

## EXPERTIZE – LABORATOR 5

**CORELATII ÎNTRE DURITATEA VICKERS  
ȘI DEFORMATIA PLASTICA REMANENTĂ**

- 
1. *Introducere*
  2. *Rezultatele anterioare*
  3. *Materiale si metoda de lucru*
  4. *Rezultate si comentarii*
- 

**1. Introducere**

Pe baza încercării de tracțiune pe probe plate, la diferite trepte de solicitare, și a încercării de microduritate Vickers se stabilește o corelație între deformarea plastica a probelor solicitate și mărimea durității. În acest fel se poate stabili durata de viața sau rezerva de rezistență a pieselor care au funcționat deja un număr de ore în anumite condiții de solicitare. Avantajele acestor tipuri de încercări îl constituie simplitatea efectuării încercărilor și faptul că nu sunt foarte scumpe. Pe baza stabilirii respectivei corelații se pot efectua microdurități Vickers pe componentele aflate în exploatare, pe baza cărora se poate stabili gradul de deformare plastică în acel moment. Se constată faptul că distrugerile, provocate pieselor în exploatare de către o astfel de încercare, sunt minime și nu conduc la punerea în pericol a integrității respectivelor piese.

Funcționarea un timp îndelungat în anumite condiții de solicitare și mediu poate afecta mai mult sau mai puțin caracteristicile de rezistență și tenacitate la rupere ale materialelor din care sunt confecționate diferitele componente. Pentru piesele, componentele, structurile ce lucrează în anumite condiții de exploatare, de cele mai multe ori se dorește aflarea răspunsului cu privire la durata de viață rămasă, pentru aceleași condiții de solicitare și acțiune a factorilor exteriori. Un astfel de răspuns reprezintă o mare responsabilitate pentru echipa de tehnicieni care este chemată să facă o astfel de evaluare. Astfel, decizia ca echipamentul aflat în exploatare să fie înlocuit poate conduce la costuri substanțiale. Dacă se decide că echipamentul mai poate funcționa, având o rezerva de rezistență suficientă pentru un anumit timp, prezintă anumite riscuri pentru cei care iau o astfel de hotărâre. În ambele cazuri, decizia finală trebuie să fie temeinic bazată pe o serie de încercări și determinări experimentale. Din păcate, pentru echipamentele aflate în exploatare sunt puține determinările care să se facă “în - situ”. Câteva dintre acestea sunt: determinarea tensiunilor remanente, metode defectoscopice, difracția cu raze X, metode bazate pe fotoelasticimetrie, etc. O astfel de metodă se propune în prezenta lucrare, respectiv stabilirea unei corelații între gradul de deformare plastică, suferit ca urmare a supunerii piesei la diferite condiții de exploatare și mediu, și mărimea durității Vickers determinată pe respectivele piese. Pe baza acestor încercări se poate evalua durata de viață rămasă pentru piese, componente, structuri. Avantajele unei astfel de încercări sunt: simplitate, pret de cost scăzut și faptul că piesele supuse la încercarea de microduritate Vickers nu suferă distrugeri care să le afecteze integritatea [7]. Este evident faptul că determinările microdurității “în situ” trebuie să fie precedate de încercări efectuate în laborator pentru fiecare material în parte, din care să se reiasă corelația dintre deformarea plastică suferită ca urmare a solicitării peste limita de elasticitate și mărimea microdurității. Această metodă se bazează pe faptul că, după depășirea limitei de elasticitate materialul se întărește în întreg volumul său, schimbându-și astfel și duritatea.

## 2. Rezultatele anterioare

Testele de duritate au fost pentru mult timp o metoda standard de caracterizare a materialelor, fiind usoara, ieftina, non-destructiva si obiectiva pentru evaluarea proprietatilor de baza ale materialelor. La fel de bine ca si rezistenta la deformare plastica, rigiditatea, tensiunile remanente cat si rezistenta la rupere sunt niste proprietati de baza ale materialelor ce pot fi determinate pe baza determinarii duritatii [3].

In literatura de specialitate, duritatea Vickers (HV) a fost cel mai abordat subiect, in special corelatia dintre duritate si durata de viata sau rezistenta de rupere la tractiune a materialului din doua motive: in primul rand, calitatea superioara comparata cu indentarea sferica; si in al doilea rand, indentarea Vickers este similiara, deoarece indentarea în mod ideal este independentă de forța de încărcare si de adancimea indentării. Prin urmare in lucrarea de fata, indentarea Vickers va fi de asemenea subiectul nostru. O revizuire de baza a primelor rezultate au fost acoperite de catre Tabor[5]. Tabor a aratat ca presiunea medie de contact  $P_m$  (duritatea) poate fi exprimata in functie tensiunea  $\sigma_y$  sau de rezistenta de rupere la tractiune  $R_m$  a materialului, de o relatie pe baza teoriei indentării de un rigid solid perfect plastic:

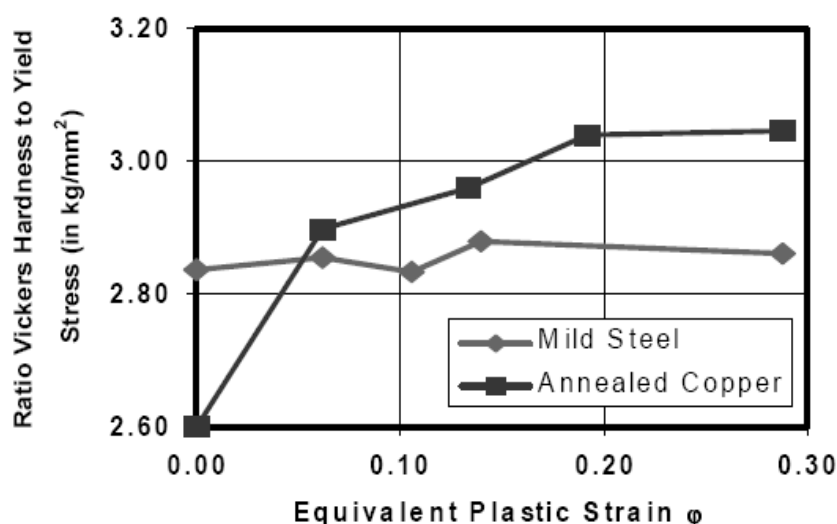
$$HV = \frac{\text{Indenter Force (kg)}}{\text{Imprint Surface Area (mm}^2\text{)}} \quad (1)$$

Pentru materialele nedeformate, duritatea Vickers care este definite mai sus , poate fi pusa in legatura cu tensiunea  $\sigma_y$  prin relatia de mai jos:

$$HV = (2.9 \div 3.0) \cdot \sigma_y \quad (2)$$

Pentru materialele deformate si pe baze empirice, Tabor sugerează să fie folosit o expresie similară ca și în cazul materialelor dure, cu deformăție redusă, dar folosind ca tensiune o valoare ce corespunzatoare domeniului plastic de deformare:

$$HV = 2.9 \cdot \sigma_y \text{ (at an engineering plastic strain of 0.08)} \quad (3)$$



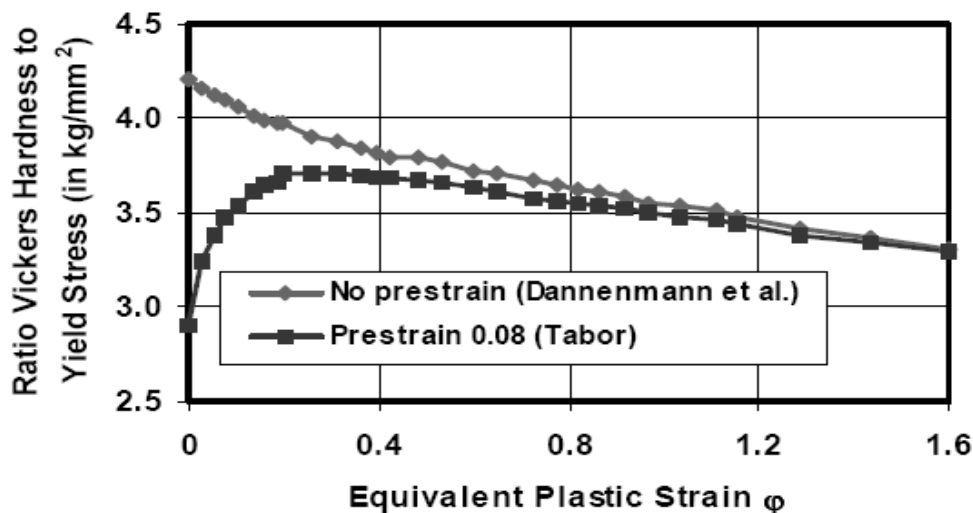
**Fig. 1:** Determinarea experimentală a raportului dintre duritatea Vickers și limita de curgere

Figura 1 prezintă o comparație între formula lui Tabor și datele experimentale obținute de acesta. În această diagramă,  $\phi$  reprezintă echivalentul adevăratei deformări plastice a epruvetei înainte de indentare. Se poate observa că corelația este mai bună pentru oțelurile slab aliate, cum ar fi cuprul ce prezintă o abatere de 15%.

Ar trebui evidențiat faptul ca formula lui Tabor este data pentru diferite zone cu coeficienti care difera usor si cu o anumita deformatie plastica, comparate cu valorile care sunt date in *ecuația .3*.

Relatia între duritatea Vickers și limita de curgere, prezentată pentru metalele turnate a fost prezentata de Dannenmann si Wilhelm [1].

Rezultatele experimentale pot fi vazute in figura 2. In lucrarea originala nu a fost explicata ca mai sus folosirea modelului Tabor si de aceea este data o interpretare a datelor experimentale folosind modelul Tabor ca in figura de mai jos. Cu toate acestea, chiar și această îmbunătățire a curbei indică o eroare de conversie de aproximativ 20%.

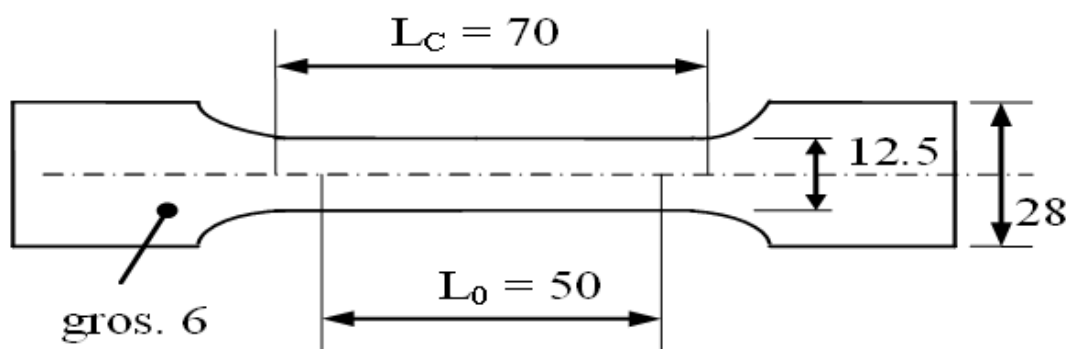


**Fig. 2.** Raportul dintre duritatea Vickers si limita de curgere

Ca o observatie bazata pe cercetarile mai sus citate se poate spune ca studiile experimentale fac o separare între diferiți factori care afectează relațiile ce privesc duritatea, durata de viață sau rezistența la tracțiune. Pe de altă parte, studiile numerice și analitice nu prezintă suficientă acuratețe cantitativă și nu acoperă în totalitate proprietățile metalelor.

### 3. Materiale si metoda de lucru

In cadrul acestei lucrari se utilizeaza pentru studiu epruveta din figura 3, confectionata dintr-un hotel obisnuit.



**Fig. 3.** Forma specifică a unei epruvete de test

Epruvetele au fost prima data testate sub actiunea unei forte la temperatura ambianta, acordandu-se foarte mare atentie descrierii metodei de testare utilizand specificatiile standard [9]. Epruvetele de test au avut 6 mm in grosime si lungimea initiala a partii de masurat de 50 mm(Fig. 3).

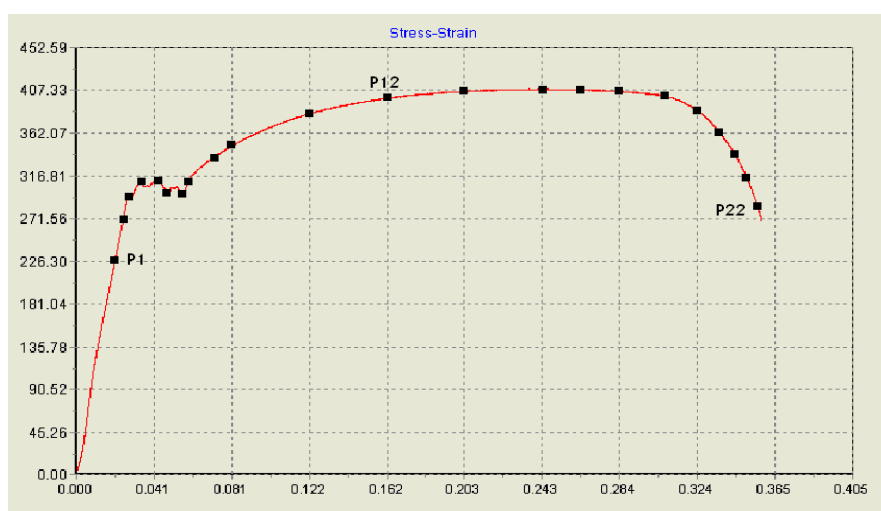
#### 4 Rezultate si comentarii

Urmatorul tabel rezuma valorile numerice ale proprietatilor mecanice ale epruvetelor de testare.

**Tab. 1.** Proprietatile mecanice

Limita de curgere	Rezistența de rupere	Alungirea relativă la rupere	Gâtuirea relativă la rupere	Modulul Young	Coeficientul Poisson
$R_{p0.2}$	$R_m$	$A_5$	$Z$	$E$	$\nu$
[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[GPa]	-
610-630	745-780	18-25	39-43	208	0.296

Se vor efectua incercari de tractiune pana la rupere asupra epruvetelor pe masina universala de incercat INSTRON 8080. Curbele caracteristice rezultate sunt prezentate in figura 4.



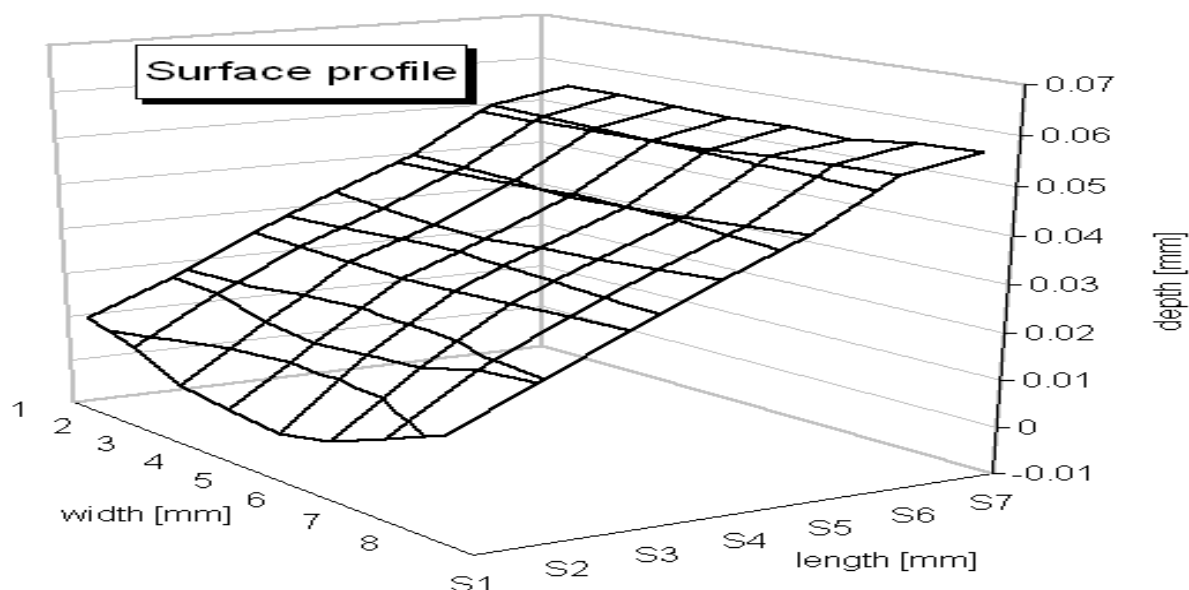
**Fig. 4.** Dependența tipică tensiune-deformație pentru oțelul studiat.

Se va constata faptul ca materialul se deformeaza plastic destul de mult pana la rupere. Aspectul suprafeței rezultate în urma ruperii este prezentate în figura 5 de unde se constata caracterul preponderent tenace a comportarii respectivelor materiale la sollicitarea de tractiune.



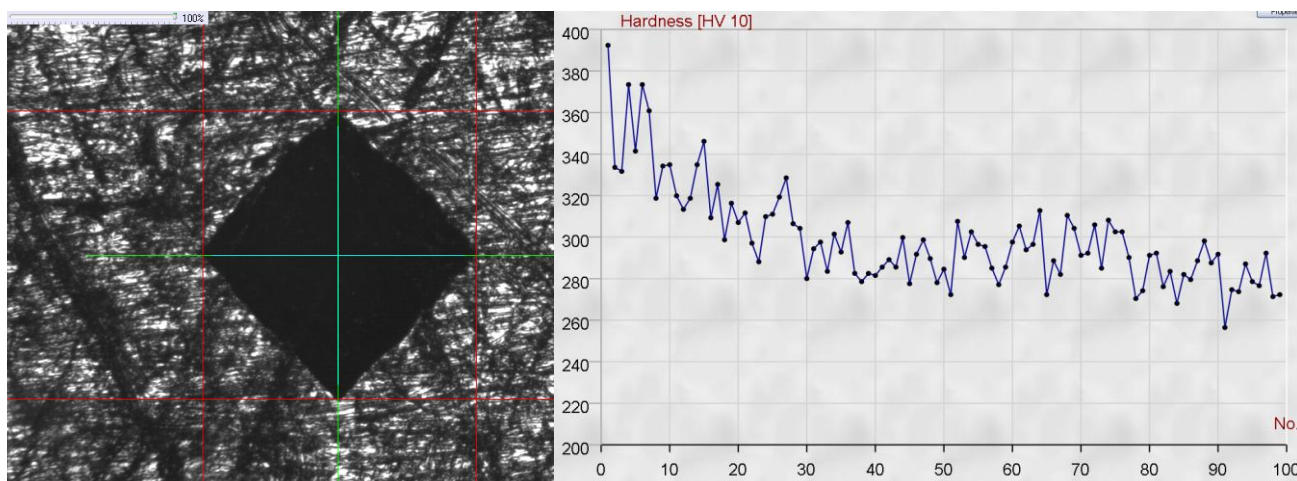
**Fig. 5.** Aspectul suprafeței rezultate ca urmare a sollicitării de tracțiune până la rupere

Aspectul suprafeței în zona ruperii confirmă caracterul ductil al oțelului: o pronunțată gatuire a fost observată înaintea ruperii, împreună cu aspectul de con-cupa acelor două bucati de epruveta. Acest caracter ductil al epruvetelor conduce la schimbarea suprafețelor în vecinătatea zonei de rupere, care ia o anumită formă după cum este prezentat în figura 6.

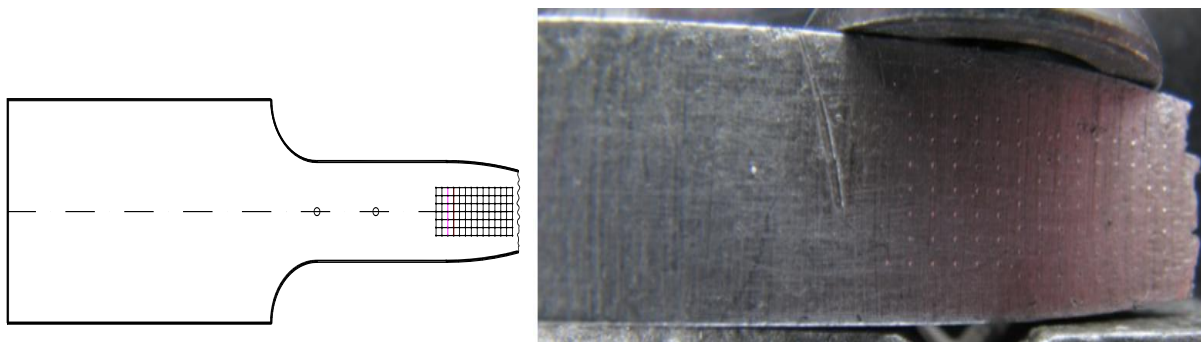


**Fig. 6.** Profilul suprafeței în apropierea zonei de rupere

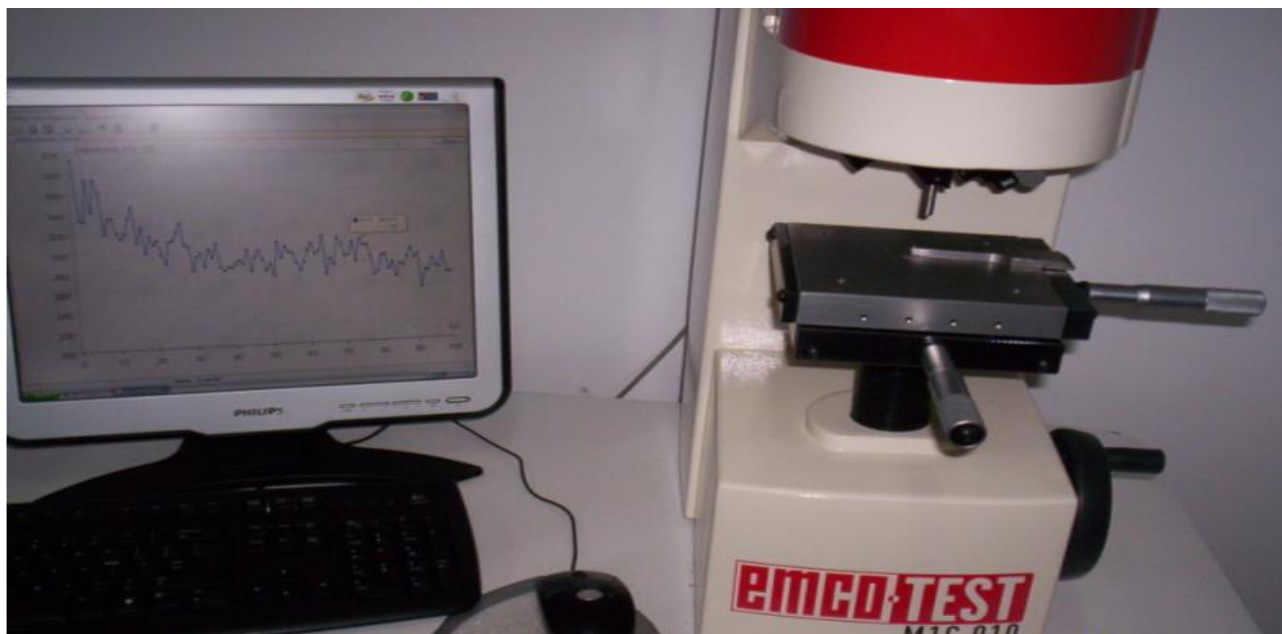
Se observa faptul că în imediata vecinătate a ruperii zona este puternic deformată, iar cu cât ne departăm de această zona deformarea tinde să scadă, iar spre capetele epruvetei deformarea aproape că dispare. Aceste circumstanțe conduc la ideea că în vecinătatea zonei de rupere ale epruvetelor apar variații ale valorilor proprietăților mecanice. Este important de remarcat dificultatea oricărei încercări de analiză a proprietății materialului în imediata vecinătate a ruperii. Dintre puținele metode disponibile existente putem folosi încercarea de microduritate Vickers (vezi Fig. 7).



**Fig. 7.** Amprenta indentării Vickers; valorile microdurităților Vickers



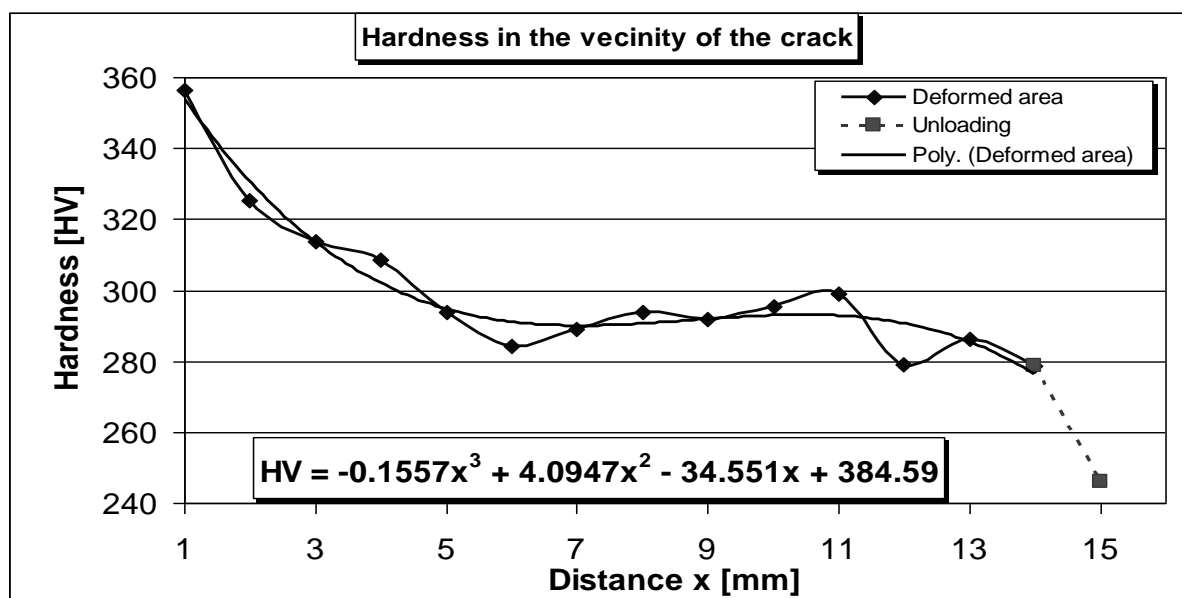
**Fig. 8.** Poziția punctelor în care s-a măsurat duritatea Vickers.



**Fig. 9.** Efectuarea încercărilor pe microdurimetru EMCOTEST M1C 010

Testele se realizează cu ajutorul unui dispozitiv de determinare a microdurității Vickers, capabil să achiziționeze și să prelucreze imagini digitale. Încercările se fac pentru fiecare epruvetă în 98 de puncte, plasate într-o formă matricială cu 14 rânduri și 7 coloane cu distanțe egale de 1 mm. Valorile măsurate printate și calculele microdurităților se realizează automat, cu o mare precizie de către un computer atașat de dispozitivul de măsurat duritatea, iar în figura 7 este prezentat un exemplu de evoluție a microdurității Vickers în cele 98 de puncte măsurate, primul punct fiind plasat din imediata vecinătate a zonei de rupere. Se observă că nu există o mare diferență între cele 7 puncte plasate pe lățimea epruvetei, făcându-se o medie a acestor puncte, iar graficul din figura 7 poate fi ușor redat printr-un grafic similar cu cel din figura 10.

Din figura 10 se observă faptul că microduritatea variază în funcție de distanță, în felul următor: în imediata vecinătate a zonei de rupere microduritatea are o valoare de 360 HV iar cu cât de departăm de zona de rupere spre capatul epruvetei microduritatea scade în jurul valorii de 246 HV.

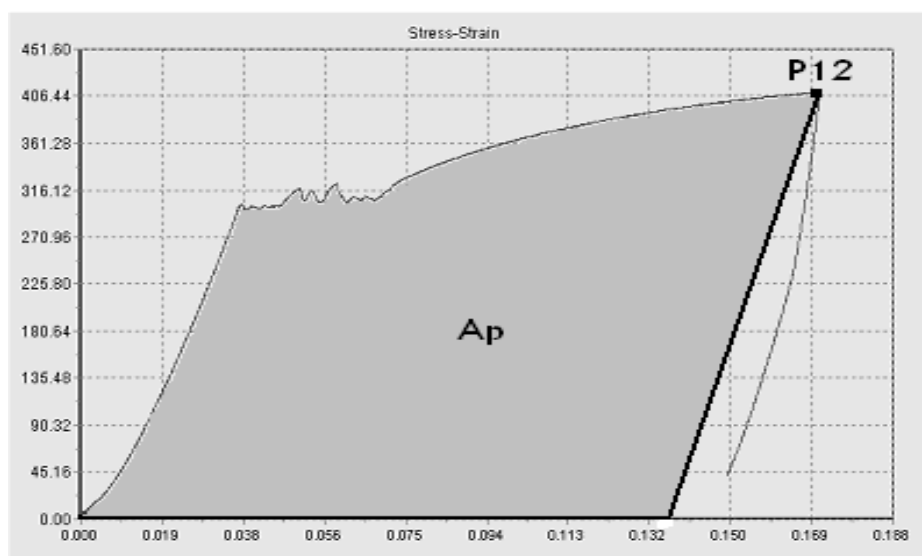


**Fig. 10.** Variația micro-durității în raport cu distanța de la zona de rupere

Se poate observa o creștere substanțială a microdurității Vickers în imediata vecinătate a zonei de rupere în comparație cu epruvetele nesupuse la încercare. Cu toate acestea, valorile măsurate între 6 și 11 mm de la zona de rupere sunt aproximativ constante. Dincolo de randul al 11-lea de încercări microduritatea începe să scadă. Ultimele două puncte de pe grafic nu reprezintă o variație reală.

În baza acestor observații se poate concluziona faptul că există o corelație între microduritatea Vickers și deformarea plastică. Pe baza acestei corelări se poate determina deformarea plastică prin măsurarea microdurității Vickers. În aceste condiții se poate estima perioada de viață rămasă a unei componente aflate deja în exploatare care a suferit unele deformări elastice și chiar plastice. Luând în considerare observațiile precedente, s-a încercat să se stabilească o corelație între microduritatea Vickers și deformarea plastică a epruvetelor care au fost supuse la încercări de tracțiune.

Pentru materialul studiat s-a efectuat 24 de încercări la tracțiune: 2 încercări până la rupere și 22 de încercări pe probe solicitate la tensiunile punctate în figura 4, (P1÷P22). În figura 11 este prezentat un exemplu de curbă caracteristică pentru materialul solicitat în mod controlat până la o anumită sarcină, după care s-a realizat descărcarea până la valoarea zero a forței. Aceste curbe sunt trasate până în punctul, respectiv P12 de pe curbă din figura 4.



**Fig. 11.** Suprafața ariei ( $A_p$ ) corespunzătoare deformăției remanente

A fost notat cu  $A_p$  suprafata corespunzatoare deformatiei plastice permanente ramase in urma indepartarii fortei la care a fost supusa epruveta.

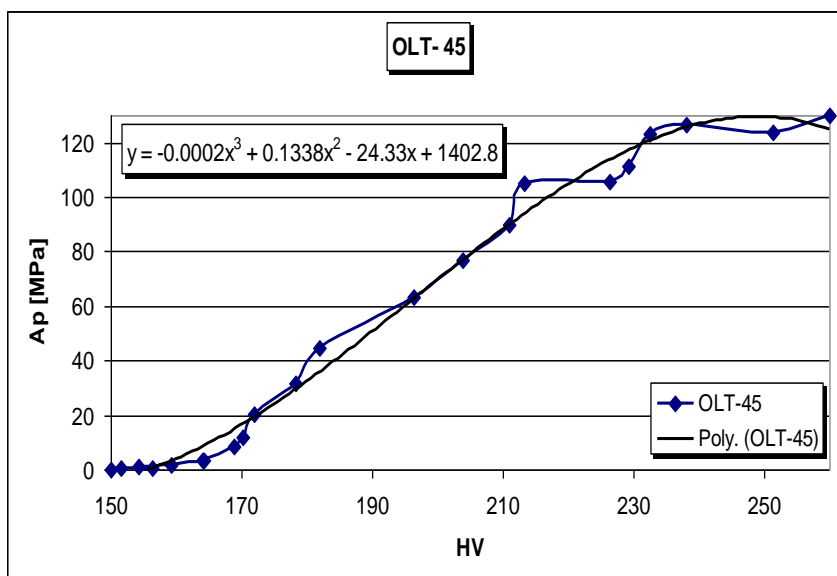
Pentru toate epruvetele incarcate in acest fel, se fac teste ale microduritatilor Vickers. Se efectueaza 14 indentări pe fiecare epruveta, câte 7 încercări pe câte 2 rânduri, paralel cu suprafata de rupere, în zona corespunzătoare mijlocului probei. Pentru fiecare set de 4 probe se ia în considerație valoarea medie (excluzând valoarea minimă și cea maximă). Rezultatele, în ceea ce privește microduritatea Vickers, forța de încărcare și aria corespunzătoare deformatiei plastice (de sub curba caracteristică) sunt trec într-un tabel de forma tabelului 2.

**Tab. 2.** Valorile medii pentru microduritatea Vickers

OLT-45		
Point No	HV	$A_p$
	[daN/cm <sup>2</sup> ]	[MPa]
P22	260	130.08
P21	251.4	124.04
P20	238	126.41
P19	232.5	123.12
P18	229.25	111.45
P17	226.25	10 69
P16	213.25	10 03
P15	211	90.08
P14	203.75	76.9
P13	196.25	63.09
P12	182	44.61
P11	178.25	31.67
P10	172	20.46
P9	170.25	12.03
P8	168.75	8.64
P7	164.25	3.35
P6	164	3.25
P5	159.3	1.61
P4	154.2	1.11
P3	156.4	0.65
P2	151.5	0.59
P1	150	0

Utilizand datele din acest tabel se traseaza graficul de variație a duritatii in raport cu aria de sub curba caracteristica,  $A_p$ , corespunzatoare deformatiei plastice remanente, fig. 12.





**Fig. 12.** Variația durității în raport cu aria corespunzătoare deformării plastice remanente

Se constată faptul că duritatea crește semnificativ în zona în care materialele suferă deformări plastice mari. Acest lucru este în concordanță și cu graficul din figura 10 în care duritatea este mai mare în zonele din imediata vecinătate a zonei rupte, respectiv, în zonele care au suferit deformări plastice ridicate. Așa cum s-a văzut în figura 4, oțelul analizat prezintă deformări plastice semnificative înainte de rupere. Din figura 12 se constată faptul că, deși aria  $A_p$  nu crește în mod semnificativ, totuși, în raport cu valoarea în stare nesolicitată sau solicitată în domeniul elastic, valoarea durității în această zonă de curgere crește foarte mult. Astfel, de la valoarea de 150 HV în domeniul elastic se ajunge la valoarea de 169 HV în punctul P8. Dacă raportăm duritatea obținută pe piesele solicitate până în imediata vecinătate a punctului de rupere la duritatea din starea nesolicitată a materialelor se obține coeficientul de **1.73** pentru oțelul studiat.

Ca urmare, introducerea stării de deformare plastică într-un oțel conduce la creșterea semnificativă a durității. Se constată că se pot stabili curbe de corelație între aria corespunzătoare deformării plastice remanente și mărimea durității determinate pe piesele deformate plastic. Pentru tipuri de oțeluri similare cu cele studiate în prezenta lucrare, relația de corelație între aria  $A_p$ , de sub curba caracteristică ce corespunde deformării plastice remanente și valoarea durității Vickers HV, este de tipul:

$$A_p = A(HV)^3 + B(HV)^2 + C(HV) + D \quad (4)$$

în care coeficienții A, B, C și D se determină prin încercări experimentale conduse similar ca în lucrarea de față.

În aceste condiții, dacă o piesă sau structură, aflate în exploatare suferă deformări peste limita de elasticitate, acestea pot fi puse în evidență pe baza încercării de duritate Vickers. Stabilirea unei corelații anterioare între mărimea deformării plastice remanente și valoarea durității Vickers, poate conduce la determinarea atât a zonei deformate plastic cât și a gradului de deformare plastică suferită de o piesă aflată în exploatare.

## 5. Concluzii

1. Suprafețele deformate plastic din vecinătatea zonei de rupere au o configurație particulară prezentată în figura 5. Se poate spune că valorile durităților sunt proporționale cu deformația acumulată în proba supusă solicitării.

2. S-a observat faptul că în imediata vecinătate a zonei de rupere valoarea microdurității Vickers este mult mai mare decât în cazul unei epruvete netestate la tracțiune și cu cât ne departăm de zona de rupere spre capetele epruvetelor valoarea microdurității Vickers scade.

3. Se poate concluziona faptul că valoarea microdurității Vickers poate reprezenta o măsură pentru deformarea plastică. Este important de notat faptul că microindentarea Vickers este printre puținele teste care se poate efectua în vecinătatea unei rupturi sau a unei crăpături.

4. Pentru a stabili o corelație între microduritate și deformarea plastică pentru epruvetele testate la tracțiune se trasează o curbă de forma celei din figura 11. Astfel se poate determina o relație matematică între gradul de deformare plastică și mărimea durității în care coeficienții pot fi determinați pe baze experimentale și analitice.

5. Utilizând procedeul descris mai sus se poate determina durata de viață rămasă pentru anumite componente care au fost solicitate dincolo de limita elastică, pe baza încercării de microduritate Vickers pe componenta aflată în exploatare.

## Bibliografie

1. Dannenmann, E., Wilhelm, H., Steck, E. - *Über den Zusammenhang zwischen Eindringharte und Umformgrad bei Kaltumformvorgängen*, Bänder Bleche Rohre, pp.368-394, 1968.
2. Hu Z.-F., Yang Z.-G. – *An investigation of the embrittlement in X20CrMoV121 power plant steel after long-term service exposure at elevated temperature*, Mat. Sci. & Eng., no. 93, pp. 224-229, 2004.
3. Hernas A. - *Creep resistance of steel and alloys*, Silesian Technical University Publishers, Gliwice, 2001.
4. Hernas A., Moskal G. Rodak K., Pasternak J. – *Properties and microstructure of 12% Cr-W steels after long-term service*, Journal of Achievements in Mat. & Manufact. Eng., v. 17, no. 1-2, p. 69-74, 2006.
5. Tabor, D. - *A Simple Theory of Static and Dynamic Hardness*, Proc. Royal Soc. Series A., 192, pp.247-274, 1947.
6. Tabor, D. - *The Hardness and Strength of Metals*, Oxford Clarendon Press, 1951.
7. Tekkaya, A.E. - *Hardness Measurements on Cold-Formed Workpieces*, 6th International Conference on Technology of Plasticity, Nuremberg, Germany, 1999.
8. DIN 17175-79 – *Seamless Steel Tubes for Elevated Temperatures*.
9. SR EN 10002:1996 – *Standard pentru încercarea la tracțiune a materialelor metalice*.