

CZU 699.87

Croitoru Gh., Toporovschi S., Luțevici I.

Coroziunea armăturilor din betonul construcțiilor aflate în medii agresive

Abstract

In article research of processes of corrosion of armatures in concrete of the designs maintained in excited environments is submitted. On the basis of the experimental program as beams tests have been tested for bearing ability, after the accelerated corrosion tests in a solution of 5 % NaCl. The choice of modes of corrosion tests was spent with observance of mechanisms of processes which pass on a surface of armature, in natural conditions. The tested beams have shown good results at external influences that allows to carry out the further researches, is especial at studying influence of duration of the accelerated influence of the corrosion environment, potential of a current and other diameters of armatures.

Rezumat

În articol se prezintă un studiu privind procesele de coroziune a armăturilor din betonul construcțiilor, exploatare în medii agresive. În baza programului experimental s-au încercat probe sub forme de grinzii la stadiul limită de serviciu, după testări la coroziune accelerată în soluție de 5% NaCl. Alegerea regimurilor de testare corosivă rapide s-a făcut cu respectarea mecanismului proceselor care au loc pe suprafața armăturii în condiții naturale. Grinzile testate au demonstrat o comportare bună la acțiunea solicitărilor exterioare, încurajând studii viitoare asupra subiectului, cu precădere la studiul influenței timpului de expunere la coroziune accelerată, intensității curentului aplicat și al altor diametre de armături.

Резюме

В статье представлено исследование процессов коррозии арматур в бетоне конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах. На основании экспериментальной программы были испытаны пробы в виде балок на несущую способность, после ускоренных коррозионных испытаний в растворе 5% NaCl. Выбор режимов коррозионных испытаний проводился с соблюдением механизмов процессов, которые проходят на поверхности арматуры, в естественных условиях. Испытанные балки показали хорошие результаты при внешних воздействиях, что позволяет провести дальнейшие исследования, особенно при изучении влияния продолжительности ускоренного воздействия коррозионной среды, потенциала тока и других диаметров арматур.

Introducere

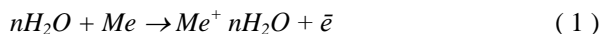
Betonul armat fiind un material care utilizează rezistența la compresie a betonului și rezistența la întindere a oțelului, are caracteristici diferite de ale celor două materiale componente [1].

Armătura conferă betonului armat nu numai rezistență la orice fel de solicitări (încovoiere, întindere centrică sau excentrică, compresiune excentrică cu excentricitate mare, torsiune cu încovoiere), ci și ductilitate, proprietate extrem de importantă pentru anumite tipuri de structuri, cum ar fi cele antiseismice.

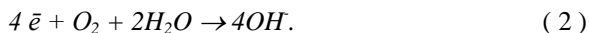
Asocierea betonului și armăturii este posibilă datorită faptului că aceste două materiale au valori apropiate ale coeficienților de dilatare termică, au caracteristici de deformație care sunt compatibile, asigurând aderența dintre ele; totodată betonul asigură protejerea armăturii contra coroziunii [2].

În majoritatea cazurilor coroziunea metalelor este un proces electrochimic și pentru realizarea lui sunt necesare următoarele condiții [3]:

1. Prezența la suprafața oțelului a diferenței de potențiale, adică neomogenității electrochimice a suprafeței;
2. Prezența peliculei de electrolit pentru legătura electrolică între sectoarele suprafeței metalului cu deferite potențiale;
3. Starea activă a oțelului pe sectoarele anodice ale suprafeței, unde are loc dizolvarea metalului conform reacției:



4. Absorbția depolarizatorilor, în particularitate oxigen, la sectoarele catodice ale suprafeței pentru asimilarea electronilor excedenți:



Conform clasificării lui N.D.Tomașov [3], neomogenitatea electrochimică a suprafeței este determinată de:

- neomogenitatea fazei metalice (gradul diferit al neomogenității suprafeței, peliculelor protectoare, deformații și tensiuni);
- faza lichidă (concentrația diferită a ionilor de metal, sărurilor neutri, ioni de hidrogen, oxigen și ai altor oxidanți);
- condițiile fizice (diferența de temperaturi, intensitatea energiei radiante și a câmpului electric exterior).

Întrucât structura oțelului și condițiile de contact ale lui cu betonul sunt neomogene, pentru armătura din beton se îndeplinește prima condiție. Deoarece betonul este un corp capilaroporos, cu suprafața interioară activă și hidrofilă, se poate presupune, că condițiile 2 și 4 ale desfășurării procesului corosiv în beton pot avea loc.

Proprietățile mecanice ale betonului nu sunt suficiente pentru o comportare adecvată a betonului în exploatare, după cum se poate observa în literatura de specialitate [4]. De aceea, este important, de a lua în considerare microstructura elementelor de beton în perioada de exploatare.

Studiul următor descrie comportarea elementelor de beton armat, cu strat de acoperire cu beton a armăturii de 25 mm și 50 mm, supuse la coroziune accelerată, cu și fără fisuri, în starea limită de serviciu (SLS). Momentele de fisurare, momentele de rupere și deschiderea fisurilor au fost monitorizate permanent. În plus, armătura folosită a fost testată înainte și după cedarea grinzilor, prin extragerea ei din grinzile cedate. Există, de asemenea, metode de detectare a coroziunii din armătură fără necesitatea înlăturării stratului de acoperire cu beton sau extragerii armăturii din element [5].

Programul experimental

1. Compoziția betonului

Compoziția betonului este prezentată în Tabelul 1. Densitatea în stare proaspătă a betonului este $\rho = 2458 \text{ kg/m}^3$.

Tabelul 1. Compoziția betonului de marca 400

Componente	Cantitatea
Ciment Portland CEM I 32,5R	380 kg/m ³
Granit fracția 5-20 mm	1104 kg/m ³
Nisip cuarțos fracția 0-4 mm	595 kg/m ³
Apă	224 l/m ³
Raport apă/ciment	0,60

Pentru cercetări s-au folosit probe din beton, sub formă de grinzii, cu dimensiunile (100 × 100 × 1000 mm), armate în partea de jos cu două bare din oțel-beton tip A400 cu diametrul Ø12 mm, cu lungimea de 98 cm, stratul de acoperire cu beton a armăturii fiind de 25 mm și 50 mm.

Odată cu grinzile, s-au turnat o serie de probe pentru verificarea proprietăților fizico-mecanice ale betonului la vârsta de 28 de zile. O parte din probe s-au întărit în camere cu aburi (după regimul: 3 ore ridicare până la $t = 90\text{ }^{\circ}\text{C} + 4$ ore menținere la $t = 90\text{ }^{\circ}\text{C} + 12$ ore coborâre de la 90 la 20 °C) și o altă parte - timp de 28 zile, la 20 °C în condiții umede, după care probele s-au menținut în condiții de aer uscat timp de o lună.

2. Testul de coroziune

Echipamentul și principiul pentru inducerea coroziunii accelerate în betonul armat sunt prezentate în Figura 1 și Figura 2.

Alegerea regimurilor de testare corosivă rapide s-a făcut cu respectarea mecanismului proceselor, care au loc pe suprafața armăturii în condiții naturale. Electrolițul din experiment este o soluție de 5% NaCl (sare de bucătărie obișnuită dizolvată în apă potabilă). Electrozii sunt catodul (armătura înglobată) și anodul (placa de oțel inoxidabil care acoperă simetric 3 fețe ale grinzii). Un voltaj extern a fost aplicat anodului.

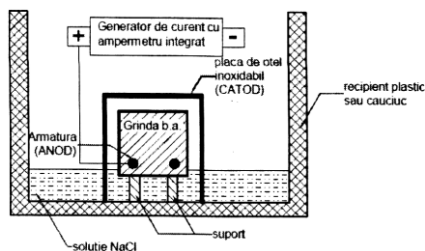


Fig. 1. Principiul celulei electrolitice



Fig. 2. Celula electrolitică

Procesul de coroziune în catod a început, când puntea de sare a pătruns stratul de acoperire cu beton până la armătură și a închis circuitul. Testul de inducere a coroziunii accelerate este similar cu cel întâlnit în alte cercetări [6].

Intensitatea moderată a curentului electric pe armătură a fost $I = 3\text{ mA/cm}^2$ de armătură și a putut fi măsurată pe un Ampermetru exterior.

Grinzile au fost supuse la coroziune accelerată pe o perioadă de la câteva ore până la câteva zile. În timpul verificărilor s-a controlat temperatura electrolitului și umiditatea betonului.

Se știe, că betonul conține în permanență apă capilară și osmotică, care poate servi drept electrolit. Pentru oțelul din beton, ca și pentru metalul deschis [7], există o anumită umiditate critică a aerului, mai jos de care peliculele lichide nu pot asigura deplasarea ionilor dintre sectoarele anodice și catodice ale suprafeței. Umiditatea relativă critică a aerului se află în limitele 50 – 60 %. La saturarea cu apă, betonul devine practic impermeabil pentru gaze, iar în alte cazuri el este neetanș pentru oxigen, fapt care provoacă desfășurarea procesului catodic conform reacției (2) și a reacțiilor secundare de formare a produșilor de coroziune.

După cum au arătat cercetările, lipsa coroziunii oțelului în beton se explică prin pasivarea lui în mediu bazic, adică prin imposibilitatea dizolvării conform reacției (1).

În cazurile când coroziunea oțelului în beton are loc, din cauza neîndeplinirii condiției (3), suprafața oțelului rămâne activă sau se pasivează incomplet la confecționarea construcției ori își pierde pasivitatea în procesul de exploatare. Avansarea pasivării, de obicei, se caracterizează prin înobilarea bruscă a potențialului de electrod al metalului. Astfel, oțelul, ce are în stare activă potențialul de la - 0,4 până la - 0,6 V, în stare pasivă poate căpăta potențialul până la +1,0 V.

Apariția stării pasive a oțelului este legată de formarea pe suprafața lui a unei pelicule compacte, insolubile a produșilor de coroziune. O astfel de peliculă apare în rezultatul procesului anodic direct.

Valoarea pH-lui lichidului din porii betonului se află în limitele 11 - 13. Calculele termodinamice [8] arată că, la astfel de valori ale pH-ului, oțelul trebuie să se pasiveze. Conform altor date [9, 10], valoarea critică a pH-ului, mai jos de care oțelul nu se pasivează, se află în limitele 11,5 - 11,8.

Interpretarea rezultatelor testului de coroziune

Conform cercetărilor, starea suprafeței oțelului în beton poate fi determinată aproximativ, după valoarea potențialului staționar, iar mai precis - după caracterul curbei anodice de polarizare.

Potențialul procesului anodic pe suprafața fierului $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ depinde de mărimea pH-ului, temperatura mediului și activitatea ionului de fier în soluție

$$E_a = - 0,44 + 0,0295 \lg Fe^{2+},$$

(3)

și de prezența ionilor străini.

În urma cercetărilor, s-a stabilit, că starea electrochimică a suprafeței de metal în betonul compact, în stare lichidă, se caracterizează prin potențial negativ 50 - 100 mV și prin polarizare anodică considerabilă. Pasivarea armăturii, de obicei, se sfârșește peste 10 - 12 ore după ce a fost introdusă în beton, în acest timp se pasivează nu numai suprafața curată, dar și sectoarele cu procent mic de rugină.

Fisurarea în starea limită de serviciu (SLS) prin încovoiere

Studiul a fost condus în 3 direcții. Toate grinzile au fost proiectate să aibe aceeași capacitate portantă la moment încovoietor:

(a) Grinzi neexpuse la coroziune accelerată și fără fisuri în stadiul limită de serviciu (SLS);

(b) Grinzi preîncărcate la stadiul limită de serviciu (SLS), fisurate și apoi expuse la coroziune accelerată pe o perioadă de 7-11 zile.

(c) Grinzi nefisurate, dar expuse la coroziune accelerată pe o perioadă de 7-11 zile. Toate grinzile au fost încărcate până la cedare, în stadiul limită ultim (SLU).

Două grinzi cu stratul de acoperire cu beton $c = 25$ mm și două grinzi cu $c = 50$ mm au fost încărcate până la stadiul de exploatare. Starea limită de serviciu a fost înregistrată și încărcarea a fost oprită la o deschidere medie de fisuri de 0,2 mm. După descărcare (relaxare), fisurile s-au închis la o deschidere remanentă de 0,03 – 0,04 mm.

Datorită expunerii la coroziune accelerată a grinzilor prefisurate (b) cu strat de acoperire $c = 25$ mm, valoarea forței de cedare este cu 7% mai mică decât cea corespunzătoare grinzilor neexpuse (a), după cum se vede în Figura 3.

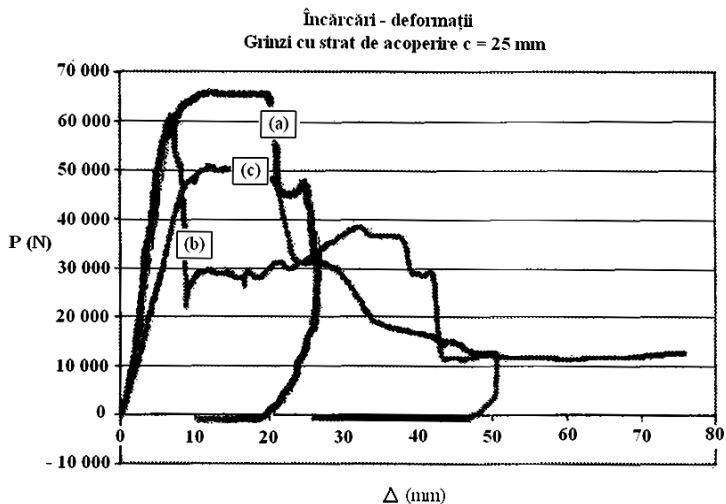


Fig. 3 Grinzi cu strat de acoperire $c = 25$ mm

În cazul grinzilor prefisurate (b), cu strat de acoperire cu beton $c = 50$ mm, valoarea forței de cedare este cu 2 % mai mică, decât cea corespunzătoare grinzilor neexpuse (a), după cum se vede în Figura 4. Rezultatele experimentale obținute sunt similare cu alte cercetări anterioare [11]. De remarcat este totuși, că grinda de tip (c) prezintă o valoare a forței de rupere superioară celorlalte tipuri de grinzi, fapt ce necesită verificări suplimentare. În unele cercetări efectuate [12] s-a remarcat, că proprietățile de rezistență și deformabilitate ale betonului de înaltă rezistență, expus la condiții agresive de lungă durată sunt influențate pozitiv de mediul agresiv.

Se poate observa o deformabilitate mai pronunțată post - rupere în cazul grinzilor expuse (b) și (c), comparativ cu grinziile neexpuse (a), după cum se remarcă în Figura 3 și 4.

În cazul grinzilor cu strat de acoperire cu beton $c = 25$ mm, Figura 3, deformabilitatea tipului (b) de grinzi este cu 42 % mai mare decât a tipului (a).

În cazul grinzilor cu strat de acoperire cu beton $c = 50$ mm, Figura 4, deformabilitatea tipului (b) de grinzi este cu 60 % mai mare decât a tipului (a). De asemenea, deformabilitatea grinzii de tip (c) este mai pronunțată decât în cazul grinzilor cu acoperire de beton $c = 25$ mm. Ca urmare, se

poate observa o comportare mai ductilă a elementelor expuse la coroziune decât a celor neexpuse.

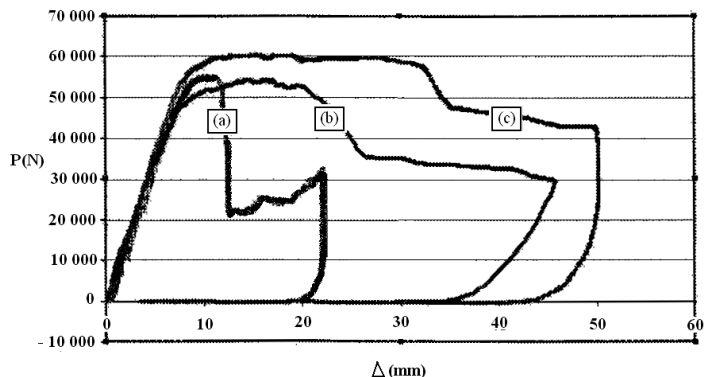
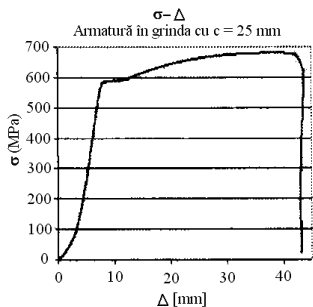


Fig. 4 Grinzi cu strat de acoperire $c = 50$ mm

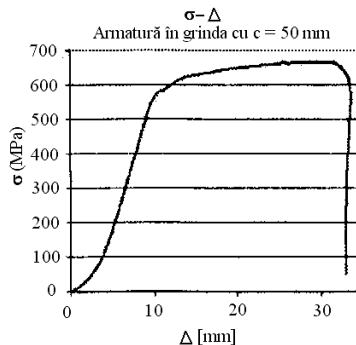
Armătura prevăzută pentru încovoiere a fost extrasă după corodarea grinzilor supuse la coroziune forțată și încercată la întindere.

Diagramele σ - Δ sunt prezentate în Figura 5, cazurile (i), (ii) și (iii). Pentru grinziile cu strat de acoperire cu beton $c = 25$ mm, efortul unitar maxim de rupere în armătură a fost $\sigma_{\max} = 674,9$ MPa, cazul (i). Pentru grinziile cu strat de acoperire cu beton $c = 50$ mm, efortul unitar maxim de rupere în armătură a fost $\sigma_{\max} = 666,5$ MPa, cazul (ii). Cu toate că armătura înglobată a fost expusă la coroziune și a prezentat un strat de rugină, pierderea de masă datorită coroziunii a fost nesemnificativă și diametrul nominal al barelor a rămas cca 12 mm.

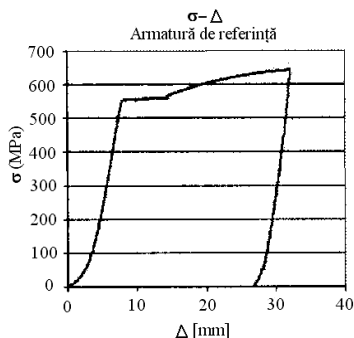
Din punctul de vedere al capacității de rezistență, barele de oțel înglobate în grinziile expuse la coroziune accelerată nu au fost semnificativ diferite de barele neînglobate în grinzi și neexpuse, cazul (iii).



(i)



(ii)



(iii)

Fig. 5 (i) – armătura extrasă din grinzi (b), strat de acoperire $c = 25$ mm;
(ii) – armătura extrasă din grinzi (b), strat de acoperire $c = 50$ mm;
(iii) – armătură neînglobată și neexpusă la coroziune.

Concluzii

Coroziunea accelerată aplicată grinzilor prefisurate a urmărit simularea comportării elementelor structurale în exploatare în medii agresive.

Caracteristica normală a oțelului în mediul bazic al betonului este pasivitatea. Însă, în anumite condiții, starea pasivă a suprafeței oțelului în beton se modifică și devine posibilă corodarea lui. Acest fapt este determinat de următoarele condiții:

- introducerea în beton a adaosurilor corosiv active (săruri) sau difuzia lor din mediul exterior;
- micșorarea stării bazice a lichidului din beton mai jos de valoarea critică, pe calea spălării sau neutralizării cu lichide acide NaCl;

- deteriorarea mecanică sau corosivă a stratului de protecție din beton;

- formarea fisurilor în beton.

Rezultatele obținute arată că momentul încovoietor a grinzilor corodate (b) este cu $2 \div 7$ % mai mic decât a grinzilor neexpuse (a).

Stratul de acoperire cu beton influențează capacitatea portantă a grinzilor (Figura 3 și Figura 4), deoarece s-a observat o descreștere de 2 % a forței de rupere pentru grinzile cu strat de acoperire cu beton de 50 mm, comparativ cu o descreștere de 7% a forței de rupere la grinzile cu strat de acoperire de 25 mm. Această observație necesită mai multe evaluări experimentale.

Deformabilitatea grinzilor este mai pronunțată pentru grinzile de tip (b), decât pentru cele de tip (a), după cum se remarcă în Figurile 3 și 4. Acest tip de comportament poate fi legat de proprietățile mecanice ale betonului de înaltă rezistență. La expunerea la medii agresive, betonul de înaltă rezistență prezintă o rezistență și o deformabilitate mai mare față de betonul neexpus, după cum se poate remarca în cercetările anterioare [13].

Armătura longitudinală înglobată a fost extrasă din grinzi la finalul experimentărilor și a prezentat semne de coroziune ne semnificative, deoarece nu au fost afectate nici diametrul și nici efortul unitar ultim al oțelului.

În general, grinzile testate au demonstrat o comportare bună la acțiunea solicitărilor exterioare, încurajând studii viitoare asupra subiectului, cu precădere la studiul influenței timpului de expunere la coroziune accelerată, intensității curentului aplicat și al altor diametre de armături.

Referințe

1. Avram C., ș. a. - Rezistențele și deformațiile betonului - Ed. Tehnică, București, 1984, pag. 34-37.
2. Nicula I., ș. a. - Beton armat - Editura Didactică și Pedagogică, București, 1992, pag. 45-48.
3. Tomașov N.D. - Teoria coroziunii și zădită metallov – Metallurghizdat, 1987, 263 s.

4. Măgureanu C., Negruțiu C., Hegheș B., „Influence of aggressive environmental effects on high-strength concrete”, CONSEC` 07 Vol. 1, ISSN 1626-4704, ed. Francois Toutlemonde, June 4-6, 2007.

5. Hyong-Seok So and Miliard S. G., „Measurement of Reinforcement Corrosion Rate Using Transient Galvanostatic Pulse Method”, ACI Materials Journal, V.105, No.4, Jul-Aug 2008.

6. Azad A. K., Ahmad S., and Azherv S. A., „Residual Strength of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams”, ACI Materials Journal V. 104, No. 1, Jan-Feb 2007.

7. Rozenfeld I.L. - Atmosfernaia corrozia - AN SSSR, 1980.

8. Biczoc I. - Coroziunea și protecția betonului - Editura Tehnică, București, 1985, pag. 45-47.

9. Lâcov A.V. - Iavlenie perenosa v capilliarno-poristâh telah - Gos. Izd-vo tehnico-teoreticescoi literatură 1990, 324 s.

10. Alexeev S.N. - Corrozia i zascita armatură v betone - Stroiiizdat, 1990, 125 s.

11. Yoon S., Wang K., Weiss W. J., and Shah S. P., „Interaction between Loading, Corrosion, and Serviceability of Reinforced Concrete”, ACI Materials Journal V. 97, No. 6, November-December 2000.

12. Magureanu C., Rosca B., and Heghes B., "Influence of Aggressive Environmental Effects on the High Strength Concrete", ACI/FHWA/fib The Seventh International Symposium on High Strength/High Performance Concrete, June 20-24, 2005, Washington DC, USA.

13. Negruțiu C., Măgureanu C., „Influence of aggressive environmental effects on high-strength concrete”, Acta Technica Napocensis, Section Civil Engineering-Architecture, Voi. II, Proceedings of the International Conference Constructions 2008, 9-10 Mai 2008, ISSN 1221-5848, Ed. Napoca Star, Cluj-Napoca.