



A XV-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2015

INFLUENȚA FENOMENELOR DE ECRUISARE ȘI ÎMBĂTRÂNIRE ASUPRA MODULULUI DE ELASTICITATE

Gelu OPRIȘA, Doru-Romulus PASCU

THE INFLUENCE OF COLD-HARDENING AND AGING ON THE COEFFICIENT OF ELASTICITY

Existing industrial steel structures, and especially those we use in the steel industry, for whom the normal operation age is approaching completion, are affected by the phenomena of cold-hardening and aging of steel. Depending on the size tension (unit stress) and the period of running, this paper is intended to adopt a different coefficient of longitudinal elasticity corresponding to components of the resistance structure.

Keywords: hardening, artificial aging, elastic modulus, strength, tension (unit effort)

Cuvinte cheie: ecruisare, îmbătrânire artificială, modul de elasticitate, rezistență mecanică, tensiune (efort unitar)

1. Generalități

Halele metalice din industria siderurgică fac parte din categoria hanelor de tip greu, cu deschideri și înălțimi foarte mari, în care se desfășoară procese tehnologice de mare amploare. Utilajele și instalațiile acestora au gabarite mari și sunt deservite de poduri rulante cu capacitatea de ridicare mai mare de 1250 kN, în regim de funcționare foarte greu și continuu. Comportarea acestor hale este prezentată detaliat în lucrarea [1]. Siderurgia prin multiplele și diversele

procesele tehnologice ce implică solicitări mult sporite, prin efectul accentuat al coroziunii atmosferice, al creșterii capacității de producție, al variației temperaturii tehnologice și al regimului greu și foarte greu de exploatare conduc la apariția fenomenelor de ecrusare și îmbătrânire a oțelului din structura metalică de rezistență.

Exploatarea halelor din siderurgie în regim complet de solicitare impune cu aceeași importanță „profilaxia” lor, știut fiind că „terapeutică” lor este foarte costisitoare. Se impune analiza comportării acestor hale la:

a) coroziune atmosferică, deoarece aceasta influențează direct capacitatea portantă, durabilitatea și siguranța structurii metalice de rezistență prin modificarea dimensiunilor geometrice ale secțiunii transversale (diminuarea lor) și ale îmbinărilor acestora;

b) acțiunile dinamice și șocurile generate de utilaje în procesul de producție ce produc o degradare rapidă a unor elemente componente ale structurii de rezistență, urmată de o propagare rapidă cu compromiterea întregii structuri;

c) variația temperaturii tehnologice, cu repetabilitate, ce produce asupra elementelor componente ale structurii metalice de rezistență diminuarea rezistenței oțelului și a valorii modulului de elasticitate;

d) modificările de tehnologie impuse de dezvoltarea producției, care induc asupra structurii metalice/sau a unor elemente componente un regim sporit de solicitare, fiind necesare lucrări ample de consolidare/recondiționare.

Depășirea limitei de comportare elastică a materialului metalic din structurile de rezistență sau din elementele componente ale acestora este determinată de o multitudine de factori, dintre care cei mai importanți sunt:

- depășirea în cursul exploatării structurii a valorilor încărcărilor;
- imperfecțiunile de execuție;
- cedările de reazeme;
- variațiile de temperatură;
- încărcările dinamice ce nu au fost considerate la proiectarea structurii;
- concentrările de eforturi în secțiunile de îmbinare a elementelor componente ale structurii de rezistență;
- subdimensionarea unor elemente de rezistență etc.

Prin încărcări repetate care induc în elementele componente ale structurii metalice de rezistență tensiuni (eforturi unitare) ce

depășesc limita de curgere a oțelului, la dispariția acestora se produc deformații remanente.

Prin fenomenul de ecruisare, limita de proporționalitate se ridică până la valoarea tensiunii din domeniul plastic la care s-a produs descărcarea anterioară, iar alungirea la rupere scade cu valoarea deformației remanente de la ultima descărcare. Prin ecruisare crește limita de elasticitate, limita de curgere și rezistența la tracțiune, respectiv se micșorează domeniul deformațiilor plastice și scade energia de rupere, astfel încât oțelul devine mai fragil.

Fenomenul de îmbătrânire a oțelului constă în variația calității acestuia cu timpul (de la câteva zile, la zeci de ani). Acest fenomen este favorizat de existența unor suprasolicitări în elementele componente ale structurii de rezistență, de încărcări repetate, de deformații plastice la rece sau de variații de temperatură. Se caracterizează prin creșterea domeniului elastic și micșorarea domeniului plastic din diagrama σ - ϵ a oțelului, manifestate prin creșterea fragilității, a limitei de curgere, a rezistenței la rupere și prin micșorarea alungirii și a energie de rupere.

În cadrul elementelor componente ale structurii de rezistență a haelor industriale din siderurgie cele două fenomene apar în general, concomitent.

2. Stabilirea gradului de degradare structurală și mecanică

Are ca scop evaluarea calității actuale a oțelului din elementele componente ale structurii metalice de rezistență raportată la caracteristicile structurale și mecanice impuse de normele tehnice din perioada proiectării structurii.

Evaluarea fenomenului de îmbătrânire a oțelului va putea caracteriza nivelul rezistenței la încovoiere prin șoc și implicit la stabilirea riscului de rupere fragilă.

Un exemplu detaliat este prezentat în lucrarea [2].

Stabilirea gradului de degradare structurală și mecanică presupune prelevarea de probe din elementele structurii metalice de rezistență de către un laborator acreditat în domeniul analizelor, examinărilor structurale și încercării materialelor, pentru:

a) determinarea compoziției chimice actuale și compararea cu compoziția chimică din norma mărcii de oțel din momentul proiectării structurii;

b) determinarea caracteristicilor structurale ale oțelului prin:

b1) examinări macroscopice (conform SR EN 1321-2000), în vederea evidențierii defectelor, atât pe suprafețele interioare-exterioare, cât și pe grosimea profilelor;

b2) examinări microscopice pe grosimea profilelor atât în vederea determinării incluziunilor nemetalice în secțiunea transversală și în secțiunea longitudinală, cât și pentru evaluarea microstructurilor specifice profilelor analizate;

c) determinarea caracteristicilor mecanice de scurtă durată ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 , Z):

c1) determinarea durtății HV10 (conform SR EN ISO 6507) pe secțiunea transversală, urmând a se analiza variația gradientului de duritate față de valoarea medie (variațiile mari sunt corelate cu structuri neomogene cu granulații neuniforme ale constituenților);

c2) evaluarea durificării locale pe grosimea probelor. Aceasta constituie un estimator de apreciere a dezvoltării fazelor și constituenților structurali duri ce pot conduce la apariția fenomenelor de fragilizare-fisurare când există durificări locale accentuate (prin determinarea estimatorului de durificare locală $\Delta HV10$ și compararea valorii acestuia cu valoarea de 50 %). Se consideră că dacă $\Delta HV10 \geq 50$ %, în zonele examinate s-au dezvoltat fenomene de durificare locală accentuate cu structuri dure, neomogene ce contribuie la apariția fenomenelor de fragilizare-fisurare și apoi la ruperi fragile;

c3) determinarea caracteristicilor de rezistență mecanică și de deformabilitate a oțelului. Caracteristicile de rezistență mecanică: limita de curgere ($R_{p0,2}$), rezistența la tracțiune (R_m) și caracteristicile de deformabilitate: alungirea la rupere (A_5), gătuirea la rupere (Z) se determină în vederea comparării valorilor acestora cu valorile similare din norma aferentă mării de oțel la data proiectării;

c4) determinarea caracteristicilor de tenacitate. Caracteristicile de tenacitate determinate prin încercarea la încovoire prin șoc la temperaturile specificate de expertul tehnic (+20; 0 °C; -20 °C) sunt definite de: energia de rupere, KV, expansiunea laterală, EL și cristalinitatea Cr, pe direcția longitudinală și pe direcția transversală a epruvetelor. Benzile de tenacitate (intervalul de variație a energiei de rupere KV determinat de valorile minime și maxime ale energiei de rupere) se vor compara cu valoarea prevăzută în norma mării de oțel la momentul proiectării. Expansiunea laterală, EL, exprimă capacitatea de deformare plastică la vârful creștăturii determinată pe direcția longitudinală. Aprecierea comportării ductil-fragilă a oțelului se face pe baza evaluării cristalinității sau a fibrozității suprafețelor de rupere, iar valori ale estimatorului de durificare locală de peste 80 % pe ambele

direcții atestă tendințe clare de producere a ruperilor mixte ductil-fragile cu risc ridicat de dezvoltare a ruperilor fragile;

d) evaluarea fenomenului de îmbătrânire a oțelului. Fenomenul de îmbătrânire afectează în bună măsură capacitatea de deformare plastică, reducând în mod corespunzător fiabilitatea structurii metalice. Aprecierea tendinței de manifestare a fenomenului de îmbătrânire se bazează pe mai multe criterii, dintre care caracteristicile de tenacitate dinamică (șoc) ocupă un rol deosebit. Susceptibilitatea la îmbătrânire se determină prin încercări la încovoiere prin șoc la +20 °C și compararea caracteristicilor de tenacitate (se alege energia de rupere KV) pe cale artificială cu cea a oțelului în stare naturală, [5]. La determinarea energiei de rupere după îmbătrânirea artificială (IA) se folosesc epruvete de încercare la încovoiere prin șoc, cu secțiunea 11x11 mm², care se supun în prealabil la:

- deformare plastică la rece prin compresiune, cu gradul de deformare de 7 %;
- încălzire la 250 °C cu menținere o oră, urmată de răcire lentă în aer.

Gradul de îmbătrânire ΔIA se calculează cu relația:

$$\Delta IA = (KV_{SA} - KV_{IA}) / KV_{SA} \quad (1)$$

unde:

KV_{SA} - reprezintă valoarea medie a energiei de rupere KV în J a oțelului în starea actuală (SA);

KV_{IA} - reprezintă valoarea medie a energiei de rupere KV în J a oțelului în stare de îmbătrânire artificială (IA).

Se consideră că dacă $\Delta IA \geq 50$ %, oțelul analizat are o sensibilitate pronunțată la îmbătrânire artificială. Estimatorul ΔIA se determină pe ambele direcții (longitudinală, L și transversală, T).

Gradul de îmbătrânire, ΔIA poate estima și fenomenul de degradare a oțelului din elementele componente ale structurii metalice existente. Capacitatea de degradare este cu atât mai ridicată cu cât valoarea estimatorului ΔIA este mai mare.

3. Valori pentru modulul de elasticitate

Norma [3] arată că în cazul verificării siguranței unei structuri metalice existente sunt necesare informații suplimentare referitoare la caracteristicile structurii privind: condiții de rezemare, caracteristicile de rigiditate etc. Valorile care caracterizează rigiditatea (modulul de elasticitate) se vor stabili luând în considerare influența în timp a

solicitărilor, caracterul repetat al acestora etc., respectiv completarea metodelor de calcul așa cum este prezentat în cap. 6 din lucrarea [4].

Fenomenele de îmbătrânire și ecruisare reduc domeniul de deformabilitate și tenacitate a oțelului, astfel încât ruperea nu mai are un caracter tenace (caracterizată prin deformații plastice mari), ci tinde să devină de tip fragil (deformațiile se produc brusc).

Specialiștii arată importanța înlocuirii după limita de proporționalitate a modulului de elasticitate, E , cu modulul de elasticitate tangent, E_t , față de neajunsurile înlocuirii cu modulul de elasticitate redus E_r , după formula lui von Karman.

Dacă se notează cu E_c modulul de elasticitate al elementelor componente ale structurii de rezistență a construcției metalice existente, atunci în lucrarea [4] se arată că:

$$E_c \leq E \quad (2)$$

și

$$E_c = f(E, \sigma, t) \quad (3)$$

(diferența față de formula 6.3 din [4] constă în introducerea argumentului E), unde:

σ – tensiunea (efortul unitar) maximă;

t – perioada de exploatare a structurii metalice.

Relația (3) în cadrul structurilor metalice existente este de forma:

$$E_c = \beta E \quad (4)$$

unde:

$$\beta = bk\sqrt{ac} \quad (5)$$

cu:

β – coeficientul de reducere pentru starea limită ultimă a capacității portante;

a – factorul de importanță a elementului,

b – factorul privind nivelul de solicitare,

c – factorul privind vechimea elementului,

k – factorul privind natura mediului agresiv.

Relația (5) satisface cerințele stipulate în relația (3).

Dacă se ține seama că:

$$0,75 \leq \beta \leq 1,00 \quad (6)$$

rezultă că:

$$0,75E \leq E_c \leq 1,00E \quad (7)$$

În tabelul 1 se prezintă valorile rotunjite ale lui E_c pentru unele elemente cuprinse în tabelul 2.3 din lucrarea [4] și se constată că acestea se încadrează în valorile din tabelul 6.1 din aceeași lucrare ($E = 210\,000\text{ N/mm}^2$; $R = 210\text{ N/mm}^2$ conform STAS 10108/0-78).

În cazul în care nu sunt cuprinse valorile lui E_c pentru elementele componente ale structurii de rezistență (altele decât cele prezentate în tabel 1), pentru valorile factorilor a ; b ; c ; k se va utiliza tabelul 2.1 din lucrarea [4].

Tabelul 1

Nr. crt.	Tipul elementului, nivel de solicitare, vechimea și natura mediului agresiv	Valoarea modului de elasticitate E_c [N/mm ²] în funcție de perioada de timp		
		10...20 ani	20...30 ani	peste 30 ani
1.	Elemente metalice supuse la solicitări dinamice (ex. din poduri rulante cu regim de funcționare III; IV; V) având tensiunea (efortul unitar) normală maximă mai mare de 0,75 R.	($\beta=0,938$) 200 000	($\beta=0,884$) 190 000	($\beta=0,827$) 170 000
2.	Idem, având tensiunea (efortul unitar) normală maximă mai mică de 0,75 R sau cu solicitări importante având tensiunea (efortul unitar) normală maximă mai mare de 0,9 R	($\beta=0,938$) 200 000	($\beta=0,844$) 180 000	($\beta=0,827$) 170 000
3.	Elemente cu solicitări statice importante (inclusiv biaxiale) având tensiunea (efortul unitar) maximă cuprinsă între 0,6...0,9 R	($\beta=0,907$) 190 000	($\beta=0,858E$) 180 000	($\beta=0,804$) 170 000
4.	Elemente cu solicitări statice medii și reduse având tensiunea (efortul unitar) normală maximă mai mică de 0,6 R	($\beta=0,901$) 190 000	($\beta=0,853$) 180 000	($\beta=0,800$) 170 000

4. Concluzii

- Analiza siguranței structurii metalice existente pe schema spațială sau plană cu valori diferențiate ale modului de elasticitate longitudinal pentru elementele componente oferă o acuratețe sporită la verificarea stării limită de serviciu din cadrul Expertizei Structurale;
- În acest context, deplasarea admisă a structurii nu va mai fi diminuată cu coeficientul α (coeficient de reducere pentru starea limită a exploataării normale) conform [4];
- Metoda de verificare a siguranței structurilor metalice existente este metoda Elastic-Elastic pentru care solicitările structurii și ale elementelor componente se determină pe baza teoriei elasticității, iar capacitatea de rezistență se determină pe baza teoriei elasticității adaptată.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Oprișa, G., *Contribuții la alcătuirea, calculul și cercetarea elementelor metalice din siderurgie*. Teză de doctorat. Universitatea Tehnică din Timișoara, Facultatea de Construcții, 1996, Timișoara, România.
- [2] Pascu, D.R., Roșu, R.A., Oprișa, G., Băluță, G., *Evaluation of aging phenomena of unalloyed weldable steel from electric steelwork*, Report TMK-Reșița, 2011, România.
- [3] * * * STAS 10108/0-78. *Principii generale de verificare a siguranței construcțiilor*, București, România.
- [4] Oprișa, G., *Siguranța și consolidarea structurilor metalice industriale*. Editura Mirton, 2002, Timișoara, România.
- [5] Safta, V., *Încercările tehnologice și de rezistență ale îmbinărilor sudate sau lipite*, Editura SUDURA, 2006, Timișoara, România.

Dr. Ing. Gelu OPRIȘA
Expert Tehnic A2, membru AGIR
e-mail: gelu.oprisa@yahoo.com.
Prof.asoc. Dr. Ing. Doru-Romulus PASCU
membru corespondent al Academiei de Științe Tehnice din România
e-mail: pascu.dorurumus@gmail.com