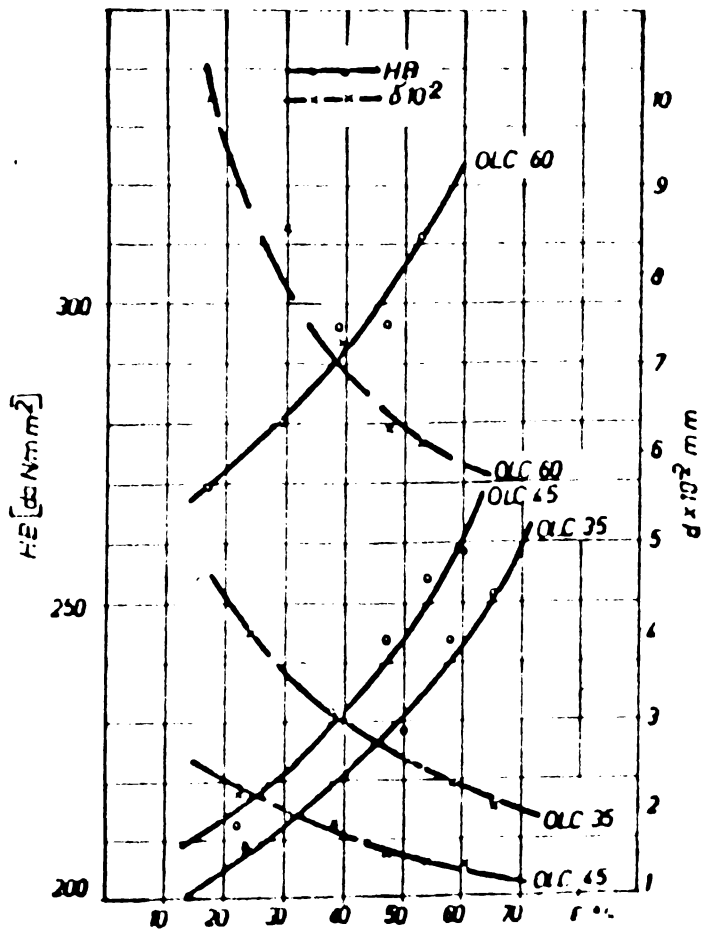


Fig.4.9.

care se manifestă spre sfârșitul deformării. Pentru ultimele faze ale deformării, rezistența este funcție, în primul rând, de interacțiunile complexe ale dislocațiilor care apar în interiorul grăunților, dimensiunea grăunților ne fiind un element de care acesta să depindă esențial. Din această cauză ecuațiile (4.1...4.4) se referă fie la rezistența la curgere, fie la rezistența la deformare și nu la rezistența la rupere. Ecuația (4.1) a fost la început propusă pentru oțeluri cu conținut scăzut de C [64] și a fost mult aplicată la încercările efectuate pe acest material. Panta diagramei în care se reprezintă σ_0 în funcție de $d^{1/2}$ este k_y și reprezintă o măsură a cantității de dislocații acumulate la limita dintre grăunți fiind independentă de temperatură.

Mărimea σ_1 reprezintă o măsură a tensiunii necesare pentru ca o dislocație să se deplaseze învingând rezistența impurităților, a particulelor precipitate, a limitelor subgrăunților etc. σ_1 este funcție de material și de temperatură dar independent de tensiunea aplicată pentru deformare. În ceea ce privește evoluția mărimii grăunților pentru un grad de deformare $\epsilon > 50\%$ se constată că de la o anumită valoare a acestuia, grăunții evoluează foarte puțin sau în unele cazuri deloc. Gradul de deformare la care curbele au tendința de aplatizare este cu atât mai mic cu cât conținutul în C este mai mare. Astfel, pentru OLC 10 este cuprins între 70...80% pentru ca la OLC 60 să se ajungă la 50...55% (tab.4.2).

Tabelul 4.2.

Material	Intervalul ϵ de aplatizare %
OLC 10	70...80
OLC 15	65...75
OLC 25	60...70
OLC 35	55...65
OLC 45	50...60
OLC 60	50...55

Se evidențiază faptul că deși de la anumite grade de deformare, micșorarea grăunților nu mai este așa pronunțată (sau chiar stagnează) duritatea crește continuu o dată cu creșterea gradului de deformare. Aceasta presupune intervenția

altor factori de influență. Cel mai important este fără îndoială creșterea pronunțată a numărului de dislocații care întîmpinînd diferite obstacole în calea deplasării duc la o scurțare puternică a materialului și implicit la creșterea durității. Acest lucru apare mai pregnant la OLC 45 unde granulația evoluează în limite foarte restrînse dar duritatea crește foarte mult.

Așa cum am mai amintit, din măsurătorile efectuate rezultă că nu sînt deosebiri evidente între evoluția mărimii grăunților la oțelurile deformate la presa cu fricțiune și cele deformate cu viteze mari de impact. Chiar dacă apar, ele pot fi neglijate întrucît nu influențează prea mult asupra comportării materialului. Se poate afirma deci, că micșorarea grăunților la deformarea plastică este o funcție mai mult de gradul de deformare ϵ și de mărimea inițială a granulației și mai puțin de modul de deformare. Întrucît apar totuși deosebiri evidente între mărimile durităților pentru cele două situații diferite de deformare (presa cu fricțiune și viteze mari de impact) rezultă că diferența de duritate trebuie pusă pe seama altor cauze. Și în afara numărului de dislocații care crește proporțional cu viteza de impact se constată din microstruc-turile efectuate, apariția cu precădere a macelilor la deformarea cu viteze mari, macle care deformează rețeaua cristalină constituind un factor important în fenomenul de ecruisare.

Măsurătorile efectuate asupra mărimii tensiunilor în func-ție de gradul de deformare ϵ la oțelul OIC 35 permite să se stabilească și concordanța care există între mărimea grăunților și respectiv mărimea tensiunilor interne. Evidențierea acestor dependențe se poate urmări în fig.4.10 în care s-a făcut reprezen-tarea parțială a curbelor $d = f(x)$, $\sigma_p = f(\epsilon)$ și respectiv $\sigma_p = f(d)$. Diagrama putînd fi generalizată și pentru celelalte mărimi de oțel studiate se poate face afirmația rezultată din curbele trasate că o dată cu micșorarea grăunților crește valoarea tensiunilor

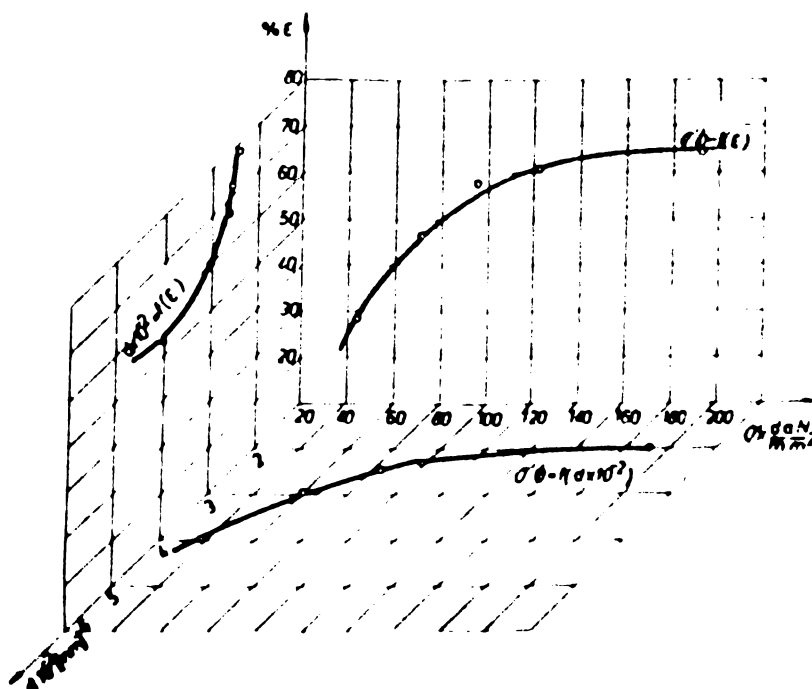


Fig.4.10.

remanente. Această creștere este cu atât mai mare cu cât conținutul în C este mai mare și cu cât viteza de deformare este mai mare așa după cum s-a afirmat anterior.

4.2. Influența limitei grăunților în procesul deformării

Pentru cazul deformării la rece când apariția fenomenului de revenire nu este decât întâmplătoare, influența limitelor grăunțelului asupra deformării constă în general, în creșterea coeficientului de ecruisare. Influența limitelor grăunților asupra ecruisării se discută din două puncte de vedere:

- limita de grăunte împiedică luncarea;
- în fiecare grăunte din policristal deformarea este mai complicată decât la monocristale.

4.2.1. Influența limitei grăunților asupra luncării.

În ceea ce privește acest prim aspect al problemei un lucru este cert și anume, că limitele grăunților împiedică deformarea. Existența unor asemenea bariere trebuie să mărească ecruisarea și acest lucru se poate imagina ușor dacă se recurge la teoria dislocațiilor. Astfel, dacă luncarea se oprește la limita grăunțelului, atunci și dislocațiile care dau naștere la luncare se opresc la aceleași limite. Dislocațiile provenite de la majoritatea surselor active și oprite la limita grăunților creează în interiorul grăunțelului tensiuni care se opun tensiunii aplicate și în acest mod produc o ecruisare puternică a materialului.

Pe măsură ce tensiunea aplicată crește iar un număr din ele în ce mai mare de dislocații ajung la limita grăunțelului, tensiunile locale create de ele cresc și devin până la urmă suficient de mari pentru a pune în acțiune sursa sau sursele din cristalul învecinat.

De obicei, primele încep să acționeze sursele ale căror dislocații ajung la limita grăunțelului aproape în același loc ca și grupa dislocațiilor primului cristal, deoarece în acest caz se neutralizează cel mai eficace tensiunile datorate acestora din urmă

[116]. Când este atinsă această fază luncarea întretaie limita grăunțelului, câmpul de tensiuni de lângă grupa acumulată înainte, dispare în parte, iar ecruisarea se atenuază. Ecruisarea datorită aglomerării de dislocații la limita grăunților este de aceea importantă în primele perioade ale deformării și nu la deformații specifice mari. O dată cu creșterea conținutului în C crește și faza dură din material. Aceasta nu se deformează și luncarea întretaie tot mai greu sau nu întretaie deloc limita grăunților iar ecruisa-

rea datorită barierelor formate poate predomina chiar la tensiuni mari aplicate. În felul acesta duritatea oțelului la deformare plastică crește o dată cu creșterea conținutului în C. Până la un conținut de 0,45 % C creșterea este aproape proporțională pentru ca peste această limită (0,6 % C) saltul să fie foarte pronunțat atât la duritatea inițială, cât și pentru diferite grade de deformare. Înseamnă că roșul limitei grăunților crește o dată cu conținutul în C. După cele afirmate în [45], [46] se poate concepe un model al grupării dislocațiilor la limita grăunților (fig.4.11).

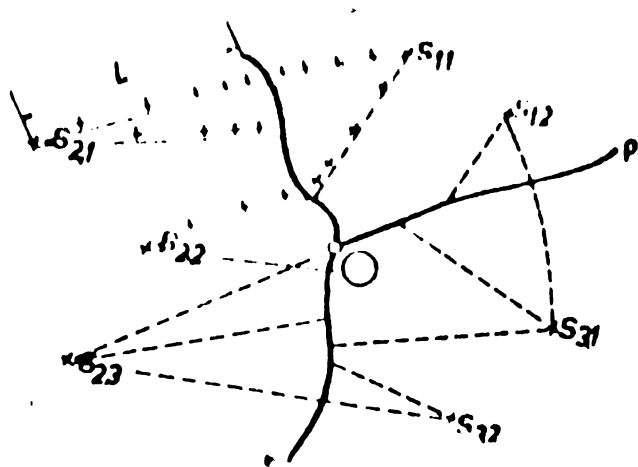


Fig.4.11.

Se presupune o parte a limitelor de la trei grăunți care se întâlnesc într-un punct O. În fiecare grăunte se găsește o sursă sau mai multe surse care emit dislocații sub acțiunea unei tensiuni aplicate. Având în vedere principiul generării dislocațiilor după Frank-Read [20] este de presupus că o sursă nu emite dislocații numai într-o singură direcție. Aceasta

deoarece segmentul inițial se regenerează iar sursa în timpul deformării plastice își schimbă mereu poziția. Din această cauză, atenuarea cernisării datorită neutralizării este numai parțială și se manifestă cu precădere pentru grade de deformare din ce în ce mai mari. Lucru confirmat și experimental. Vor exista suficiente îngrămădiri de dislocații la limita grăunților care creează tensiuni capabile să activeze noi și noi surse din grăunții învecinați. Forța de blocare a dislocațiilor la limita grăunților este supusă legii de distribuție statistică, astfel încât în unii grăunți există dislocații slab legate cu tensiune mică la limita de curgere (de obicei grăunții cu orientarea planelor de alunecare preferențială față de direcția alunecării) în timp ce în grăunții învecinați dislocațiile au nevoie de tensiuni mult mai mari pentru a deveni mobile (în mod obișnuit grăunții cu orientări arbitrare ale planelor de alunecare față de direcția tensiunii aplicate).

Cele de mai sus explică creșterea bruscă a durității față de duritatea inițială în primele faze ale deformării. La început grăunții au dimensiuni mari și numărul de dislocații generate este și el mare. Astfel încât, atenuarea este mică în comparație cu tensiunea generată de dislocațiile blocate la limita grăunților

care mărește mult ecruișarea materialului respectiv duritatea. Spre sfârșitul fazei de deformare, o dată cu micșorarea dimensiunilor grăunților, scade corespunzător și numărul de dislocații generate și crește proporțional coeficientul de atenuare față de tensiunea generată de dislocațiile blocate la limita grăunților. Panta curbei de ecruișare se reduce pînă către sfârșitul deformării cînd alături de fenomenul de blocare apare cu precădere și efectul de complicare al deformării.

Există însă, deosebiri în ceea ce privește viteza de ecruișare. Astfel metalele cu granulație mare se ecruișează cu viteze mai mici decît cele cu granulație mică. Viteza de ecruișare nu înseamnă însă și sporirea în același ritm a rezistenței la deformare. Astfel, întrucît presiunea inversă exercitată de dislocații asupra sursei sale descrește invers proporțional cu distanța dintre ele rezultă că pentru a echilibra centrul unui grăunte mare tensiunea aplicată va trebui să acumuleze la limita grăuntelui mai multe dislocații decît în cazul unui grăunte mic. Un număr mai mare de dislocații înseamnă deci și o ecruișare mai puternică a grăunților mari, în faza primelor deformări. În [20], [45], [46] se arată că numărul n de dislocații care pot fi comprimate prin tensiunea tangențială τ pe segmentul L între sursă și obstacol (fig.4.11) este egal cu:

$$n = \frac{k \cdot \pi \cdot \tau \cdot L}{G \cdot b} \quad [\text{cm}^{-2}] \quad (4.6)$$

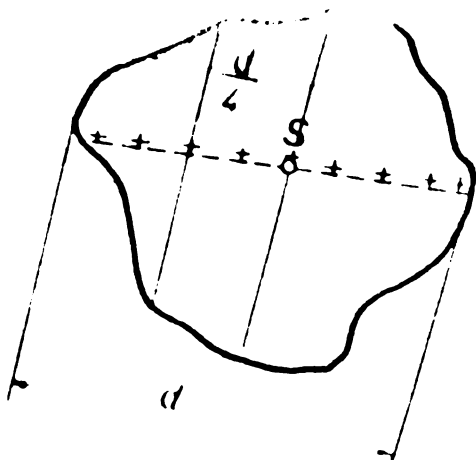
unde: $k = 1$ pentru dislocații elicoidale și $k = 1 - \nu$ pentru dislocații marginale (ν - coeficientul Poisson oca. 0,3 pentru oțel); G - modulul de elasticitate transversal; b - vectorul Bûrgers.

Sursa de dislocații lucrează pînă cînd tensiunea în jurul ei este anihilată prin tensiunea de sens contrar de la obstacol spre sursă. Numărul de dislocații create de sursa amplasată la mijlocul grăuntelui cu diametrul d este egal cu:

$$n = \frac{k \cdot \pi \cdot \tau \cdot d}{4Gb} \quad [\text{cm}^{-2}] \quad (4.7)$$

Se ia 4 la numitor pentru că sursa generează dislocații pe o direcție amplasată pe ambele părți ale ei (fig.4.12). Relația (4.7) arată că numărul de dislocații generate de sursa S variază în mod liniar în funcție de diametrul grăuntelui. Cum

Într-un grăunte nu se găsește o singură sursă relația (4.7) de



poate completa cu un coeficient n_{ϵ} care să țină cont de numărul de surse dintr-un grăunte pentru un anumit grad de deformare

.Dacă se fac referiri la unitatea de volum (cm^3) de material și se notează cu N_{ϵ} numărul de grăunți pentru 1 cm^3 din materialul deformat atunci obținem relația:

$$n = \frac{k \cdot \pi \cdot \tilde{\sigma}_{\epsilon} \cdot d_{\epsilon}}{G \cdot b} n_{\epsilon} N_{\epsilon} \quad (4.8)$$

Fig.4.12.

în care: $\tilde{\sigma}_{\epsilon}, d_{\epsilon}$ -reprezintă rezistența la deformare respectiv distanța pînă la limita grăuntelui pentru un anumit grad de deformare ϵ .

Cele de mai sus se referă la grade de deformare corespunzătoare capacității de deformare plastică a materialului pentru deformarea cu viteze normale de lucru.

Intrucît viteza de impact influențează direct rezultatele, pentru a ține cont de aceasta,este necesar să se introducă înă un factor suplimentar notat cu k_1 care să fie egal cu 1 pentru viteze normale și mai mare decît 1 ($k = 1...3$) pentru viteze mari de impact,întrucît s-a observat și în [36] se confirmă,că o dată cu creșterea vitezei de impact crește corespunzător și numărul de dislocații.

În acest fel formula finală de calcul a numărului de dislocații oprite la limita cristalelor pe unitatea de volum are forma:

$$n = \frac{k \cdot k_1 \cdot \pi \cdot \tilde{\sigma}_{\epsilon} \cdot d_{\epsilon}}{G \cdot b} n_{\epsilon} N_{\epsilon} \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (4.9)$$

În formulă nu apare nici un coeficient care să țină seama de conținutul în C și acest lucru datorită faptului că procentul în C este reprezentat prin mărimea $\tilde{\sigma}_{\epsilon}$ care este cu atât mai mare cu cît conținutul în C este mai mare.

Din discuțiile purtate pînă acumă rezultă că limitele grăunților împiedică luncarea iar numărul de dislocații crește prin acumulare proporțional cu gradul de deformare aplicat,Dezuisarea este însă mai puternică la începutul deformării.Acest lucru se datorește faptului că lungimea limitelor grăunților crește o dată cu creșterea gradului de deformare și în acest fel tensiunea

creată de grupările de dislocații la limita grăunților se repara-
tizează pe o lungime din ce în ce mai mare scăzând în intensi-
tate .

La grade de deformare mari, substanța intergranulară suferă
și ea deformații astfel încît la un moment dat cedează la ten-
siuni mai mici decît în prima parte a deformării. Acest lucru
este confirmat și de numărul tot mai mic de dislocații nece-
sare pentru a străpunge limita grăuntelui.

4.2.2. Influența limitei grăunților asupra efectului de complicare a deformării.

Intr-un cristal al policristalului acționează pînă la 5
sau chiar 6 sisteme de alunecare [45], [46], [119]. La o alunecare
multiplă ecruisarea se produce mai repede decît la alunecarea
simplă. Alunecării multiple i se datorește aproximativ jumătate
și chiar mai mult din ecruisarea policristalului la deformare
In general, fișile de alunecare se opresc la limita grăuntelui
atunci cînd alunecarea este mare, dar alunecările fine pot fi
oprite de alte obstacole în interiorul grăuntelui în apropie-
re de sursă (intersecții ale dislocațiilor, impurități etc.).
Adică, ecruisarea se datorește mai mult efectului de complicare
al deformării decît opririi dislocațiilor la limita grăunților.
Acest lucru vine în sprijinul ideii exprimate mai înainte și
anume că spre sfîrșitul deformării ecruisarea este mai mică
și că deci în acest caz predomină efectul de complicare. Fap-
tul că alunecarea multiplă are totuși tendința de a se manifesta
mai vizibil în apropierea limitei grăunților, înseamnă că în
eprovetele policristaline, ecruisarea la deformare se va mani-
festa mai repede dacă grăunții inițiali vor avea dimensiuni
mai mici pentru că alunecarea multiplă să cuprindă în între-
gime fiecare grăunte de metal încă de la începutul deforma-
rii [116]. În acest caz se vor manifesta concomitent atât efec-
tul de complicare cît și efectul de barieră. O dată cu mărirea
vitezei de impact, precum și a conținutului în C apar în plus
mole precum și carburi fin dispersate care măresc acțiunea de
frînare a dislocațiilor mai ales prin efectul de complicare.
Acest lucru și datorită faptului că numărul sporit de disloca-
ții care se produc o dată cu creșterea vitezei de impact nu
au în totalitate timp să se deplaseze spre limita grăunților.
Se poate afirma că în cazul deformării cu viteze mari de im-
pact și mai ales la conținuturi în C mai mari de 0,45 % in-

diferent de gradul de deformare se manifestă atât efectul de blocare a dislocațiilor la limita grăunților (preponderent pentru grade mici de deformare) cât și efectul de complicare. Cert este că la temperaturi joase și viteze mari de impact limitele grăunților măresc capacitatea de ecruisare și implicit se obțin durități mai mari. Indiferent de influență (efect de blocare sau efect de complicare) limita de grăunte dispune de o energie superficială mai ridicată decât restul cristalului. De aceea limita grăuntelui este locul preferențial unde se inițiază transformări în stare solidă: cum ar fi: difuzia, transformări de fază și reacții de precipitare. Energia ridicată a unei limite de grăunte conduce la existența unei concentrații mai ridicate de atomi străini dizolvați pe limită decât în interiorul grăuntelui și deci este greu de separat influența pur mecanică a limitelor grăunților asupra proprietăților de influența impurităților existente.

4.3. Concluzii

- Mărimea grăunților obținuți după deformare depinde în mod esențial de gradul de deformare aplicat și mai puțin de condițiile de deformare (viteza de impact).

- Micșorarea grăunților are loc mai ales în primele momente ale deformării, pentru grade de deformare care nu depășesc obișnuit valoarea de 50 %. Rezultă că mărimea grăunților are cea mai mare influență asupra proprietăților care sînt legate de primele faze ale deformării (ecruisare, duritate, tensiuni reziduale, limita de curgere etc.). Pentru ultimele faze ale deformării influența mărimii grăunților asupra proprietăților de material scade sensibil.

- Limitele de grăunți influențează deformarea prin obstacolele ce le formează în calea deplasării dislocațiilor. Scăderea ecruisării spre sfîrșitul deformării se datorește faptului că o dată cu mărirea lungimii limitelor de grăunți, tensiunea creată de acumulările de dislocații se repartizează pe o lungime mai mare scăsînd în intensitate.

- Creșterea ecruisării o dată cu creșterea vitezei de impact se explică prin apariția efectului de complicare al deformării, adică, efectul de frinare a mișcării dislocațiilor de către alte obstacole (intersecții de dislocații, alte defecte), înainte de atingerea limitelor de grăunți. Acest efect este cu atât mai mare, cu cît numărul de dislocații, respectiv viteza de impact este mai mare.

.

C A P I T O L U L 5

INFLUENȚA VITEZEI DE IMPACT LA DEFORMAREA PLASTICĂ A OTELURILOR CARBON

5.1. Considerații teoretice

Prelucrarea materialelor metalice cu viteze mari de impact este o metodă nouă de deformare. Noutatea se resfringe atât asupra ariei de răspândire a prelucrării propriu-zise, cât și asupra studiilor teoretice în ceea ce privește efectele prelucrării cu viteze mari de impact asupra proprietăților de material.

Azi se constată o creștere a rolului vitezei de impact [26], [110], ca parametru tehnologic al prelucrării prin deformare plastică. Creșterea continuă a vitezei de impact are ca avantaj pe lângă creșterea productivității și o îmbunătățire a condițiilor de deformare creștând în același timp premisele unei îmbunătățiri a preciziei și chiar a structurii și caracteristicilor mecanice ale pieselor matritate. În [108] se arată astfel că una din metodele de studiere a comportării metalelor solicitate și deformate cu viteze mari de deformare este trasarea curbelor solicitare-deformare $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ pentru diferite viteze de deformare. În fig. 5.1 se arată schematic influența vitezei de deformare asupra deformației și asupra punctelor caracteristice din diagrama $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$.

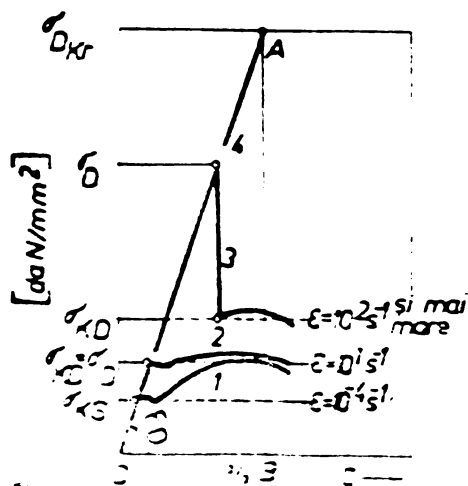


Fig. 5.1.

În cazul vitezelor mici sau în cazul deformării statice pe curba $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ se disting următoarele elemente caracteristice:

- $\bar{\sigma}_{ks}$ - limita convențională de elasticitate ($\bar{\sigma}_{0,2}$ în notațiile tehnice uzuale);

- E_s - modulul de elasticitate.

Se observă de asemenea că rezistența opusă deformării crește cu creșterea gradului de deformare (datorită fenomenului de serration), iar peste o anumită valoare maximă scade pînă se produce ruperea materialului.

În cazul vitezelor mari de deformare apar următoarele particularități:

- limita de elasticitate dinamică (σ_D) variază după legea lui Hooke rezultând din relația:

$$\sigma_D = \rho \cdot c \cdot v \quad (5.1)$$

în care: ρ este densitatea metalului; c -viteza sunetului în material; v -viteza particulelor de material în mișcare. Rezultă deci că în cazul unei solicitări dinamice tensiunile se propagă ca o undă cu amplitudinea σ_D și o viteză egală cu cea a sunetului;

- după propagarea undei elastice, metalul este traversat de o undă de deformare plastică, caracterizată de o solicitare σ_{KD} mai mică decât σ_D (aceasta spre deosebire de solicitarea cu viteză mică sau solicitarea statică unde limita de plasticitate este mai mare decât limita de elasticitate).

Valoarea limitei σ_{KD} variază puțin cu viteza de deformare. Mărimea ei poate fi calculată cu relația:

$$\sigma_{KD} = \sigma_{ks} \left(\frac{\dot{\epsilon}_D}{\dot{\epsilon}_s} \right)^n \quad (5.2)$$

unde: σ_{ks} este limita convențională de elasticitate; $\dot{\epsilon}_s$ și $\dot{\epsilon}_D$ -viteza de deformare în regim static, respectiv dinamic; n -coeficient care depinde de temperatura încercării și materialul deformat.

Din fig.5.1 rezultă că peste o anumită viteză de deformare (viteză critică de deformare) metalul se rupe fragil, adică fără o deformare plastică prealabilă. În acest caz curba de variație a tensiunii cu deformația se reduce la triunghiul DAB. Energia consumată pentru a rupe fragil un metal solicitat cu o viteză mai mare decât cea critică se calculează știind că este egală cu suprafața triunghiului DAB menționat mai sus.

În fig.5.2 sînt trasate cîteva curbe reale $\sigma - \epsilon$ în funcție de viteza de impact ($v = 30, 60, 90$ m/s) și gradul de deformare ϵ și pentru un oțel. Se observă clar diferența care există între valorile σ_D pentru cele trei viteze de impact ($\sigma_{D30} = 124$, $\sigma_{D60} = 248$, $\sigma_{D90} = 372$ daN/mm²) și respectiv între valorile σ_{KD} pentru aceleași mărimi ale vitezei de impact ($\sigma_{KD30} = 57$, $\sigma_{KD60} = 58$, $\sigma_{KD90} = 58,5$ daN/mm²).

Modulul de elasticitate dinamică E_D se poate determina cu relația:

$$E_D = e_1^2 \cdot \rho \quad (5.3)$$

în care: e_1 este viteza de propagare a impulsului elastic (determinat experimental); ρ - densitatea metalului.

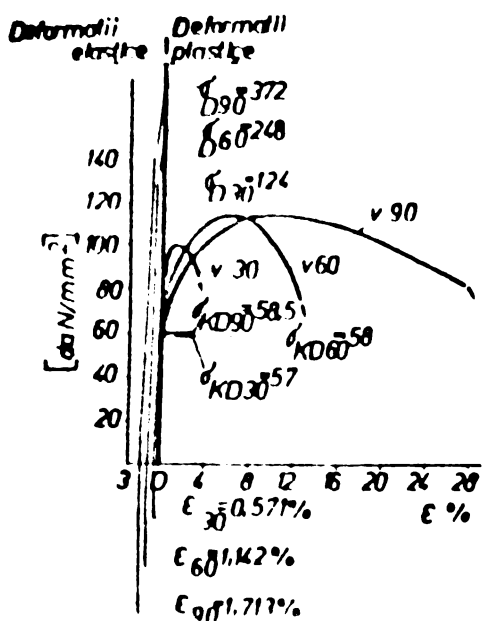


Fig.5.2.

clar dependența rezistenței la deformare k_p , de viteza de deformare la oțelul C 15. Drept referință se prezintă variația rezistenței la deformare k_p pentru viteza $\dot{\epsilon} = 40 \text{ s}^{-1}$.

Preocupări în domeniul deformării plastice cu viteze mari de deformare se întâlnesc și în alte surse bibliografice [83], [85], [86], [88], [94], [102], [112].

Astfel, [102] vorbind despre influența vitezei de deformare, arată că o dată cu creșterea acesteia crește rezistența la deformare, la deformarea la cald mai puternic ca la deformarea la rece.

Din fig.5.3, 5.4 și 5.5 unde se reprezintă variația rezistenței la deformare k_p în funcție de gradul de deformare și viteza de deformare pentru 1000, 1100 și 1200°C, rezultă

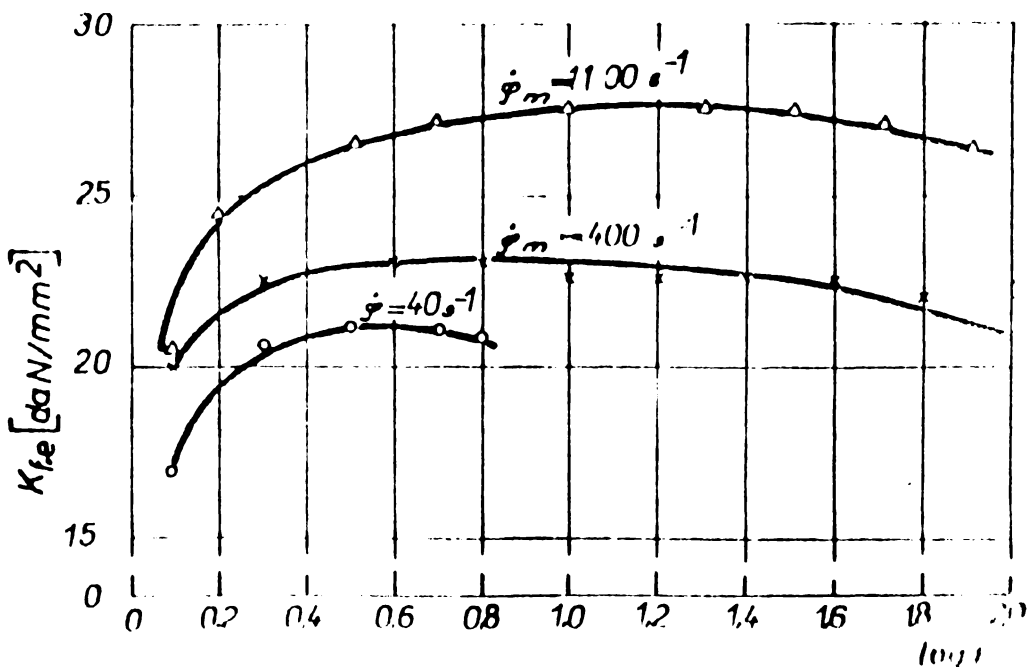


Fig.5.3.

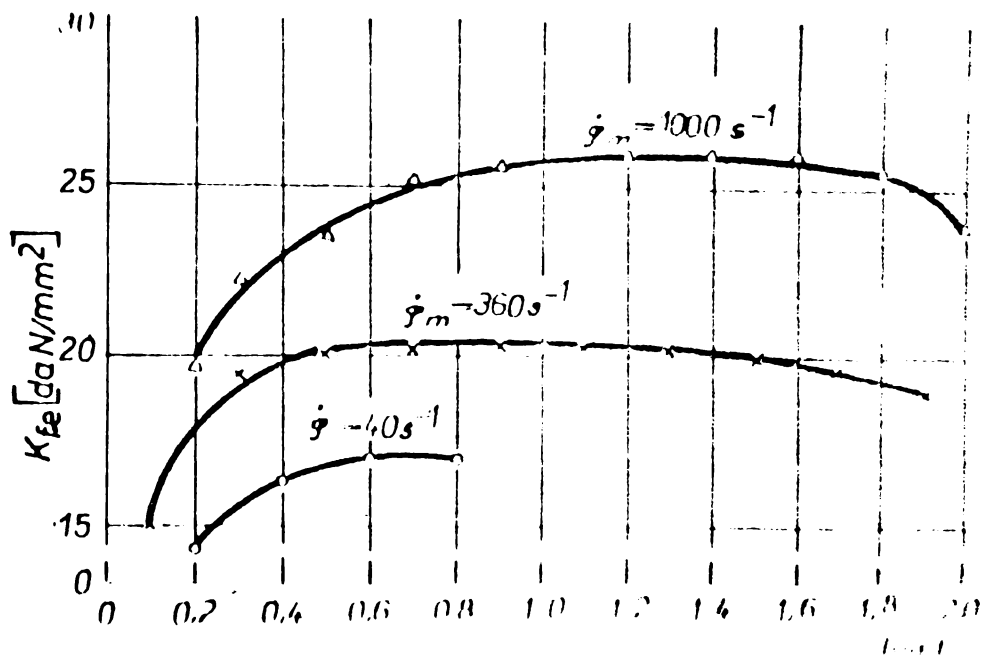


Fig.5.4.

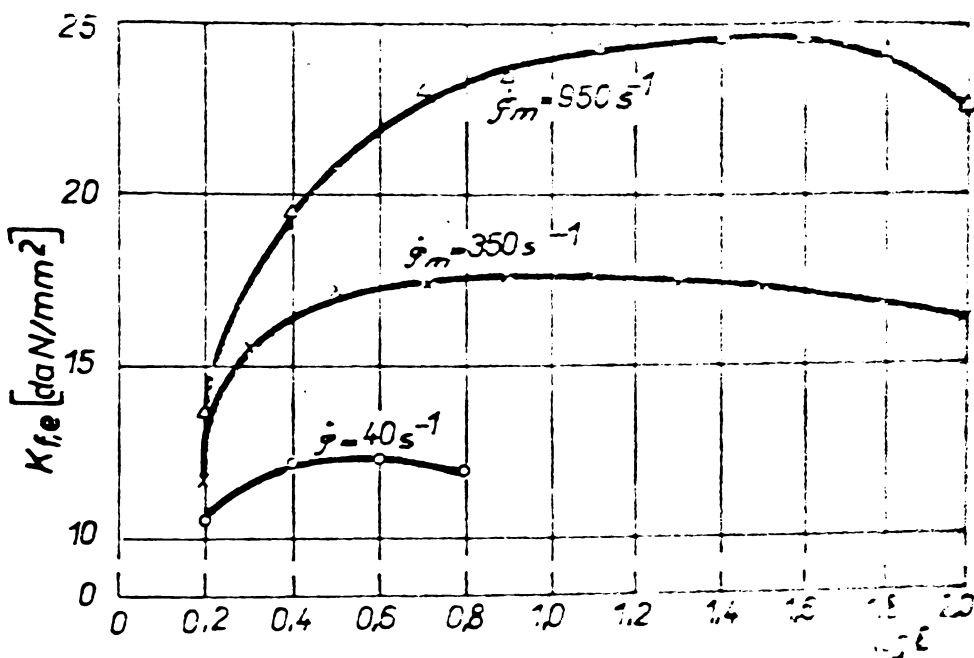


Fig.5.5.

Micșorarea valorii lui k_{pe} (după maximul curbei obținute) la grade mari de deformare nu se atribuie fenomenului de înmuiere la deformare, intrucît timpul de deformare este mic. Scăderea, se explică prin aceea că la deformări mari apar creșteri considerabile de temperatură, care fac să scadă valoarea lui k_p . Pentru a

TI
INSTITUTUL CENTRAL

evidenția mai bine influența vitezei de deformare asupra rezistenței la deformare s-a folosit o altă reprezentare. In fig.5.6, 5.7 și 5.8 este reprezentată rezistența la deformare k_{10} a oțelului C₁₅ pentru diferite temperaturi și grade de deformare logaritmică în funcție de viteza de deformare la scara dublu logaritmică.

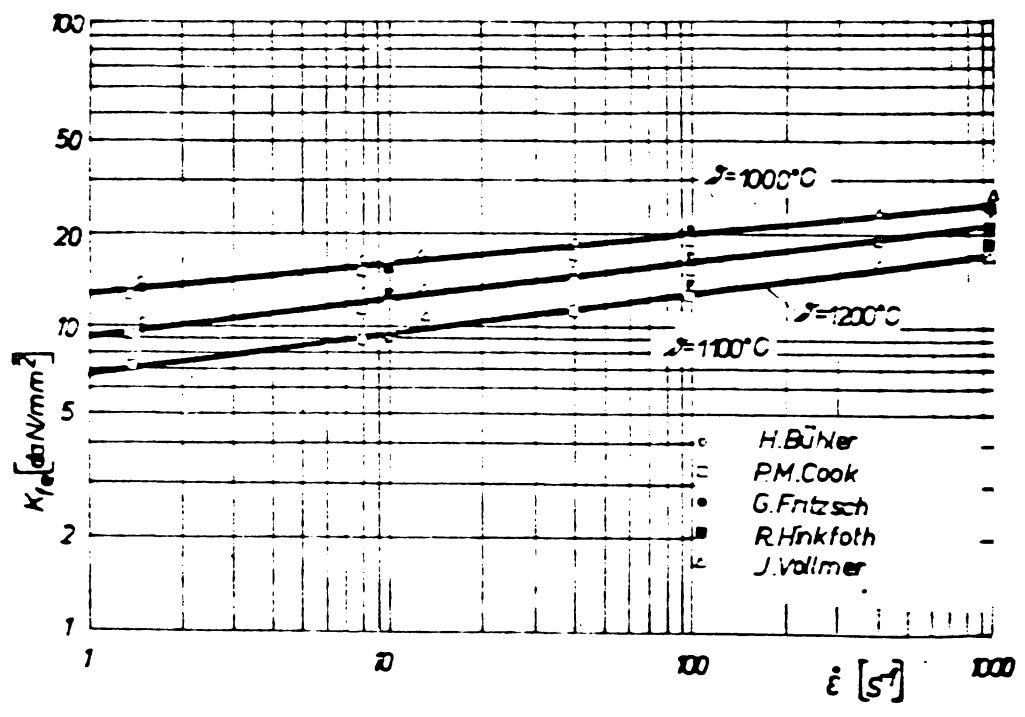


Fig.5.6.

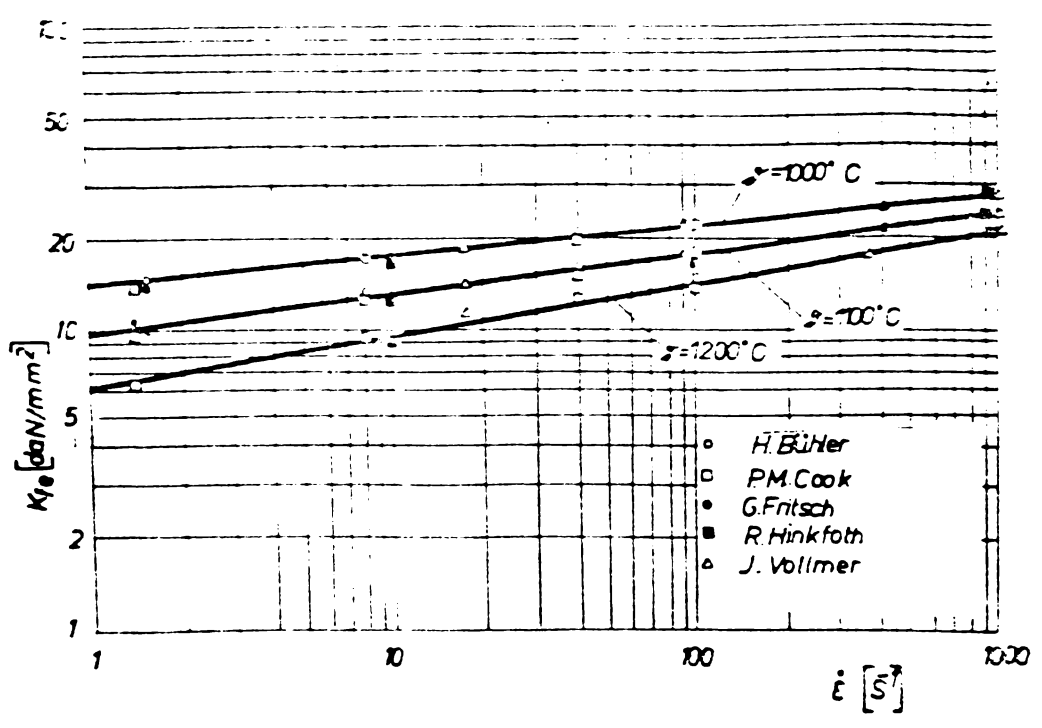


Fig.5.7.

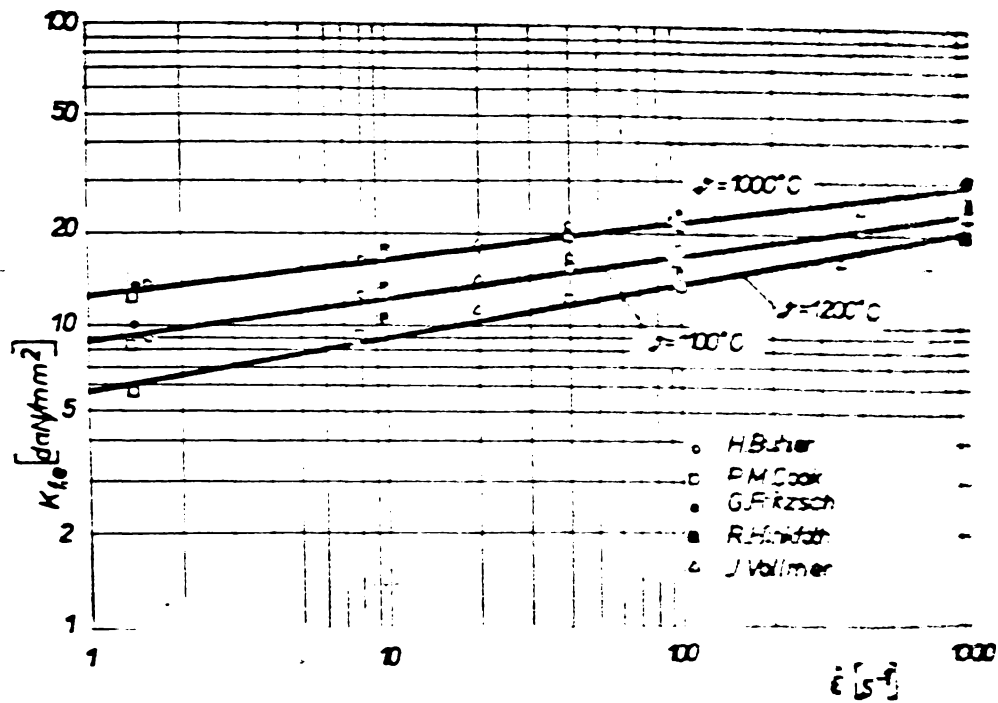


Fig.5.8.

După cum rezultă din diagrame cercetările coincid pentru un număr foarte mare de cercetători.

Observația este valabilă și pentru alte oțeluri. Este admisibil să se facă extrapolări de la viteze mici la viteze mari întrucât toate valorile pentru rezistența la deformare sînt pe o dreaptă. Valabilitatea observațiilor ține pînă la $\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ s}^{-1}$ și grade de deformare logaritmice pînă la 0,8. Pentru deformări mai mari aceste afirmații nu sînt cercetate [102]. O altă posibilitate de studiere a influenței vitezei de deformare asupra rezistenței la deformare este reprezentarea rezistenței la deformare în funcție de viteza medie de refulare fig.5.9 [102].

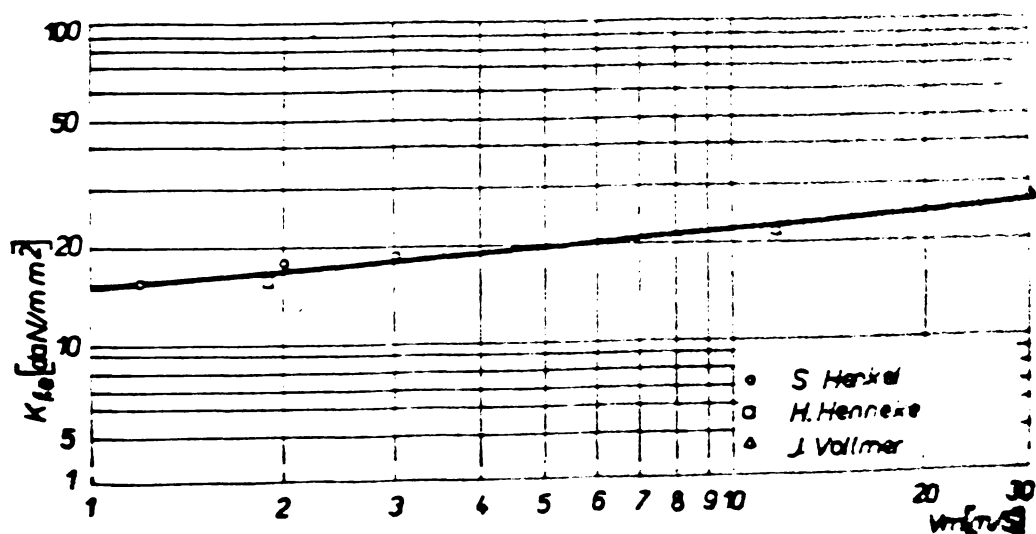


Fig.5.9.

Viteza medie de refulare se calculează cu relația:

$$v_m = \frac{\Delta h}{t} \quad (5.4)$$

în care: Δh este scurtarea [m]; t - timpul de deformare [s].

Dreapta rezultată are forma unei exponențiale a cărei expresie este:

$$k_F = k_{F_1} (v_m)^n \quad (5.5)$$

unde k_{F_1} este rezistența la deformare pentru $v_m = 1$ m/s și n -exponent determinat experimental.

Coeficientul k_{F_1} depinde în afară de material și temperatură și de gradul de deformare logaritmic. Este o măsură a frecărilor interioare ce apar la deformare, similar cu coeficientul de viscozitate la lichide. Exponentul $n < 1$, caracterizează influența vitezei asupra rezistenței la deformare a oțelurilor.

Pentru calculul rezistenței la deformare se mai poate folosi și relația:

$$k_F = c_1 \cdot \dot{\epsilon}^{c_2} \cdot \dot{\epsilon}^{c_3} \quad (5.6)$$

unde: $c_1 = f(\theta)$; c_2 - determină influența deformării; c_3 - influența vitezei de deformare asupra lui k_F .

Calcululele efectuate cu valorile din literatură ale lui c_1 , c_2, c_3 [102] și folosind relația de mai sus au dus la diferențe mari între valorile calculate și cele experimental determinate. Rezultă că relația prezentată nu este valabilă decât în cazul anumitor materiale și viteze de deformare.

Revenind la fig. 5.6, 5.7, 5.8 se observă că cu creșterea vitezei de deformare dreptele pentru anumite temperaturi, de obicei mai mari, se apropie. k_F crește cu atât mai mult cu cât temperaturile sînt mai mari. Se poate afirma că la creșterea vitezei de deformare peste 10^3 s^{-1} pentru temperaturi de $1000 \dots 1200^\circ\text{C}$ este posibil obținerea aceluiași rezultate la deformare. În fig. 5.10 [102] s-au prelungit dreptele pentru fiecare temperatură și se observă că se intersectează la $\dot{\epsilon} = 5,5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Rezultă că la deformarea plastică cu viteze foarte mari de deformare se poate limita temperatura la valori mai mici de 1100°C întrucît pentru valori mai mari rezistența la deformare crește foarte puțin.

Alți autori [110] au făcut încercări la viteze foarte mici. În acest caz predomină influența deformării propriu-zise și nu viteza de deformare. Pentru viteze mici influența vitezei de de-

formare se face simțită mai ales la grade foarte mari de deformare.

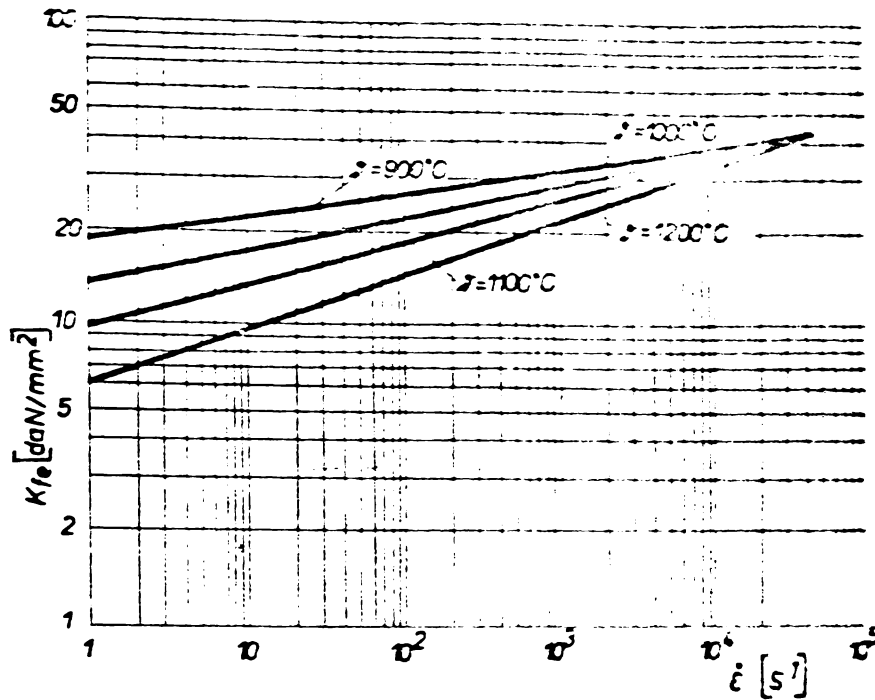


Fig.5.10.

Acest lucru este adevărat însă și pentru viteze mari de deformare, ceea ce rezultă clar din fig.5.11 unde se reprezintă rezistența la deformare pentru oțelul C₁₅ pentru trei temperaturi și două

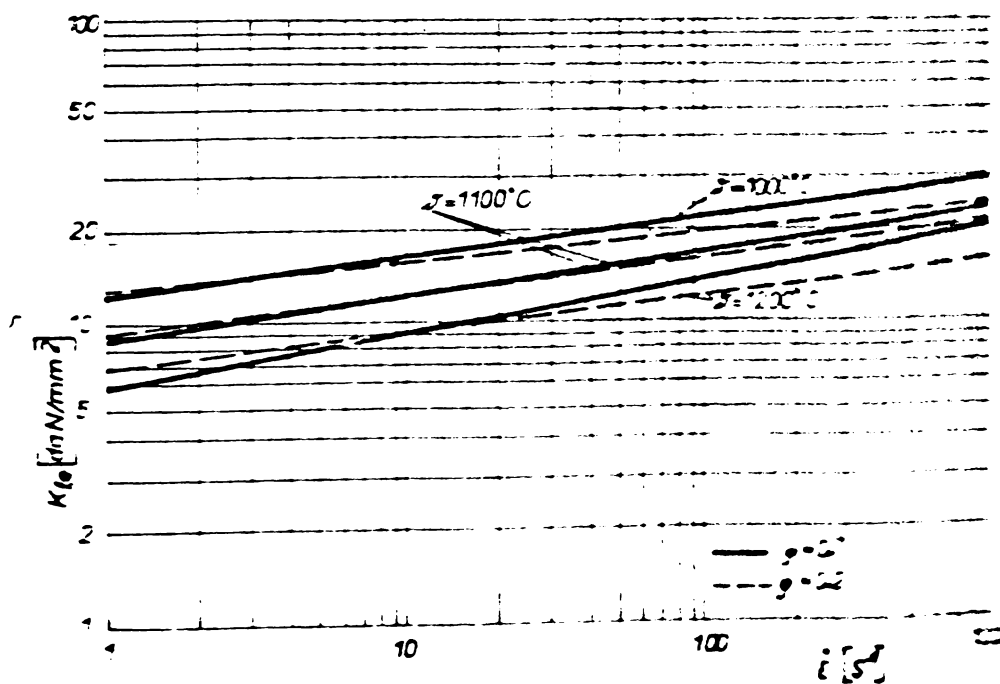


Fig.5.11.

grade de deformare logaritmice în funcție de viteza de deformare la scara dublu logaritmică. Se observă clar că o dată cu creșterea

vitezei de deformare $\dot{\epsilon}$, crește distanța dintre drepte pentru $\ln \xi = 0,2$ și pentru $\ln \xi = 0,7$. Adică, pentru logaritmul $\ln \xi = 0,7$ creșterea rezistenței la deformare este mai accentuată cu creșterea vitezei de deformare. În contractidicție cu [102], [36] afirmă că influența vitezei de deformare se resimte cel mai puternic la grade mici de deformare și acest lucru datorită influenței mai puternice a vitezei de deformare asupra mărimii grăunților. Cert este, că o dată cu creșterea vitezei de deformare, crește corespunzător și rezistența la deformare. Pentru calculul acesteia majoritatea autorilor propun diverse formule, dintre care se amintesc:

$$\sigma_0 = A \ln \dot{\epsilon} \quad (5.7)$$

$$\sigma_0 = \sigma_0 \dot{\epsilon}^n \quad (5.8)$$

$$\sigma_0 = \sigma_0 + \eta \dot{\epsilon} \quad (5.9)$$

$$\sigma_0 = \sigma_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon} \right)^{A_0} \quad (5.10)$$

sau o formulă generalizată de forma: [110]:

$$\sigma_0 = A + B \ln \epsilon + \theta (C + D \ln \dot{\epsilon} + F \ln \epsilon \ln \dot{\epsilon}) \quad (5.11)$$

în care: σ_0 - rezistența dinamică la curgere; σ_0 - rezistența statică la curgere; A, B, C, D, F, n, η - constante ale materialului deformat; ϵ și $\dot{\epsilon}$ - gradul, respectiv viteza de deformare.

Deformând prin refulare șa cald diferite materiale cu viteze de impact de 100, 200 și 300 m/s [5] constată că efectul vitezei se manifestă atât asupra formei epruvetei cât și asupra caracterului curgerii metalului, mai ales la grade mari de deformare. Cea mai intensă curgere se constată în zona de contact epruvetă-sculă (fig. 3.3). În zonele cele mai deformate, apare cu precădere naclarea, iar în domeniu de separare apare o bandă albă. Aceasta se explică prin încălzirea foarte pronunțată a zonei și apariția transformării austenitice. Austenita se transformă în martensită datorită răcirii foarte rapide. Martensita obținută nu are caracter acicular, iar microdunitatea obținută în zona albă este de 74 daN/mm² față de 368 daN/mm² în zonele învecinate. Cu creșterea vitezei de deformare, crește gradul de finisare a structurii pe suprafața de contact deoarece și mărimea deformării pe această suprafață este mai mare. Făcând filmări rapide (125.000 imagini/s) [5] studiază caracterul curgerii metalului în cazul deformărilor rapide. Se afirmă astfel că mai întâi are loc o deformare a suprafeței de contact, apoi deformarea se propagă spre

interiorul epruvetei. Caracterul curgerii este foarte neuniform, gradul de deformare variind de la un punct la altul. Cu creșterea gradului de deformare și mai ales a vitezei de impact, caracterul de neuniformitate al deformării este mai clar exprimat. În [88], se exprimă părerea contrară și anume aceea că la probele deformate în mod dinamic, configurația deformației este mai omogenă.

[85], [86] arată că pentru majoritatea încercărilor efectuate la deformarea prin refulare cu viteze mai mici de 100 m/s, se constată o ecruisare puternică mai ales la începutul deformării. Pentru grade mari de deformare densitatea ecruisării scade. Ecruisarea pronunțată la începutul deformării este pusă pe apariția maculelor în timpul deformării. Cum maculele preced luncarea, ele sînt puternic distorsionate și contribuie la mărirea gradului de ecruisare. Pentru viteze în jur de 80 m/s, în material pot lua naștere temperaturi mai mari de 300°C. Se poate produce astfel o recristalizare parțială și în consecință o dedurificare a metalului respectiv o scădere a rezistenței la deformare, care poate deveni mai mică decît în cazul deformării statice sau viteze foarte mici.

Alți autori [5], [34], [61], [89] tratează mai ales influența vitezei asupra structurii metalului deformat plastic. Viteza de deformare se afirmă are o mare influență asupra transformărilor de fază care au loc în metale și aliaje. Aceasta reglează cantitatea de martensită în timpul transformării. Se specifică de asemenea că în timpul deformării plastice sînt activate numai unele plane de luncare, ceea ce duce la încălziri locale foarte pronunțate însoțite de creșteri de temperatură peste punctul de transformare. Pentru obținerea unor efecte termice mari sînt necesare atât viteze de deformare mari cît și presiuni specifice mari.

Efectul termic al vitezei de deformare contribuie în același timp la apariția unor transformări structurale specifice deformării plastice cu viteze mari.

Făcînd un rezumat al cercetărilor amintite se pot trage următoarele concluzii referitor la influența vitezei de deformare:

- majoritatea autorilor efectuează încercările la rece asupra materialelor neferoase sau la cald asupra oțelurilor. Foarte rar, se întîlnesc referiri pentru încercarea la rece a oțelurilor. Acolo unde se utilizează viteze mari încercările se fac pentru grade mici de deformare. Rezultatele încercărilor confirmă apariția unor modificări importante în comportarea materialului deformat. În majoritatea cazurilor ele sînt date sub forma unor constatări, foarte rar apărînd motivări ale rezultatelor obținute;

- gama de viteze utilizate de unul și același cercetător este mică. Se întâlnesc obișnuit două noțiuni pentru viteză. Unii cercetători folosesc noțiunea de viteză de deformare ($\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{v_0}{v_m} \text{ s}^{-1}$) iar alții noțiunea de viteză de impact echivalentă cu viteza medie de deplasare a pistonului, v_m m/s;

- majoritatea cercetătorilor fac comparație între comportarea materialului la viteze mici și respectiv viteze mari de deformare. Se consideră astfel, că între deformarea cu viteze mici și deformarea cu viteze mari există deosebiri apreciabile. În cazul sarcinilor aplicate prin șoc, distribuția tensiunilor în masa corpului este foarte neomogenă, existând pericolul de apariție a ruperii într-un punct al corpului independent de ceea ce se întâmplă în alt punct.

5.2. Interpretarea rezultatelor experimentale

Cercetările proprii au la bază următoarele elemente mai importante:

- utilizarea unei game largi de materiale și viteze mari de impact (OLC 10, 15, 25, 35, 45 și 60 și $v = 24, 31, 6, 38, 7$ m/s pentru masa pistonului $m_p = 2,680$ kg și $v = 36, 47, 4, 58$ m/s pentru masa pistonului $m_p = 1,200$ kg). Se adoptă noțiunea de viteză de impact mai proprie decât viteza de deformare, care suferă modificări de la o dimensiune la alta a epruvetei încercate;

- deformarea are loc la rece și la grade mari de deformare, apropiate de capacitatea de deformare plastică a materialelor utilizate;

- pentru compararea rezultatelor obținute, încercările și măsurătorile se fac în paralel la o presă cu fricțiune ($v < 5$ m/s) și la o instalație pneumomecanică cu vitezele specificate mai sus;

- numărul mare de măsurători suplimentare (tensiuni, granulatie, microstructuri) permite interpretarea corespunzătoare a rezultatelor obținute.

Diagramele de variație ale durității în funcție de principalii factori de influență (grad de deformare ϵ , viteză de impact v_1) sînt trasate pe baza datelor trecute în tab. 2.1.

O primă serie de diagrame reprezintă variația durității în funcție de gradul de deformare pentru fiecare calitate de oțel și vitezele de impact amintite, precum și pentru deformarea la presa cu fricțiune

Intrucit numărul vitezelor utilizate este mare, iar rezultatele obținute se grupează pe grupe de viteze, diagramele sînt trasate după același principiu. Adică, în fig. 5.12...5.17 sînt trasate diagramele de variație ale durității în funcție de gradul de deformare ξ %, pentru grupul de viteze de 24, 31,6, 38,7 m/s și $m_p = 2,680$ kg, iar în fig. 5.18...5.23 aceleași diagrame pentru grupul de viteze de 36, 47,4, 58 m/s și $m_p = 1,200$ kg.

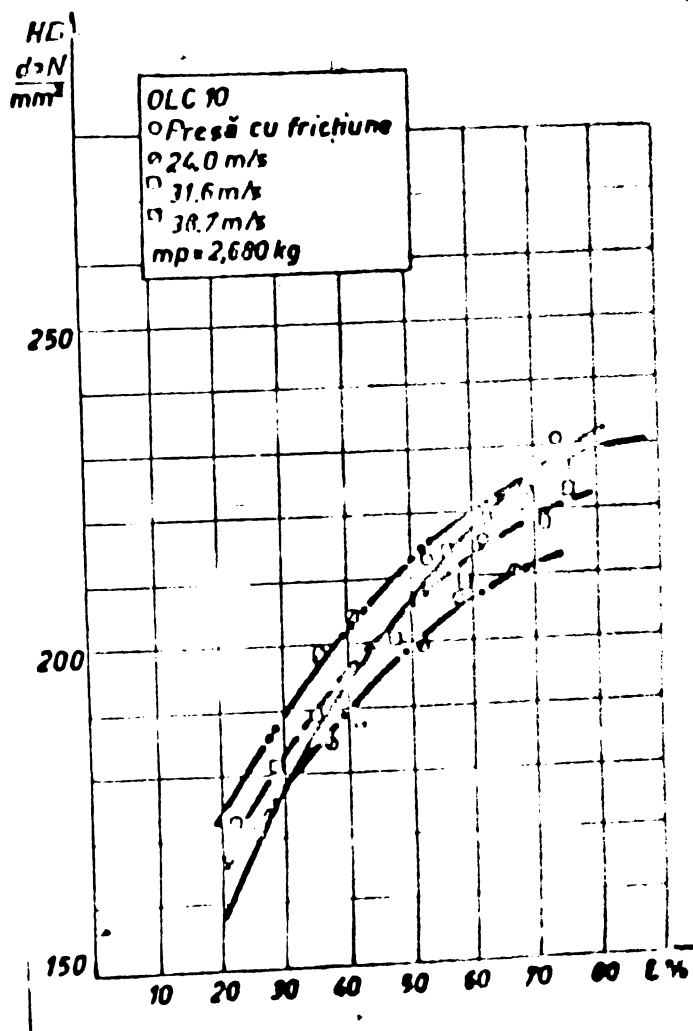


Fig. 5.12.

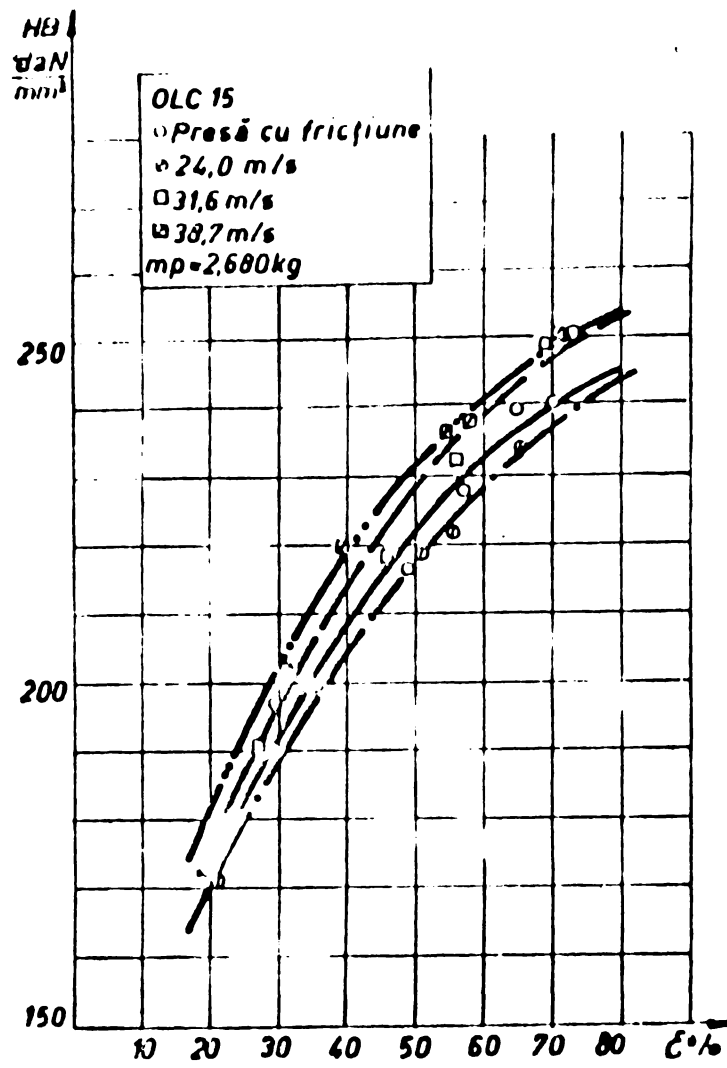


Fig.5.13.

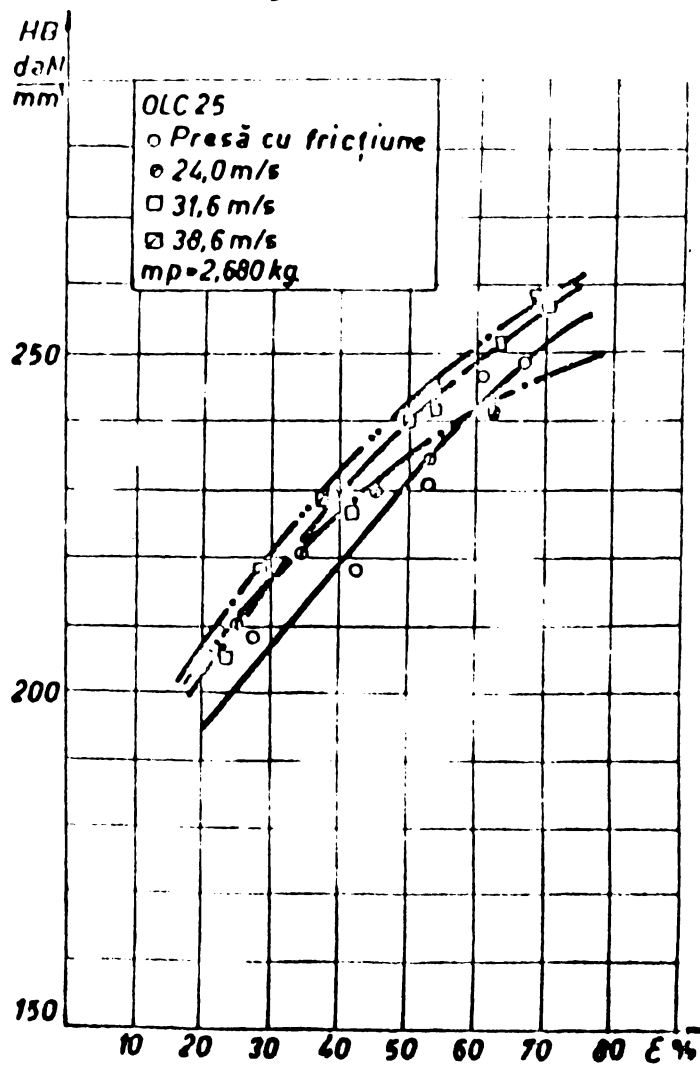


Fig. 5.14.

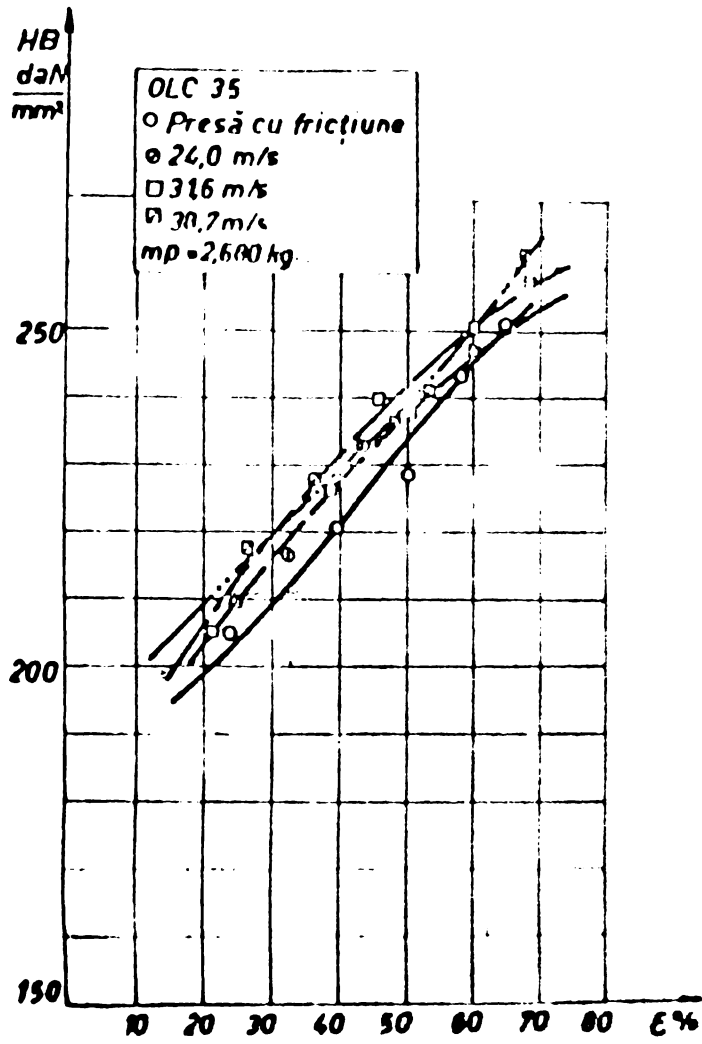


Fig.5.15.

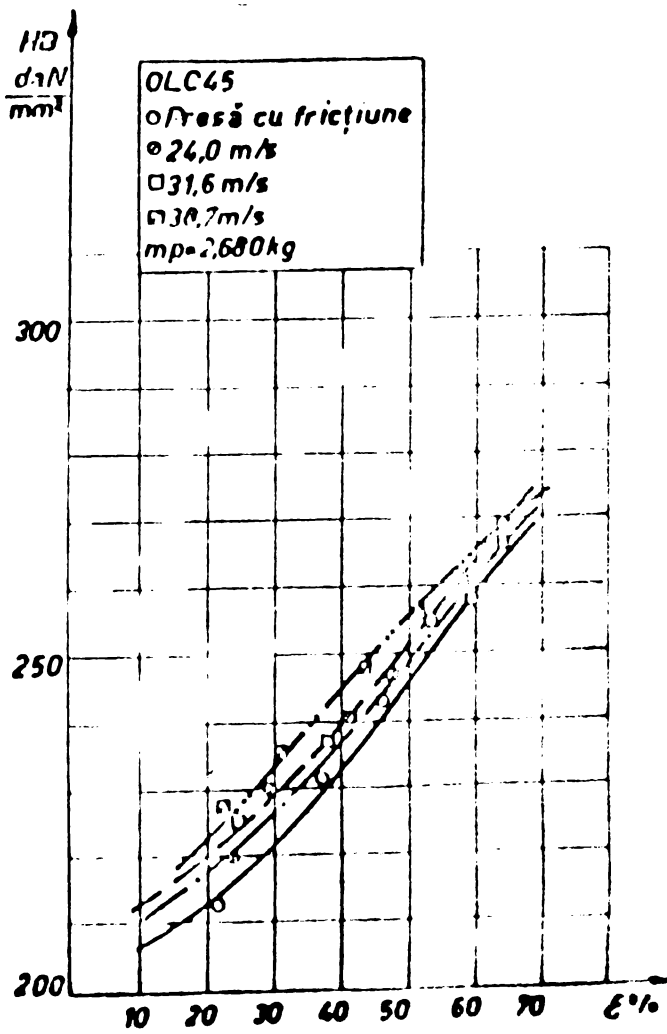


Fig.5.16.

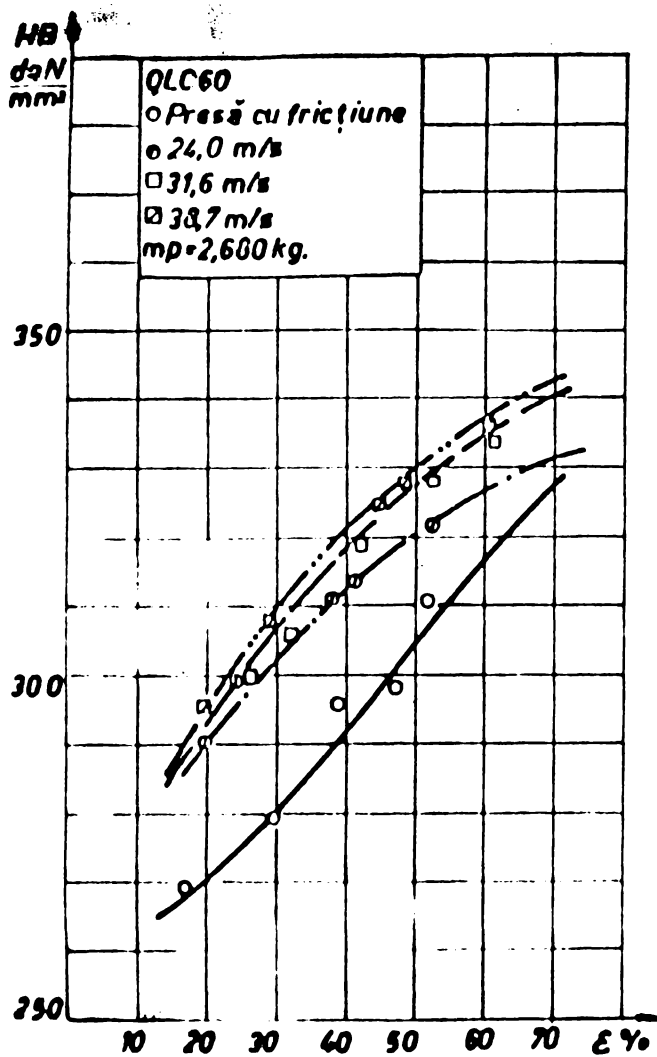


Fig.5.17.

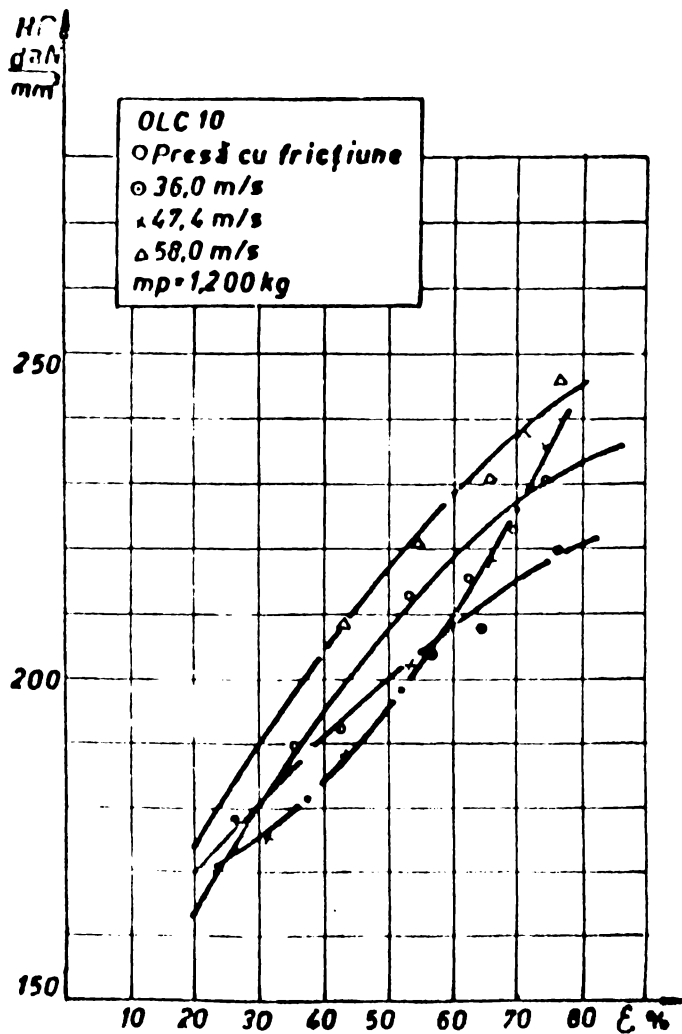


Fig.5.18.

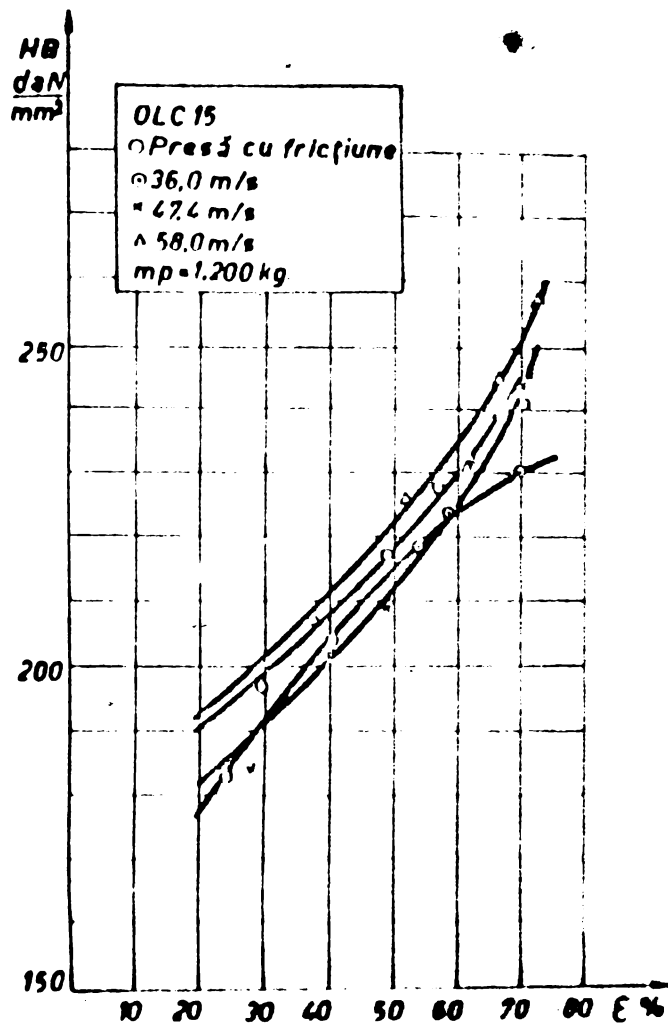


Fig.5.19.

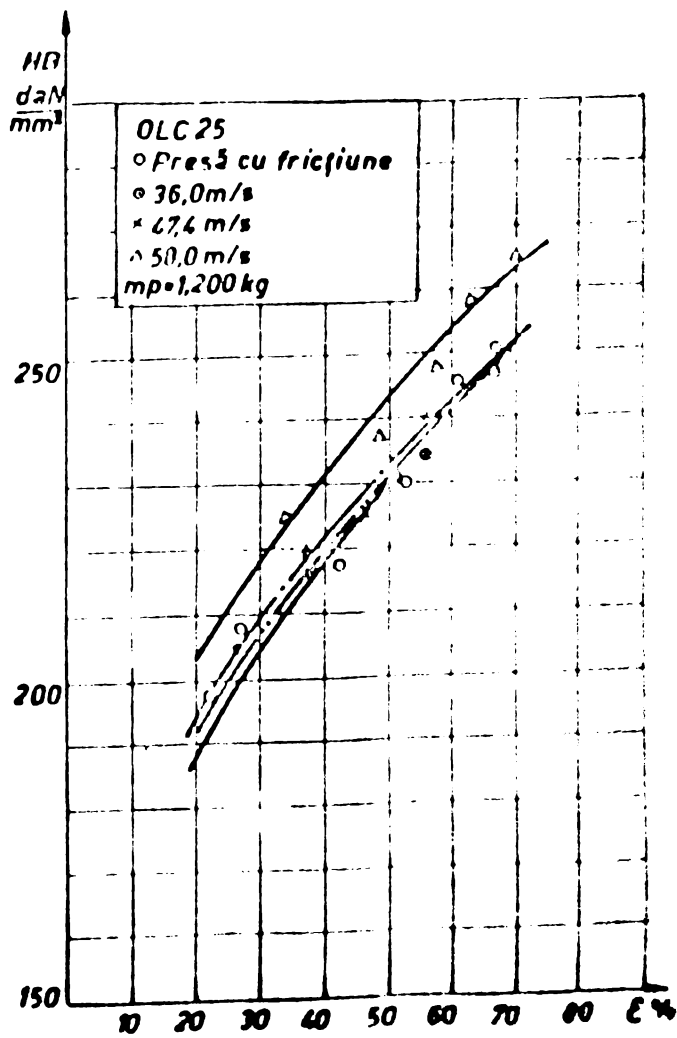


Fig.5.20.

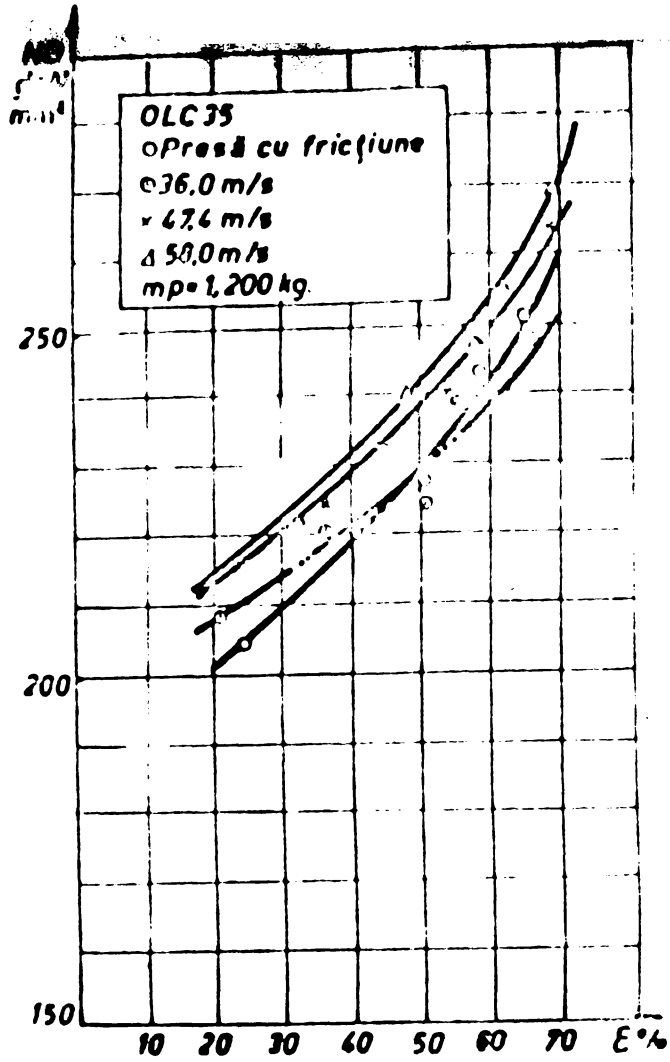


Fig.5.21.

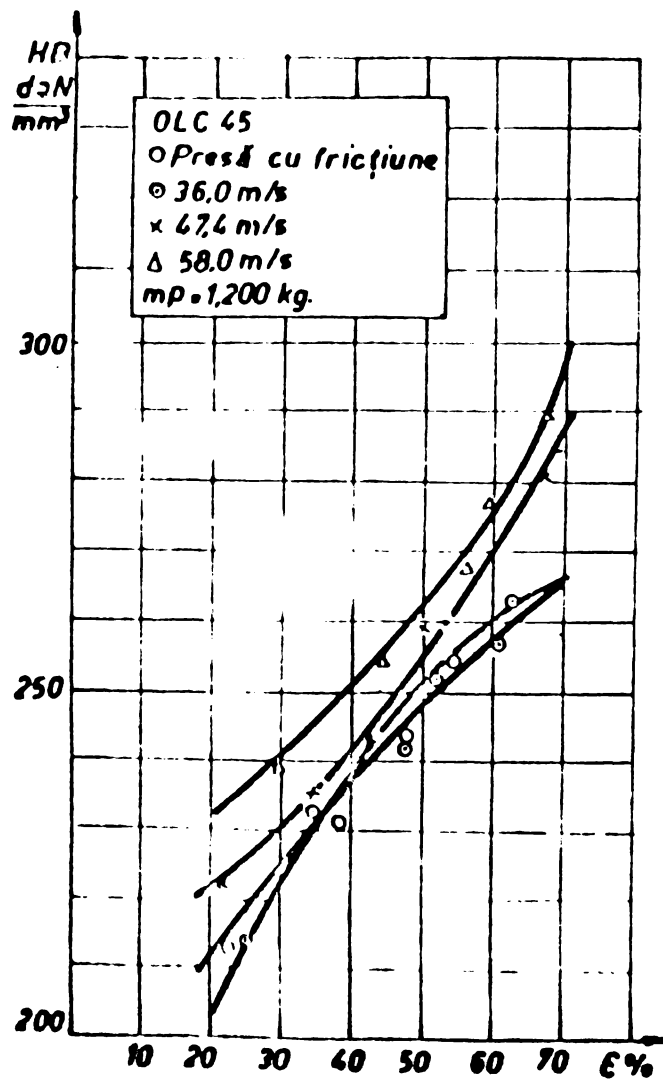


Fig.5.22.

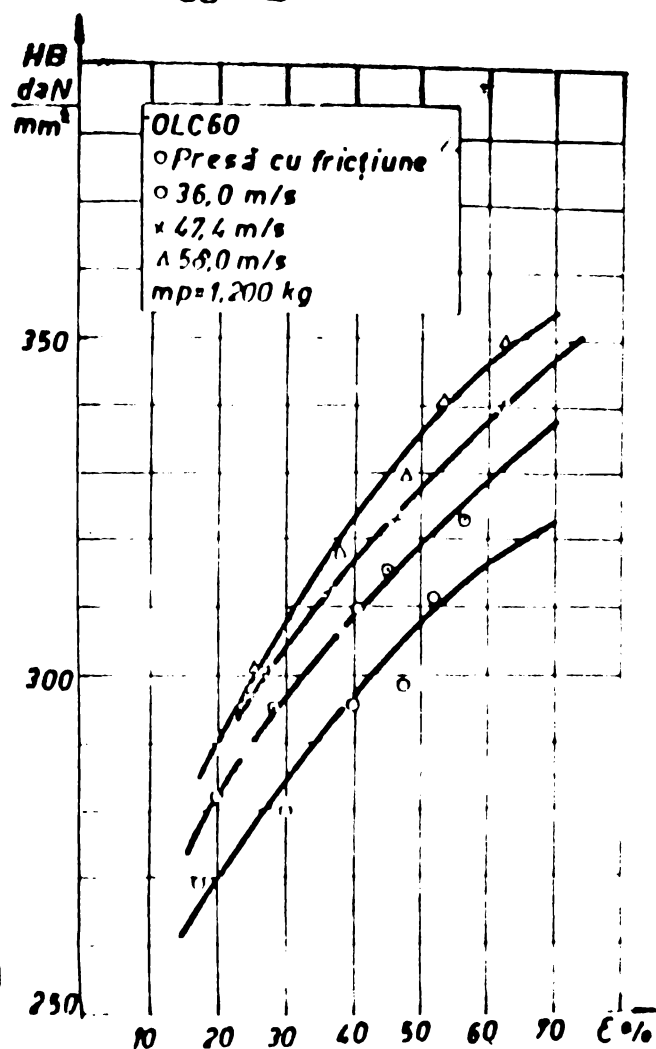


Fig.5.23.

Din analiza diagramelor rezultă următoarele:

- la oțelurile cu conținut scăzut de C (OLC 10 și 15) se obțin valori mai mari ale durității decât în cazul deformării la presă cu fricțiune, pentru viteze de impact mai mari de 30 m/s. Sub această valoare se obțin durități mai mici sau foarte apropiate de cele reprezentate în curba etalon;

- influența vitezei de impact crește o dată cu creșterea conținutului în C astfel că de la OLC 25 în sus, aproape în totalitate duritățile obținute pentru orice viteză de impact sînt superioare celor obținute la deformarea la presă cu fricțiune. O influență clară a vitezei de impact se observă pentru viteza de 58 m/s la care duritățile au valori cu mult peste curba etalon indiferent de conținutul în C a oțelurilor. De asemenea, influența vitezei de impact se face clar simțită în cazul OLC 60 la care duritățile obținute sînt mai mari decât cele înscrise în curba etalon indiferent de viteza de impact aplicată (fig.5.17 și 5.23);

- influența vitezei de impact se face remarcată mai ales spre extremitățile gradelor de deformare studiate ($\epsilon < 20\%$ și $> 50\%$). Între aceste valori ale gradelor de deformare se observă o oarecare grupare a mărimii durităților;

- pantele curbelor de variație sînt din ce în ce mai pronunțate o dată cu creșterea vitezei de impact, a gradului de deformare și a conținutului în C;

- pentru domeniul gradelor de deformare studiat, indiferent de viteza de impact, duritățile au valori continuu crescătoare spre deosebire de cazul deformării la cald cînd la un anumit grad de deformare curbele prezintă un maxim și apoi scad în mod vizibil datorită efectului termic al vitezei de impact (fig.5.3, 5.4, 5.5 [102]).

Apropierea valorilor durității de curba etalon în cazul oțelurilor cu conținut scăzut de C (C10,15) se explică prin apropierea condițiilor de deformare. În acest caz datorită plasticității ridicate a acestor oțeluri, chiar la viteze mari de impact se produce mai ales o deformare a grăunților și nu o distrugere a lor, astfel încît modificarea proprietăților se face în limita strictă a ecruizării datorită deformărilor intragranulare și mult mai puțin a celor intergranulare (fig.5.24). Obținerea unor



C1010 400
 $\epsilon = 53.3\%$ $V_i = 47.4 \text{ m/s}$
Fig.5.24.

durități mai mari în cazul deformării la presa cu fricțiune față de cazul deformării la viteze mari de impact se poate pune pe seama efectului de relaxare care are loc în urma deformării. Relaxarea sau revenirea este de obicei definită ca o restabilire a proprietăților fizice și mecanice ale materialului

deformat plastic la rece, fără afectarea microstructurii. În timpul relaxării se reduce apreciabil deformarea rețelei. Sînt afectate obișnuit proprietățile sensibile la defecte punctiforme între care și duritatea. În cazul concret al deformării plastice cu viteze mari de impact o dată cu creșterea acesteia, crește și temperatura probei deformate, și ca o consecință efectul de relaxare este mai pronunțat decît în cazul deformării la presa cu fricțiune, iar duritățile obținute sînt evident mai mici.

O dată cu creșterea conținutului în C, apar însă fenomenul de fragilizare a materialului, care face ca alături de deformarea grăunților să se producă și o distrugere a acestora, astfel încît structura devine mai fină și corespunzător duritățile obținute

mai mari. Influența vitezei de impact se mai explică și prin creșterea pronunțată a numărului de defecte punctiforme (vacanțe) respectiv dislocații (fig.5.25 [36]). După cum se observă numărul

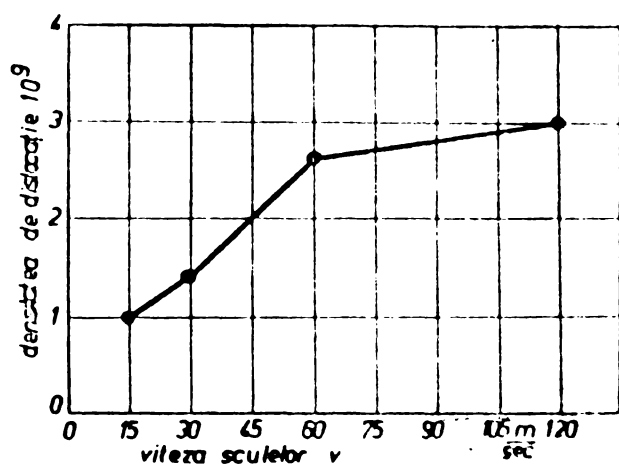


Fig.5.25.

și măsurarea concretă a granulației au dus la concluzia că viteza de impact nu influențează prea mult mărimea grăunților, aceștia menținându-se aproximativ în același ordin de mărime, indiferent de viteza de impact. Coroborând rezultatele experimentale obținute cu cele prezentate în literatura de specialitate [5], [110], [116] în care se demonstrează că la viteze mari alături de luncare apare cu intensitate sporită macelarea, se poate afirma că influența vitezei de impact se face simțită nu printr-o structură mai fin obținută ci prin apariția maclelor în timpul deformării. Maclele precede luncarea, producând distorsiuni ale rețelei, care influențează direct procesul deformării prin obstacolele ce le formează în calea deplasării dislocațiilor. Se produce în acest fel o ecruisare suplimentară a materialului deformat care influențează direct asupra durității. Maclele sînt cu atît mai numeroase cu cît viteza de impact și respectiv mărimea grăunților este mai mare [5], [20]. Cum indiferent de tipul deformării (viteze mici sau viteze mari) mărimea grăunților este aproximativ aceeași rezultă că la același grad de deformare factorul preponderent care influențează duritatea este viteza de impact. Aceasta se face simțită în primele momente ale deformării cînd dimensiunea grăunților este încă mare și ca o consecință numărul maclelor apărute este de asemenea mare.

Pentru studiul în continuare a influenței vitezei s-au trasat curbele de variație a durității în funcție de viteza de impact mai întîi pentru fiecare calitate de oțel la diferite grade de deformare (fig.5.26...5.31) și apoi pentru fiecare grad de deformare și diferite calități de oțel (fig.5.32...5.36).

de dislocații crește mai pronunțat în domeniul $v = 15...60$ m/s, adică chiar domeniul atins în lucrare. Creșterea pronunțată a numărului de dislocații duce în final la tensionarea puternică a materialului și corespunzător acesta își îmbunătățește proprietățile mecanice printre care și duritatea. Microstructurile efectuate, precum

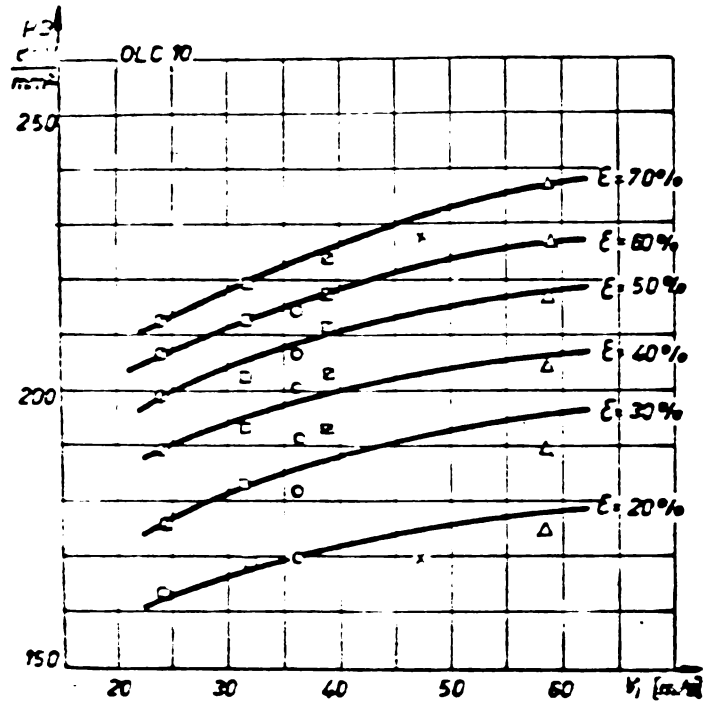


Fig. 5.26.

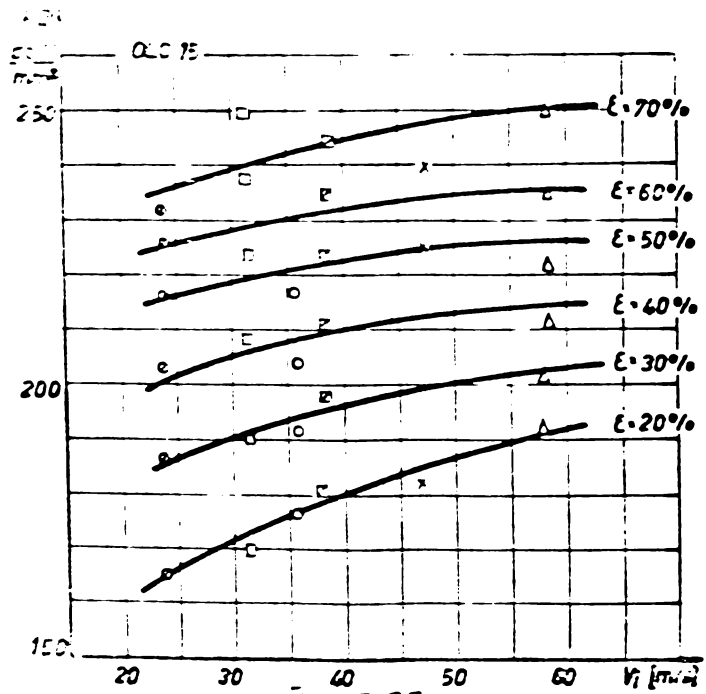


Fig. 5.27.

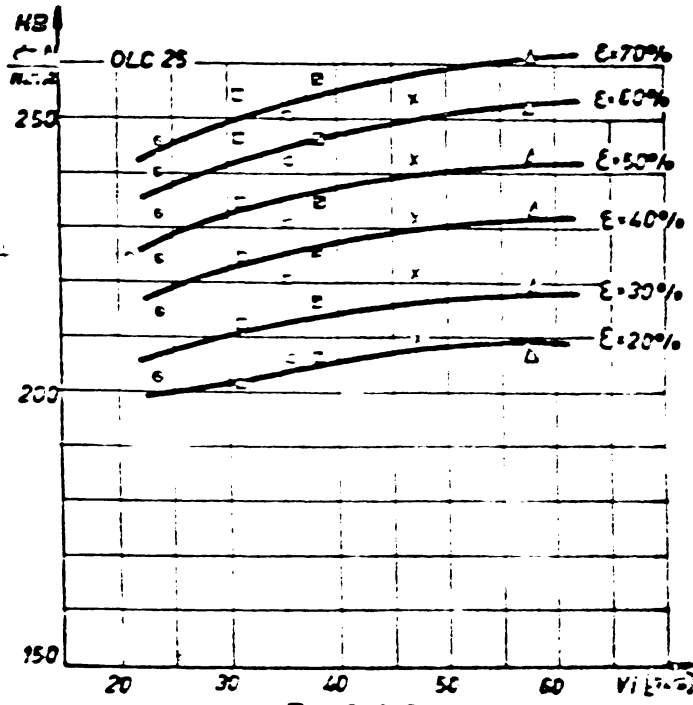


Fig.5.28.

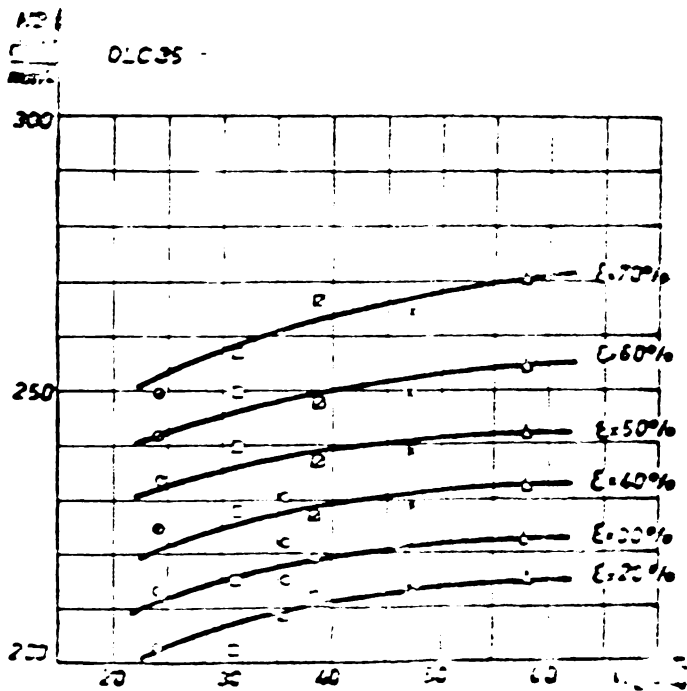


Fig.5.29.

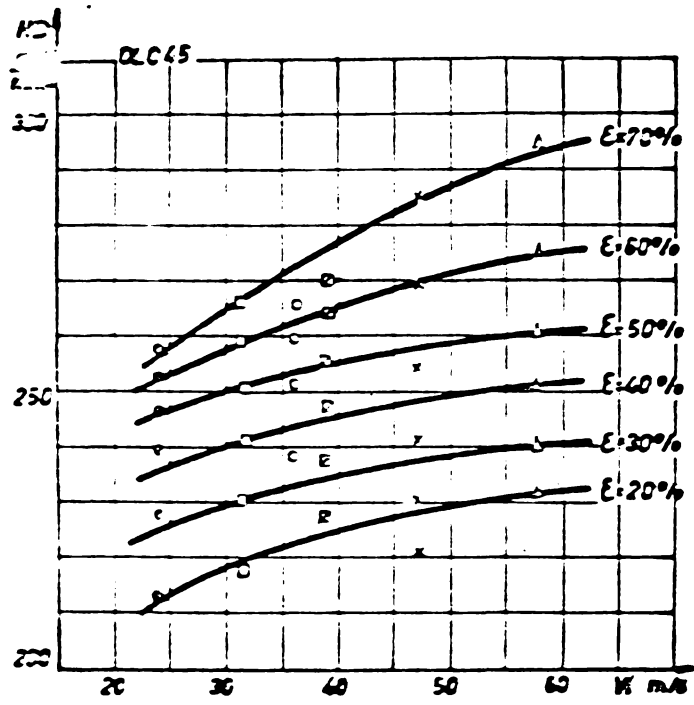


Fig.5.30.

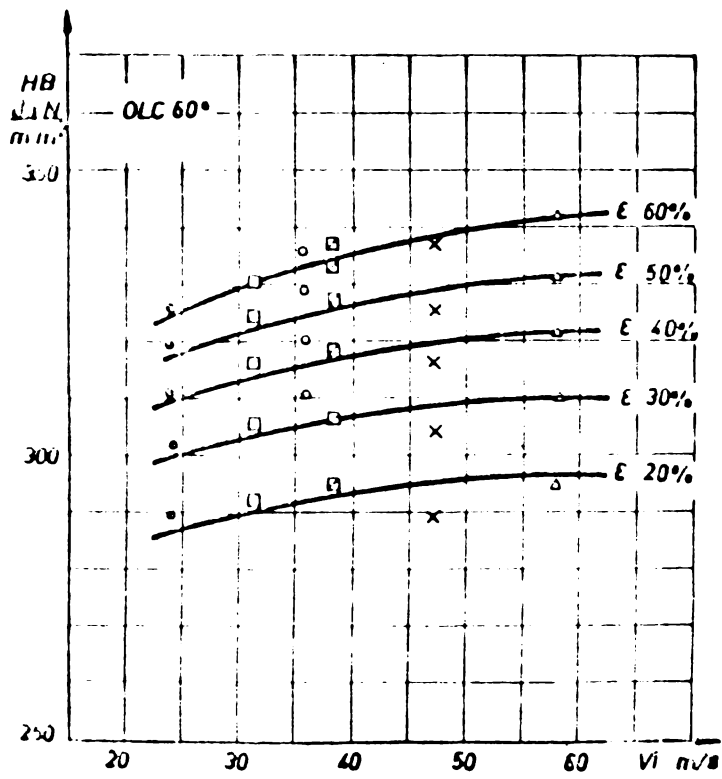


Fig.5.31.

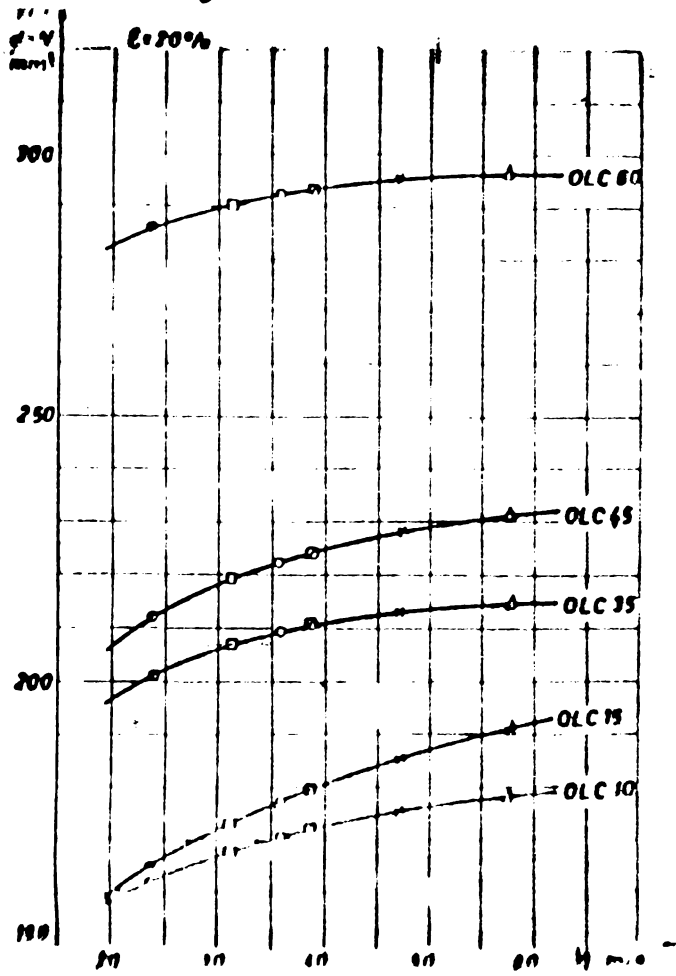


Fig. 5.32.

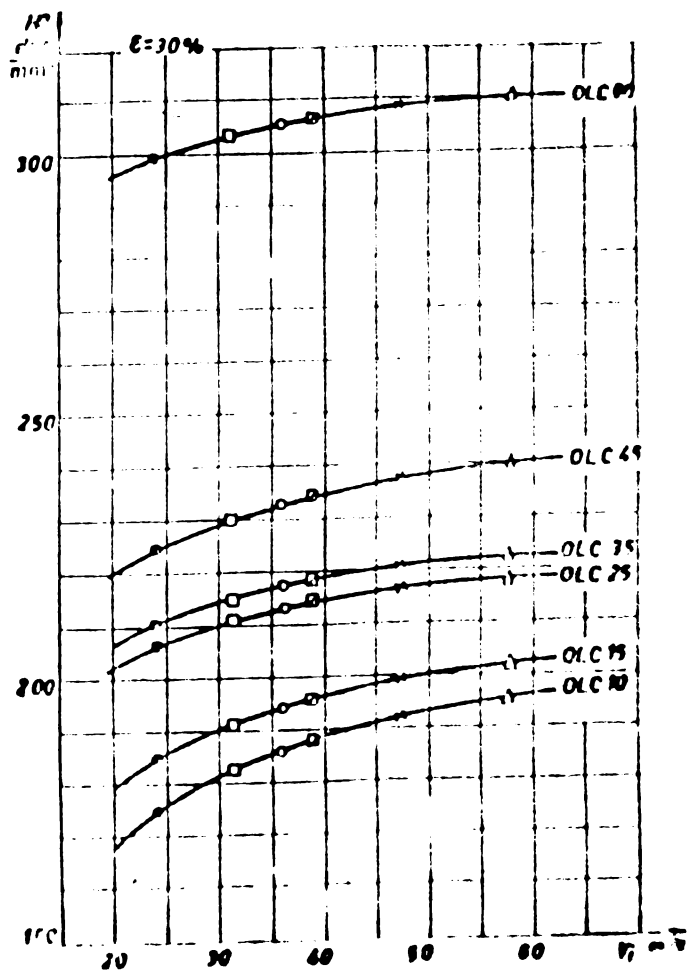


Fig. 5.33.

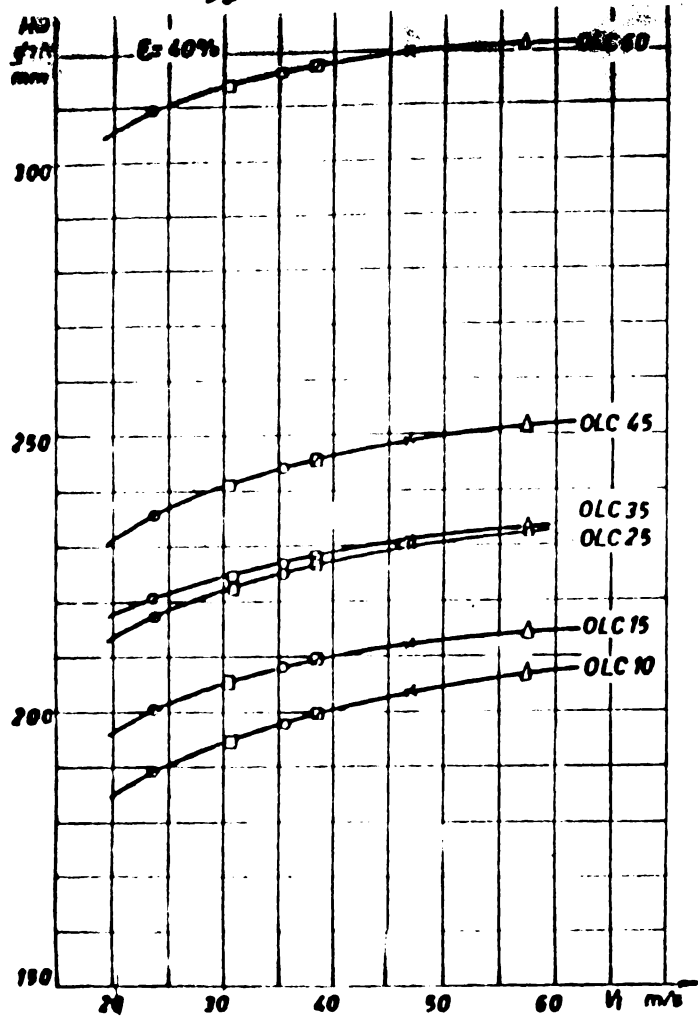


Fig. 5.34.

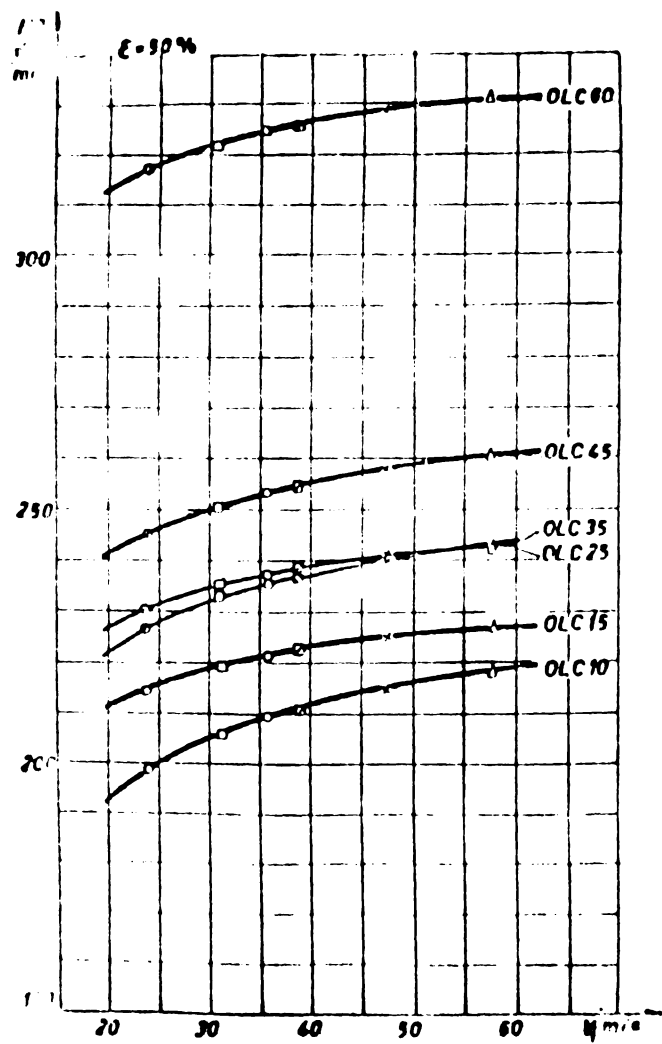


Fig. 5.35.

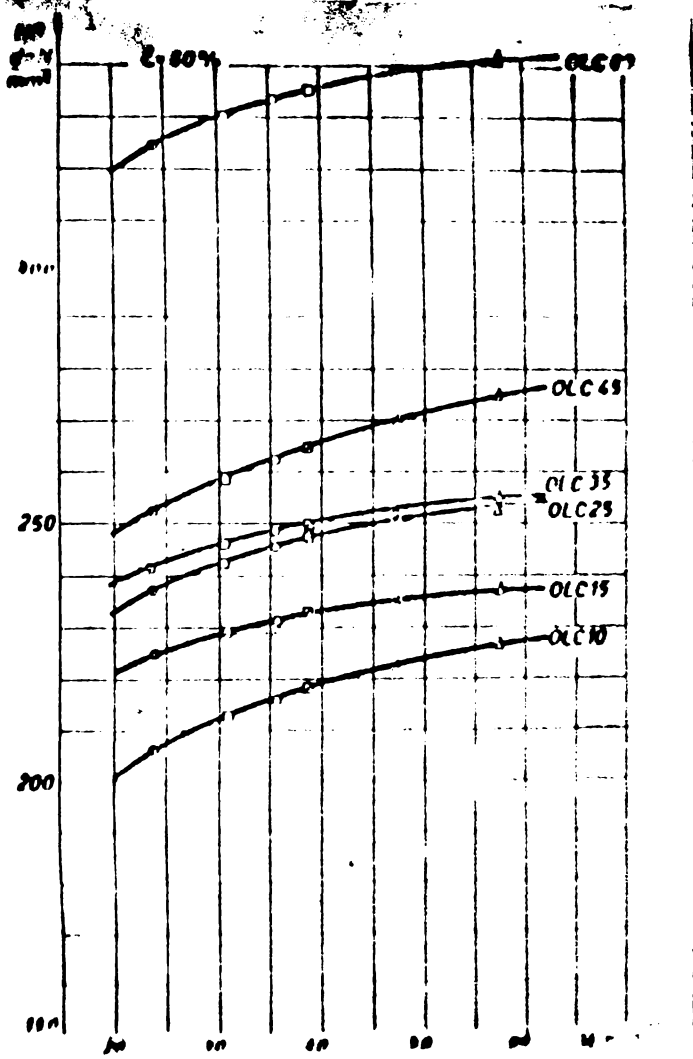


Fig. 5.36.

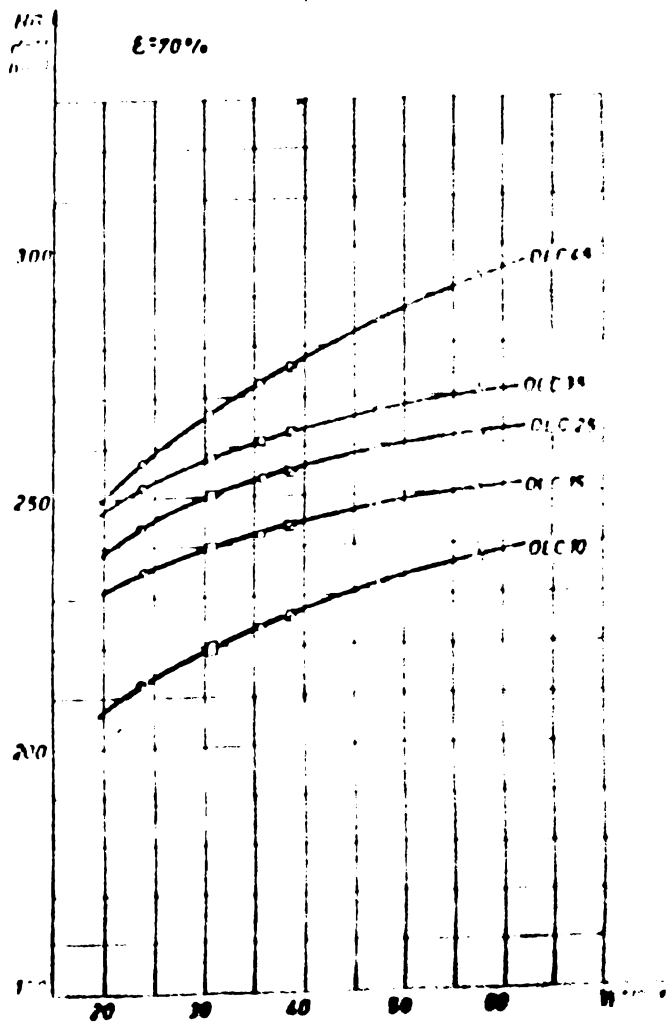


Fig. 5.37.

Din această serie nouă de diagrame se remarcă în mod deosebit următoarele:

- duritatea crește evident o dată cu creșterea vitezei de impact, pentru toate oțelurile studiate. Duritatea este cu atât mai mare cu cât gradul de deformare este mai mare;

- creșterea cea mai pronunțată a durității se obține la grade mici de deformare. Între $\epsilon = 20\%$ și $\epsilon = 70\%$ salturile de duritate se pot considera constante, cu mici excepții care nu sînt concludente;

- se remarcă comportarea apropiată a oțelurilor (LC 25 și OLC 35 indiferent de viteza de impact pentru grade de deformare ce nu depășesc valoarea $\epsilon = 60\%$.

La $\epsilon = 70\%$ diferența de duritate obținută pentru cele două oțeluri este evidentă (fig. 5.37);

- panta curbelor de variație crește o dată cu creșterea conținutului în C și a vitezei de impact.

Creșterea pronunțată a durității la grade mici de deformare se datorește în primul rînd modificărilor care apar în comportarea materialului și care au o intensitate maximă în primele momente ale deformării (micșorarea pronunțată a grăunților, apariția cu precădere a maculelor, majorarea numărului de dislocații etc.).

O dată cu creșterea gradului de deformare respectiv o dată cu micșorarea grăunților apar fenomene noi cum ar fi de exemplu interacțiunea dintre dislocații, dintre acestea și noile obstacole apărute în cursul deformării și care sînt funcție atât de conținutul în C cât și de viteza de impact. Acestea fac ca duritatea să crească în continuare, dar influența lor nu mai este așa pronunțată ca aceea a mărimii grăunților în primele faze ale deformării.

Influența vitezei de impact asupra durității se explică și prin gradul de tensionare, respectiv prin mărirea tensiunilor interne rămase după deformare. Astfel, tensiunile reziduale remanente sînt mult mai mari la deformarea cu viteze mari de impact, decît în cazul deformării la presa cu fricțiune. De exemplu în cazul deformării la presa cu fricțiune a OLC 35 cu $\epsilon = 57\%$, $\tilde{\sigma}_p = 78,8 \text{ daN/mm}^2$, iar la deformarea cu viteze de impact de 58 m/s pentru $\epsilon = 58\%$, $\tilde{\sigma}_p = 190,5 \text{ daN/mm}^2$. După cum se observă diferența foarte mare dintre cele două tensiuni $\tilde{\sigma}_p$, nu poate fi justificată de diferența foarte mică care există între gradele de deformare ϵ , ci trebuie pusă pe seama vitezei de impact

care crește foarte mult.

Tensionarea foarte puternică la viteze mari de impact este datorată fenomenelor complexe care apar în timpul deformării (precipitări de faze noi, creșterea coeficientului de difuzie a fazelor, dispersia fină a carburilor etc.).

Unii autori [20], pe baza coroborării rezultatelor proprii cu a altor cercetători ajung la concluzia că există o viteză critică de impact:

$$v_{cr} = \int_0^{\epsilon_{cr}} \left(\frac{d\tilde{v}}{d\epsilon} \right)^{1/2} d\epsilon \quad (5.12)$$

unde: ϵ_{cr} este deformarea care corespunde rezistenței la rupere a materialului; $d\tilde{v}/d\epsilon$ -panta curbei tensiune-deformare; ρ -densitatea de material.

Pentru sarcini prin șoc aplicate cu viteze mai mari decât v_{cr} , materialul se va deforma dar nu se va rupe. Se apreciază că pentru majoritatea metalelor valoarea vitezei critice este cuprinsă între 60...150 m/s.

Având în vedere că vitezele care fac obiectul lucrării nu depășesc 60 m/s, nu există cel mult teoretic, temerea că deformarea ar fi depășit limita plasticității. Rezultatele obținute pentru deformarea pînă la atingerea vitezei critice sînt confirmate și de literatura de specialitate.

Revenind asupra curbelor din fig.5.12...5.17 respectiv 5.18...5.23 se remarcă faptul că valorile obținute pentru duritate în cadrul celor două grupe de viteze de impact sînt foarte apropiate, ba chiar uneori, se obțin valori mai mari ale durității pentru viteze mai mici de impact, dar masa pistonului în mișcare mai mare. Se exclude de la observația de mai sus viteza de 58 m/s la care rezultatele sînt net diferențiate la aceleași valori ale energiei de impact. Se poate desprinde concluzia că deformarea este influențată nu numai de viteza de impact propriu-zisă, ci și de energia de impact, care se poate calcula cu formula simplă:

$$W = \frac{1}{2} m_p v_1^2 \quad (5.13)$$

V aloarele obținute pentru energiile de impact W_1 în cazul concret al vitezelor și pistoanelor utilizate se dau în tabelul 5.1.

TABELUL 5.1.

Energii de impact la deformare W_1

Nr. crt.	m_{p1} kg	v_1 m/s	W_1 kg m/s	m_{p2} kg	v_1 m/s	W_1 kg m/s
1		24	1543		36	1560
2	2,680	31,6	2681		47,4	2700
3		38,7	4025		58	4040

In fig.5.38...5.43 se reprezintă curbele de variație ale durității în funcție de energia de impact pentru fiecare calitate oțel și diferite grade de deformare.

Din diagramele prezentate rezultă că:

- indiferent de calitatea oțelului încercat se constată o apropiere aproape perfectă a valorilor durității pentru cazul deformării cu viteza de 24 m/s și masa pistonului de 2,680 kg, respectiv 36 m/s și masa pistonului de 1,200 kg. O oarecare diferențiere se constată la grade mici de deformare ($\epsilon < 20\%$) pentru OLC 45 și OLC 60;

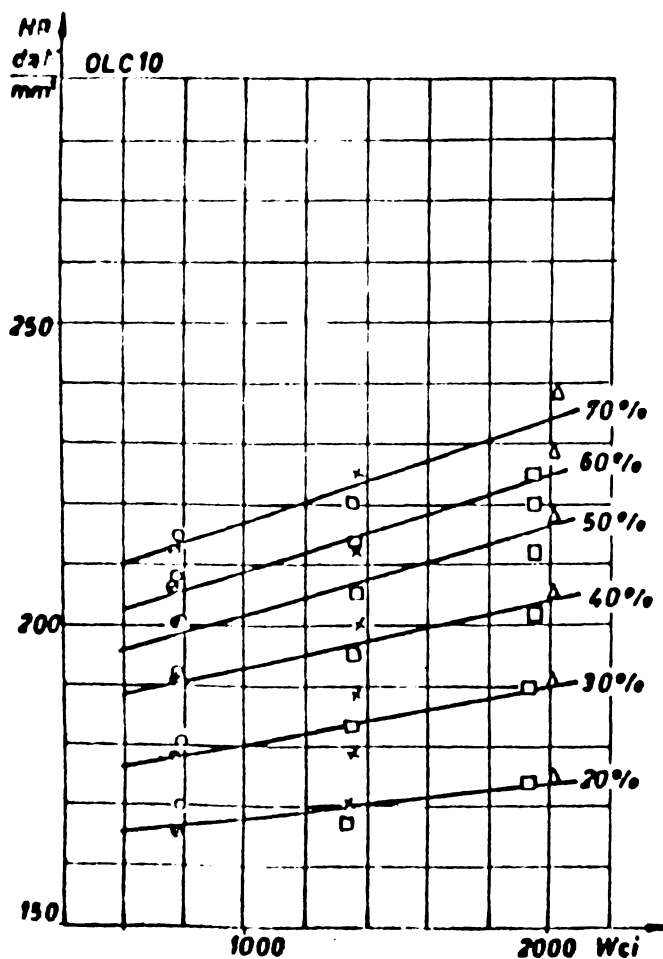


Fig. 5.38.

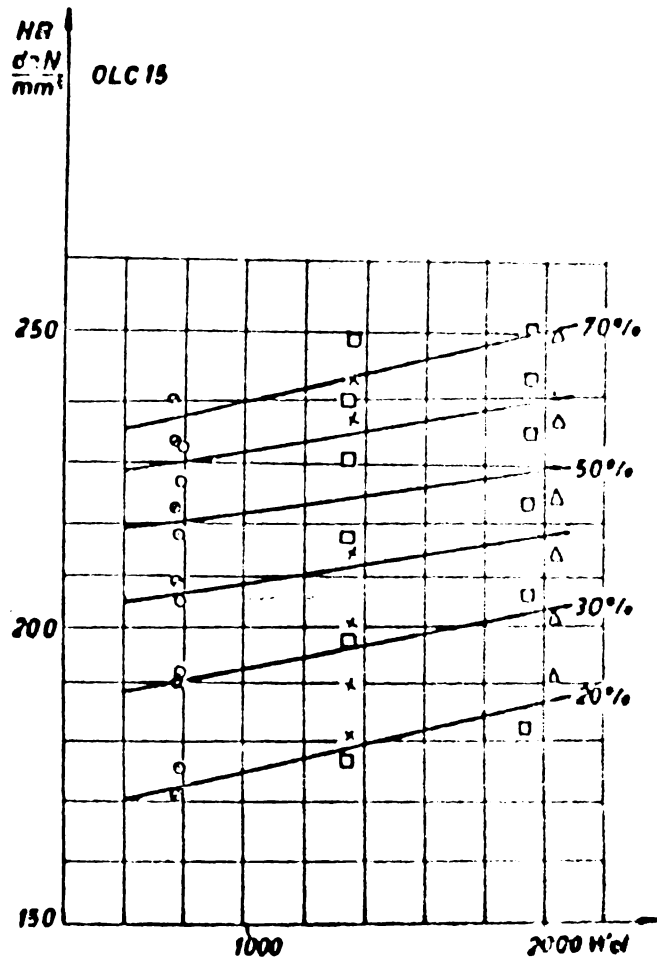


Fig.5.39.

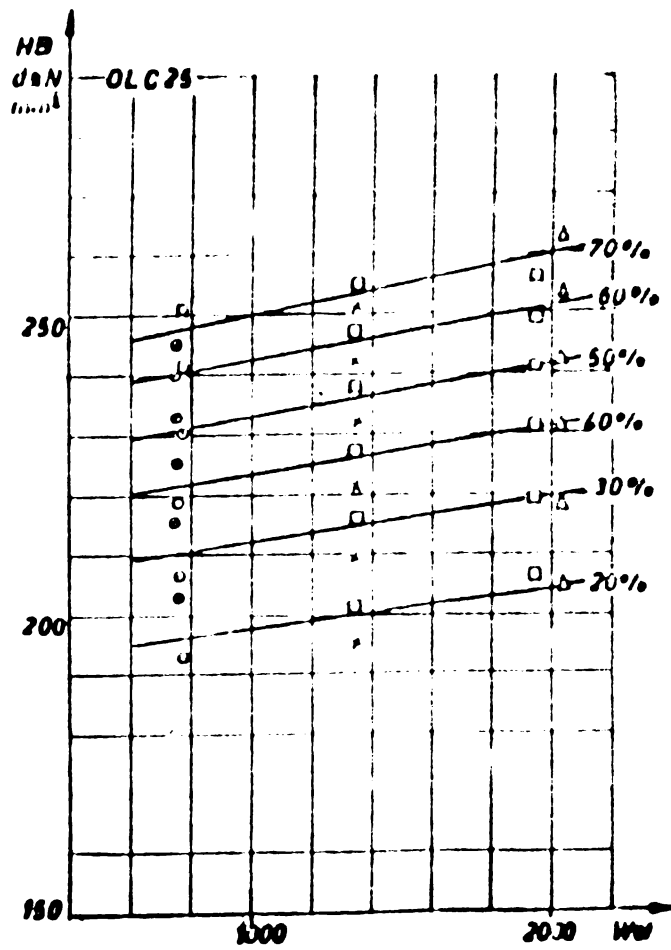


Fig.5.40.

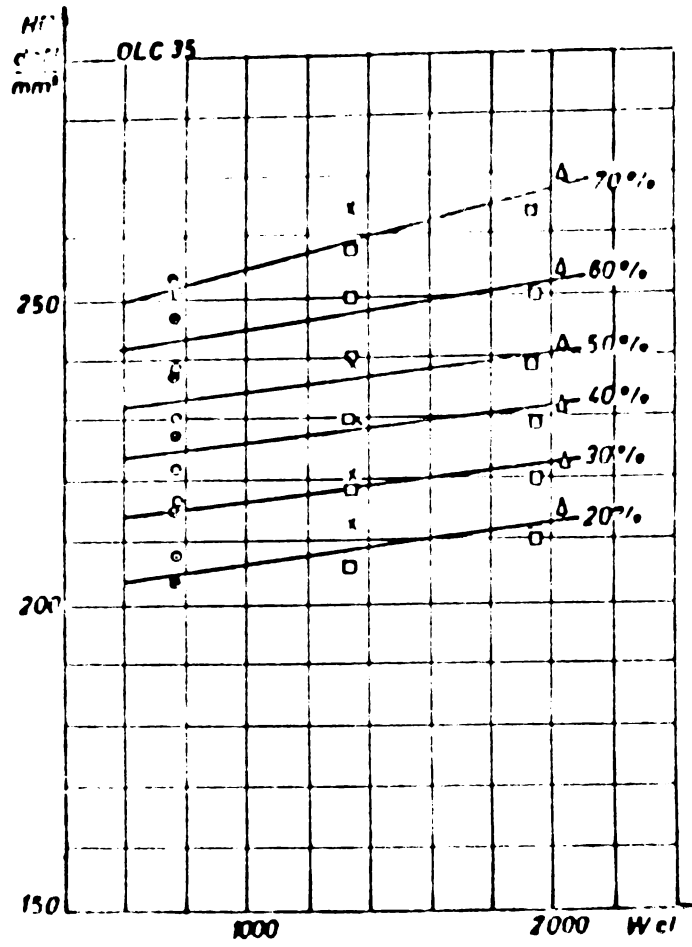


Fig.5.41.

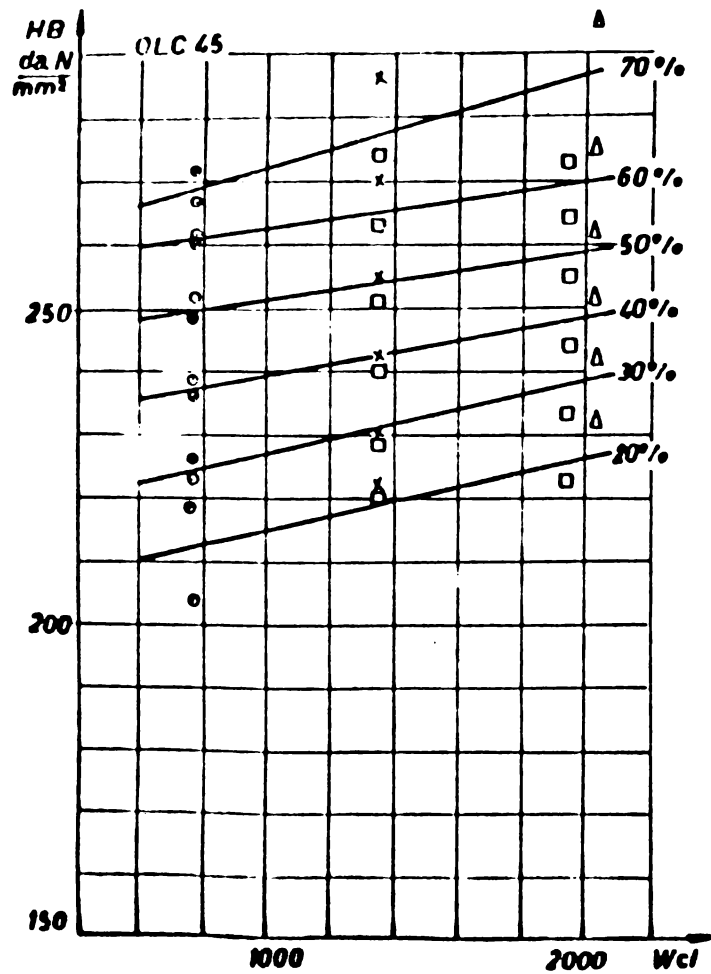


Fig.5.42.

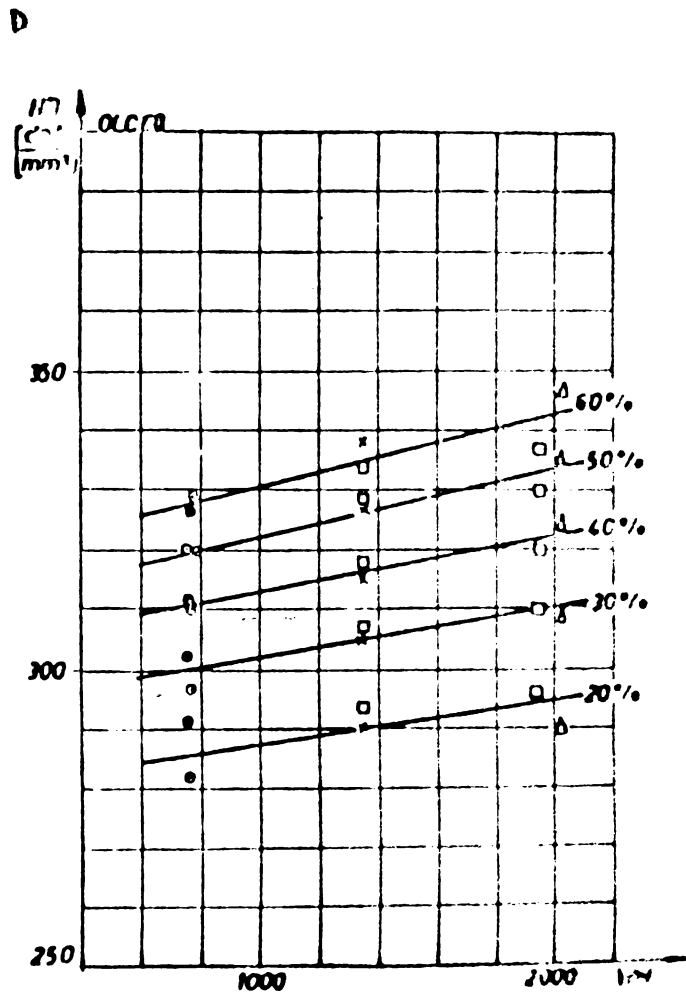


Fig.5.43.

- pentru oțelurile cu conținut scăzut de C (C/C 10,15,25) apropierea valcrlor durității se menține cu mici abateri și pentru celelalte două perechi de viteze utilizate (31,6 și 47,4 respectiv 38,7 și 58 m/s);

- o dată cu creșterea conținutului în C, apare o diferențiere a durităților obținute, în majoritatea cazurilor în favoarea vitezei mai mari de impact;

Această diferențiere este proporțională cu gradul de deformare aplicat și cu conținutul în C (C/C 35 și 45) (Fig.5.41 și 5.42).

Pe baza observațiilor de mai sus se pot face următoarele afirmații:

- în cazul în care vitezele de impact sînt obținute prin variația greutății părților căzătoare, apare posibilă aprecierea comportării la deformare a materialelor după energia de impact dacă vitezele de impact au valori mai mici de 50 m/s, iar conținutul în C este mai mic de 0,35 %.

Pentru conținuturi în C de 0,35 % sau mai mari și pentru viteze mai mari de 50 m/s devine preponderentă viteza de impact și nu energia de impact.

In acest sens utilajele de deformare se pot construi în două variante:

- cu greutatea părții căzătoare mare și viteza de impact care să nu depășească 45...50 m/s;

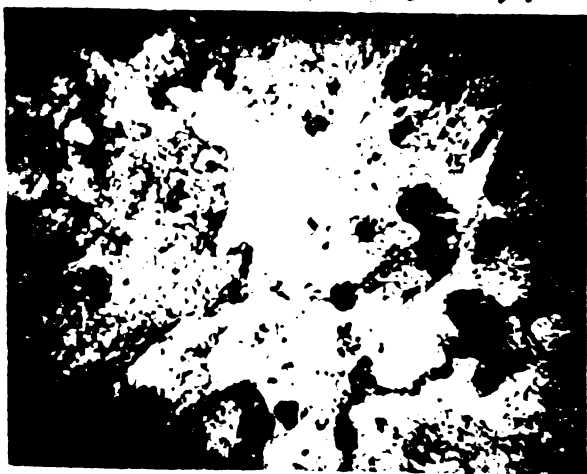
- cu greutatea părții căzătoare mică dar cu viteze de impact mai mari de 50 m/s.

Varianta optimă se alege în funcție de condițiile existente, fluidul de lucru fiind într-un fel preponderent. Din punct de vedere al greutății utilajului, respectiv al economiilor de material se preferă varianta a doua întrucât se obține același efect al deformării în condiții mult mai comode de lucru.

De o importanță majoră în ceea ce privește influența vitezei de impact asupra proprietăților de material sînt și modificările care apar în evoluția structurii metalului deformat. Literatura de specialitate este deficitară în acest sens referirile scoțînd totuși în evidență existența unor asemenea modificări. Se evidențiază mai ales faptul că o dată cu creșterea vitezei de impact și a gradului de deformare se observă apariția de substructuri care duc în final la o eruisare suplimentară a materialului. Microstructurile efectuate pe un număr mare de probe, deformate în condiții diferite de lucru scot în evidență aceste substructuri confirmînd în acest fel așteptările.

Studiînd cu atenție microstructurile se pot evidenția în plus alte cîteva aspecte, care justifică comportarea materialelor studiate în sensul celor afirmate mai sus:

- astfel, se observă o tendință pronunțată în ceea ce privește fragmentarea, finisarea și globulizarea structurii obținute după deformare (fig. 5.44);



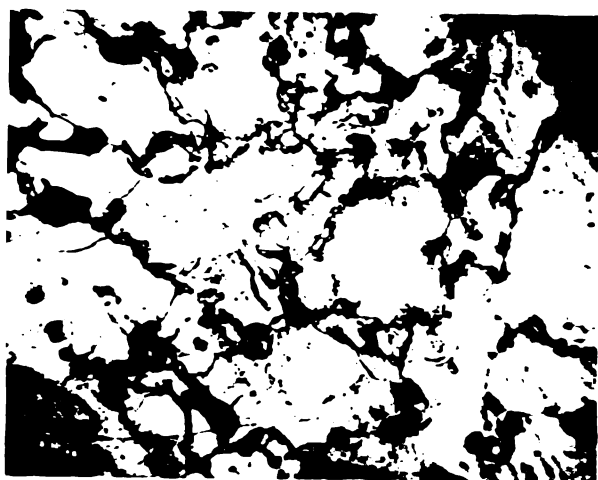
OLC 10 400
 $\Sigma = 65,3\%$ $V_i = 58 \text{ m/s}$



OLC 15 400
 $\Sigma = 49,6\%$ $V_i = 47,4 \text{ m/s}$

a

b



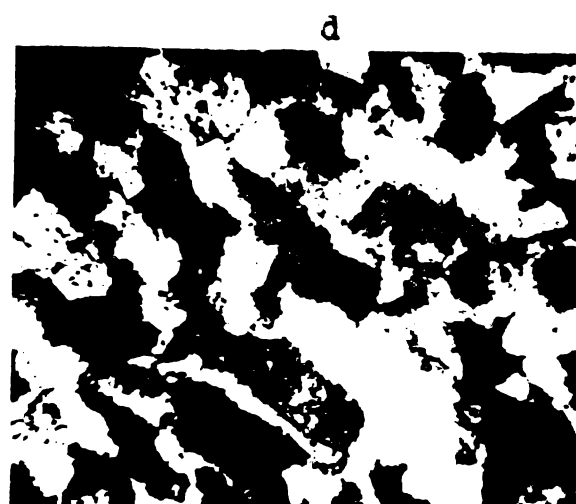
OLC 15 $\times 400$
 $\Sigma = 51,4\%$ $V_i = 24\%$



OLC 25 $\times 400$
 $\Sigma = 42,5\%$ $V_i = 31,6\%$



OLC 35 $\times 400$
 $\Sigma = 57\%$ $V_i = 24\%$



OLC 45 $\times 400$
 $\Sigma = 60,4\%$ $V_i = 31,6\%$

Fig.5.44.

- crește de asemenea gradul de dispersie al fazelor (fig.5.44, b) lucru acesta se datorează atât fenomenului de distrugere a acestora, cât și fenomenului de difuzie a fazelor, difuzie care crește cu creșterea vitezei de impact și a gradului de deformare [87]. Această dispersie produce o durificare suplimentară cunoscută chiar sub denumirea de durificare prin dispersie, care în final duce la creșterea durității materialului. Difuzia suplimentară se datorește fenomenului de deplasare a vacanțelor care se măresc o dată cu creșterea vitezei de impact și a gradului de deformare;

- un fenomen frecvent observat și pus foarte pregnant în evidență este cel de globulizare a perlitei (fig.5.44, a, b). Această globulizare este specifică mai ales oțelurilor cu conținut scăzut de C ($C\% < 0,35$). - e măsura creșterii conținutului în C se observă o tendință mai pronunțată de finisare a structurii, scăzând

in același timp fenomenul de globulizare a perlitei a cărei lamele devin însă mai fine. Globulizarea perlitei sau finisarea lamelilor acesteia contribuie evident la mărirea gradului de ecruisare și implicit la mărirea durității acestuia. In final, se obțin proprietăți mecanice îmbunătățite specifice tratamentelor termice sau a altor prelucrări suplimentare (cum ar fi durificarea prin deformare, prin sablare, prin scintei etc.) (fig. 5.44, f, g);

- o altă caracteristică a deformării plastice cu viteze mari de impact este aceea a formării structurilor mixte (fig. 5.44, e), adică, structuri cu grăunți de diferite dimensiuni ca o consecință fie a modului neomogen de deformare plastică, fie a orientărilor preferențiale a anumitor grăunți față de direcția forței de deformare. Acest lucru duce la deformarea pronunțată a unor grăunți față de ceilalți a căror orientare față de direcția forței de acționare este preferențială confirmând în acest fel creșterea gradului de neomogenitate a piesselor deformate plastic cu viteze mari de impact.

Pentru gama de viteze utilizate și în cazul materialelor studiate cel mai slab se manifestă fenomenul de formare de noi faze, ceea ce dovedește că pentru cazul concret al cercetării efectuate acest fenomen nu este specific.

5.5. Concluzii

- Majoritatea încercărilor cu viteze mari de impact scot în evidență influența acesteia asupra rezistenței la deformare. Rezistența la deformare crește cu creșterea vitezei de impact. Interpretarea rezultatelor este însă deficitară și neconcludentă.

- Măsurătorile suplimentare efectuate (tensiuni reziduale, granulație, microstructuri) permit o interpretare corespunzătoare a rezultatelor proprii.

- Influența vitezei de impact se face simțită mai ales la grade mici de deformare când intensitatea transformărilor ce au loc în material ating valoarea maximă.

- Creșterea durității cu creșterea vitezei de impact se datorează în principal următorilor factori:

- ecruisarea puternică a materialului datorită apariției cu precădere a macelilor, creșterii pronunțate a numărului de defecte (vacanțe, dislocații), finisarea structurii, creșterea valorii tensiunilor interne reziduale etc.;

- modificărilor structurale din care se remarcă în mod deosebit tendința de globulizare și respectiv finisare a grăun-

ților de perlită;

- creșterii gradului de dispersie a fazelor datorită distanțării acestora și a măririi gradului de difuzie a lor în masa metalică de bază.

- Cu ajutorul vitezelor mari de impact se pot obține proprietăți mecanice îmbunătățite în piesele deformate, eliminând astfel alte procedee de prelucrare.

- Cu creșterea vitezei de impact scade valcarea forțelor de frecare de contact și în acest mod se îmbunătățește umplerea cavității din matriță.

.

C A P I T O L U L 6

INFLUENTA MATERIALULUI

6.1. Influenta continutului in carbon.

Prelucrarea materialelor metalice cu viteze mari de impact este limitată din mai multe motive. Unul din ele este utilajul necesar pentru deformare. Utilajele existente, pentru prelucrările prin forjare-matrițare sînt puține, iar sfera lor de răspîndire este foarte redusă. Metoda se găsește încă în stadiu incipient și experimentarea se face mai ales pe materiale moi, oțelul fiind înțrebuințat cu precădere în stare încălzită la conținuturi mici în carbon. Acesta, prezintă însă dezavantajul distribuției neuniforme a proprietăților de rezistență în secțiunea piesei, determinată de cele mai multe ori de temperatura joasă de revenire (cca. 200°C), care se poate atinge chiar în cazul deformării plastice la rece. În general, în literatura de specialitate [5], [88], [102], [109], [110], [117], se tratează prelucrarea prin deformare a unei mărci de oțel, foarte rar două sau trei calități la care elementul preponderent să fie conținutul în C. Chiar în acest ultim caz, observațiile se fac în mod obișnuit individualizat pentru fiecare marcă de oțel fără a se face o apreciere globală prin prisma conținutului în C.

Acesta a fost unul din motivele principale pentru care s-a ales drept material de experimentare oțelurile carbon de calitate. Ele se elaborează mai îngrijit decît celelalte mărci de oțeluri și într-o gamă foarte largă din punct de vedere al conținutului în C. Excluzînd influența celorlalte elemente care rămîn practic constante, putem să considerăm ca singurul element variabil carbonul.

În cap. 2. Măsurători și rezultate experimentale, se dau detalii asupra oțelurilor utilizate precum și asupra modului de deformare a epruvetelor. Rezultatele măsurătorilor sînt trecute în tab. 2.1. Avînd la baza rezultatele înscrise în tab. 2.1. și folosind o parte a curbelor care au făcut obiectul capitolului precedent, s-au trasat mai întîi curbele de variație a durității HB în funcție de gradul de deformare ϵ % pentru deformarea la presa cu fricțiune și pentru cele 6 viteze de impact utilizate, fiecare diagramă cuprinzînd curbele corespunzătoare celor 6 mărci de oțeluri utilizate (fig. 6.1...6.7).

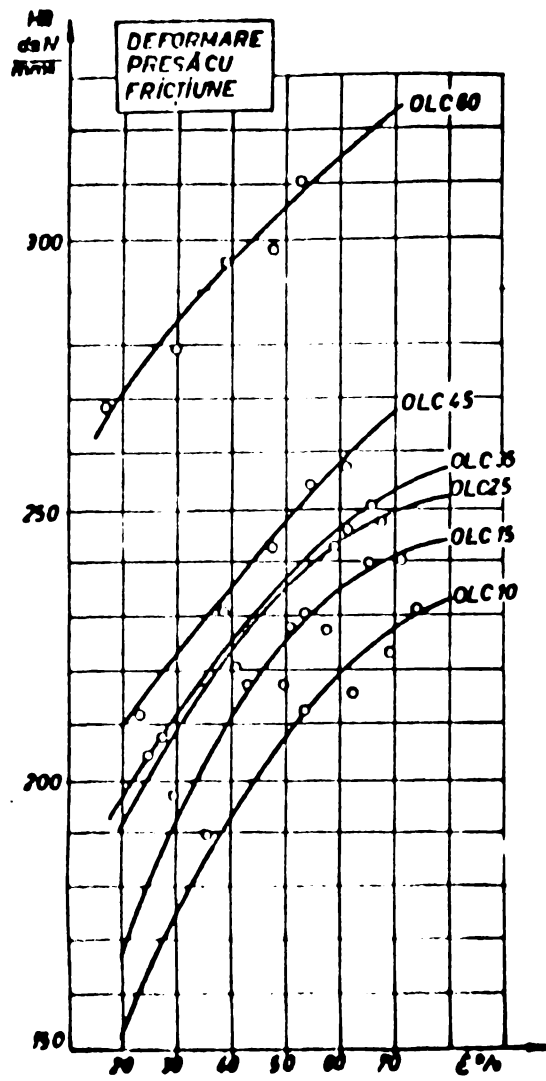


Fig. 6.1.

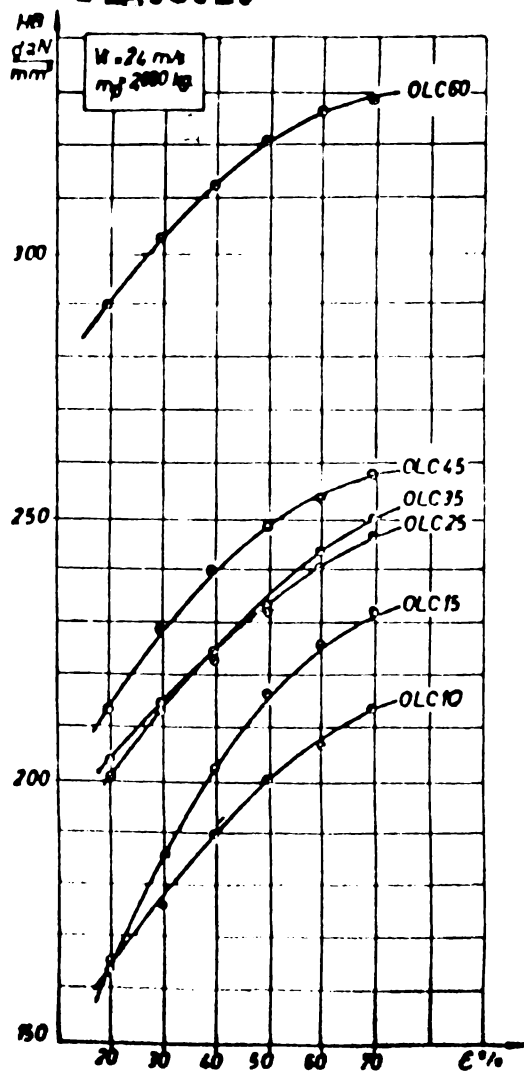


Fig. 6.2.

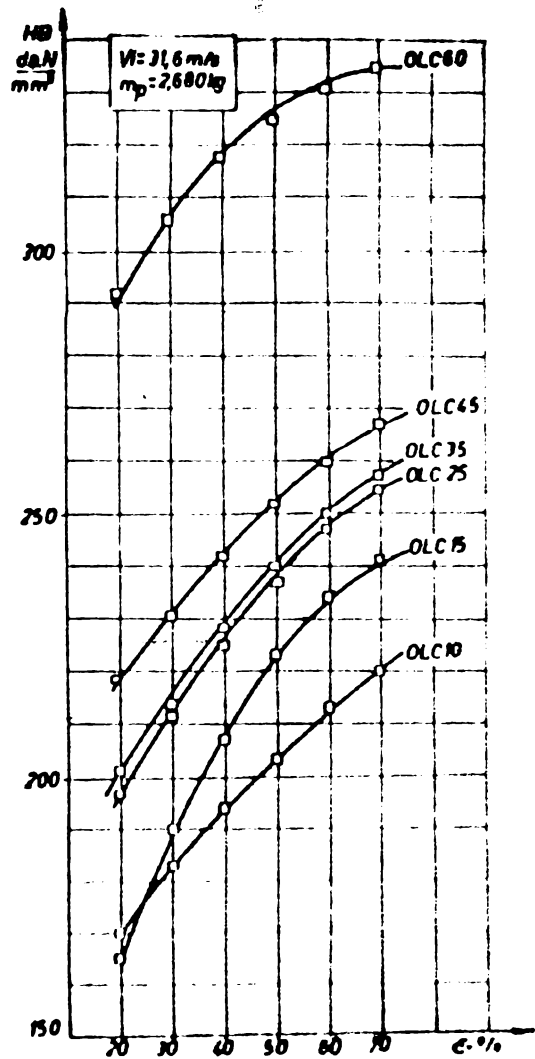


Fig. 6.3.

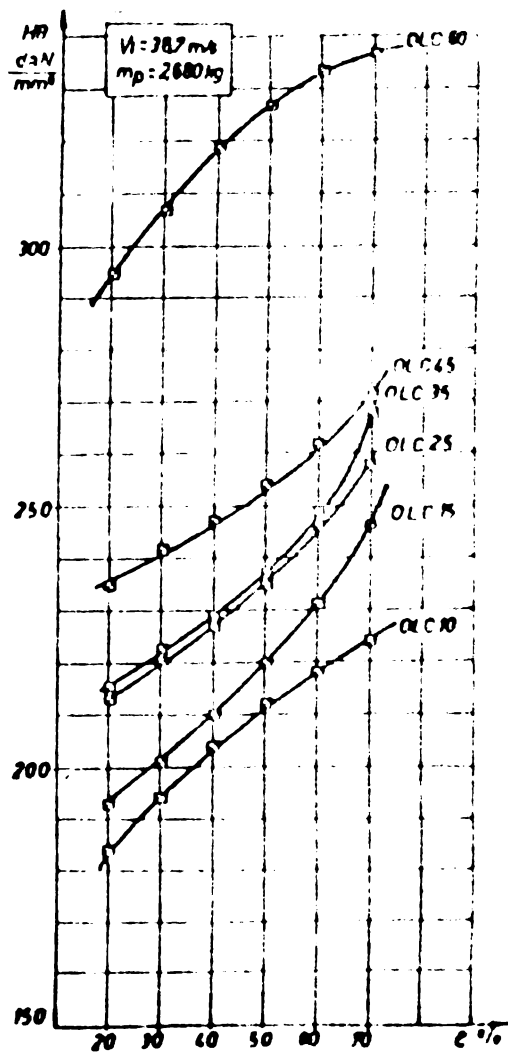


Fig. 6.4.

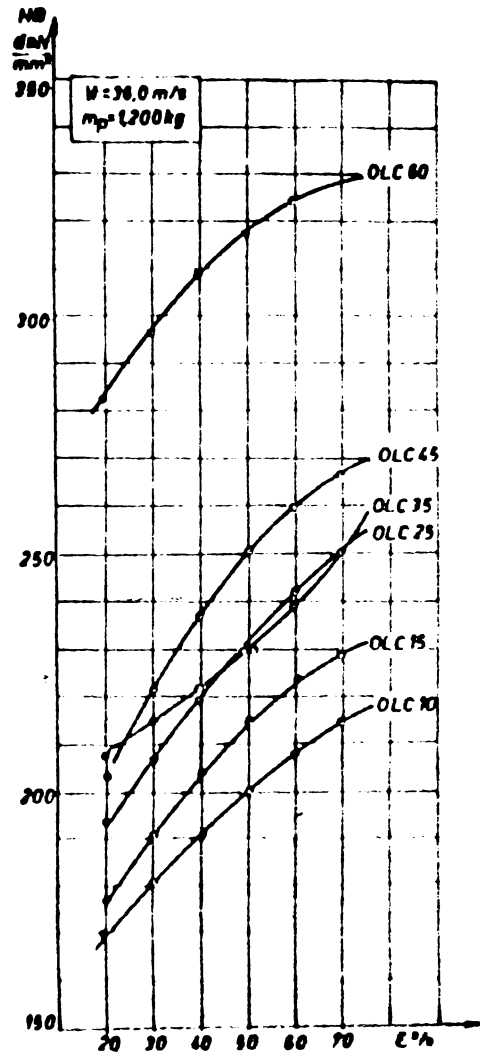


Fig. 6.5.

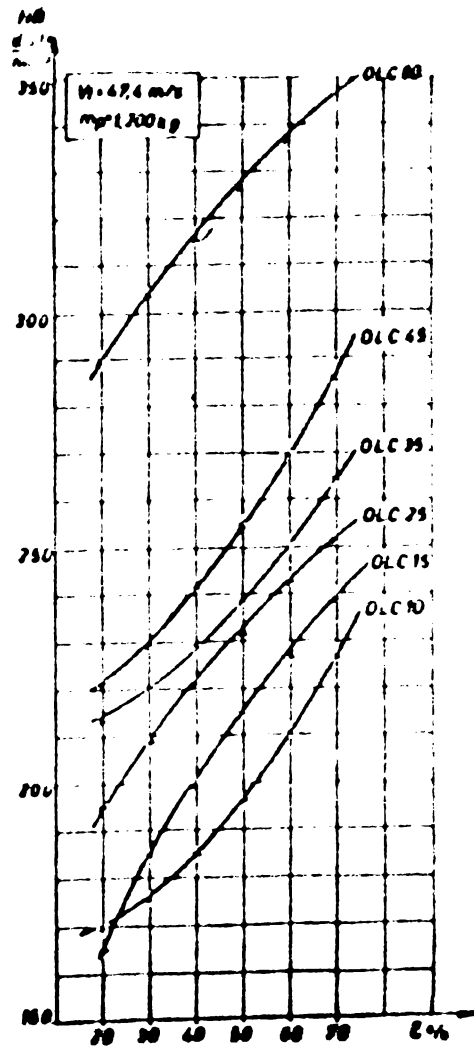


Fig. 6.6.

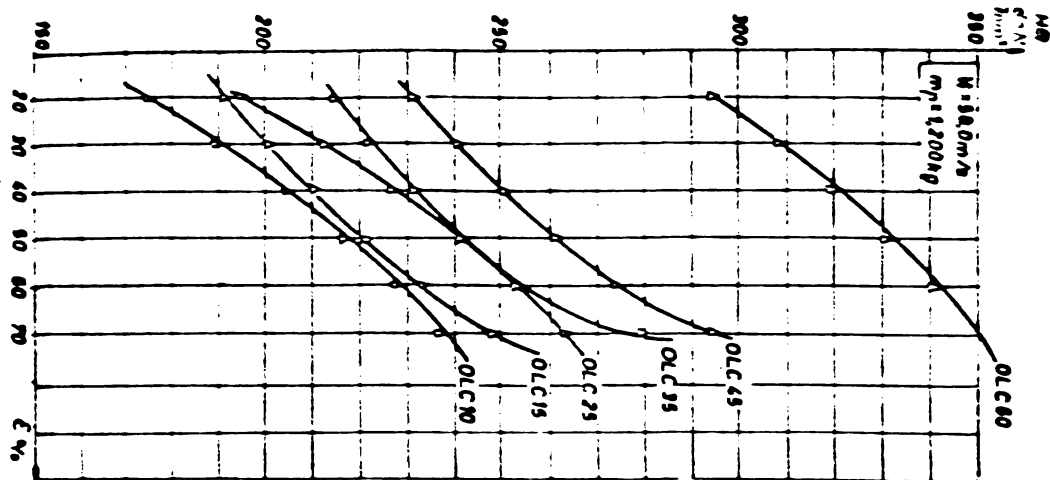


Fig.6.7.

Din aceste diagrame se pot face următoarele observații:

- duritatea crește normal o dată cu creșterea conținutului în C pentru același grad de deformare;
- se constată o apropiere evidentă între comportarea la deformare a OLC 25 și OLC 35 indiferent de modul și gradul de deformare utilizat, cu precizarea că totuși la viteza de impact de 47,4 m/s și 58 m/s se constată o oarecare diferențiere pentru grade de deformare sub 40 % și respectiv peste 60 %, ca urmare a unei coarșări superioare în primele faze ale deformării și corespunzător unei influențe sporite a vitezei de impact pentru grade mari de deformare;
- se observă de asemenea o diferențiere mică în comportare pentru toate oțelurile cu conținut în C sub 0,45 %, precum și saltul foarte mare a valurilor durității pentru oțelul cu 0,6 % C. Diferențierea apare evidentă dacă se analizează grupa oțelurilor OLC 10, OLC 25, OLC 45 și OLC 60 la care conținutul în C crește cu o rată aproape constantă 0,15; 0,20 și respectiv 0,15 %, în schimb, duritatea crește neuniform, saltul valorilor durității fiind cel mai mic de la OLC 25 la OLC 45 și cel mai mare de la OLC 45 la OLC 60.

Putem afirma deci că influența C se face simțită mai ales pentru valori mai mari de 0,45 % C. Acest lucru datorită în principal schimbării raportului cantitativ între constituenții moi și duri din structura oțelului, care duce la o creștere pronunțată a

proprietăților de rezistență. Saltul ar fi cu siguranță mai mare dacă s-ar pleca de la o structură inițială cu aceeași mărime a grăunților.

După cum rezultă din microstructurile efectuate, structura inițială pentru OLC 60 este mai mare decât ^{la}oricare alt oțel utilizat. Se remarcă de asemenea, evoluția ascendentă a curbelor de duritate, maximul curbelor de variație plasându-se la grade de deformare cu atât mai mari cu cât conținutul în C este mai mic. Corespunzător crește și capacitatea de deformare plastică a metalului.

Rezultate asemănătoare se obțin și în cazul deformării la cald. Spre comparare se dau curbele de variație a rezistenței la deformare k_p pentru 3 calități de oțeluri cu conținut variabil în C (oțelurile C 15, C 60 și C 100) deformate însă la 3 temperaturi diferite și la cca. aceeași viteză de deformare (cca. 1000 s^{-1}) (fig. 6.8; 6.9; 6.10).

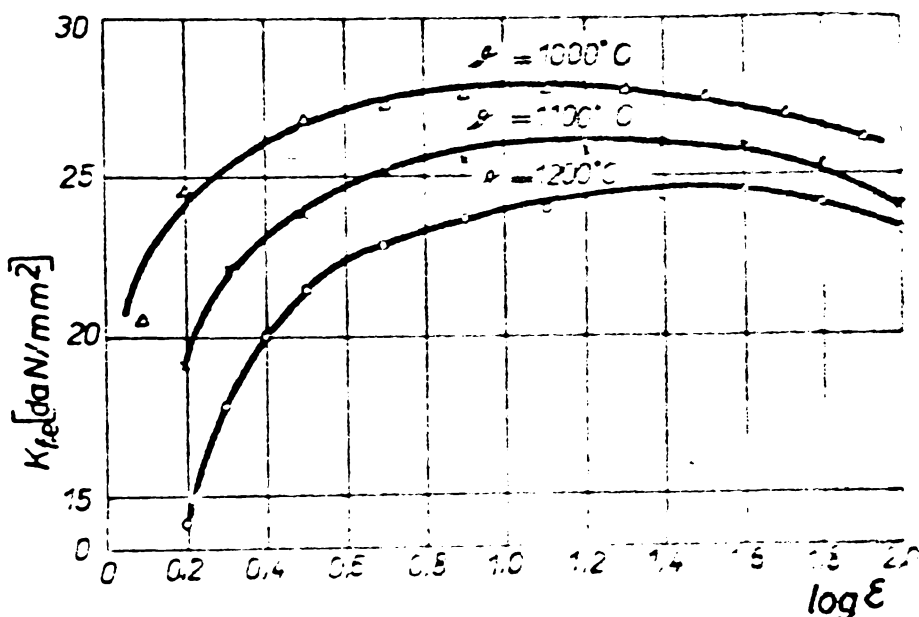


Fig. 6.8.

În comparație cu deformarea la rece se observă că evoluția curbelor de variație a mărimii k_p nu mai este continuu ascendentă. Ele prezintă un maxim după care valcile rezistenței la deformare scad. Pentru oțelul C 15 acest maxim se plasează la un grad de deformare logaritmic de 1,2...1,4, iar pentru oțelul C 60 și C 100 la un grad de deformare logaritmic egal aproximativ cu 1. Scăderea rezistenței la deformare se atribuie unui așa-numit fenomen de înmuiere, pus în principal pe seama interacțiunii dislocațiilor

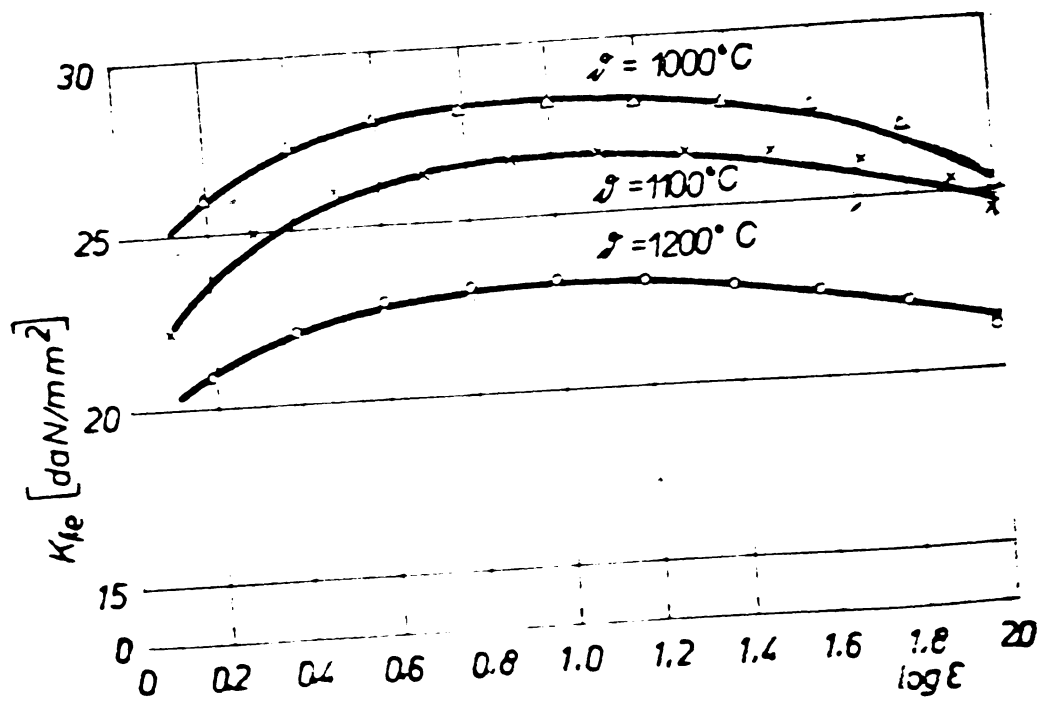


Fig.6.9.

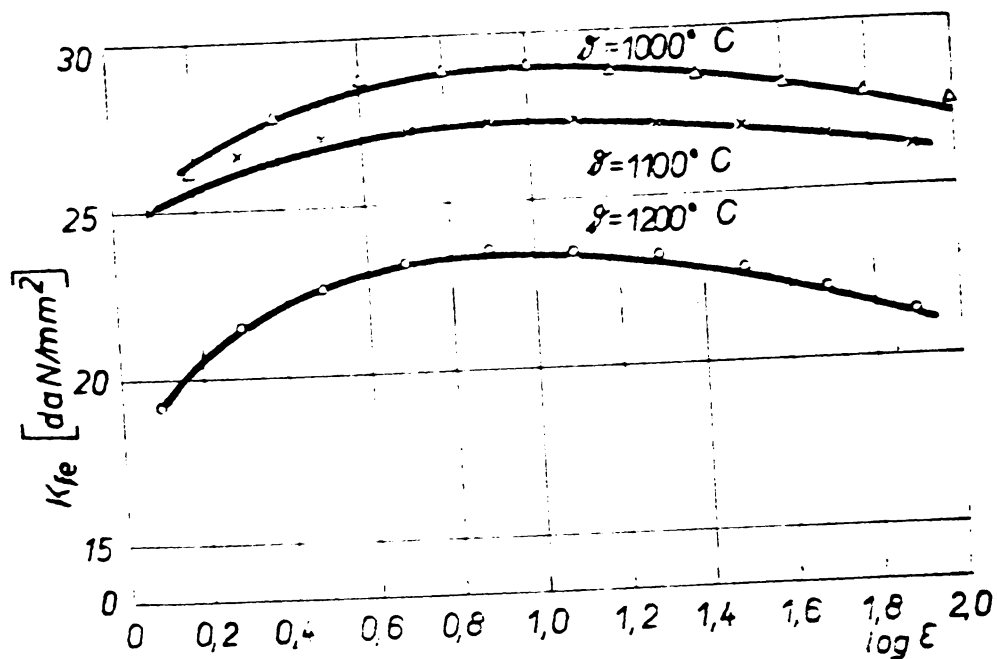


Fig.6.10.

(cele de semn contrar se anulează). Intrucît viteza de înmuiere crește cu creșterea conținutului în C, curba de curgere pentru oțelul C 100 va începe să scadă la deformații mai mici și mai puternic decît pentru oțelul C 15.

Se poate conchide că influența C asupra comportării materialului la deformare este mai pronunțată la rece decît la cald.

Fenomenul de înmuiere semnalat la cald, se face simțit și la rece dar în măsură mult mai mică și numai pentru viteze mici de impact, respectiv la deformarea cu presa cu fricțiune. Curbele prezentate în fig.6.1 prezintă tendința unei inflexiuni, respectiv tendința unei ușoare stagnări a durității, la grade de deformare cu atât mai mici, cu cât crește conținutul în C. Această stagnare (în orice caz nu o scădere a durității) se poate pune pe seama fenomenului semnalat mai înainte de interacțiune a dislocațiilor.

O dată cu creșterea vitezei de impact însă, timpul de deformare este scurt și interacțiunea fie că nu poate avea loc, fie că nu se poate face simțită întrucât curbele nu mai prezintă modificări esențiale în evoluție.

Pentru evidențierea în continuare a influenței conținutului în C s-au trasat curbele de variație a durității în funcție de conținutul în C, considerând pe de o parte viteza de impact constantă și variind gradul de deformare ϵ (fig.6.11...6.16) și pe de altă parte menținând gradul de deformare constant și variind viteza de impact (fig.6.17...6.28).

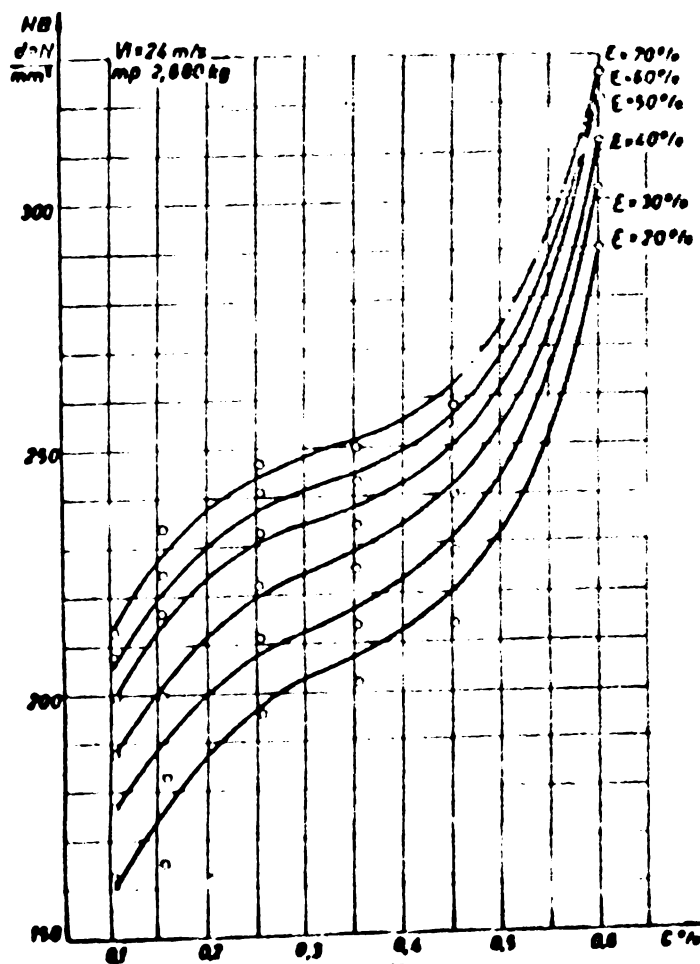


Fig.6.11.

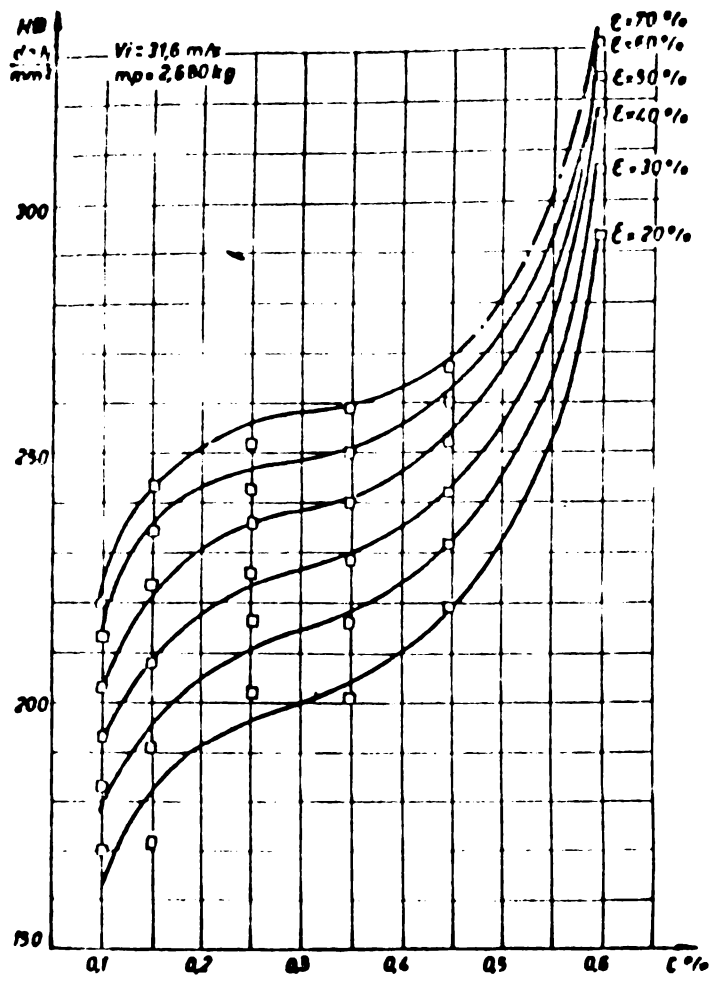


Fig.6.12.

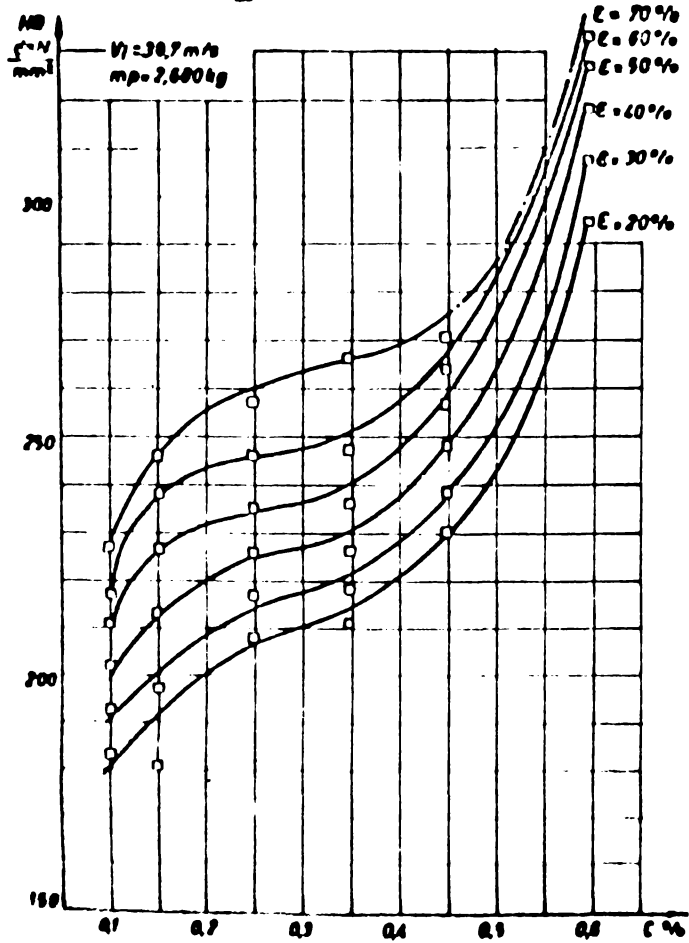


Fig.6.13.

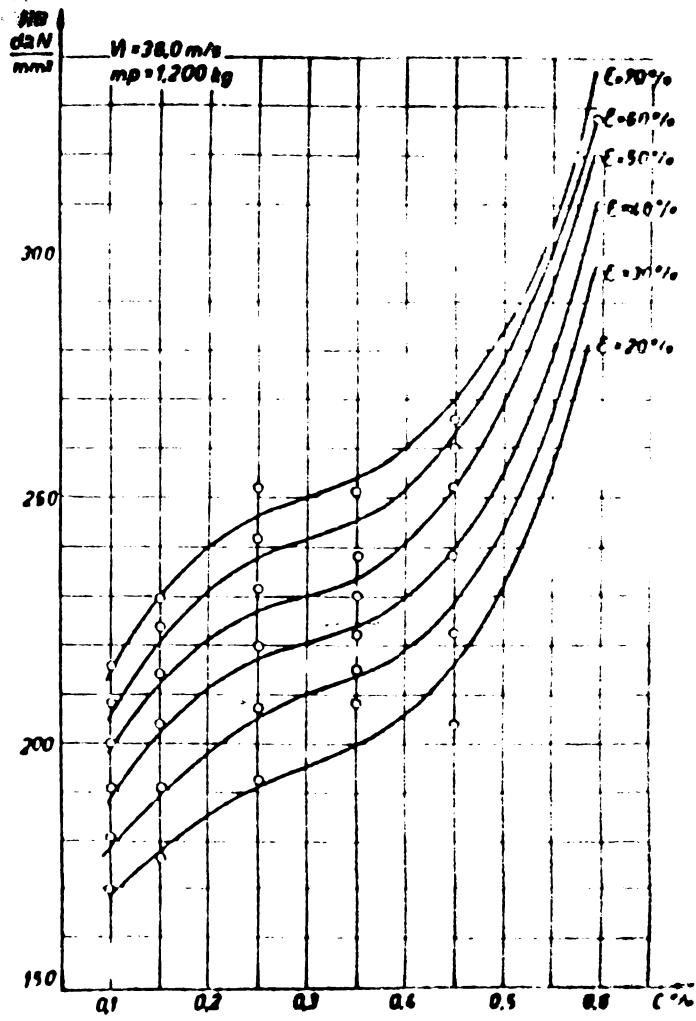


Fig. 6.14.

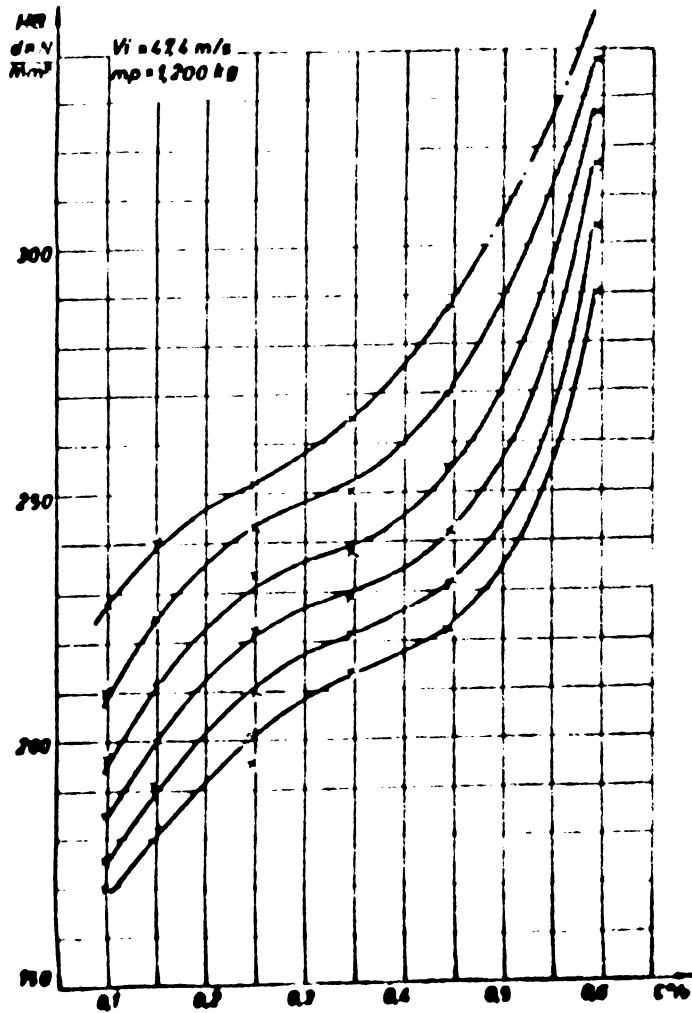


Fig. 6.15.

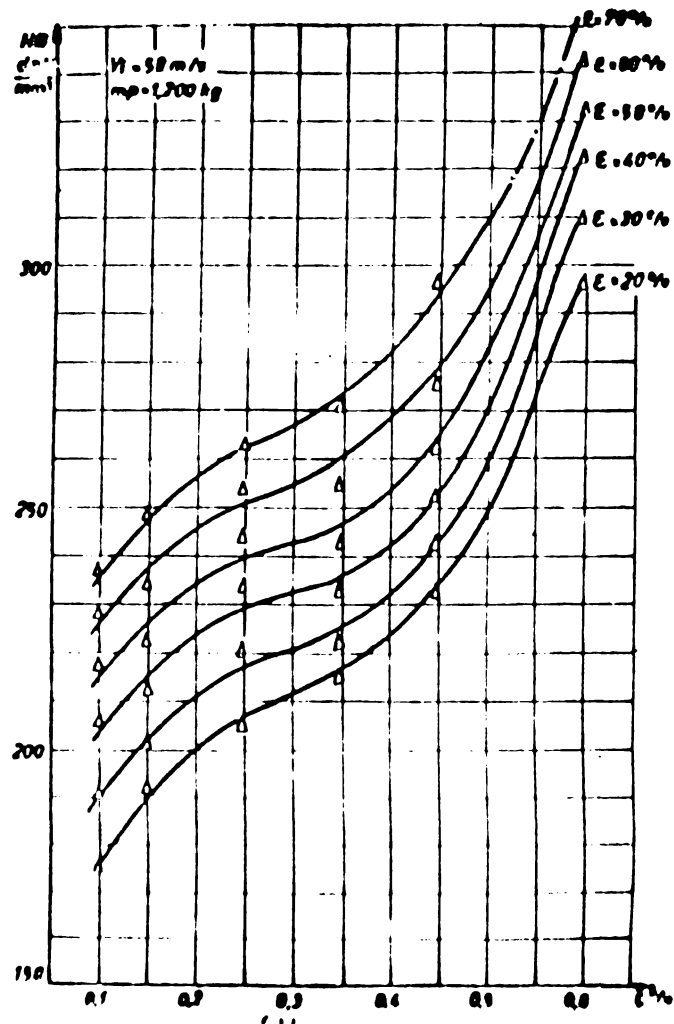


Fig. 6.16.

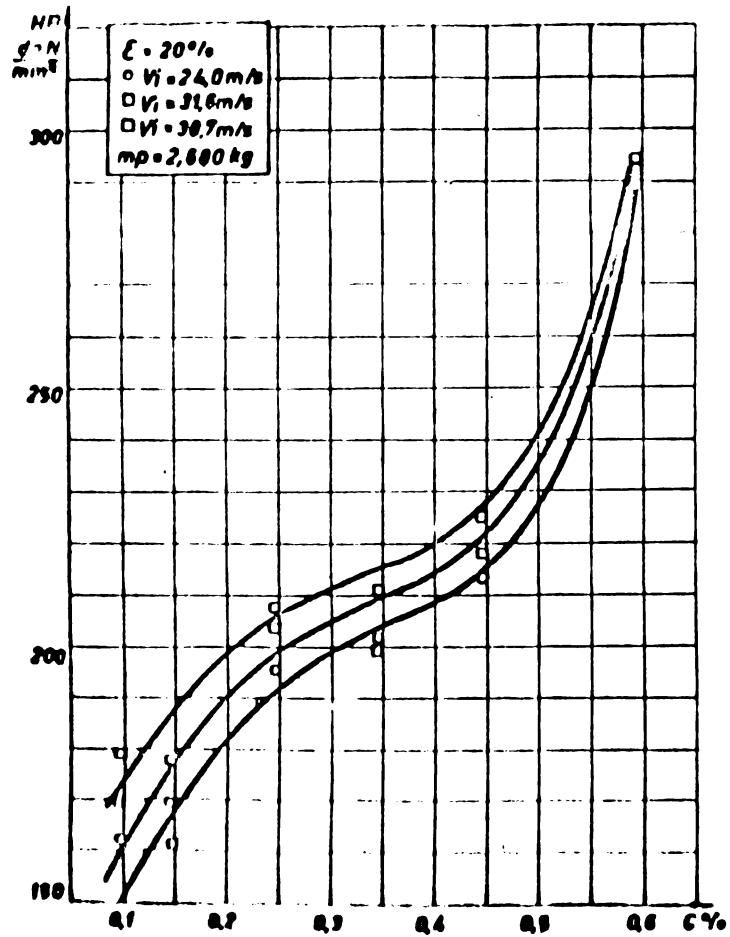


Fig. 6.17.

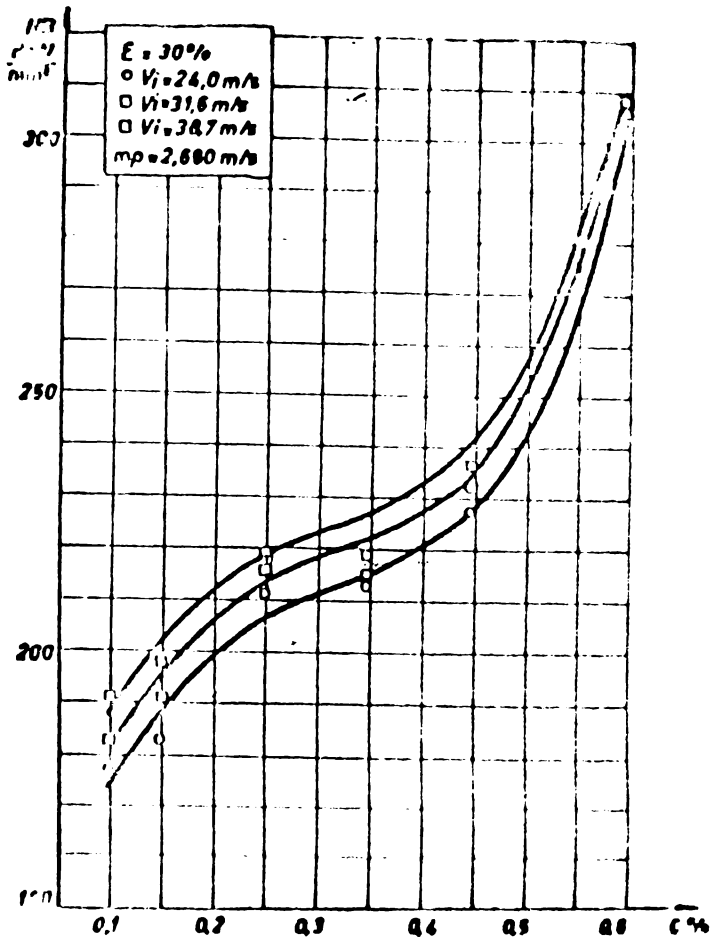


Fig.6.18.

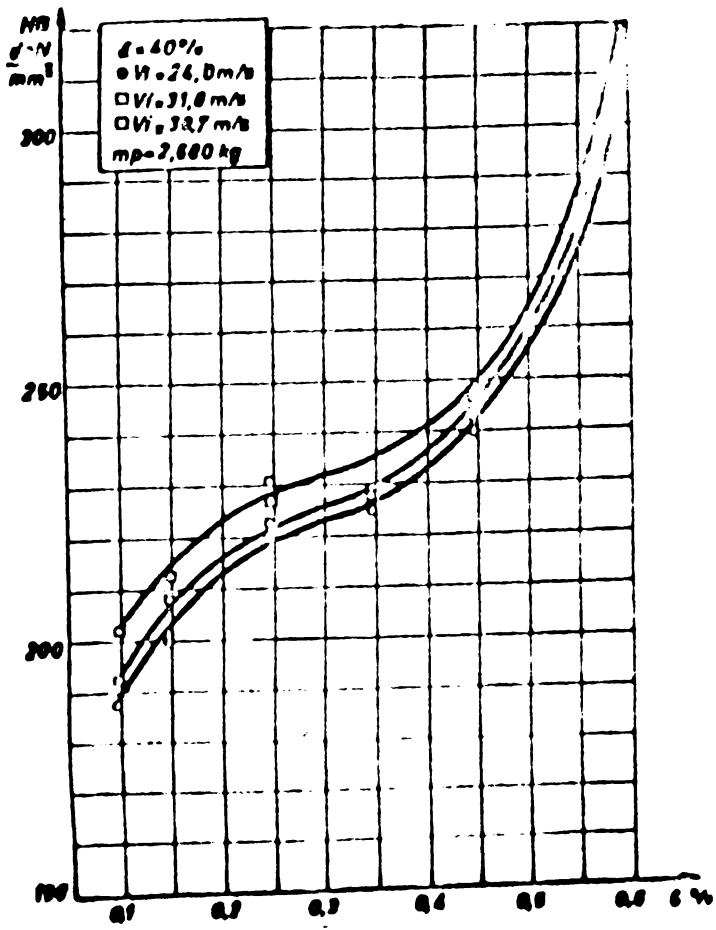


Fig.6.19.

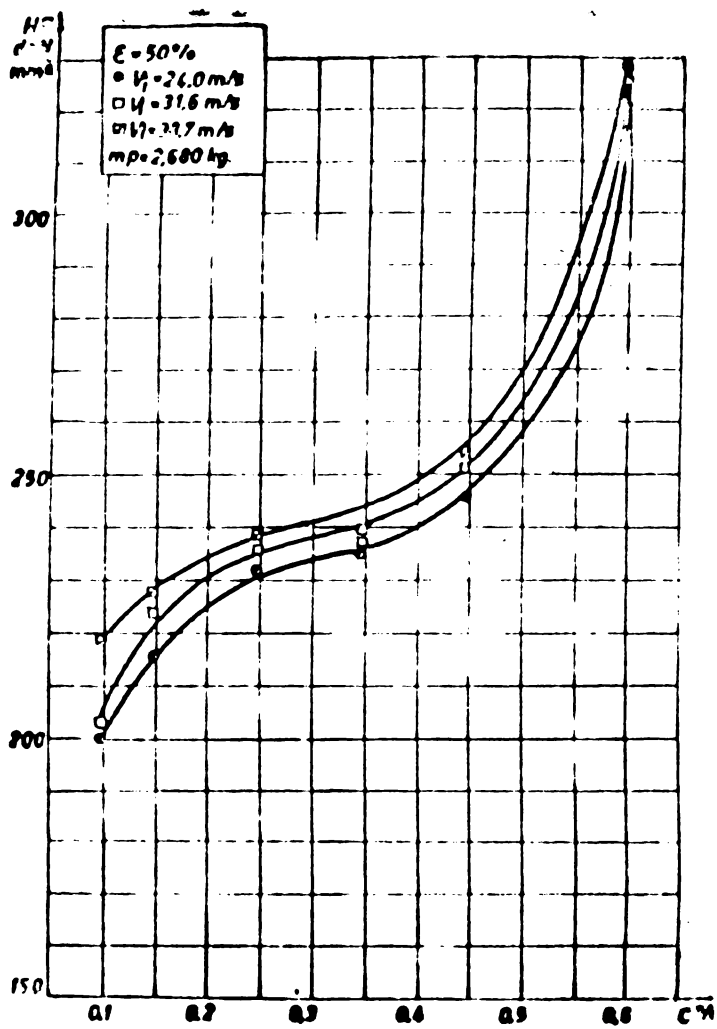


Fig. 6.20.

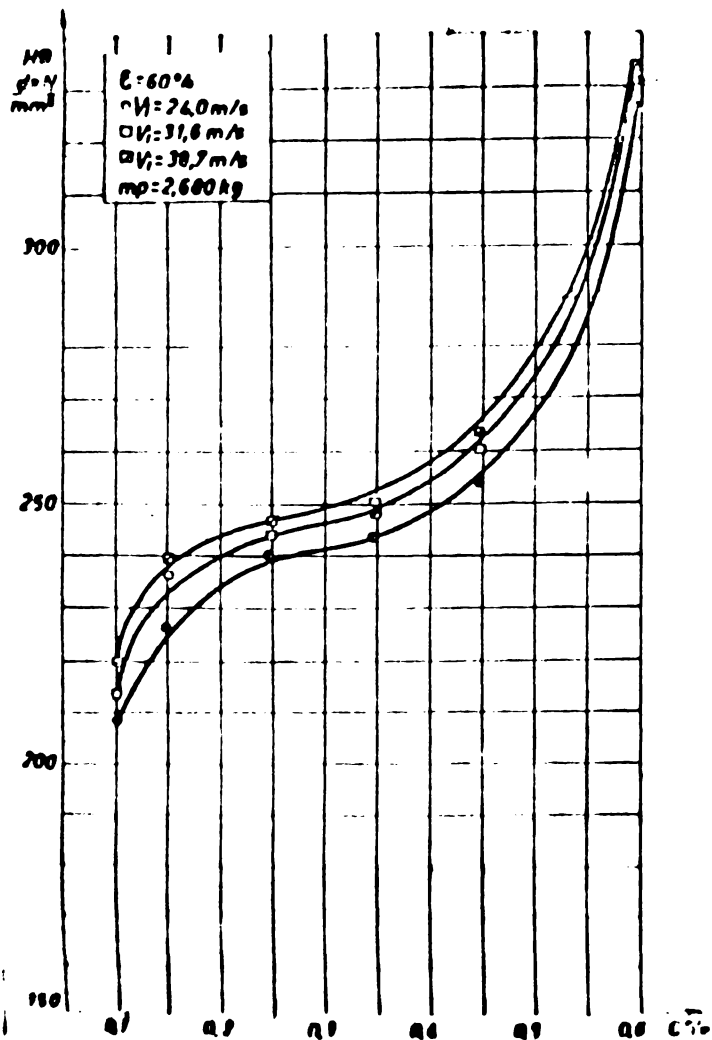


Fig. 6.21.

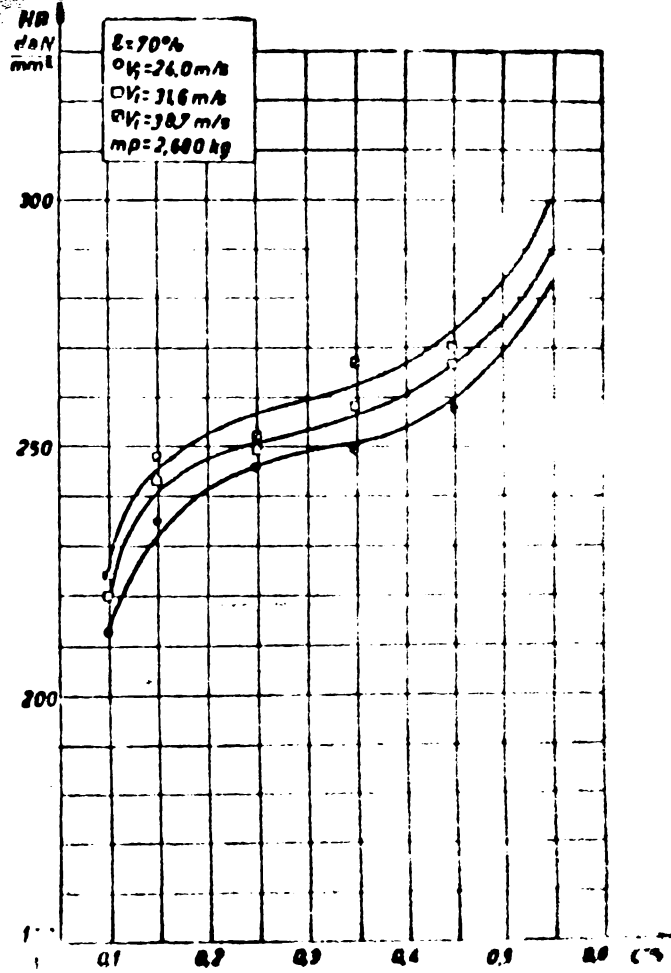


Fig. 6.22.

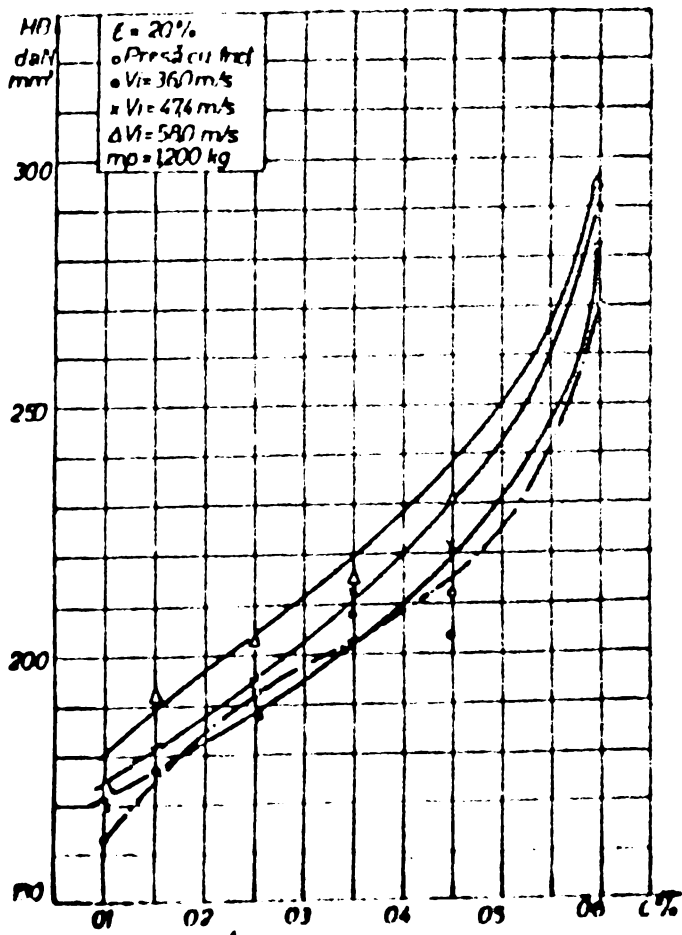


Fig. 6.23.

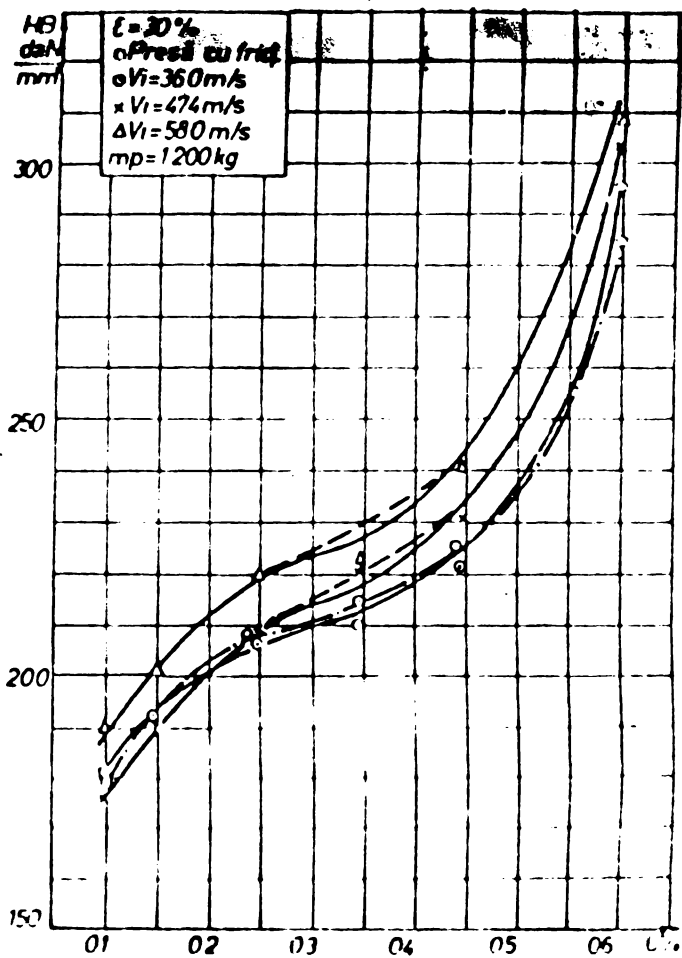


Fig. 6.24.

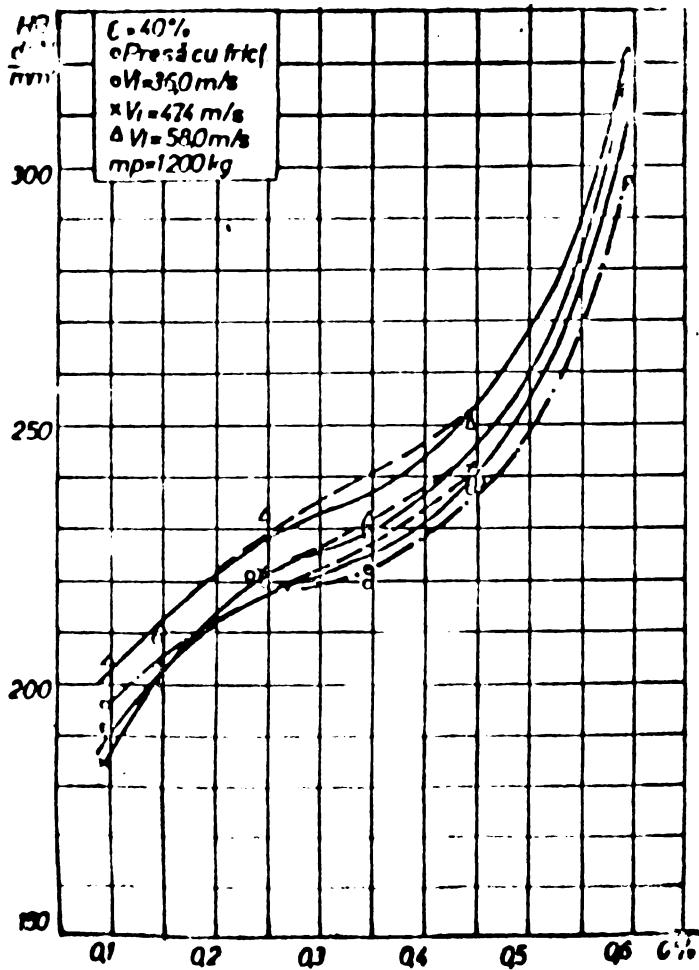


Fig. 6.25.

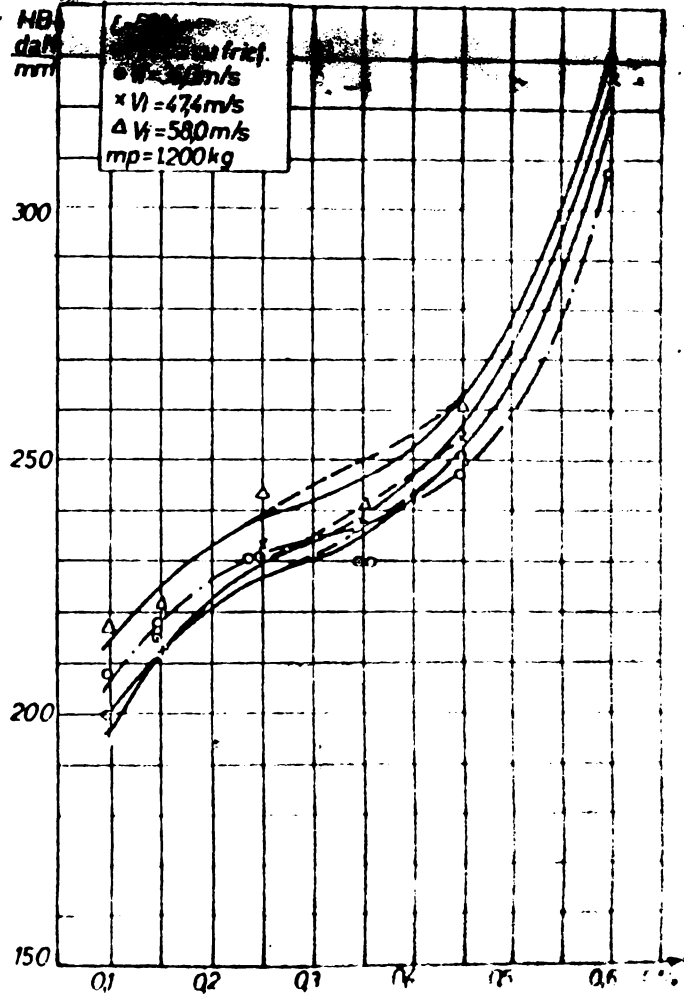


Fig. 6.26.

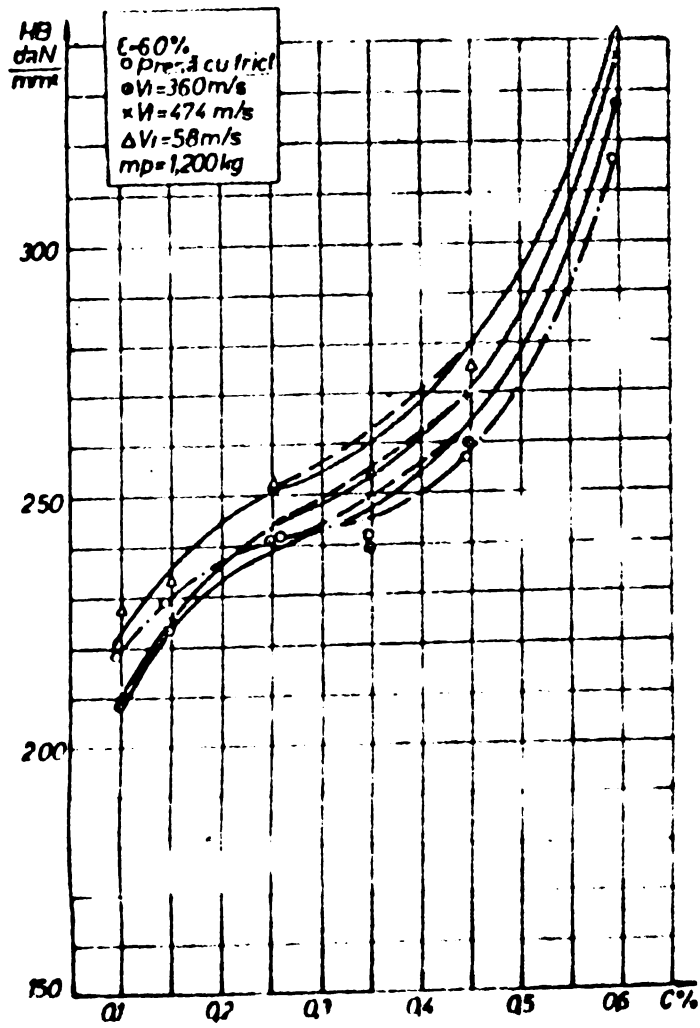


Fig. 6.27.

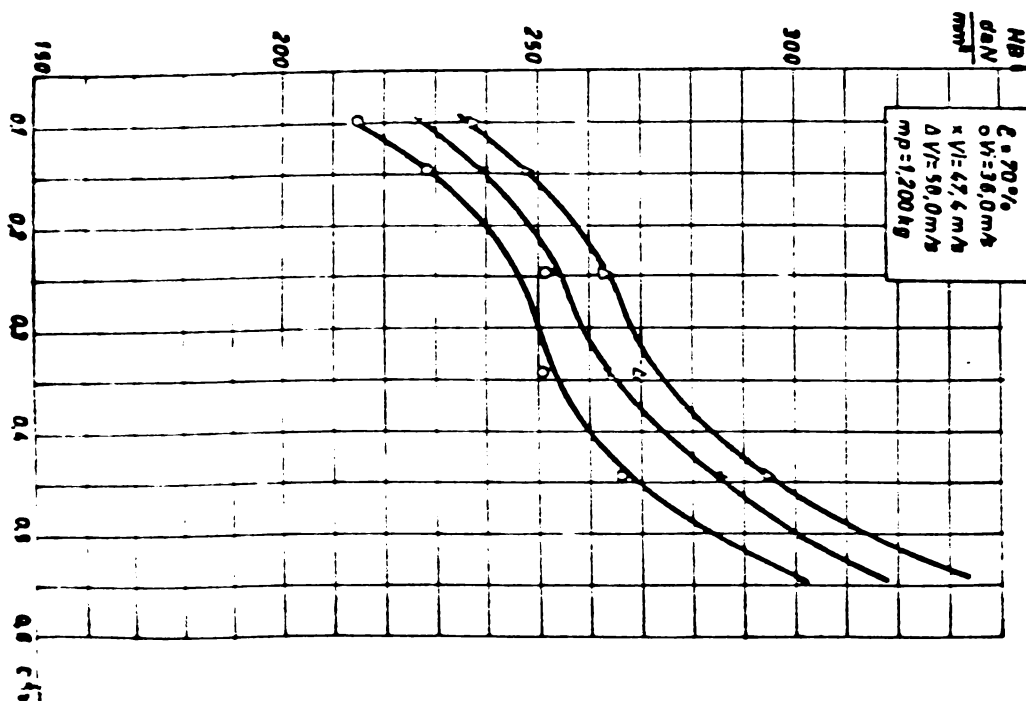


Fig.6.28.

Indiferent de varianta în care au fost trasate diagramele ele au aproximativ aceeași alură considerată în trepte. O primă treaptă de variație cu o înclinație a curbei foarte pronunțată (dacă se pleacă de la duritatea inițială) care este specifică oțelurilor ^{cu conținut} scăzut de C (OLC 10, OLC 15). Urmează apoi o treaptă a doua de variație cu o înclinație a pantei curbelor la unghiuri foarte mici, înclinație care crește o dată cu creșterea vitezei de impact. Această treaptă este caracteristică oțelurilor cu conținut mediu de C (OLC 25, 35 și 45). Și în sfârșit, urmează ultima treaptă a treia în care duritățile cresc foarte mult, panta curbei avînd de asemenea unghiuri mari de înclinație.

Cîmpul de dispersie al durităților tinde să se restrîngă pentru conținuturi în C mai mari de 0,45 %. Din diagramele 6.17 ...6.28 se observă, comparativ cu deformarea la presa cu fricțiune că influența C se face simțită pentru conținuturi mai mari de 0,25 % cînd se obțin durități superioare pentru majoritatea gradelor de deformare și viteze de impact studiate. O excepție există în cazul gradului de deformare $\epsilon = 60\%$ și $\epsilon = 70\%$ pentru viteze de impact $v_1 = 24$ m/s, cînd valorile durităților obținute la deformarea cu presa cu fricțiune sînt mai mari decît la deformarea cu viteza de impact de 24 m/s indiferent de conținutul în C. În cazul oțelurilor cu conținut scăzut de C duritățile

obținute la deformarea cu presa cu fricțiune sînt mai mari decît în cazul deformării cu viteze mai mici decît aproximativ 40 m/s.

Salturile de duritate față de duritatea inițială sînt mai accentuate pentru conținuturi pînă la 0,25 % C și mai mici pentru procentaje mai mari de C ele depinzînd și de gradul de deformare ϵ . Astfel, pentru $\epsilon = 30\%$ saltul de duritate ΔHB este de cca. 40...60 % la oțelurile moi și între 10...20 % la oțelurile cu peste 0,25 % C, în timp ce pentru $\epsilon = 60\%$ saltul de duritate este de 60...90 % și respectiv 25...40 % pentru aceleași domenii considerate (fig.6.29 respectiv tab.6.1).

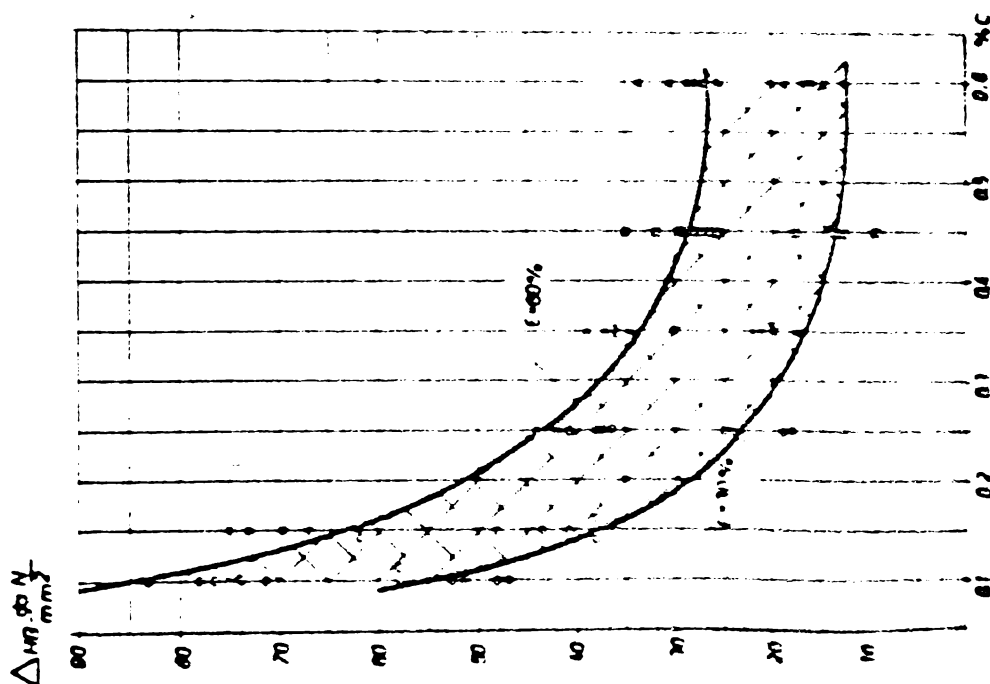
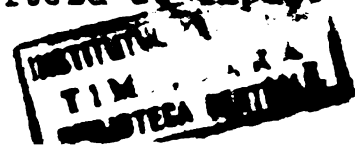


Fig.6.29.

Salturile de duritate sînt mai mari pentru grade mici de deformare întrucît la o deformare mică, viteza de recristalizare este mică și astfel ecruisarea materialului este mai puternică. Acest lucru este evident dacă se are în vedere coeficientul de ecruisare C relația (4.5). Ecruisarea este mai puternică în primele momente ale deformării, cînd diametrul grăuntelui este încă mare. Fenomenul este specific oțelurilor moi. Mășorarea saltului de duritate o dată cu creșterea conținutului în C pentru același grad de deformare ϵ , se datorează fenomenului de revenire care se poate produce și la temperaturi de cca. 200°C , ușor de atins chiar la deformarea la rece a acestor oțeluri. Această temperatură se atinge cu atît mai ușor cu cît viteza de impact



Material	Duritate HB ₁ dan/mm ²	P.F.	Duritatea HB g1 saltul de duritate dan/mm ²	Δ HB pentru $\epsilon = 30\%$ respectiv $\epsilon = 60\%$
OLC 10	120		176	
OLC 15	138		194	
OLC 25	176		205	
OLC 35	183		209	
OLC 45	205		215	
OLC 60	259		285	
		$v_1 = 24$ m/s		
		$v_1 = 31,6$ m/s		
		$v_1 = 48,5$		
		$v_1 = 40$		
		$v_1 = 16$		
		$v_1 = 14$		
		$v_1 = 5$		
		$v_1 = 10$		
		$v_1 = 218$		
		$v_1 = 232$		
		$v_1 = 68$		
		$v_1 = 81,5$		
		$v_1 = 178$		
		$v_1 = 190$		
		$v_1 = 216$		
		$v_1 = 215$		
		$v_1 = 218$		
		$v_1 = 302$		
		$v_1 = 48,5$		
		$v_1 = 38$		
		$v_1 = 83$		
		$v_1 = 17,5$		
		$v_1 = 6$		
		$v_1 = 16,5$		
		$v_1 = 206$		
		$v_1 = 230$		
		$v_1 = 67$		
		$v_1 = 71,5$		
		$v_1 = 241$		
		$v_1 = 37$		
		$v_1 = 34,5$		
		$v_1 = 260$		
		$v_1 = 26,5$		
		$v_1 = 327$		
		$v_1 = 26$		
		$v_1 = 183$		
		$v_1 = 198$		
		$v_1 = 216$		
		$v_1 = 219$		
		$v_1 = 229$		
		$v_1 = 293$		
		$v_1 = 52,5$		
		$v_1 = 43,5$		
		$v_1 = 23$		
		$v_1 = 20$		
		$v_1 = 12$		
		$v_1 = 13$		
		$v_1 = 214$		
		$v_1 = 239$		
		$v_1 = 248$		
		$v_1 = 250$		
		$v_1 = 263$		
		$v_1 = 335$		
		$v_1 = 78$		
		$v_1 = 73$		
		$v_1 = 41$		
		$v_1 = 37$		
		$v_1 = 28$		
		$v_1 = 29$		

Tabellul 6.1 (continuare)

	$v_1 = 38,7$ m/s	$v_1 = 36$ m/s	$v_1 = 47,4$ m/s	$v_1 = 58$ m/s
190	58	83	182	51,5
204	48	75	191	38
220	25	42	207	18
220	20	36,5	215	17
233	14	29	223	9
310	20	28	297	14,5
	220	83	182	51,5
	241	75	191	38
	250	42	207	18
	250	36,5	215	17
	265	29	223	9
	332	28	297	14,5
		74	176	47
		62	191	38
		37,5	210	19
		30	221	21
		27	231	13
		27	304	17
		212	47	212
		224	38	224
		243	19	243
		250	21	250
		270	13	270
		338	17	338
		76,5	47	76,5
		62	38	62
		38	19	38
		36,5	21	36,5
		32	13	32
		30,5	17	30,5
		190	47	190
		202	38	202
		219	19	219
		223	21	223
		241	13	241
		308	17	308
		58	47	58
		41	38	41
		24	19	24
		22	21	22
		17,5	13	17,5
		19	17	19
		229	47	229
		234	38	234
		254	19	254
		254	21	254
		276	13	276
		347	17	347
		91	47	91
		69,5	38	69,5

este mai mare. Așa se explică de ce în cazul oțelurilor moi duritatea obținută la deformarea cu presa cu fricțiune este mai mare decât în cazul deformării cu viteze de impact mai mici de 40 m/s. Peste această viteză însă intervin fenomene suplimentare care anihilează efectul de revenire. Mai întâi pentru că deformarea se face în timp foarte scurt și deci revenirea nu se produce complet și în al doilea rând la viteze mari de impact, în oțelurile cu conținut scăzut în C apare cu precădere deformarea prin maclare care contribuie la ecruisarea suplimentară a materialului. Rolul important al maclării în cazul deformării plastice nu rezultă din mărirea deformației produsă prin procesul de maclare ci mai ales din faptul că schimbările de orientare ale rețelei cristaline rezultate din maclare conduc la apariția unor sisteme noi de luncare având o orientare favorabilă în raport cu direcțiile de aplicare a tensiunii, astfel că iau naștere noi luncări care implicit măresc gradul de ecruisare a materialului. În ceea ce privește maculele propriuzise limitele acestora au același aspect ca și limitele dintre grăunți fiind de fapt limite de mare energie.

Evoluția în trepte a curbelor de duritate respectiv aplatizarea curbelor prezentate în domeniul 0,25...0,45 % C, este în principal dictată de comportarea foarte apropiată a oțelurilor OLC 25 și OLC 35, la care valorile durităților sînt foarte apropiate indiferent de gradul de deformare și viteza de impact considerată.

Exceptînd oțelul cu 0,35 % C curbile capătă o alură normal crescătoare între 0,25...0,45 % C, după care panta curbelor crește brusc pînă la 0,60 % C (fig. 6.23...6.28 - curbele întrerupte). Creșterea puternică a durității pentru concentrații mai mari de 0,45 % C se explică prin tensionarea mai puternică a materialului și apariția fenomenului de fragilitate care face ca alături de deformarea grăunților să se producă și o distrugere a acestora, astfel încît structura devine mult mai fină. De asemenea, la concentrații mari de C există tendința de formare a unui număr mai mare de carburi care se dispersează mai fin în masa metalică de bază. Carburile formate constituie obstacole în calea deplasării dislocațiilor și acest lucru duce la o ecruisare foarte puternică a materialului deformat, ecruisare proporțională pentru conținuturi mari de C atît cu viteza de impact cît și cu gradul de deformare aplicat.

6.2. Concluzii

- La conținuturi mici de C, preponderentă la deformarea plastică este viteza de impact care dă naștere în material la temperaturi mai mari de 200°C ceea ce se soldează cu o înmuiere corespun-

sătoare a materialului și implicit micșorarea durității față de deformarea la presa cu fricțiune.

- Pentru conținuturi în C mai mari de 0,25...0,35 %, acesta devine factorul important al deformării prin creerea de noi carburi mai fin dispersate în masa metalică de bază și schimbarea raportului cantitativ între constituenții moi și duri din structura oțelului. Viteza de impact la conținuturi mari de C influențează asupra gradului de distrugere a carburilor formate și asupra dispersiei lor în masa metalică de bază.

- Creșterea durității față de duritatea inițială este cu atât mai mare, cu cât conținutul în C este mai mic și viteza de impact este mai mare.

- Creșterea vitezei de impact crează premise favorabile pentru deformarea corespunzătoare și a oțelurilor cu conținut mărit de C.

Rezultatele experimentale confirmă posibilitatea utilizării în același scop a OLC 25 sau OLC 35, acestea putându-se suplini reciproc.

.

C A P I T O L U L 7

INTERPRETAREA MATEMATICA A REZULTATELOR EXPERIMENTALE

In prezent teoria deformării plastice [110] a metalelor are atât rolul de a lămurii fenomenele ce stau la baza proceselor de deformare, cât și rolul de a fundamenta noi posibilități tehnologice de prelucrare. Cu toate că teoria deformării plastice a înregistrat numeroase succese trebuie recunoscut că această teorie se află în prezent într-un stadiu de început. Teoria deformării plastice analizează atât procesele macroscopice cât și cele microscopice sau submicroscopice, întrucât toate acestea dictează stabilirea corectă a parametrilor tehnologici. Ea are la bază succesele obținute în fizică, chimie, mecanica solidului, metalurgie fizică urmărind însă în mod special caracterul aplicativ al rezultatelor obținute. Rigurozitatea calculelor este lăsată pe plan secundar, apelându-se la modelare și teoria similitudinii. În ultimii 10 ani s-a înregistrat totuși tendința descrierii cantitative exacte a fenomenelor. Apariția mașinilor de calcul, a calculatoarelor electronice a făcut posibilă rezolvarea unor ecuații greoaie, care în alte situații este foarte greu sau imposibil de rezolvat.

Ecuațiile teoretice se deduc pe baza unor curbe trasate cu ajutorul datelor experimentale și au un caracter fenomenologic.

În contextul celor de mai sus avînd la bază un număr foarte mare de măsurători, se procedează la o analiză cantitativă exactă a acestora în așa fel încît interpretarea rezultatelor să fie cât mai apropiată de realitate.

Pentru respectarea unei anumite ordini matematice în lucrare se face mai întîi analiza statistică a rezultatelor experimentale după care se stabilesc ecuațiile teoretice pentru un caz concret al deformării. Analiza statistică cuprinde un cîmp mai larg de măsurători în timp ce ecuațiile teoretice se referă numai la cazul deformării cu viteza de 58 m/s unde rezultatele obținute diferă evident de celelalte cazuri de deformare.

7.1. Analiza statistică

Analiza statistică a rezultatelor experimentale se impune din mai multe puncte de vedere. În primul rînd, proprietățile mecanice, fiind proprietăți sensibile față de modificările de struc-

tură prezintă adeseori variații sau împrăștiuri destul de importante. În al doilea rând, statistica permite obținerea unei cantități maxime de informații cu un număr relativ mic de experimentări.

7.1.1. Determinarea parametrilor statistici principali ai distribuției empirice.

În cazul concret al lucrării, analiza statistică a rezultatelor experimentale a fost efectuată pentru fiecare oțel în parte OLC 10...OLC 60, și pentru fiecare caz de deformare separat (deformare la presa cu fricțiune și viteze de impact de 24; 31,6; 38,7; 36; 47,4; 58 m/s). Întrucât volumul măsurărilor și calculurilor efectuate este foarte mare se dau tabelat rezultatele obținute. Pentru o interpretare corectă de ansamblu a caracteristicilor obținute și pentru a avea posibilitatea de a compara diversele colectivități cercetate, care au cuprins în general același număr de epruvete cercetate pentru fiecare oțel și tip de deformare s-au determinat parametrii statistici principali ai distribuției empirice [8], [9], [20], [74].

Astfel, s-au calculat următoarele mărimi:

Media aritmetică:

$$\bar{X} = \frac{\sum n_1 x_1}{\sum n_1} \quad (7.1)$$

în care: x_1 - valoarea mărimii determinate; n_1 - frecvența absolută.

Dispersia distribuției:

$$s^2 = \frac{\sum (x_1 - \bar{x})^2 n_1}{\sum n_1} \quad (7.2)$$

Dispersia distribuției corectată:

$$s_1^2 = \frac{\sum (x_1 - \bar{x})^2 n_1}{\sum n_1 - 1} \quad (7.3)$$

Abateră medie patratică corectată:

$$s_1 = \sqrt{\frac{\sum (x_1 - \bar{x})^2 n_1}{\sum n_1 - 1}} \quad (7.4)$$

Coeficientul de variație:

$$C_v \% = \frac{s_1}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (7.5)$$

Pentru cazul deformării cu viteza de impact de 58 m/s s-a determinat în plus:

Coefficientul de asimetrie:

$$S_k = \frac{m_3}{S_1^3} \quad (7.6)$$

în care:

$$m_3 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^3 n_i$$

Coefficientul de exces:

$$E_k = \frac{m_4}{S_1^4} - 3 \quad (7.7)$$

în care: $m_4 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^4 n_i$

Rezultatele obținute se dau concentrat în tab.7.1 pentru toate cazurile de deformare, iar în tab.7.2...7.7 separat rezultatele complete pentru OLC 10...OLC 60 și viteza de impact de 58 m/s.

7.1.2. Interpretarea rezultatelor.

Din studiul rezultatelor cuprinse în tab.7.1...7.7 rezultă următoarele:

Media aritmetică a durităților măsurate este net diferențiată la viteza de impact de 58 m/s față de toate celelalte măsurători (fig.7.1)

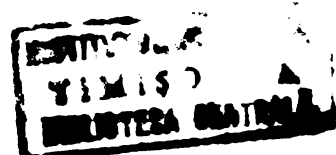
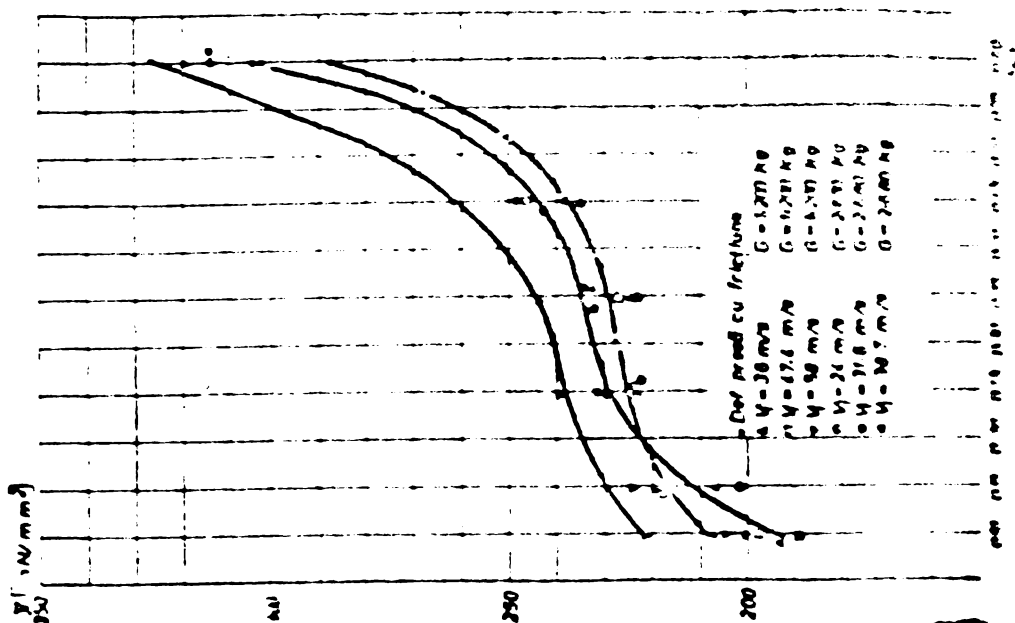


Fig.7.1.

Nr. Material ort.	Material	Velocidade de deformação m/s	$\sum x_i n_i$	\bar{x}	s^2	s^2_1	s^2_2	C_v
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1:	OLC 10	P.F.	11,372	206,8	984	1001	31,6	14,8
2:		24	10,347	188,5	667	690	26,25	13,8
3:		31,6	11,002	200,0	828	844	29,05	14,5
4:		38,7	11,277	205,00	825	840	29,00	14,15
5:		36	10,662	193,8	746	761	27,6	14,20
6:		47,4	10,857	197,5	1011	1030	32,1	16,25
7:		58	12,112	220,5	1182	1205	34,75	15,7
8:	OLC 15	P.F.	11,957	217,5	1041	1061	32,6	15,0
9:		24	11,057	201,5	850	866	29,4	14,6
10:		31,6	12,002	218,5	1301	1327	36,4	16,6
11:		38,7	11,842	215,5	848	864	29,4	13,65
12:		36	11,327	206,5	755	769	27,7	13,4
13:		47,4	11,462	208,5	960	978	31,6	14,95
14:		58	12,327	224,5	1069	1088	33,0	14,7
15:	OLC 25	P.F.	12,322	224,5	576	586	24,2	10,7
16:		24	12,262	222,0	355	361,8	19,0	8,45
17:		31,6	12,597	229,0	626	638	25,2	11,0
18:		38,7	12,697	230,5	500	509	22,52	9,75
19:		36	12,237	222,5	526	533	23,15	10,4
20:		47,4	12,328	224,5	514	523	22,9	10,6
21:		58	13,187	239,5	631	643	25,4	10,6
22:	OLC 35	P.F.	12,432	226,2	515	525	22,9	10,1
23:		24	12,347	224,5	346,1	352,2	18,5	8,22
24:		31,6	12,752	232,5	587,5	598	24,4	10,5
25:		38,7	12,822	233,5	482	491	22,2	9,52
26:		36	12,377	225	406	412,7	20,3	9,0
27:		47,4	12,772	232,5	546	556	23,55	10,1
28:		58	13,362	242,5	655	667	25,8	10,6

TABELUL 7.1. (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
29.	OLC 45	P.F. 24	13.052	237,5	527,5	537,5	23,15	9,73
30.		31,6	12.987	235,5	128,9	131,2	11,42	4,86
31.		38,7	13.327	242,5	312,0	317,5	17,8	7,33
32.		36	13.597	247,5	327,5	334,0	18,25	7,50
33.		47,4	13.132	238,5	381,0	388,0	19,7	8,30
34.		58	13.487	245,0	550,0	560,0	23,6	9,62
35.			14.317	260,5	617,0	623,0	25,0	9,60
36.	OLC 60	P.F.	15.897	288,5	350,5	357,0	18,9	6,65
37.		24	16.717	304,5	300,0	305,0	17,45	5,73
38.		31,6	17.212	313,5	425,0	434,0	20,0	6,65
39.		8,7	17.257	314,0	466,0	475,0	21,8	6,95
40.		36	16.592	301,5	398,1	406,0	20,15	6,70
41.		47,4	17.007	309,5	546,0	556,0	23,6	7,63
42.		58	17.562	319,5	570,0	580,0	24,05	7,55

OBS: Pentru toate categoriile de oțeluri studiate suma măsurătorilor efectuate este $\sum n_i = 55$

OIG 10 - Viteza de Impact 58 m/s

TABELA 7.2.

Nr. Duritatea crt. HB	Medie Inter-Valu- dant/mm ²	Frec- venta n ₁	n ₁ x ₁	x - \bar{x}	(x - \bar{x}) ²	(x - \bar{x}) ² n ₁	(x - \bar{x}) ³	(x - \bar{x}) ³ n ₁	(x - \bar{x}) ⁴	(x - \bar{x}) ⁴ n ₁	
1.	115-119,9	117,5	1	117,5	-103	10610	10610	-1.099.10 ³	-1.499.10 ³	112.060.10 ³	112.060.10 ³
2.	120-125	122,5	4	490,0	-98	9610	38440	-945.10 ³	-3.780.10 ³	92.500.10 ³	370.000.10 ³
3.	200-204,9	202,5	5	1012,5	-18	324	1620	-585.10	-2925.10	105.10 ³	505.10 ³
4.	205-209,9	207,5	0	0	-13	169	0	-221.10	0	286.10 ²	0
5.	210-214,9	212,5	3	637,5	-8	64	192	-512.1	-1536	41.10 ²	123.10 ²
6.	215-219,9	217,5	7	1522,5	-3	9	63	-27	-189	81	567
7.	220-224,5	222,5	3	667,5	2	4	12	-8	24	16	48
8.	225-229,9	227,5	7	1592,5	7	49	343	343	2301	2401	168.10 ²
9.	230-234,9	232,5	5	1162,5	12	144	720	1735	8675	208.10 ²	104.10 ³
10.	235-239,9	237,5	3	712,5	17	289	867	4940	14820	837.10 ²	251.10 ²
11.	240-244,9	242,5	7	1697,5	22	484	3388	10680	74760	234.10 ³	1638.10 ³
12.	245-249,9	247,5	6	1485	27	729	4374	198.10 ²	1188.10 ²	531.10 ³	3186.10 ³
13.	250-254,9	252,5	3	757,5	32	1024	3072	329.10 ²	989.10 ²	1050.10 ³	3150.10 ³
14.	255-260	257,5	1	257,5	37	1369	1369	510.10 ²	510.10 ²	1875.10 ⁴	1875.10 ⁴
15.	Σ	-	55	12112,5	-	-	65070	-	-4941.10 ³	-	493.10 ⁶

$$\bar{x} = \frac{12.112,5}{55} = 220,5 ; \quad C_v = \frac{24,75}{120,5} \cdot 100 = 15,7 \% ; \quad S_1^2 = \frac{65070}{54} = 1205 ; \quad S_1 = 34,75 ;$$

$$S_k = \frac{-4941.10^3}{2310.10^3} = -2,14 < 0 ; \quad E_k = \frac{493.10^6}{801.10^5} = 3 = 3,14 > 0$$

- 55 -

OTC 15 - viteză de impact 58 m/s

Nr. ort.	Duritatea HB daN/mm ²	Media inter- valu- lui x_1	Frec- vența n_1	$n_1 x_1$	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$	$(x - \bar{x})^2 n_1$	$(x - \bar{x})^3$	$(x - \bar{x})^3 n_1$	$(x - \bar{x})^4$	$(x - \bar{x})^4 n_1$
1	135-139,9	137,5	4	55 0,0	- 87	7589	30356	-661.10 ³	-2644.10 ³	576.10 ⁵	2304.10 ⁵
2	140-145	142,5	1	142,5	- 82	6726	6726	-552.10 ³	- 552.10 ³	453.10 ⁵	453.10 ⁵
3	195-199,9	197,5	2	395,0	- 27	729	1458	-19790	- 39580	531.10 ³	1062.10 ³
4	200-204,9	202,5	3	607,5	- 22	484	1452	-10700	- 32100	234.10 ³	702.10 ³
5	205-209,9	207,5	1	207,5	- 17	289	289	- 4925	- 4925	837.10 ²	837.10 ²
6	210-214,9	212,5	3	637,5	- 12	144	432	- 1722	- 5166	208.10 ²	624.10 ²
7	215-219,9	217,5	5	1087,5	- 7	49	245	- 343	- 1715	2410	12050
8	220-224,9	222,5	6	1335,0	- 2	4	24	- 8	- 48	16	96
9	225-229,9	227,5	3	682,5	3	9	27	27	81	81	243
10	230-234,9	232,5	6	1395,0	8	64	384	512	3072	4110	24660
11	235-239,9	237,5	3	712,5	13	169	507	2217	6651	286.10 ²	858.10 ²
12	240-244,9	242,5	3	727,5	18	324	972	5862	17586	105.10 ³	315.10 ³
13	245-249,9	247,5	2	495,0	23	529	1058	12200	24400	2795.10 ²	559.10 ³
14	250-254,9	252,5	5	1262,5	28	784	3920	22050	110250	632.10 ³	316.10 ⁴
15	255-259,9	257,5	3	772,5	33	1089	3267	36200	108600	1185.10 ³	3555.10 ³
16	260-264,9	262,5	4	1050,0	38	1444	5776	55100	220400	2093.10 ³	8368.10 ³
17	265-270,0	267,5	1	267,5	43	1859	1859	79970	79970	346.10 ⁴	346.10 ⁴
18	Σ		55	12327,5		58752			-2.708.524		29715.10 ⁴

Tab.7.3 (continuare)

$$\bar{x} = \frac{12327,5}{55} = 224,5$$

$$C_v = \frac{33}{224,5} \cdot 100 = 15,7 \%$$

$$S_1^2 = \frac{58752}{54} = 1088$$

$$S_1 = 33$$

$$S_k = \frac{-2708,524}{1.992.000} = -1,36 < 0$$

$$E_k = \frac{297.149.949}{65.250.000} - 3 = 1,56 > 0$$

OLC 25 - viteza de impact 58 m/s

Nr. ort.	Duritatea HB daN/mm ²	Media inter- valu- lui x _i	Frec- vența n _i	n _i x _i	x - x̄	(x - x̄) ²	(x - x̄) ² n _i	(x - x̄) ³	(x - x̄) ³ n _i	(x - x̄) ⁴	(x - x̄) ⁴ n _i
1	170-174,9	172,5	2	345,0	- 67	4489	8978	-302500	-605.000	2015.10 ⁴	403.10 ⁵
2	175-180	177,5	3	532,5	- 62	3850	11550	-238500	-685500	1483.10 ⁴	4488.10 ⁴
3	210-214,9	212,5	1	212,5	- 27	729	729	- 19800	- 19.800	531.10 ³	531.10 ³
4	215-219,9	217,5	3	652,5	- 22	484	1452	- 10700	- 31.950	234.10 ³	702.10 ³
5	220-224,5	222,5	5	1112,5	- 17	289	1455	- 4925	- 24.625	837.10 ²	4185.10 ²
6	225-229,9	227,5	2	455,0	- 12	144	288	- 1722	- 3.444	208.10 ²	416.10 ²
7	230-234,9	232,5	4	930,0	- 7	49	196	- 345	- 1.372	2410	9640
8	235-239,9	237,5	3	712,5	- 2	4	12	- 8	- 24	16	48
9	240-244,9	242,5	5	1212,5	3	9	45	27	135	81	405
10	245-249,9	247,5	2	495,0	8	64	128	512	1.024	4110	8220
11	250-254,9	252,5	4	1010,0	13	169	676	2217	8.908	286.10 ²	1144.10 ²
12	255-259,9	257,5	8	2060,0	18	324	2592	5862	46.896	105.10 ³	84.10 ³
13	260-264,9	262,5	6	1575,0	23	539	3234	12200	73.200	279.10 ³	1677.10 ³
14	265-269,9	267,5	5	1337,5	28	784	3920	22050	110.250	632.10 ³	316.10 ⁴
15	270-275	272,5	2	545,0	33	1089	2178	36200	72.400	1185.10 ³	237.10 ⁴
16	Σ		55	13187,5			37423		-1058902		94647813

136

$$\bar{x} = \frac{13187,5}{55} = 239,5$$

$$C_v = \frac{25,4}{239,5} \cdot 100 = 10,6 \%$$

$$S_1^2 = \frac{37.423}{54} = 693$$

$$S_1 = 25,4$$

$$S_k = \frac{-1.058.902}{906.000} = -1,17 < 0$$

$$E_k = \frac{94.647.813}{22.800.000} - 3 = 1,15 > 0$$

OLC 35 - vitesa de impact 58 m/s

Nr. orb.	Duritatea HB daN/mm ²	Media inter-valului x _i	Frec-venta n _i	x - x̄	(x - x̄) ²	(x - x̄) ² n _i	(x - x̄) ³	(x - x̄) ³ n _i	(x - x̄) ⁴	(x - x̄) ⁴ n _i
1	180-184,9	182,5	3	- 60	3600	10800	-216,000	-648,000	1295,10 ⁴	3885,10 ⁴
2	185-190	187,5	2	- 55	3025	6050	-167,800	-335,600	905,10 ⁴	181,10 ⁵
3	215-219,9	217,5	3	- 25	625	1875	- 15,700	- 47,100	392,10 ³	1176,10 ³
4	220-224,9	222,5	4	- 20	400	1600	- 8,000	- 32,000	16,10 ⁴	64,10 ⁴
5	225-229,9	227,5	2	- 15	225	450	- 3,389	- 6,778	50,850	101,700
6	230-234,9	232,5	2	- 10	100	200	- 1,000	- 2,000	10,000	20,000
7	235-239,9	237,5	5	- 5	25	125	- 125	- 625	625	3,125
8	240-244,9	242,5	7	0	0	0	0	0	0	0
9	245-249,9	247,5	5	5	25	125	125	625	625	3,125
10	250-254,9	252,5	12	10	100	200	1,000	2,000	10,000	20,000
11	255-259,9	257,5	7	15	225	1575	3,389	23,703	50,850	355,950
12	260-264,9	262,5	3	20	400	1200	8,000	24,000	16,10 ⁴	48,10 ⁴
13	265-269,9	267,5	4	25	625	2500	15,700	62,800	392,10 ³	1568,10 ³
14	270-274,9	272,5	1	30	900	900	27,000	27,000	81,10 ⁴	81,10 ⁴
15	275-279,9	277,5	0	35	1225	0	43,000	0	15,10 ⁵	0
16	280-284,9	282,5	4	40	1600	6400	64,000	256,000	256,10 ⁴	1024,10 ⁴
17	285-290	287,5	1	45	2025	2025	91,500	91,500	41,10 ⁵	41,10 ⁵
18	Σ		55		36025		-584,455		76,467,000	

$$\bar{x} = \frac{13362,5}{55} = 242,5$$

$$C_v = \frac{25,8}{242,5} \cdot 100 = 10,6 \%$$

$$S_1^2 = \frac{36025}{54} = 667$$

$$S_k = \frac{-584,455}{946.000} = -0,615 < 0$$

$$S_1 = 25,8$$

$$\bar{k} = \frac{76.467,900}{24.550.000} = -3 = 0,11 > 0$$

TABELA 7.02

OLC 45 - vitesa de impact 58 m/s

Nr. ort.	Duritatea HB daN/mm ²	Medie inter- valului x ₁	Frec- vența n ₁	n ₁ x ₁	x - x̄	(x - x̄) ²	(x - x̄) ² n ₁	(x - x̄) ³	(x - x̄) ³ n ₁	(x - x̄) ⁴	(x - x̄) ⁴ n ₁
1	200-204,9	202,5	1	202,5	- 58	3364	3364	-167.000	-167.000	1035.10 ⁴	1035.10 ⁴
2	205-210	207,5	4	830,0	- 53	2809	11236	-148.500	-594.000	789.10 ⁴	3156.10 ⁴
3	235-239,9	237,5	5	1187,5	- 23	529	2645	- 12.200	- 61.000	279.10 ³	1397.10 ³
4	240-244,9	242,5	5	1212,5	- 18	324	1620	- 5.850	- 29.250	105.10 ³	525.10 ³
5	245-249,9	247,5	4	990,0	- 13	169	676	- 2.200	- 8.800	28.600	114.400
6	250-254,9	252,5	4	1010,0	- 8	64	256	- 512	- 2.048	4.100	16.400
7	255-259,9	257,5	5	1287,5	- 3	9	45	- 27	- 135	81	405
8	260-264,9	262,5	2	525,0	2	4	8	8	16	16	32
9	265-269,9	267,5	1	267,5	7	49	49	343	343	2.410	2.410
10	270-274,9	272,5	2	545,0	12	144	288	1445	2890	20.800	41.600
11	275-279,9	277,5	7	1942,5	17	289	2023	4940	34580	83.700	586.10 ³
12	280-284,9	282,5	7	1977,5	22	484	3388	10.700	74900	234.000	1638.10 ³
13	285-289,9	287,5	3	862,5	27	729	2187	19.700	59100	532.10 ³	1596.10 ³
14	290-294,9	292,5	2	585,0	32	1024	2048	32.950	65900	105.10 ⁴	21.10 ⁵
15	295-300	297,5	3	892,0	37	1369	4107	50.900	152700	1875.10 ³	5625.10 ³
16	Σ		55	14317,5		33940	33940	-471.804	-471.804	55.552.647	55.552.647

$$\bar{x} = \frac{14317,5}{55} = 260,5$$

$$C_v = \frac{25,1}{260,5} \cdot 100 = 9,6 \%$$

$$S_1^2 = \frac{33940}{54} = 628$$

$$S_k = \frac{-471804}{869500} = -0,544 < 0$$

$$S_1 = 25,1$$

$$E_k = \frac{55.552,647}{21.650.000} - 3 = -0,44 < 0$$

TABELUL 7.2.

OLC 60 - viteza de impact 58 m/s

Nr. crt.	Duritatea HB daN/mm ²	Media inter- valului x _i	Frec- vența n _i	n _i x _i	m- \bar{x}	(x- \bar{x}) ²	(x- \bar{x}) ² n _i	(x- \bar{x}) ³	(x- \bar{x}) ³ n _i	(x- \bar{x}) ⁴	(x- \bar{x}) ⁴ n _i
1	255-259,9	257,5	3	772,5	-62	3844	11532	-238,500	-685,500	14825,10 ³	44475,10 ³
2	260-265	262,5	2	525,0	-57	3249	6498	-186,500	-373,00	10285,10 ³	2057,10 ⁴
3	290-294,9	292,5	1	292,5	-27	729	729	-19,800	-19,800	531,000	531,000
4	295-299,9	297,5	3	892,5	-22	484	1452	-10,700	-32,100	234,000	702,000
5	300-304,9	302,5	2	605,0	-17	289	578	-4,925	-9,850	83,700	167,400
6	305-309,9	307,5	3	922,5	-12	144	432	-1,722	-5,166	20,800	62,400
7	310-314,9	312,5	3	937,5	-7	49	147	-343	-1,029	2,410	7,230
8	315-319,9	317,5	6	1905,0	-2	4	24	8	48	16	96
9	320-324,9	322,5	5	1612,5	3	9	45	27	135	81	405
10	325-329,9	327,5	6	1965,0	8	64	384	512	3,072	4,110	24,660
11	330-334,9	332,5	7	2327,5	13	169	1183	2,217	15,519	28,600	200,200
12	335-339,9	337,5	5	1687,5	18	324	1620	5,862	29,310	105,000	525,900
13	340-344,9	342,5	5	1712,5	23	529	2645	12,200	61,000	279,500	1398,10 ³
14	345-349,9	347,5	2	695,0	28	784	1568	22,050	44,100	632,900	1264,10 ³
15	350-354,9	352,5	1	352,5	33	1089	1089	36,200	36,200	1185,10 ³	1185,10 ³
16	355-360	357,5	1	357,5	38	1444	1444	55,010	55,010	209,10 ⁴	209,10 ⁴
17	Σ		55	17262,5		31370			-882,147		73,201,891

$$\bar{x} = \frac{17652,5}{55} = 319,5$$

$$C_v = \frac{24,05}{319,5} \cdot 100 = 7,55 \%$$

$$S_1^2 = \frac{31.370}{54} = 580$$

$$S_k = \frac{-882,147}{767.500} = -1,15 < 0$$

$$S_1 = 24,05$$

$$E_k = \frac{73.201,891}{18.550.000} - 3 = 0,94 > 0$$

Cele mai slabe rezultate se obțin pentru OLC 10 și OLC 15 la care media măsurătorilor indiferent de viteza de impact se situează sub valcrite obținute pentru cazul deformării la presa cu fricțiune. Grupînd vitezele de impact 3 cîte 3 după masa pistonului în mișcare (24;31,6; 38 m/s pentru $m_p = 2,680$ kg și 36; 47,4; 58 m/s pentru $m_p = 1,200$ kg) se distinge clar influența vitezei de impact în cazul grupărilor propuse. În cadrul aceluiași grup de viteze se observă că o dată cu creșterea vitezei de impact crește și abaterea medie patratică corectată S_1 . Dovadă a faptului că deformarea se produce cu atît mai uniform, cu cît viteza de impact este mai mare. Pentru vitezele de 36 respectiv 47,4 m/s și $m_p = 1,200$ kg rezultatele sînt mai slabe decît în cazul vitezelor de 24;31,6; 38,7 m/s și $m_p = 2,680$ kg. Adică, deformarea este influențată atît de viteza de impact, cît și de energia impactului respectiv. Abaterea medie patratică corectată S_1 se micșorează o dată cu creșterea conținutului în C. În aceeași măsură se micșorează și coeficientul de variație C_v . Cele mai mari valori ale lui S_1 și C_v se obțin pentru OLC 10 și OLC 15 ceea ce arată că aceste oțeluri prezintă un grad mare de neuniformitate a deformării. Lucru evidențiat și de microstructurile efectuate. Fiînd foarte moi se produce mai mult o deformare a grăunților decît o distrugere a acestora. Din această cauză pot exista zone întregi nedeformate sau altele intens deformate în cadrul aceleiași suprafețe de măsurare.

Nu se pot face observații cantitative asupra coeficienților amintiți întrucît nu există cercetări care să limiteze valoarea acestora. O dată cu creșterea conținutului în C coeficienții S_1 și C_v se micșorează sensibil ca o consecință a creșterii omogenității deformării. Cele mai mici valori ale coeficienților S_1 se obțin pentru OLC 45. Acest lucru datorită structurii mai fine cu care se pornește la deformare. Structura finală suferă modificări mici din punct de vedere al granulației și se poate afirma că în mod corespunzător deformarea în ansamblu este mai omogenă. De altfel, faptele sînt confirmate și de măsurarea tensiunilor interne. Pentru aproximativ aceleași condiții de deformare valorile tensiunilor interne pentru OLC 45 sînt mult mai mici decît pentru OLC 35 respectiv OLC 60. Cele mai mici valori ale coeficientului de variație C_v se obțin însă pentru OLC 60, de unde rezultă că valorile obținute pentru \bar{x} și S_1 sînt cu atît mai stabile, respectiv abaterile față de valorile medii obținute, sînt cu atît mai mici cu cînt conținutul în C este mai mare.

În fig. 7.2...7.7 se reprezintă grafic distribuția frecvenței

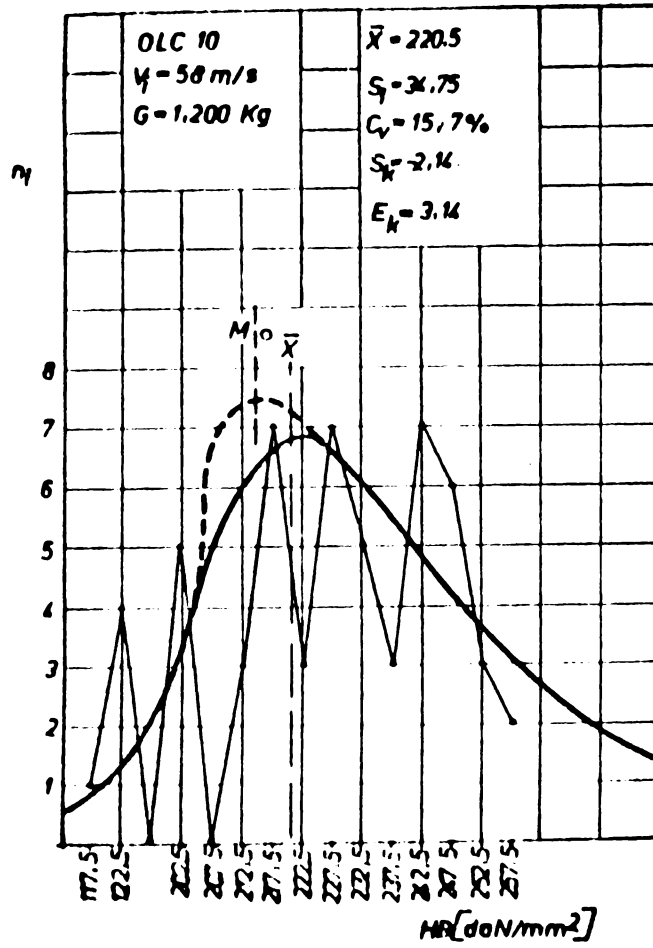


Fig.7.2.

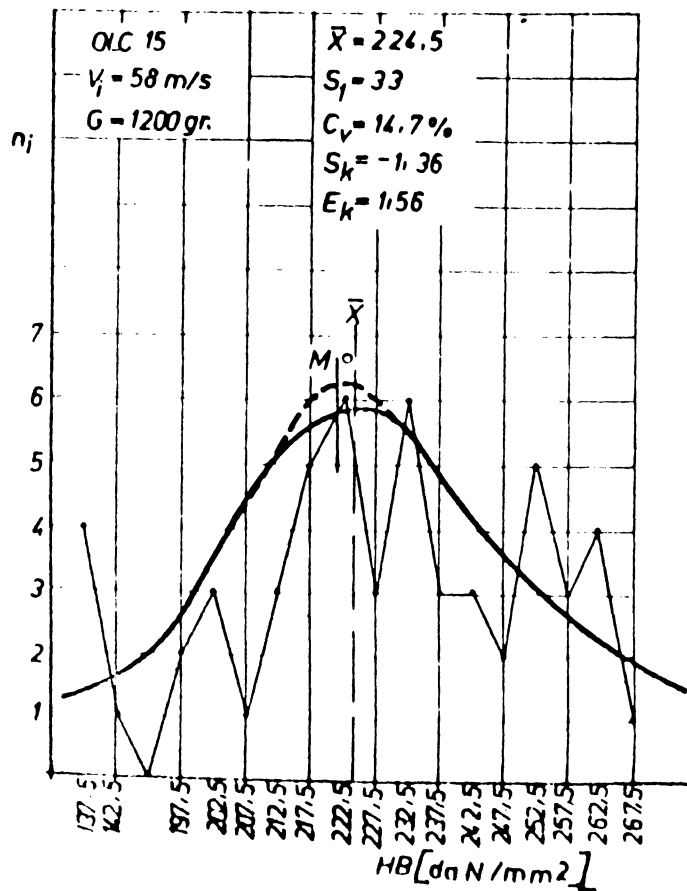


Fig.7.3.

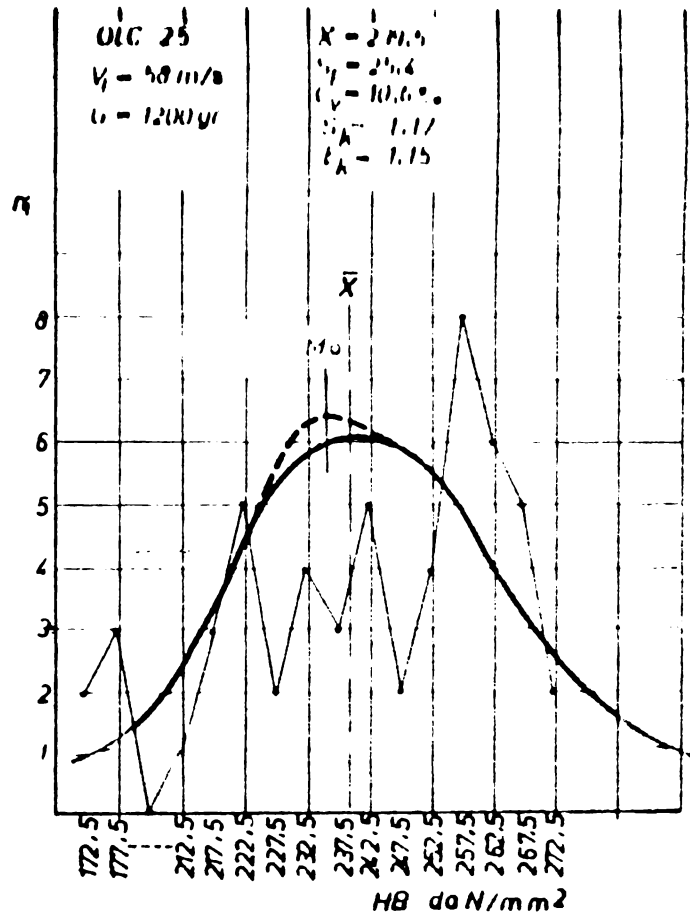


Fig.7.4.

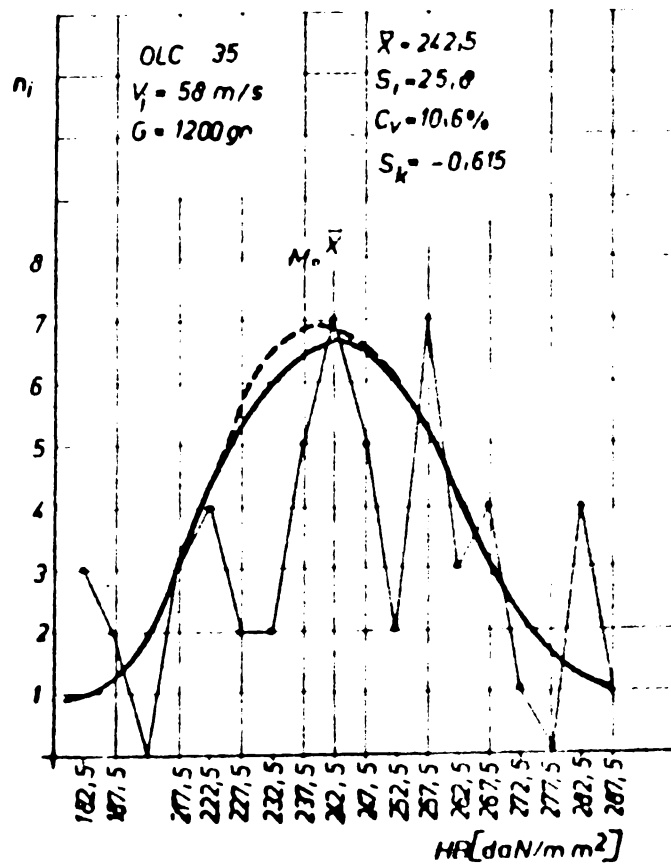


Fig.7.5.

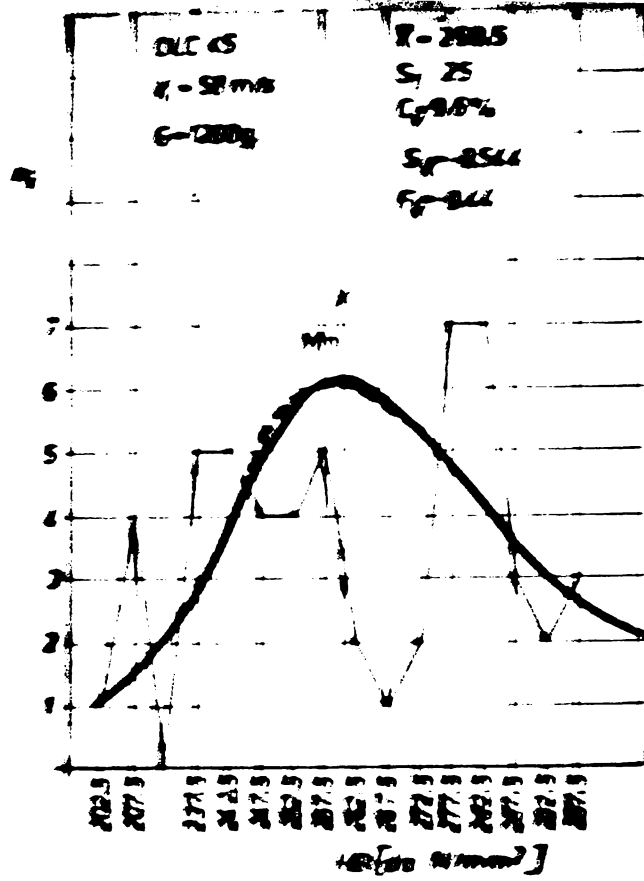


Fig. 7.6.

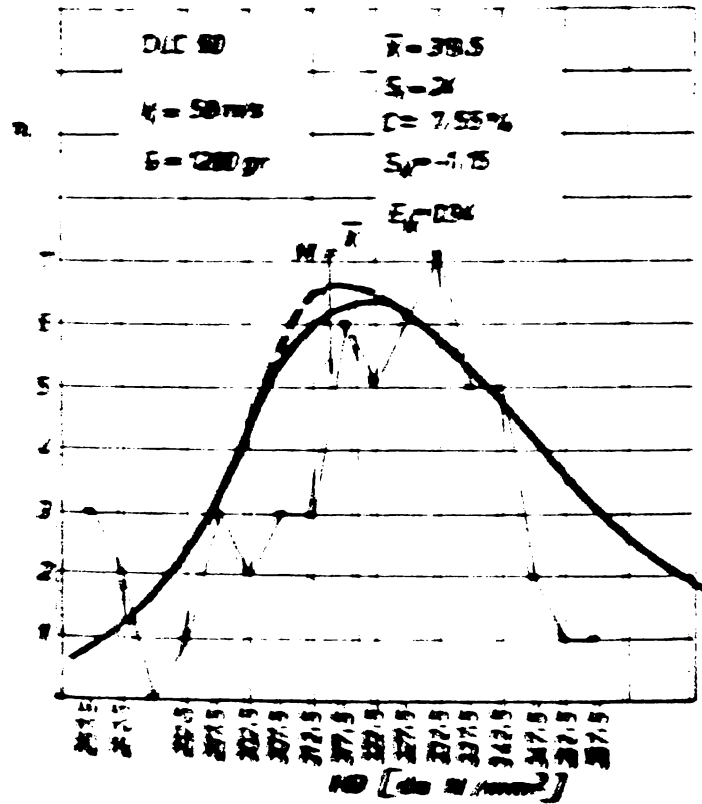


Fig. 7.7.

absolute n_1 a durităților pe baza datelor înscrise în tabelele 7.2...7.7. Dacă se notează cu M_0 abscisa corespunzătoare intensității maxime de probabilitate pentru apariția unei durități HB mai mică sau mai mare ca \bar{x} , pe baza coeficientului de asimetrie S_k se poate afirma că pentru absolut toate oțelurile studiate probabilitatea maximă este să apară o duritate mai mică decât duritatea medie (S_k avînd valori negative virful clopotului gaussian se deplasează spre stînga). Frecvența de apariție a unor valori mai mici decât \bar{x} crește ($E_k > 0$) pentru toate oțelurile în afară de OLC 45 unde această frecvență are tendința să scadă ($E_k < 0$).

Se confirmă și în acest fel comportarea diferită a OLC 45, comportare care nu poate fi pusă pe seama altor factori decât a structurii sale inițiale, restul condițiilor de deformare rămînînd aceleași.

În ceea ce privește deplasarea spre stînga sau în sus a maximumului curbelor obținute se observă că tendința maximă de deplasare o au oțelurile cu conținut scăzut de C și mai ales OLC 10 la care $S_k = -2,14$ și $E_k = 3,14$ sînt valorile cele mai mari obținute. Din cele de mai sus rezultă că dacă se urmărește îmbunătățirea proprietăților de material, respectiv creșterea durității prin deformare este indicat să limităm gradul de deformare la valori pînă la care se obțin durități apropiate de \bar{x} , întrucît probabilitatea de obținere a durităților mai mari chiar cu creșterea gradului de deformare scade, indiferent de conținutul în C.

Tendința de scădere este mai pronunțată la oțelurile moi, adică ecruisarea acestora se face mai greu decât a celor cu conținut ridicat de C. Considerînd valcarea \bar{x} , valorile durității cu probabilitate maximă, se pot deduce aproximativ care sînt gradele de deformare optime pentru atingerea acestor valori, tab. 7.8.

TABELUL 7.8.

Nr. ort.	Material	Media aritmetică \bar{x} daN/mm ²	Gradul de deformare %
1	OLC 10	220,5	54
2	OLC 15	224,5	52
3	OLC 25	239,5	50
4	OLC 35	242,5	48
5	OLC 45	260,5	46
6	OLC 60	319,5	38

Aplicarea unor grade mai mari de deformare nu se justifică decât atunci când în afara durității se urmăresc și alți factori: finisarea structurii, transformări structurale etc.

7.1.3. Regresia liniară.

Pentru a verifica dacă există o corelație fundamentală între duritate și conținutul în C al materialului în cadrul analizei statistice efectuate s-a trecut la stabilirea ecuației de regresie și a coeficientului de corelație care caracterizează intensitatea legăturii existente. Întrucât volumul de calcul necesar este foarte mare în cele ce urmează se fac referiri la stabilirea ecuației de regresie pentru viteza maximă de impact $v = 58$ m/s și pentru trei grade de deformare diferite ($\epsilon_1 = 30\%$; $\epsilon_2 = 40\%$; $\epsilon_3 = 50\%$) cele mai uzuale la prelucrarea prin deformare plastică.

Presupunând o legătură liniară între duritatea HB și conținutul în C, pentru un grad de deformare dat, atunci ecuația de regresie, de fapt ecuația dreptei considerate are forma:

$$Y = a + bx \quad (7.8)$$

Parametrii a și b se determină în așa fel încât să îndeplinească condiția de minim:

$$F = \sum (y - Y)^2 = \text{minim sau}$$

$$F = \sum (y - ax - b)^2 = \text{minim}$$

Anulând derivatele parțiale ale expresiei F în raport cu a și b obținem:

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 2 \sum (y - ax - b)(-x) = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = 2 \sum (y - ax - b)(-1) = 0$$

de aci rezultă sistemul de ecuații normale:

$$\begin{aligned} na + b \sum x &= \sum y \\ a \sum x + b \sum x^2 &= \sum xy \end{aligned} \quad (7.9)$$

care prin rezolvare ne dă valoarea parametrilor a și b ai dreptei.

Pentru un număr mare de valori ale perechii x și y, calculul parametrilor ecuației de regresie se efectuează mai ușor pe baza tabelului de corelație [74].

Sistemul de ecuații normale pentru acest caz este următorul:

$$na + b \sum m_x = \sum y n_x$$

$$a \sum x m_x + b \sum x^2 n_x = \sum_x \sum_y x \cdot y n_{xy} \quad (7.10)$$

Cantitățile $\sum_x x \cdot n_x$; $\sum_y y n_x$; $\sum_x \sum_y x \cdot y n_{xy}$; $\sum x^2 n_x$ și $\sum y^2 n_y$ (ultima necesară pentru calculul coeficientului de corelație) se determină pe baza datelor cuprinse în tabelele 7.9...7.11, pentru cele trei grade de deformare amintite.

Calculînd mărimile corespunzătoare și înlocuind în sistemul (7.10), prin rezolvare obținem valorile cuprinse în tabelul 7.12.

TABELUL 7.12.

Nr. crt.	Grad de deformare %	Parametrii		Ecuația de regresie $Y = a + bx$	Coef. de corelație
		a	b		
1	30	159,2	218	$Y = 159,2 + 218x$	0,952
2	40	175,0	216	$Y = 175 + 216x$	1
3	50	191,0	194	$Y = 191 + 194x$	0,89

Pe baza aceluiași tabele de corelație se calculează și coeficientul de corelație pentru stabilirea legăturii între parametrii considerați - duritatea HB și conținutul în C %.

Formula de calcul este:

$$r = \frac{n \sum_x \sum_y x y n_{xy} - (\sum_x m_x)(\sum_y y n_y)}{\sqrt{\left[n \sum_x x^2 n_x - (\sum_x m_x)^2 \right] \left[n \sum_y y^2 n_y - (\sum_y y n_y)^2 \right]}} \quad (7.11)$$

Prin înlocuirea datelor de calcul obținem pentru r valorile cuprinse în tab.7.12.

Coeficientul de corelație are valorile $-1 \leq r \leq 1$. Dacă între caracteristicile x și y există o legătură liniară funcțională, coeficientul de corelație exprimat în valoare absolută este egal cu unu. În cazul nostru acest lucru este valabil pentru un grad de deformare de 40 %. Pentru celelalte grade de deformare coeficientul de corelație este foarte apropiat de unu și se poate afirma că între duritatea HB și conținutul în C există o corelație liniară bună care se poate exprima pe baza ecuațiilor de regresie stabilite mai sus. Semnul + al coeficientului r arată că această corelație este directă, adică o dată cu creșterea conținutului în C

TABELLUL 2.2.

OIC 10...60; v = 58 m/s; $\xi = 30\%$

y	x	0,07- 0,14	0,12- 0,19	0,22- 0,29	0,32- 0,39	0,42- 0,49	0,57- 0,64	Total n _y	y·n _y	y ² ·n _y	∑x ² ·n _{xy}	y ∑x ² ·n _{xy}
185-195	9							9	1710	325000	0,9	171
195-205	1	8						9	1800	360000	1,3	260
205-215	2		4					6	1260	264500	1,3	273
215-225	8		6	8				14	3080	676000	4,3	945
225-235	2		2	2	2			4	920	212000	1,6	368
235-245	8			8	8			8	1920	462000	3,6	864
245-255							0	0	0	0		
255-265							0	0	0	0		
265-275							0	0	0	0		
275-285							0	0	0	0		
285-295							0	0	0	0		
295-305							1	1	300	90000	0,6	180
305-315							9	9	2790	864000	5,4	1675
Total n _x	10	10	10	10	10	10	10	60	13780	3253500	19,0	4736
x·n _x	1,0	1,5	2,5	3,5	4,5	6,0	6,0	19,0				
x ² ·n _x	0,1	0,225	0,625	1,1225	2,025	3,6	3,6	7,6975				
∑y·n _{xy}	1910	2020	2160	2220	2380	3090	13780					
x ∑y·n _{xy}	191	303	541	776	1071	1854	4736					

OLC 10...60; v = 58 m/s; C = 40 %

x \ y	0,07- 0,14	0,12- 0,19	0,22- 0,29	0,32- 0,39	0,42- 0,49	0,57- 0,64	Total n _y	y · n _y	y ² · n _y	∑ x · n _{xy}	∑ x ² · n _{xy}	∑ y · x · n _{xy}
200-210	9	1					10	2050	422000	1,05	215,8	
210-220	1	9					10	2150	464000	1,45	312,4	
220-230			9	2			11	2475	561000	2,95	664,0	
230-240		1	8				9	2115	499000	3,05	717,0	
240-250				5			5	1225	300500	2,25	552,0	
250-260				5			5	1275	325500	2,25	574,0	
260-270					0		0	0	0	0	0	0
270-280					0		0	0	0	0	0	0
280-290					0		0	0	0	0	0	0
290-300					0		0	0	0	0	0	0
300-310					0		0	0	0	0	0	0
310-320					3		3	945	297900	1,8	566,0	
320-330					7		7	2275	721000	4,2	1365,0	
Total n _x	10	10	10	10	10	10	60	14510	3590900	19,0	4966,2	
x · n _x	1,0	1,5	2,5	3,5	4,5	6,0	19					
x ² · n _x	0,1	0,225	0,625	1,1225	2,025	3,6	7,6975					
∑ y · n _{xy}	2062	2140	2260	2330	2500	3220	14510					
x ∑ y · n _{xy}	206,2	321	565	816	1126	1932	4966,2					

OIG 10...60; v = 58 m/s; C = 50 %

TABLE 7.11.

y	x	0,07- 0,14	0,12- 0,19	0,22- 0,29	0,32- 0,39	0,42- 0,49	0,57- 0,64	Total n_y	$y \cdot n_y$	$y^2 \cdot n_y$	$\sum x \cdot n_y$	$y \sum x \cdot n_y$
215-225	7		4					11	2420	532000	1,3	285
225-235	3	6						9	2070	476000	1,2	275
235-245			10		8			18	4320	1039000	5,3	1270
245-255					2			2	500	125000	0,7	175
255-265						8		8	2080	542000	3,6	935
265-275						2		2	540	146000	0,9	242
275-285						0		0	0	0		
285-295						0		0	0	0		
295-305						0		0	0	0		
305-315						0		0	0	0		
315-325						0		0	0	0		
325-335						8		8	2640	872000	4,8	1580
335-345						2		2	680	231800	1,2	408
Total n_x	10	10	10	10	10	10	10	60	11250	3963800	19,0	5160
$x \cdot n_x$	1	1,5	2,5	3,5	4,5	6,0		19				
$x^2 \cdot n_x$	0,1	0,225	0,625	1,1225	2,025	3,6		7,6975				
$\sum y \cdot n_y$	2230	2260	2400	2420	2620	3320		15250				
$x \sum y \cdot n_y$	223	339	600	846	1180	1992		5160				

crește, corespunzător și duritatea pentru același grad de deformare ξ .

Scăderea coeficientului de corelație r pentru grade de deformare $\xi > 40\%$, arată că indiferent de conținutul în C pentru grade mari de deformare relația liniară între mărimile HB și procentul de C se strică. Corelația ^{se} dovedește a fi cu atât mai slabă cu cât crește gradul de deformare ξ . Acest lucru se datorește factorilor suplimentari care apar în cursul deformării și de care nu se ține cont în analiza efectuată. Făcând calculele de mai sus și pentru găsirea unei corelații liniare între duritatea HB și viteza de impact v , precum și între HB și gradele de deformare ξ s-au obținut valori ale coeficientului r de cca. 0,5 ceea ce arată o corelație liniară slabă între acești parametri. Corelația este de formă curbilinie și poate fi determinată fie prin metoda corelației multiple fie prin alte metode matematice.

7.2. Calculul variației HB = f(ξ) la deformarea plastică la rece pentru deformarea la presa cu fricțiune și cu viteza de impact de 58 m/s

Pentru rezolvare, s-au ales rezultatele cele mai reprezentative pe baza cărora se pot trage concluzii generale. Întrucât deformarea cu viteze mari de impact s-a făcut comparativ cu deformarea la viteze normale, ecuațiile stabilite privesc în principal curbele $HB = f(\xi)$ pentru deformarea la presa cu fricțiune și cele pentru deformarea cu viteza de 58 m/s, viteză la care rezultatele valorice sînt evident diferite de celelalte rezultate prezentate în lucrare.

Calcululele se extind asupra întregii game de oțel studiate (CNC 10...60) și se execută diferențiat pentru cele 6 viteze de impact amintite.

7.2.1. Aproximarea matematică a curbelor experimentale.

Din analiza formei curbelor experimentale și pe baza indicațiilor din literatura de specialitate [20], [59], [102], [110] rezultă posibilitatea aproximării acestora prin parabole folosind metoda celor mai mici pătrate. Ecuația generală a curbelor are forma:

$$Y_i = a_i x^2 + b_i x + c_i, \quad i = \overline{1, n} \quad (7.12)$$

reprezentînd p familie de parabole unde coeficienții $a_i, b_i, c_i \in R$ se determină din ecuațiile de minim ale expresiei:

$$\int_0^{\infty} [f(x) - y_1]^2 = F(a_1, b_1, c_1) \quad (7.13)$$

unde: $f: [0, \infty] \rightarrow R$

Minimul expresiei (7.13) cu ajutorul căreia se calculează coeficienții a_1, b_1, c_1 se determină din condiția:

$$\frac{\partial F}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial b_1} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial c_1} = 0 \quad (7.14)$$

Din efectuarea calculelor rezultă:

$$\frac{\partial F}{\partial a_1} = -2 \int_0^{\infty} [f(x) - y_1] x^2 dx \quad (7.15)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b_1} = -2 \int_0^{\infty} [f(x) - y_1] x dx$$

$$\frac{\partial F}{\partial c_1} = -2 \int_0^{\infty} [f(x) - y_1] dx$$

Se obține astfel un sistem de ecuații liniare cu ajutorul cărora se determină prin metoda amintită coeficienții a_1, b_1, c_1 R :

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} [f(x) - y_1] x^2 dx &= 0 \\ \int_0^{\infty} [f(x) - y_1] x dx &= 0 \\ \int_0^{\infty} [f(x) - y_1] dx &= 0 \end{aligned} \quad (7.16)$$

Rezolvarea sistemului (7.16) se face notînd cu:

$$I_2 = \int_0^{\infty} x^2 f(x) dx; \quad I_1 = \int_0^{\infty} x f(x) dx; \quad I_0 = \int_0^{\infty} f(x) dx \quad (7.17)$$

și integralele se calculează cu metoda dreptunghiurilor. Notînd în continuare cu:

$$\begin{aligned} I_2' &= a_1 \frac{\infty^5}{5} + b_1 \frac{\infty^4}{4} + c_1 \frac{\infty^3}{3} = \int_0^{\infty} x^2 y_1 dx \\ I_1' &= a_1 \frac{\infty^4}{4} + b_1 \frac{\infty^3}{3} + c_1 \frac{\infty^2}{2} = \int_0^{\infty} x y_1 dx \\ I_0' &= a_1 \frac{\infty^3}{3} + b_1 \frac{\infty^2}{2} + c_1 \infty = \int_0^{\infty} y_1 dx \end{aligned} \quad (7.18)$$

obținem:

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \int_0^{\alpha} x^2 f(x) dx \approx \alpha_1 f_2(x_1) + \alpha_2 f_2(x_2) + \alpha_3 f_2(x_3) + \alpha_4 f_2(x_4) + \alpha_5 f_2(x_5) \\
 I_1 &= \int_0^{\alpha} x f(x) dx \approx \alpha_1 f_1(x_1) + \alpha_2 f_1(x_2) + \alpha_3 f_1(x_3) + \alpha_4 f_1(x_4) + \alpha_5 f_1(x_5) \\
 I_0 &= \int_0^{\alpha} f(x) dx \approx \alpha_1 f_0(x_1) + \alpha_2 f_0(x_2) + \alpha_3 f_0(x_3) + \alpha_4 f_0(x_4) + \alpha_5 f_0(x_5)
 \end{aligned}
 \tag{7.19}$$

unde $x_i, i = \overline{1,5}$ sînt valorile experimentale date:

$$f_2(x_i) = x^2 f(x) \Big|_{x=x_i}; \quad f_1(x_i) = f(x) \Big|_{x=x_i}; \quad f_0(x_i) = f(x) \Big|_{x=x_i}$$

se deduc din curbele experimentale:

$$x_i = x_1 - x_{1-1}, \quad x_0 = 0 \quad \text{și} \quad \sum_{i=1}^5 \alpha_i = \alpha$$

Se obține astfel un sistem liniar de forma:

$$\begin{aligned}
 I_2 &= I_2' \\
 I_1 &= I_1' \\
 I_0 &= I_0'
 \end{aligned}
 \tag{7.20}$$

din care, folosind notațiile din (7.18) și (7.19) se determină coeficienții $a_i, b_i, c_i \in R$ și deci ecuațiile parabolilor care aproximează curbele experimentale date. Spre exemplificare se dă în continuare rezolvarea concretă a unui sistem.

Coeficienții luați în considerare avînd valori mari, efectuarea calculelor s-a făcut pe o mașină de calcul tip Felix, aproximarea făcîndu-se la 2 zecimale.

Coeficienții α_i, X_i și $f(x_i)$ sînt reprezentați în fig.7.8 și în mod similar se pot deduce pentru toate cele 12 cazuri prezentate în fig.7.8...7.19.

Funcțiile $f_1(x) \dots f_5(x)$ au ca origine duritatea inițială a oțelului considerat. Valorile astfel extrase se introduc pe rînd în sistemul liniar (7.20) și în urma calculelor efectuate rezultă coeficienții a_i, b_i, c_i pe baza cărora se stabilesc exact ecuațiile $y_i = a_i x^2 + b_i x + c_i$.

Intrucît calculele sînt aceleași se va exemplifica numai o situație și anume cea referitoare la OLC 10 pentru cazul deformării la presă cu fricțiune respectiv $v = 58$ m/s. Astfel:

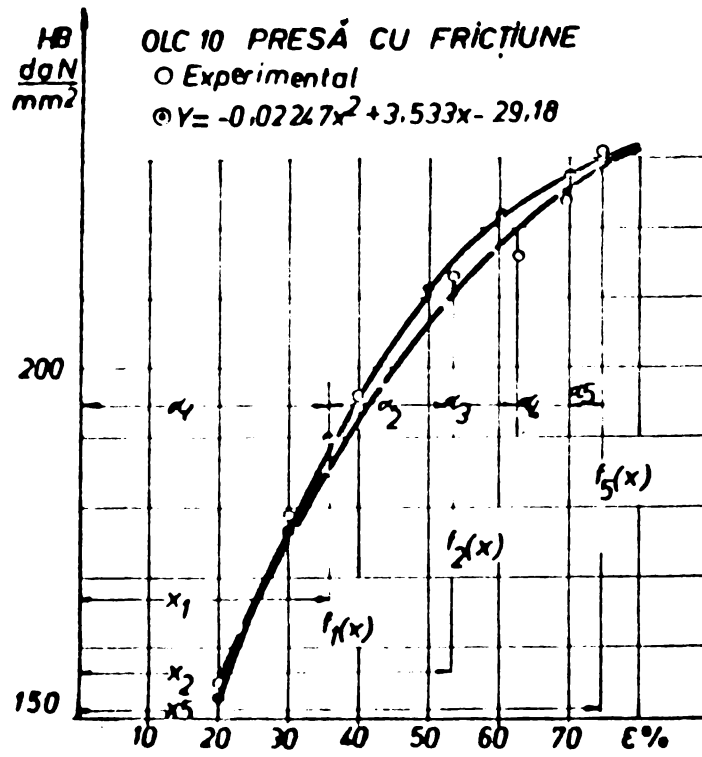


Fig.7.8.

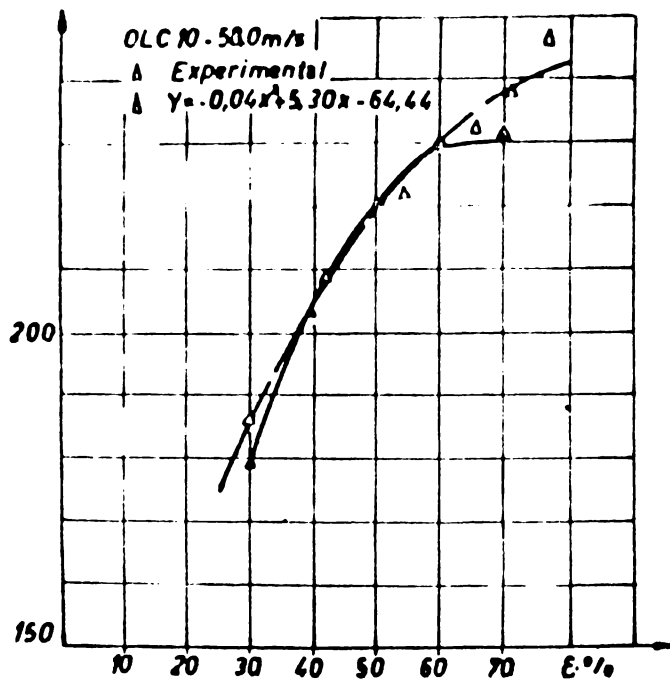


Fig.7.9.

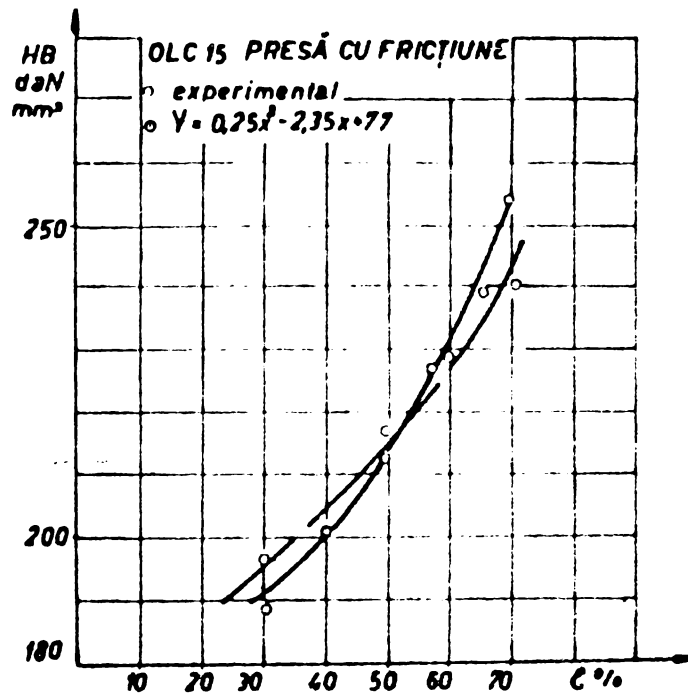


Fig.7.10.

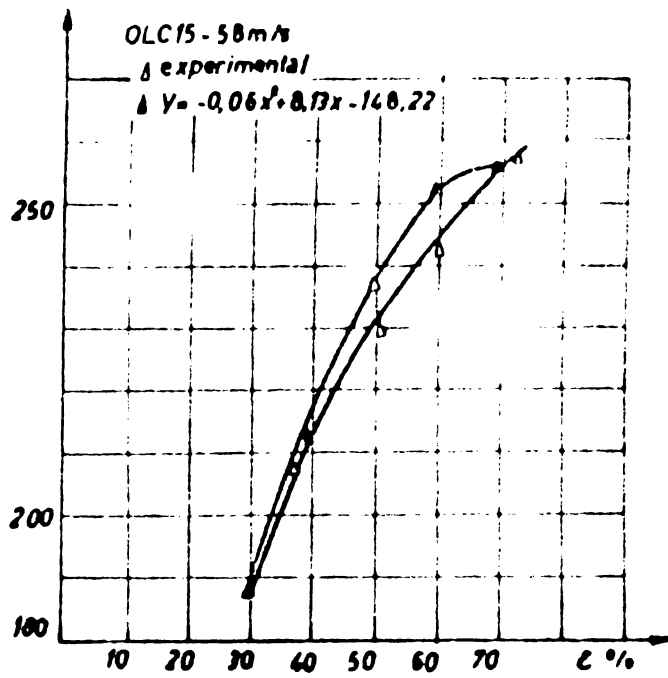


Fig.7.11.

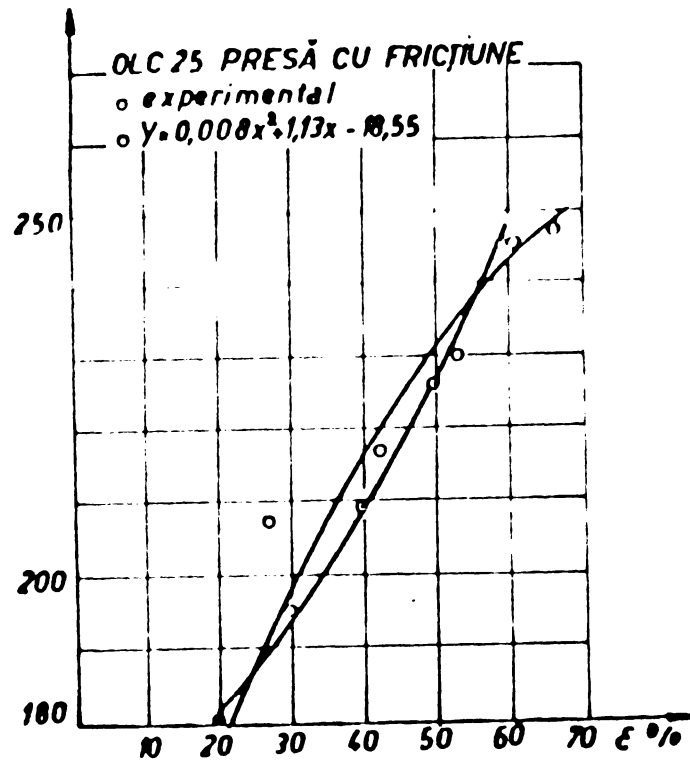


Fig.7.12.

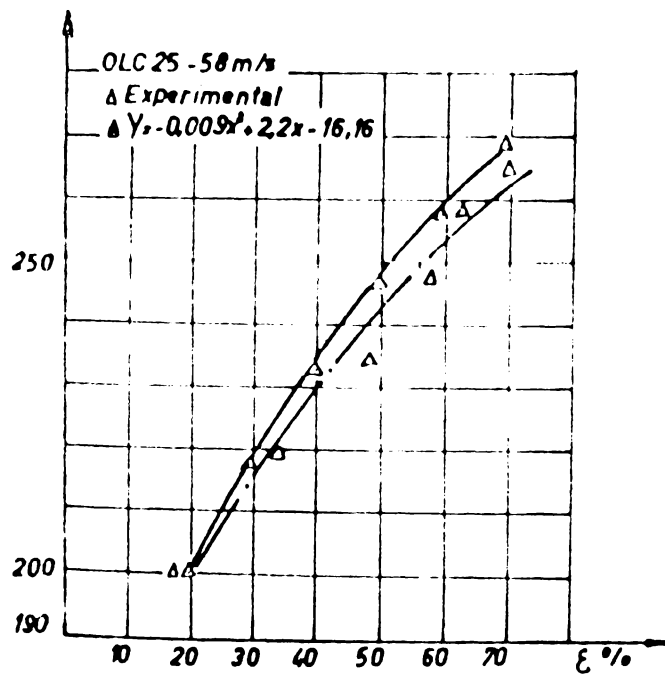


Fig.7.13.

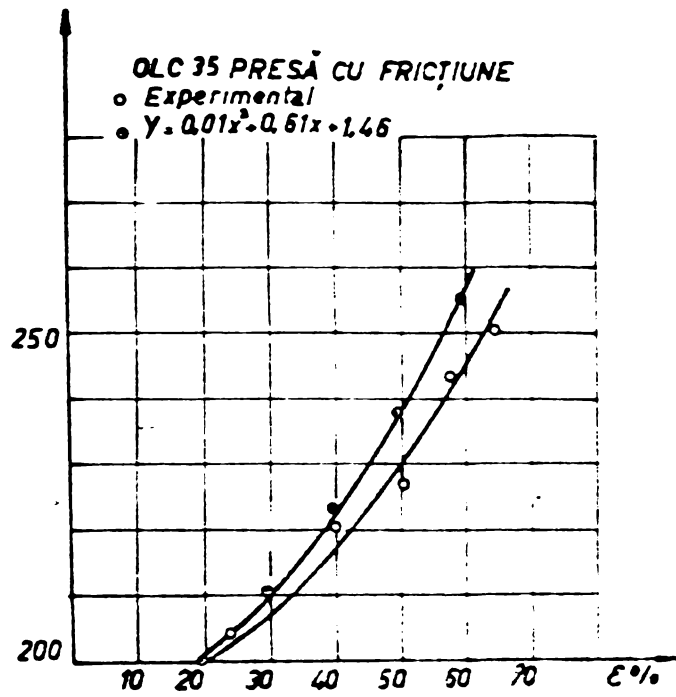


Fig.7.14.

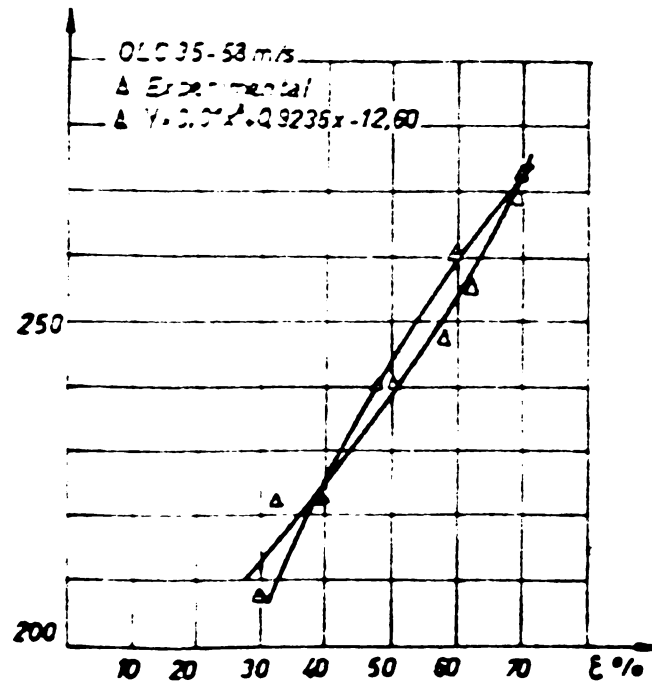


Fig.7.15.

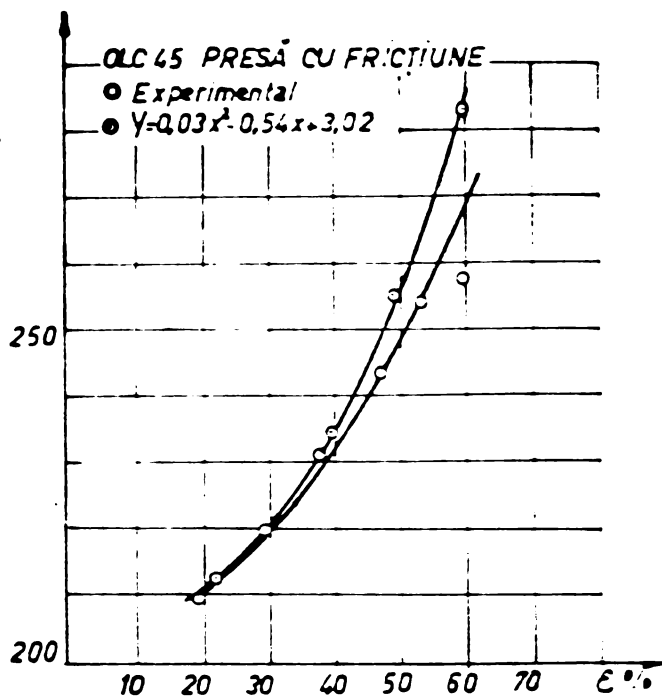


Fig.7.16.

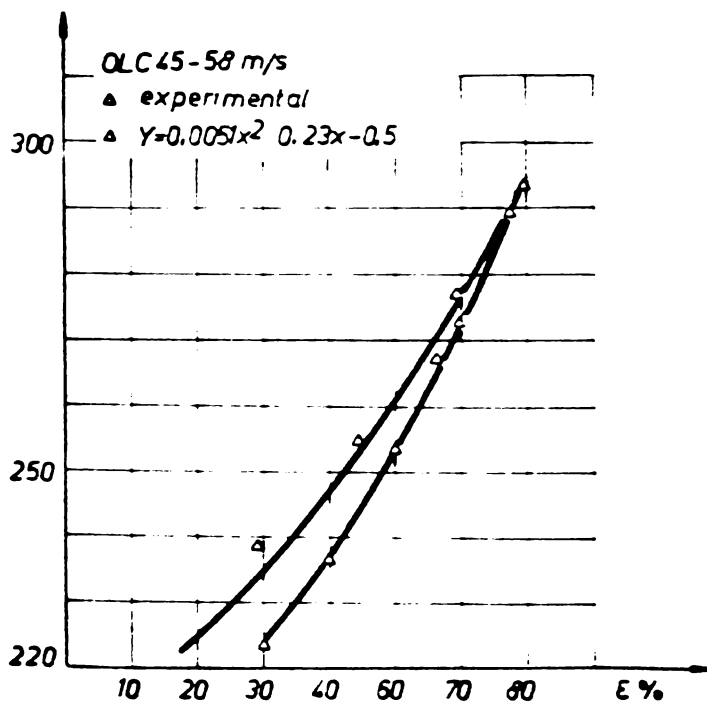


Fig.7.17.

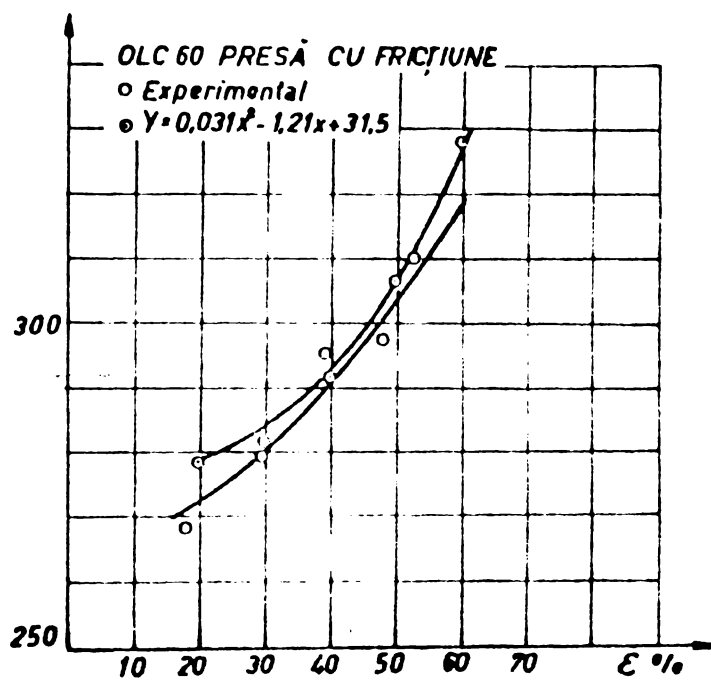


Fig.7.18.

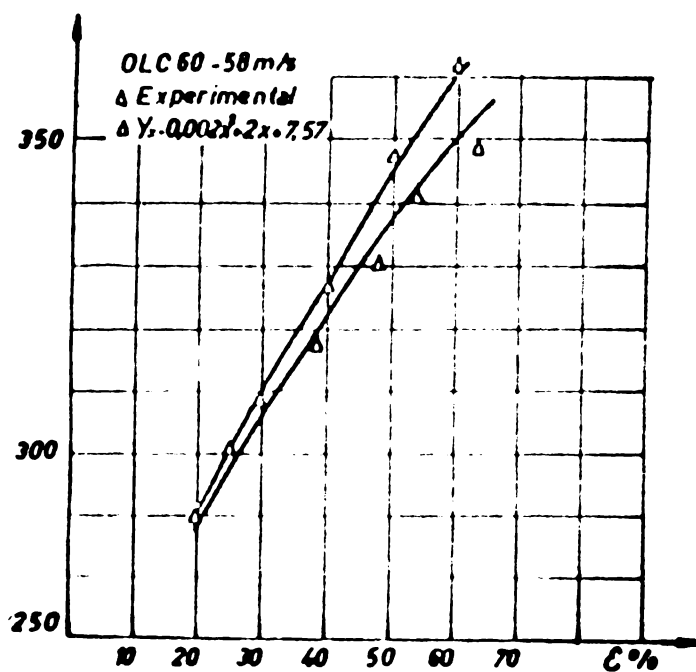


Fig.7.19.

$$I_2 = 35,8 \times 1281,6 \times 70 + 17,5 \times 2841 \times 93,5 + 9,5 \times 3943,8 \times 96 + 6,7 \times 4830,25 \times 104 + 5 \times 5550 \times 111,5 = 17.917.140$$

$$I_1 = 35,8 \times 35,8 \times 70 + 17,5 \times 53,3 \times 93,5 + 9,5 \times 62,8 \times 96 + 6,7 \times 69,5 \times 104 + 5 \times 74,5 \times 111,5 = 324.161,87$$

$$I_0 = 35,8 \times 70 + 17,5 \times 93,5 + 9,5 \times 96 + 6,7 \times 104 + 5 \times 111,5 = 6.308,55$$

Se obține astfel sistemul liniar:

$$3330,15 \cdot a_1 + 55,87 \cdot b_1 + c_1 = 129,99$$

$$2775,25 \cdot a_1 + 49,66 \cdot b_1 + c_1 = 116,81$$

$$1850,08 \cdot a_1 + 37,24 \cdot b_1 + c_1 = 84,67$$

care prin rezolvare dă:

$$a_1 = -0,02247 ; b_1 = 3,533 ; c_1 = -29,182$$

iar ecuația Y_1 are expresia :

$$Y = -0,02247 x^2 + 3,533 x - 29,182$$

În felul acesta prin rezolvări similare rezultă următoarele ecuații pentru curbele experimentale trasate în fig.7.8... 7.19. (tab.7.13).

Fînd pe rînd lui x diferite valori (20,30,40,50,60) corespunzător diferitelor grade de deformare se calculează valorile ϵ pentru duritate. Pentru domeniul amintit $\epsilon = 20...60\%$ abaterile medii patratice sînt mai mici de 5 % și se încadrează în normele acceptate. Cu ajutorul valorilor calculate se trasează curbele teoretice.

7.2.2. Considerații asupra metodei utilizate.

- Metoda matematică de calcul aleasă este bună și rezultatele obținute se încadrează în normele existente, adică pentru toate cazurile considerate abaterea medie patratică nu depășește 5 %.

- Ecuațiile obținute permit extrapolarea rezultatelor și pentru grade de deformare în afara celor experimental determinate.

- Metoda poate fi aplicată pentru toate cazurile luate în studiu astfel încît se crează posibilitatea stabilirii unor limite pentru coeficienții a_1, b_1 și c_1 care înlocuiți în ecuația generală $Y_1 = a_1 x^2 + b_1 x + c_1$ să permită obținerea unor ecuații

Nr. crt.	Cal. oțel	Tipul def. m/s	$Y_1 = a_1 x^2 + b_1 x + c_1$
1	OLC 10	P.F.	$Y = -0,02247x^2 + 3,533x - 29,182$
2	OLC 10	58	$Y = -0,04 x^2 + 5,3 x - 64,44$
3	OLC 15	P.F.	$Y = 0,05 x^2 - 2,35 x + 77,07$
4	OLC 15	58	$Y = -0,06 x^2 + 8,13 x - 152,22$
5	OLC 25	P.F.	$Y = 0,00776 x^2 + 1,13 x - 18,55$
6	OLC 25	58	$Y = -0,009 x^2 + 2,2 x - 16,16$
7	OLC 35	P.F.	$Y = 0,01 x^2 + 0,61 x + 1,46$
8	OLC 35	58	$Y = 0,01 x^2 + 0,9236 x - 12,60$
9	OLC 45	P.F.	$Y = 0,03 x^2 - 0,54 x + 3,62$
10	OLC 45	58	$Y = 0,015 x^2 + 0,23 x - 0,5$
11	OLC 60	P.F.	$Y = 0,031 x^2 - 1,21 x + 31,5$
12	OLC 60	58	$Y = 0,002 x^2 + 2 x - 7,57$

generale pentru diferite viteze de impact și diferite conținuturi de C al oțelurilor pentru funcția $HB = f(\epsilon)$.

- Cele mai bune rezultate în ceea ce privește aproximarea făcută se obține pentru cazul deformării la presa cu fricțiune. Dacă se ia în considerare conținutul în C atunci aproximarea se consideră mai bună la conținuturi mici de C și grade mici de deformare și mai slabă în celelalte cazuri.

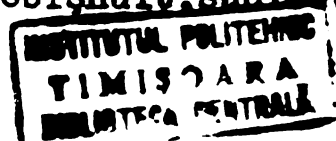
- Deși se încadrează în limitele acceptate, abaterile medii practice sînt totuși mai mari la deformarea cu viteză mare de impact decât în cazul deformării clasice. Principalul motiv este acela al neuniformității deformării dar și apariția unor cauze suplimentare cum ar fi de exemplu ecruisarea mai puternică datorită deformării prin maclare, a multiplicării rapide a dislocațiilor și deci creșterii numărului acestora etc.

- Abaterile mai mari de 5 % față de valorile experimentale determinate pentru valori ale gradului de deformare ϵ mai mici de 20 % sau ϵ mai mari de 60 % pot fi puse pe seama a trei factori:

- aproximarea deficitară a curbelor experimentale mai ales în zona sub gradul minim de deformare pînă la duritatea inițială a oțelului considerat;

- comportarea neuniformă a materialului supus deformării sub sau peste limita gradelor de deformare considerate;

- intervenția unor elemente suplimentare obișnuit, subiective



care n-au fost luate în considerare (erori de măsurare, apropierea greșită a gradului maxim de deformare, aplicarea unor lovituri repetate pentru obținerea unui anumit grad de deformare etc.).

7.3. Concluzii

- Analiza statistică efectuată, confirmă pe deplin rezultatele experimentale în ceea ce privește influența vitezei de impact asupra deformării plastice, precum și caracterul neomogen al deformării.

- Se confirmă existența unei corelații liniare bune între duritatea HB a oțelurilor și conținutul în C al acestora.

- Corelația între celelalte mărimi $HB = f(v)$ și $HB = f(C)$ este de natură curbilinie ceea ce dovedește caracterul complex al deformării plastice în general.

- Determinarea ecuațiilor pentru curbele de variație $HB=f(\xi)$ permite extrapolarea rezultatelor experimentale obținute și pentru alte grade de deformare decât cele inițiale. De asemenea ele confirmă încă odată caracterul mai omogen al deformării la viteze mici de impact.

.

C A P I T O L U L 8

CONSIDERATIILE FINALE SI CONCLUZII

Abordarea studiului comportării oțelurilor carbon de calitate la deformarea plastică la rece cu viteze mari de impact este dictată de importanța crescîndă a oțelurilor amintite în tehnica prelucrării prin deformare plastică precum și a perspectivelor ce le oferă prelucrarea cu viteze mari de impact.

Lucrarea este o sinteză a realizărilor pe plan mondial în domeniul amintit cu contribuții originale atât în ceea ce privește sistematizarea datelor din literatura de specialitate și în ceea ce privește studiul cercetărilor altor aspecte inedite procedurii.

Principalele contribuții originale aduse în lucrarea de față sînt:

1. În domeniul cercetării teoretice:

- Stabilirea unui nou criteriu de clasificare a procedeelor de deformare plastică după viteza, respectiv utilajul de deformare. Astfel, deformarea se poate produce cu viteze mici pe utilaje clasice ($v < 10$ m/s) și cu viteze mari pe utilaje specializate ($v > 10$ m/s). La rîndul lor utilajele specializate pot fi cu sisteme în mișcare avînd viteza de deplasare a sistemului cuprinsă obișnuit în limitele 10...300 m/s și fără sisteme în mișcare la care deformarea se face prin intermediul undelor de șoc cu viteze obișnuit mai mari de 1000 m/s.

- Aprofundarea matematică a cercetărilor experimentale.

În acest sens se procedează la analiza statistică a măsurătorilor experimentale precum și la stabilirea unor ecuații teoretice pentru un caz concret al prelucrării (deformarea la presa cu fricțiune și cu viteza de impact de 58 m/s). Aceasta permite să se tragă cîteva concluzii importante în ceea ce privește prelucrarea la rece cu viteze mari de impact a oțelurilor carbon de calitate. Concluziile se referă în mod deosebit la limita vitezelor de impact, la neomogenitatea deformării, la determinarea unor grade optime de deformare precum și la utilizarea concretă a ecuațiilor teoretice stabilite care permit extrapolarea rezultatelor, precum și generalizarea lor pentru alte cazuri de deformare.

- Fundamentarea teoretică a fenomenelor pe baza curbelor de variație a factorilor fundamentali ai cercetării: duritatea HB;

viteza de impact v_1 ; conținutul în carbon C %. Acest lucru permite o interpretare mai exactă a fenomenelor apărute la deformare și tragerea unor concluzii clare în ceea ce privește comportarea la deformarea plastică la rece a oțelurilor carbon de calitate. Rezultatele concrete ale analizei statistice efectuate, precum și ecuațiile teoretice stabilite confirmă corectitudinea curbelor trasate pe baza rezultatelor experimentale și întăresc pe deplin concluziile care se desprind din discuția acestora.

- Fundamentarea rolului grăunților și a limitelor de grăunți în procesul deformării.

Acest lucru se face prin măsurarea concretă a mărimii grăunților în funcție de gradul de deformare și modul de deformare (presă cu fricțiune sau viteză mare de impact). Reprezentarea grafică a evoluției mărimii grăunților în paralel cu evoluția durității în funcție de gradul de deformare, permite stabilirea mărimii maxime a gradului de deformare până la care se produce o finisare pronunțată a structurii. Peste acest grad de deformare duritatea crește în continuare, dar creșterea este pusă pe seama altor factori ai deformării și nu pe finisarea structurii care se modifică foarte puțin sau deloc. În mod concret este vorba de mărirea tensiunilor interne, de apariție a transformărilor structurale, de evoluția dislocațiilor etc. În ceea ce privește limitele grăunților, acestea influențează deformarea prin obstacolele ce le formează în calea deplasării dislocațiilor. Scăderea ecruisării spre sfârșitul deformării se datorește faptului că o dată cu mărirea lungimii limitelor de grăunți, tensiunea creată de acumulările de dislocații se repartizează pe o lungime mai mare scăzând în intensitate.

2. În domeniul aplicativ:

- Proiectarea și realizarea unei instalații originale, funcționând pe principiul pneumatic, având următoarele caracteristici:

- presiunea maximă în camera de compresie 100 daN/cm^2 ;
- greutatea pistoanelor în mișcare $1,200 \text{ kg}$ și $2,680 \text{ kg}$;
- viteze de impact realizate $10 \dots 100 \text{ m/s}$;
- forța de impact $100 \dots 2000 \text{ daN}$;
- lungimea cursei pistonului $0,320 \text{ m}$;

- Alegerea durității drept criteriu de referință al comportării materialelor, ceea ce mărește posibilitatea de investigare a acestora fără o aparatură pretențioasă din import. Concordanța existentă între variația măririi durității și cea a rezistenței

la deformare permite o interpretare corespunzătoare a rezultatelor obținute.

- În domeniul vitezelor utilizate, există posibilitatea obținerii de proprietăți mecanice îmbunătățite în piesele deformate, eliminând în felul acesta alte prelucrări (tratamente termice, durificări etc.).

3. În domeniul cercetării experimentale:

- Stabilirea unei metode originale de determinare a vitezelor medii de impact, prin oscilografiera pe ecranul osciloscopului a diagramei spațiu-timp între două repere determinate pe cilindrul de ghidare a pistonului. Înregistrarea s-a făcut la un osciloscop catodic cu două spoturi de tip Krizik D 581 iar etalonarea bazei de timp a acestuia cu un generator de semnal de înaltă frecvență tip Tesla BN 344 cu frecvență 20 Hz...2 kHz. Vizualizarea și fotografierea fenomenelor produse într-un anumit interval de timp se bazează pe îmbinarea într-un montaj corespunzător a unui aparat foto și a sistemului de declanșare a bazei de timp a osciloscopului catodic.

- Alegerea unei gamei largi de viteze de impact și oțeluri carbon de calitate, ceea ce permite efectuarea unui număr mare de măsurători și implicit o interpretare corespunzătoare a rezultatelor experimentale. S-a preferat utilizarea oțelurilor carbon de calitate atât pentru modul îngrijit de elaborare, cât și pentru conținutul variabil în C de la o calitate la alta. Vitezele utilizate cuprinse între 25...60 m/s se încadrează în gama de viteze frecvent întrebuințate la prelucrările pe ciocane rapide.

- Determinarea tensiunilor interne reziduale în piesele deformate și folosirea acestora în interpretarea corespunzătoare a rezultatelor obținute. Tensiunile interne au fost determinate prin metoda iradierii cu raze X atât pentru faptul că se pretează cel mai bine la tipul de epruvete rezultate în urma deformării, cât și pentru că oferă posibilitatea efectuării și altor investigații pe aceleași probe. S-au făcut două iradiări, una normală pe suprafața probei și a doua înclinată cu unghiul $\theta = 40^\circ$ față de normală. Pentru obținerea imaginilor de difracție s-a folosit într-un montaj simetric metoda reflexului înapoi. Iradierea s-a făcut la o instalație röntgen tip TUR 100 cu un anticatod de Fe, iar înregistrarea pe film roentgen de mare sensibilitate care a permis reducerea timpului de expunere la numai 4 ore pentru fiecare probă

- Evidențierea modificărilor structurale care apar pe baza analizei metalografiei optice și electronice a principalelor

epruvte deformate. S-a folosit pentru metalografiere microscopul optic tip MC 1 și microscopul electronic din dotarea laboratorului de Studiul metalelor. Imaginile obținute și fotografiate permit o interpretare pînă în cele mai mici amănunte a comportării materialului la deformare în diferite condiții de lucru.

Din lucrare se desprind cîteva concluzii mai importante:

- Pe plan mondial crește ponderea deformărilor plastice cu viteze mari de impact. Cercetările teoretice ale procedurii sînt rămase în urma dezvoltării lui industriale. Majoritatea autorilor se ocupă de influența strictă a vitezei de deformare asupra rezistenței la deformare neglijîndu-se alți factori ai deformării.

- Coroborînd rezultatele altor autori cu cele proprii cercetările efectuate scot în evidență următoarele:

- pentru oțeluri cu conținut scăzut de C OLC 10, OLC 15 deformate la rece, viteza de impact se face simțită față de deformarea clasică pentru valori mai mari de 50 m/s. Sub această valoare materialul încălzit la cca. 200...250°C suferă un pronunțat proces de relaxare (revenire) micșorîndu-și duritatea;

- pentru oțeluri ^{cu conținut} ridicat de C influența vitezei de impact se face simțită chiar pentru valori mai mici de 20 m/s;

- viteza de impact influențează mai puțin asupra finisării structurii și mai mult asupra celorlalți factori ai deformării:

- mărește tensiunile reziduale prin creșterea pronunțată a numărului de defecte la deformare (vacanțe, dislocații);

- favorizează apariția naclelor ceea ce distorsionează rețeaua cristalină conducînd la creșterea gradului de ecruisare;

- produce globulizarea grăunților de perlită la oțelurile cu conținut scăzut de C și respectiv o finisare a lamelilor de perlită pentru oțelurile cu conținut ridicat de C. Ca o consecință se mărește corespunzător și proprietățile mecanice ale pieselor deformate;

- produce creșterea gradului de dispersie a fazelor datorită distrugerii acestora și măririi gradului de difuzie a lor. Fenomenul este cu atît mai pronunțat, cu cît crește viteza de impact și respectiv conținutul în C;

- mărește numărul benzilor active de lunecare, ceea ce duce la mărirea gradului de deformabilitate al materialului. Acest lucru are ca efect mărirea gradului de ecruisare și implicit creșterea rezistenței la deformare [116.]

- Viteza de impact se face simțită mai mult la grade mici de deformare cînd intensitatea transformărilor care au loc în material sînt maxime. Din această cauză creșterea durității în acest domeniu este mult mai mare decît la grade mari de deformare dacã se fac referiri la duritatea inițială. La grade mari de deformare preponderent devine mărimea grăunților prin limitele lor precum și alte fenomene suplimentare care influențează mai mult asupra proprietăților de material decît viteza de impact (creșterea numărului de defecte etc.).

- Viteza de impact influențează asupra gradului de neomogenitate a deformării în măsură mult mai mare decît la deformarea clasică. Gradul de neomogenitate crește cu viteza de impact și scade cu creșterea conținutului în C.

- Pentru cazul concret al vitezelor utilizate se detașează net prin rezultatele obținute viteza de impact de 58 m/s indiferent de material și gradul de deformare aplicat. Pînă la această valoare se poate vorbi mai degrabă de influența energiei de impact, decît al vitezei de impact.

- În ceea ce privește conținutul în C, în afara aspectelor semnalate mai sus o dată cu creșterea cantității de C se evidențiază schimbarea raportului cantitativ între constituenții moi și duri din structura oțelului, viteza de impact influențînd evident comportarea materialelor. În acest caz se distinge net influența vitezei de impact de energia de impact.

- Analiza statistică a rezultatelor experimentale permite stabilirea unor criterii precise în ceea ce privește gradul optim de deformare pentru obținerea unor proprietăți corespunzătoare la piesele deformate. Limitarea acestora permite alegerea mărimumi optime a semifabricatelor astfel încît un grad minim de deformare să se obțină cele mai bune proprietăți. Gradul optim de deformare este cu atît mai mic, cu cît conținutul în C este mai mare. Depășirea acestora nu se justifică decît dacã în afara durității și a rezistenței la deformare de urmăresc și alți factori (finisarea structurii, transformări structurale etc.).

- Interpretarea matematică a curbelor de variație trasate pe baza rezultatelor experimentale este impusă nu ca un fenomen de largă utilizare, ci ca o necesitate firească. Matematica confirmă exactitatea rezultatelor experimentale și în felul acesta interpretările care se fac nu apar întîmplătoare.

Prin natura cercetărilor efectuate ca și prin rezultatele practice obținute consider lucrarea ca o modestă contribuție la

dezvoltarea cercetării științifice din catedră, precum ea și un
aport la dezvoltarea cercetării științifice în țara noastră.

.

B I B L I O G R A F I E

- 1.-Abramov V.V.-Ostatocinfe napriajenia i deformații v metallov
Maşghiz, Moskva, 1963
- 2.-Aczel O.-Dislocațiile și frecările interne la metale. Edit. Facla,
Bozan C. Timișoara, 1974.
- 3.-Alekscev Iu.N.-Vaprosi plasticeskovo tecenia metallov.
Harkov, 1958
- 4.-Backofen W.A.-Deformation Processing. London, Adison Wesley, 1972
- 5.-Baranovski M.A.-Harakter tecenia metalla pri visokoskorostnom
osajivanii.
Kuznecino Stampovocinoc proizvodstvo, Moskva, 1970
- 6.-Bernar P.-Plasticeskaia deformația monokristallov. Izd. Mir, Moskva
ș.a. 1969
- 7.-Bezruciko I.I. ș.a.-Obrabotka metallov davleniem. Izd. Maşinostroieni.
Leningrad, 1967
- 8.-Boleanțu L., Dobre I., Dumitru Al.-Studiul parametrilor statisticii
ai caracteristicilor mecanice la șarje din oțel beton
cu profil variat.
Bul.șt.și tehn.IPT, Timișoara, 1970
- 9.-Boleanțu L., Dobre I., Babeu T.-Considerații asupra aprecierii sta-
tistice a calităților mecanice și a corelațiilor sto-
hastice cu elemente de compoziție, la sortimente noi
de oțel beton laminate din OL 38 și 17M13.
Bul.șt.și tehn.IPT, Timișoara, 1970.
- 10.-Buzdugan Gh.-Rezistența materialelor. Edit. tehn. București, 1970
- 11.-Bühler H., Vollmer I.-Werkstoffe bei grossen Formänderungsgesch-
windigkeiten. Industrie Anzeiger, Berlin, 1969
- 12.-Calnan E.A.-Instit. Metals-New-York, 1950
- 13.-Cemenov E.I.-Formarea și ștanțarea volumetrică. Izd. Metallurghia,
Moskva, 1972
- 14.-Certavskih A.K.-Trenie i tehnologiskaia snazka pri obrabotke
metallov davleniem. Izd. Metallurghia, Moskva, 1968
- 15.-Cijikov Iu.M.-Procesele de deformare plastică a oțelurilor aliate
și aliajelor neferoase speciale. Edit. tehn. București, 1969
- 16.-Cijikov Iu.M.-Prokatnoe proizvodstvo. Metalurgizdat, Moskva, 1958
- 17.-Cottrell A.N.-Dislocations and plastic flow in crystals. Clarendon
Press, Oxford, 1953

- 18.-Cristescu N.-The Unloading in Symmetric Longitudinal Impact of two Elastic-Plastic Bars.Pergamon Press. London,1970
- 19.-Cristescu N.,Bell I.F.-On Unloading in the Symmetrical Impact of two Al Bars.Maryland-The Jous Hopkins University,Baltimore,1970
- 20.-Dieter G.-Metalurgie mecanică.Edit.tehn.București,1970
- 21.-Dodd R.A.-Metode pentru determinarea tensiunilor interne. Metalurgia,București,1970
- 22.-Drăgan I.-Tehnologia forjării și matrițării,vol.I și II EDP,București,1963
- 23.-Drăgan I.,Canta Tr.-Tehnologia deformărilor plastice.Lit. I.P.Cluj,1973
- 24.-Drăgan I.,Chiriță V.-Matrițarea la cald a metalelor.Edit. tehn.,București,1968
- 25.-Ekinov K.K.-Mecanizarea și automatizarea forjării și matrițării.Edit.tehn.București,1962
- 26.-Finkenstein E.V.-(P.M.D.P.No.3,1971
- 27.-Geru N.-Proprietățile metalelor și metode fizice de control.EDP,București,1967
- 28.-Ghizdavu V.-Prelucrarea metalelor cu puteri și viteze mari. Edit.tehn.București,1967
- 29.-Gladkih A.N.-Automatizarea producției de piese refulate la rece.IDT,București,1964
- 30.-Götttert W.-Über das Verhalten der bäre von Schmiedhämern beim Schlag,insbesonderer in Hinblick auf den Schlagwirkungsgrad von gegenschlaghämern. Dissertation,Hannover,1969
- 31.-Griaznov V.S.-Practica de laborator privind rezistența materialelor la deformare.Izd.Metallurghia, Moskva,1961
- 32.-Gromov K.P.-Teoriia obrabotki metallov davleniem.Izd. Metallurghia,Moskva,1967
- 33.-Gubkin S.I.-Plasticeskaia deformația metallov.Fiziko mehaniceskie osnovi plasticeskoi deformații.Vol. 1,2,3.Metalurgizdat,Moskva,1961
- 34.-Guleasv A.F.-Tratamentul termic al oțelului.Edit.tehn. București,1962

- 35.-Gyuresik P., Popovici V.-Procedeu pentru fotografierea oscilogramelor la osciloscops catodice. Inovație înregistrată IPT, 1968
- 36.-Hasek V.-Einfluss der Warmumformbedingungen auf die Eigenschaften von Stahl. Industrie Anzeiger, Berlin, 1969
- 37.-Hell R.-The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, New-York, 1950
- 38.-Jung P.-Kaltstanchen zu nichtzylindrischen Bolzenköpfen. Experimentelle und rechnerische Ermittlung der Umformverhältnisse und der Uniformkräfte beim Kaltstanchen zu Sechskanz Bolzenköpfen in zwei Stufen. Dissertation T.H. Darmstadt, 1973
- 39.-Kiessler H., Fröber H.-Oțeluri destinate prelucrării la rece. Werkstattstechnik, RFG, 1971
- 40.-Kirillov P.G.-Teoria obrabotki metallov davleniem. Izd. Metallurghia Moskva, 1965
- 41.-Kolmagorov B.-Tensiuni. Deformații. Distrugerii. Izd. Metallurghia, Moskva, 1970
- 42.-Krejci M.-Measurement Techniques in dynamic forming experiments. Praga. Technical digert 1967
- 43.-Kroha V.A.-Krivie uprocinenia metallov pri holodnoi deformații. Izd. Maşinostroenie, Moskva, 1968
- 44.-Lange K.-Gesenschnieden von Stahl. Springer Verlag, Berlin, 1968
- 45.-Lean D.Mc.-Rolul limitelor grăunților în metal în procesul de deformare plastică. IDT, București, 1961
- 46.-Lean D.Mc.-Mehanicăskie svoistva metallov. Izd. Metallurghia, Moskva, 1965
- 47.-Lynch I.-Residual Stress Measurements Ohio American Society for Metals Park, 1952
- 48.-Makisov E.M.ș.a.-Novie metodi issledovania proțessov obrabotki metallov davlenie. Nauka i tehnika, Minsk, 1973
- 49.-Malțev M.V.-Modificarea structurii metalelor și aliajelor. Edit. tehn. București, 1966
- 50.-Manis Al.ș.a.-Utilaj pentru deformarea plastică. Lit. I.P. Braşov, 1974
- 51.-Maşcenakov P.V.-Influența vitezei asupra condițiilor termice în zona bavurii. în Kuzn. Stamp. proizv., Moskva, 1972
- 52.-Mantea St.-Metalurgie fizică. Edit. tehn. București, 1970
- 53.-Massalski T.P., Barret C.S.-Structure of metals. Crystallographic methods, principles date. Mc.Graw-Hill, 1966

- 54.-Mirka L.I.-Spravocinie po roentgenostrukturnamu analizu polikristallov. Fizmatgiz, Moskva, 1961
- 55.-Nanu A.-Tehnologia materialelor. EDP, Bucuresti, 1972
- 56.-Nanu A., Popovici I.-Prelucrarea materialelor metalice prin deformare plastica. Manualul inginerului mecanic Vol. III-Tehnologia constructiilor de masini, Edit. tehn. Bucuresti, 1972
- 57.-Nanu A., Popovici I.-Influenta vitezei de deformare asupra rezistentei la deformare la prelucrarea prin deformare plastica la rece cu metoda pneumomecanica a oțelurilor carbon de calitate. Timisoara, 1974
- 58.-Nădășan St.-Rezistența materialelor Vol. 1...3, EDP, Bucuresti 1957...1959
- 59.-Nicolescu H.-Analiza matematică. EDP, Bucuresti, 1968
- 60.-Novikov V.M.-Utilizarea ciocanelor cu viteze inalte pentru matrișarea volumetrică de precizie. în Kuzn Stamp-proizv., Moskva, 1972
- 61.-Osima V.-Deformarea metalelor cu viteze și energii mari. în Metal Traitement, London, 1960
- 62.-Pawlow I.-Grundlagen der Metallverformung durch Druck. Verlag Technic, Berlin, 1954
- 63.-Perlin I.L.-Teoria Presovania Metallov. Izd. Metallurgiya, Moskva, 1964
- 64.-Petch H.J.-Iron Steel, New-York, 1953
- 65.-Pluhar S.ș.a.-Recristalizarea austenitei după deformarea plastica cu viteze mari. Rev. Metalurgie, Paris, 1969
- 66.-Polak K, Nemeo I.-The effect of impacts on mechanical properties of tool Steel. Kovove materialy. Bratislava, 1969
- 67.-Polakovici A., Taborsky L.-Deformarea plastica cu viteze mari de impact a materialelor neferoase. Kovove materialy, Bratislava, 1969.
- 68.-Popescu V.-Analiza și imbunătățirea calității pieselor forjate. Edit. tehn., Bucuresti, 1967
- 69.-Popovici I.-Calculul variației HB=f() la deformarea plastica Izvercean P. la rece cu viteze mari de impact, a oțelurilor carbon de calitate. Timisoara, 1974

- 70.-Popovici I.-Influența conținutului de carbon la deformarea plastică la rece cu viteze mari de impact a oțelurilor carbon de calitate.Timișoara,1974
- 71.-Popovici V.-Contribuții la studiul fenomenelor fundamentale la prelucrarea prin eroziune complexă.-Teză de doctorat-,Timișoara,1970
- 72.-Pridvornic M.-Relații de corelare și indici tehnico-economici în producția de piese forjate.In Metalurgia,București, 1968
- 73.-Pridvornic M.-Forjarea.Procedee și utilaje speciale.IDT, București,1969
- 74.-Rancu N.,Tăbăssi L.-Analiza statistică matematică a calității producției industriale.Edit.tehn.București,1964
- 75.-Read W.T.-Les dislocations dans les cristaux.Lunod,Paris,1957
- 76.-Roberts W.,Bergström Y.-Zeitschrift für Metallkunde,1971
- 77.-Sachs G.,Weerts I.-Z.Physik - New-York,vol.64,1930
- 78.-Salnev V.G.-Razvitie metodov obrabotki metallov davleniem Maşghiz,Moskva,1962
- 79.-Samanta S.K.-Conferință asupra deformării metalelor la cald.In The Iron and Steel Institute,London,1968
- 80.-Sevcenko K.N.-Osnovii matematicheskikh metodov v teorii obrabotki metallov davleniem .Izd.Metallurghia,Moskva,1970
- 81.-Srekludi L.-Relația dintre tensiuni interne și deformări,pe de o parte și unele proprietăți magnetice ale oțelului pe de altă parte,IDT,București,1961
- 82.-Skeen S.A.-Forgeage à grand vitesse d'impact.In La machine moderne.Paris,1965
- 83.-Sneider Iu.G.-Holodnaya bezstampovaya obrabotka metallov davleniem.Izd.Maşinostroenie,Leningrad,1967
- 84.-Sofman L.A.-Teoria rasciolti proţessovholodnoi stampovki.Izd. Maşinostroenie,Moskva,1964
- 85.-Sogrişin Iu.P.-Asupra factorilor care influențează deformarea cu viteze înalte.In Kuzn.Stamp.proizv.,Moskva,1972
- 86.-Sogrişin Iu.P.ş.a.-Influența vitezei asupra rezistenței la deformare în cazul refulării la rece.In Kuz.Stamp. proizvod.,Moskva,1971
- 87.-Stüwe H.P.-Einfluss einer plastischer Verformung auf Phasenumwandlungen in Metallen.Härterei-Technische Mitteilungen,1969
- 88.-Svejoar I.-Intărirea monocristalelor de Fe-Ni la viteze mari de deformare,Materialele CMTN,Timișoara 1971

- 89.-Tabarsky L.-The surface structure Study on lugh rate Strained bei crystals of Aluminium.Kavove-Materialy Bratislava,1968
- 90.-Tabarsky L.-Studiul structurii de dislocații la deformarea plastică cu viteze mari de impact a aluminiului Kavove Materialy, Bratislava,1968
- 91.-Tabarsky L.-Some Phenomens Cansing of High Rate Strained Aluminium.Kavove Materialy, Bratislava,1969
- 92.-Taranovski A.N.-Kontaktnie napriajenia pri plasticeskoi deformații.Izd.Metalurghia, Moskva,1966
- 93.-Tarnovski I.Ia.ș.a.-Deformații i usilia pri obrabotke metallov davleniem.Masghiz, Moskva,1959
- 94.-Tarnovski I.Ia.ș.a.-Teoria presovania metallov.Izd.Metalurghia, Moskva,1964
- 95.-Taylor A.-An introduction to X-roymetalsgraphy.L.D.T., London,1945
- 96.-Tiurin V.A.,Ohrimenko Ia.M.-Neuniformitatea deformației la forjare.Izd.Metalurghia, Moskva,1969
- 97.-Tretiakov A.V.ș.a.-Izmenenia mekhaniceskih svoistv metallov i splavov pri holodnoi prokatke.Sverdlovskoe-Metalurgizdat,1960
- 98.-Treatiakov A.V.ș.a.-Mehaniceskie svoistva stalei i splavov pri plasticeskom deformirovanii.Mașinostroenie, Moskva,1971
- 99.-Trușculescu M.-Studiul metalelor,EDP,București,1972.
- 100.-Trușculescu M.,Popovici I.,Mitelsa I.-Evoluția granulației și a tensiunilor interne funcție de gradul de deformare plastică la oțelurile carbon de calitate,Timișoara,1974
- 101.-Uroș T.-Știință.Cercetare.Producție.EA RSR,București,1970
- 102.-Vollner I.-Messung der Formänderungsfestigkeit metallischer Werkstoffevornehmaloch bei groben Formänderungen und groben Formänderungsgeschwindigkeiten. Dissertation, Berlin,1969
- 103.- X X X - Cercetări noi în domeniul tehnologiei forjării (Culegere de articole),IDT,București,1952
- 104.- X X X - Indreptar de fonte și oțeluri.Edit.tehn.București 1969
- 105.- X X X - Issledovanie proțessov plasticeskoi deformații metallov.Izd.Nauka, Moskva,1971

- 106.- X X X - Manualul inginerului mecanic, Vol. III, Tehnologia construcției de mașini, Edit. tehn. București, 1972.
- 107.- X X X - Mașini i tehnologhia obrabotki davleniem. Izd. Mașinostroeienie, Moskva, 1964
- 108.- X X X - Nouveaux aspects teoriques et pratiques du travail par formage a hautes vitesses. In Machine Moderne. Paris, 1969
- 109.- X X X - Prelucrarea aliajelor prin deformare plastică. IDT, București, 1959
- 110.- X X X - Prelucrarea metalelor prin deformare plastică. Buletin de informare tehnică pentru ingineri. Oficiul de documentare și publicații tehnice - Colecția, București, 1965-1974
- 111.- X X X - Prelucrarea metalelor prin deformare plastică. IDT, București, 1960
- 112.- X X X - Prelucrarea rapidă a metalelor. Reducerea adaosurilor de prelucrare. IDT, București, 1951
- 113.- X X X - Procedee moderne de forjare în matriță. IDT, București 1970
- 114.- Procedee moderne de prelucrarea metalelor prin deformare. IDT, București, 1962
- 115.- X X X - Procedee și utilaje moderne de prelucrare prin forjare IDT, București, 1966
- 116.- X X X - Realizări noi în domeniul deformabilității metalelor la deformarea plastică. Vol. 1, 2, IDT, București, 1961
- 117.- X X X - Realizări noi în domeniul presării la rece a metalelor. IDT, București, 1960
- 118.- X X X - Tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor. Materialele CNTN-71, Timișoara, 1971
- 119.- X X X - Usilia i deformații pri plasticeskoi obrabotke metallov Izd. Nauka, Alma-Ata, 1967

.