

## Civil engineering Statybos inžinerija

# KOMPOZITINE ARMATŪRA ARMUOTŲ KONSTRUKCIJŲ APSAUGINIO BETONO SLUOKSNIO PATIKIMUMO VERTINIMAS

Andrius PATAPAVIČIUS\*

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2019 m. spalio 23 d.; priimta 2019 m. spalio 24 d.

**Santrauka.** Svarstoma galimybė taikyti tikimybę pagrįstus metodus bei tikimybinis patikimumo rodiklius gelžbetoninių gaminių ir konstrukcijų ilgaamžiškumui bei patikimumui vertinti. Tikimybiniais metodais analizuojamas gelžbetoninių konstrukcijų apsauginio betoninio sluoksnio patikimumas. Analizuojamas vandens ir cemento santykio betono mišinyje bei kitų veiksnių poveikis apsauginių betono dangų karbonizacijos greičiui. Aptariamas kompozitinės kaip skersinės armatūros naudojimas konstrukcijoms armuoti bei jos įtaka konstrukcijų patikimumui ir ilgaamžiškumui. Pateiktas taikomojo skaičiavimo pavyzdys rodo tikimybinį metodų paprastumą ir būtinybę.

**Reikšminiai žodžiai:** karbonizacija, betoninis apsauginis sluoksnis, patikimumas, kompozitinė armatūra.

## Įvadas

Šiuolaikiniame pasaulyje gelžbetonis tapo pagrindine konstrukcine medžiaga, kuri gerai apsaugo plieninę armatūrą nuo korozijos, yra atspari ugniai, didelio stiprio gniuždant bei ilgaamžė.

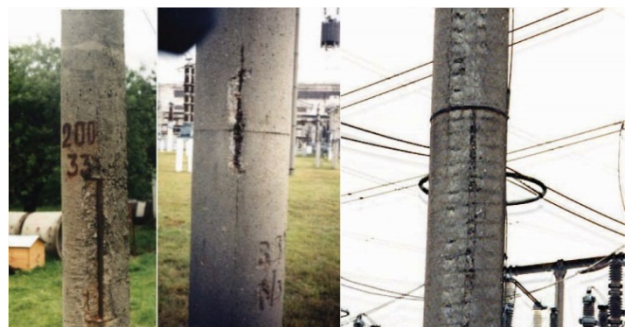
Betono ilgaamžiškumas yra labai svarbus veiksnys, lemiantis statinių ekonomiškumą, saugumą ir jo laikančiųjų konstrukcijų patikimumą.

Gelžbetoninių elementų plieninės armatūros rūdijimas ir betono korozija yra viena iš pagrindinių avarinių situacijų priežasčių, kurias sukelia nepakankamas betono tankis, mažas betono šalčio atsparumas, nepakankamas apsauginio betono sluoksnio storis, agresyvi aplinka, kurioje eksploatuojamos konstrukcijos (saulės radiacija, vėjas, įmirkimas ir išdžiūvimas, užšalimas ir atšilimas, druskų prisotintas gruntinis vanduo), gamybos, transportavimo ir statybos metu sukeliama papildomi poveikiai (Vanagas et al., 2017).

Kaip rodo eksperimentiniai eksploatuojamų statinių tyrimai, laikančiųjų konstrukcijų (tiltų atramų, elektros tiekimo linijų atramų stiebų ir t. t.) armatūros korozija pirmiausia prasideda nuo skersinės armatūros rūdijimo. To priežastys dažniausiai yra per mažas apsauginio betoninio sluoksnio storis, porėtas nepakankamai sutankintas betonas, nudaužytas ar kitaip pažeistas apsauginis betono sluoksnis.

Konstrukcijose pirmiausia pradeda rūdyti skersinė armatūra, rūdintis nuskėlus apsauginį betono sluoksnį, korozija persimeta į išilginę darbo armatūrą, betone sukeldama išilginį pleišėjimą. Plieninės armatūros korozija yra ne konstrukcijos problema o pačios medžiagos, todėl efektyviausias būdas problemą pašalinti yra pakeisti medžiagą (Young-Jun et al., 2015).

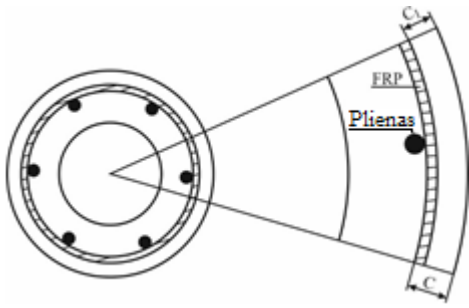
Pastaruosius kelis dešimtmečius kompozitinės medžiagos vis plačiau naudojamos ir statybos pramonėje. Pagrindinė priežastis, paskatinusi inovatyvių alternatyvų įprastai plieninei armatūrai paiešką, yra įprastų gelžbetoninių



1 paveikslas. Korozijos pažeistos žiedinio skerspjūvio konstrukcijos

Figure 1. Corrosion damaged ring cross-sections

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [kwattis@yahoo.co](mailto:kwattis@yahoo.co)



2 paveikslas. Žiedinio skerspjūvio konstrukcijų armavimo schema

Figure 2. Schematic diagram of reinforcing circular cross-section structures

elementų plieninės armatūros korozija ir su tuo susijusios didžiulės priežiūros išlaidos.

Vienas iš būdų „padidinti“ apsauginį betono sluoksnį (atstumą nuo betono paviršiaus iki išilginės darbo armatūros paviršiaus) skersinę metalinę armatūrą pakeisti kompozitine (2 paveikslas).

Naujų medžiagų naudojimas realių statinių konstrukcijoms neišvengiamai susijęs su tam tikra rizika. Pastaraisiais metais visame pasaulyje kompozitiniai strypais armuotų betoninių konstrukcijų tyrimai ir naudojimas realių statinių konstrukcijoms tapo ypač intensyvūs. Nors pasaulyje jau sukaupta nemaža kompozitiniai strypais armuotų konstrukcijų projektavimo, statybos ir eksploatacijos patirtis, tačiau dėl didelės kompozitinės armatūros įvairovės ir specifinių mechaninių savybių kompozitiniai strypais armuotų konstrukcijų projektavimas išlieka gana sudėtingu uždaviniu.

Dėl šių priežasčių būtina geriau rūpintis konstrukcijų ilgalaikiškumu ir daugiau domėtis eksploatacijos trukmės įtaka jų patikimumui. Tikslinga prognozuoti galimas gelžbetoninių konstrukcijų pažeidimus ir iš anksto numatyti priemones avarijoms išvengti. Todėl reikia įsisąmoninti, kad gamyklinių ir statybvietėje išbetonuotų konstrukcijų kokybę nusakoma ne tik stiprumo ar atsparumo mechaniniais ar fizikiniais parametrais, bet ir saugos bei kitais tikimybinio patikimumo indeksais (ISO 2394:1998, 1998). Kaip žinoma (Leira et al., 1999; Lawanwisut et al., 2003; COST Action C12, 2003), degraduojančių medžiagų ir jų dirbinių ar gaminių mechanines ir fizikines charakteristikas objektyviai įvertinti galima tik statistiniais duomenimis, todėl tik tikimybiniais metodais galima teisingai prognozuoti gelžbetoninių konstrukcijų kokybės pokyčius, o kartu artėjančias pažeidimus ir avarijas. Šių metodų taikymas leistų mūsų šalies projektuotojams ir statybininkams įvykdyti Europos Sąjungos reikalavimus, skirtus pastatų ir statinių konstrukcijoms tobulinti (Brühwiler et al., 2002).

## 1. Deterministinis patikimumo vertinimas

Rūdijanti metalinė armatūra gali labai sumažinti gelžbetoninių konstrukcijų patikimumą (saugą ir ilgalaikiškumą). Rūdys sumažina išilginių ir skersinių strypų bei sankabų skerspjūvius, taip pat armatūros sukibimą su betonu. Be to, jos priverčia atsiverti labai pavojingiems, išilgai arma-

tūros strypams ištįsusiems, plyšiams (1 paveikslas). Rūdys atsiranda, kai betono karbonizacijos skverbtis (gylis)  $d_c$  yra ne mažesnis kaip apsauginio sluoksnio storis  $c$ . Dėl korozinio plieno skilinėjimo rūdys yra ypač pavojingos įtemptojo gelžbetonio gaminiuose esantiems termiškai grūdinto plieno strypams.

Atvirame ore esančių gelžbetoninių gaminių ir kitų elementų betono karbonizacijos sparta priklauso nuo šių pagrindinių veiksnių: betono mišinio kokybės (vandens ir cemento santykio, cemento kiekio ir kt.); sukietėjusio betono kokybės (masės tankio, aktyvumo, sluoksnuiotumo ir kt.); ore esančių teršalų koncentracijos; betono drėkimo ir džiūvimo proceso; oro temperatūros kitimo; saulės radiacijos ir vėjo gūsių slėgio.

Betono karbonizacijos arba anglies dvideginio skverbties sparta  $v_c$  priklauso nuo vandens difuzijos koeficiento  $D_w$ . Pagal šį rodiklį yra trys apsauginio sluoksnio tankio klasės: A, B, ir C, kai koeficientas  $D_w = 60, 130$  ir  $200-10^{12}$  ( $m^2/s$ ) arba artimas šioms vertėms (CEB-FIP Model Code, 1990). Be to, dėl betono mišiniuose esančių įvairios paskirties priemaišų ir įmaišų betonas ne tik saugo plieninę armatūrą nuo rūdžių, bet ir skatina rūdijimo procesą (COST Action C12, 2003).

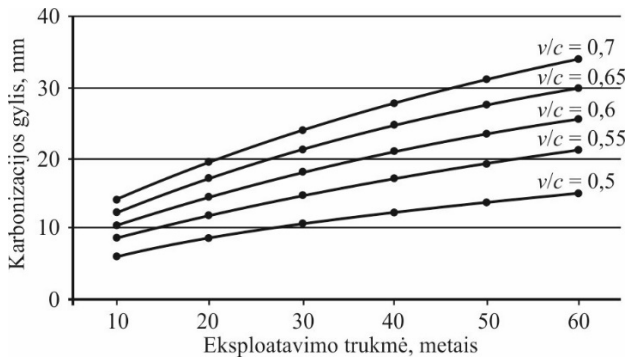
Spėjamas karbonizacijos skverbties didumas arba skverbtis gali būti apskaičiuotas remiantis šia formule:

$$d_c(t) = \int_0^t v_c(\tau) d\tau \approx 5\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot v/c \cdot t^{0.5}, \quad (1)$$

čia  $t$  – konstrukcijos eksploataavimo trukmė;  $\eta_1$  – vietovės klimato faktorius;  $\eta_2$  – betono kokybės faktorius;  $v/c$  – vandens ir cemento santykis (CEB-FIP model Code, 1990; CEB Bulletin 238, 1997)

Europos betono komitetas išskiria devynias aplinkos agresyvumo klases (CEB Bulletin 238, 1997; Kudzyz, 2003). Kai konstrukcijos naudojamos oro drėgmės arba drėgmės ir šalčio aplinkoje, jos agresyvumo klasė atitinkamai yra 2a ir 2b. Šiuo atveju vandens ir cemento santykis betono mišinyje turi būti ne didesnis atitinkamai kaip 0,60 ir 0,55. Betono mišinyje turi būti ne mažiau kaip 280 ir 300  $kg/m^3$  cemento, kai armuojama atitinkamai neįtemptais ir įtemptais strypais. Be to, skaldos užpildai turėtų būti ne didesni kaip 16 mm, o šutinimo procesas neturėtų gadinti kietėjančio cementinio akmens ir jo sankibos su užpildais. Atvirame ore esančių gelžbetoninių konstrukcijų minimalus apsauginio betoninio sluoksnio storis  $c_{min} = 25$  mm, vidutinė vibruoto betono karbonizacijos skverbtis  $d_{cm}$  (mm) pateikta grafike (3 paveikslas).

Užsienio šalių mokslininkų atliktų tyrimų analizė leidžia prognozuoti atvirame ore esančių vibruotojo gelžbetonio konstrukcijų vidutinę betono karbonizacijos skverbtį (3 paveikslas) (Faber ir Rostam, 2001). Iš grafiko duomenų nesunku suvokti, kad, naudojant daug vandens turinčius betono mišinius, negalima užtikrinti geros gelžbetonio kokybės. Reikia paminėti, kad Lietuvoje atliekami esančių elektros tiekimo linijų stiebų iš vibruotojo betono stebėjimų rezultatai yra artimi (3 paveikslas) duomenims. Stiebų stebėjimai ir apsauginio betoninio sluoksnio tyrimai



3 paveikslas. Vidutinė vibruoto betono karbonizacijos skverbtis  
Figure 3. Average penetration of vibration concrete carbonation

leidžia tvirtinti, kad betonuojant prie klojinio dugno buvusieji plieniniai strypai yra mažiau pažeidžiami, nes po stiebų vibravimo šioje zonoje betono mišinyje vandens sumažėja, o išorinėje zonoje padidėja. VGTU atlikti centrifuguotų atramų tyrimai rodo, kad išoriniame paviršiuje  $v/c$  santykis po centrifugavimo 0,30, o išorinių betono sluoksnių stipris 50 % didesnis negu vidinių. Po 30 metų tokių konstrukcijų eksploatacijos karbonizacijos skverbtis lygi 1–2 mm.

## 2. Apsauginio betono sluoksnio tikimybinis patikimumo vertinimas

Kadangi betono karbonizacijos skverbtis yra atsitiktinis procesas, tikslinga apsauginio betoninio sluoksnio patikimumą vertinti tikimybiniais metodais. Apsauginio betono sluoksnio efektyvumo procesas arba jo ribinė sauga aprašoma formule:

$$Z(t) = g[X(t), \theta] = \theta_c c - \theta_d d_c(t), \quad (2)$$

čia  $X(t)$  ir  $\theta$  – pagrindinių ir papildomos atsitiktinių kintamųjų vektoriai, kurių argumentai yra atsitiktiniai faktoriai ir jų skaičiavimo modelių neapibrėžtys (JCSS, 2000). Apsauginio betono sluoksnis  $c$  ir betono karbonizacijos skverbtis  $d_c(t)$  yra pagrindiniai atsitiktiniai kintamieji.  $\theta_c$  ir  $\theta_d$  – betono apsauginio sluoksnio ir karbonizacijos skverbties skaičiavimo modelių neapibrėžtys. Šių kintamųjų statistiniai vidurkiai ir standartai yra  $\theta_{cm} \approx \theta_{dm} \approx 1$ ,  $\sigma_{\theta_c} \approx 0,14$  (CEB Bulletin 238, 1997).

Apsauginio betono sluoksnio patikimumo indeksas gali būti išreiškiamas taip:

$$\beta(t) = \frac{\theta_{cm} c_m - \theta_{dm} d_{cm}(t)}{\sqrt{\sigma^2(\theta_c c) + \sigma^2(\theta_d d_c(t))}}. \quad (3)$$

Kai atsitiktinių kintamųjų apsauginio betono sluoksnio  $c$  ir betono karbonizacijos skverbties  $d_c(t)$  tikimybės skirstiniai yra artimi normaliajam skirstiniui, atsitiktinių kintamųjų vidurkiai ir dispersijos yra tokie:

$$\theta_{cm} c_m \approx c_m; \quad \theta_{dm} d_{cm}(t) \approx d_{cm}(t), \quad (4)$$

$$\sigma^2(\theta_c c) = \theta_{cm}^2 \sigma^2 c + c_m^2 \sigma^2 \theta_c;$$

$$\sigma^2(\theta_d d_c(t)) = \theta_{dm}^2 \sigma^2(d_c(t)) + d_{cm}^2(t) \sigma^2 \theta_d. \quad (5)$$

Atsižvelgiant į Kudzio (2003) rekomendacijas, apsauginio betono sluoksnis laikomas pakankamai patikimu po 25 konstrukcijos eksploataavimo metų, jei patikimumo indeksas  $\beta_{\min} = 1,28$  arba avarijos tikimybė  $P_f = 0,9$  (CEB Bulletin 238, 1997).

Atlikta gelžbetoninio konstrukcinio elemento po 25 eksploatacijos metų patikimumo analizė. Didėjant apsauginio betono sluoksnio storii  $c_m = 22\text{--}31$  mm, kai variacijos koeficientas  $\delta_c = 0,219$  (Faber ir Rostam, 2001; Bob, 2001) didėja ir patikimumo indeksas  $\beta$ . Kai karbonizacijos skverbties vidurkis  $d_{cm}(t) = 15$  mm, variacijos koeficientas  $\delta d_c(t) = 0,3$ . Pagrindiniai skaičiavimo rezultatai pateikti 1 lentelėje.

Prognozuojamas apsauginio betono sluoksnio patikimumo indeksas  $\beta_{\min} = 1,28$ , kai sluoksnio storis yra apie  $C_{\min} = 25,0$  mm. Betono apsauginio sluoksnio storii padidėjus 6 mm (toks skersinės kompozitinės armatūros (spiralės) skersmuo, patikimumo indeksas išauga 1,39 karto.

## Išvada

Gelžbetoninių konstrukcijų armatūros apsauginio betoninio sluoksnio storis ir betono karbonizacijos arba anglies dvideginio skverbtis yra atsitiktiniai dydžiai. Todėl teisingai vertinti ir prognozuoti ilgalaikį šio sluoksnio patikimumą bei gelžbetoninių gaminių ir kitų elementų konstrukcinę kokybę galima tik tikimybiniais metodais. Šie metodai yra nesudėtingi ir juos tikslinga taikyti visais atvejais, kai vertinama ne tik laikančiųjų, bet ir atitvarinių konstrukcijų

1 lentelė. Patikimumo skaičiavimo rezultatai  
Table 1. Results of the reliability calculation

| Apsauginio betono sluoksnio storio           |  | Karbonizacijos skverbio                         |   | Patikimumo indeksas formulė (3) |
|--|--|---|---|---------------------------------|
| vidurkis, formulė (4) $\theta_{cm} c_m$ , mm | dispersija, formulė (5) $\sigma^2(\theta_c c)$ , mm <sup>2</sup> | vidurkis, formulė (4) $\theta_d d_{cm}(t)$ , mm | dispersija, formulė (5) $\sigma^2(\theta_d d_c(t))$ , mm <sup>2</sup> |                                 |
| 22,0   | 28,05  | 15,0  | 24,66   | 0,96                            |
| 25,0   | 36,23  |   |   | 1,28                            |
| 27,0   | 42,25  |   |   | 1,47                            |
| 31,0   | 46,09  |   |   | 1,78                            |

bei statybinių medžiagų kokybė. Kompozitinės armatūros kaip skersinės naudojimas gali labai padidinti konstrukcijų patikimumą ir ilgalaikiškumą, nes padidina atstumą nuo elemento paviršiaus iki metalinės armatūros.

## Literatūra

- Bob, C. (2001). Probabilistic assessment of concrete structures durability. In *International Conference on Safety, Risk, Reliability-Trends in Engineering* (pp. 149–154). Malta.
- Brühwiler, E., Denarié, E., Urlau, U., Hasler, S., & Peter, H. (2002). Betonstahl mit erhöhten Korrosionswiderstand. *Beton und Stahlbetonbau*, 5, 209–248.  
<https://doi.org/10.1002/best.200201070>
- CEB-FIP Model Code. (1990). *Design Code* (437 p.). Thomas Telford, Lausanne.
- CEB Bulletin 238. (1997). *New approach in durability design* (138 p.). Sprint-Druck.
- COST Action Cl2. (2003). Improvement of buildings structural quality by new technologies. In *Proceedings of the International Seminar* (138 p.). Lisbon.
- Faber, M. H., & Rostam, S. (2001). Durability and service life of concrete structures – the owner's perspective. In *International Conference on Safety, Risk, Reliability-Trends in Engineering* (pp. 369–374). Malta.
- Kliukas, R., Daniūnas, A., Gribniak, V., Lukoševičienė, O., Vanagas, E., & Patapavičius, A. (2018). Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: inspection, field-testing, and performance assessment. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(9), 1221–1232.  
<https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1402068>
- Kudzys, A. (2003). *Structural quality improvement in design processes. Qualité et Sécurité de Fonctionnement* (pp. 62–67). Actes du Congrès Nancy – France.
- ISO 2394:1998. (1998). *General principles on reliability for structures*. 73 p.
- Young-Jun, Y., Ki-Tae, P., Dong-Woo, S., & Ji-Hyun, H. (2015). Tensile Strength of GFRP reinforcing Bars with Hollow section, Hindawi Publishing Corporation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, Article ID 621546, 8.  
<https://doi.org/10.1155/2015/621546>
- JCSS. (2000). *Probabilistic model code: Part 1 – basic of design Joint Committee on structural safety*.
- Lawanwisut, W., Li, C. Q., Dessa, A., & Chen Z. (2003). Serviceability assessment of deteriorating reinforced concrete structures. In F. Bontempi et al. (Eds.), *Lisse system-based visio for strategic and creative design* (Vol. 2, pp. 1803–1809). CRC Press.
- Leira, B., Lindgråd, A., Nesje, A., Sund, E., & Saegrov, S. (1999). Degradation analysis by statistical methods. In M. A. Laçasse, & D. J. Vanier (Eds.), *Durability of building materials and components* (Vol. 8, pp. 1439–1446). Ottawa, Canada.
- Vanagas, E., Kliukas, R., Lukoševičienė, O., Maruschak, P., Patapavičius, A. ir Juozapaitis, A. (2017). A feasibility study of using composite reinforcement in transport and power industry structures. *Transport*, 32(3), 321–329.  
<https://doi.org/10.3846/16484142.2017.1342689>

## ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE REINFORCED CONCRETE LAYER IN STRUCTURES

### A. Patapavičius

#### Abstract

An urgency to use probability-based methods and probabilistic reliability indices in long-term quality assessments and predictions of reinforced concrete products and structures is under consideration. Carbonation nature and depth of protective concrete covers of reinforcement bars and stirrups are analysed. Effect of water-cement ratio on the carbonation rate of protective concrete covers is discussed. Analyzes of reliability of structures reinforcement with composite as spiral (transverse) usage and influence. Presented applied equations and the calculation example demonstrate a simplicity and necessities of probability-based methods.

**Keywords:** carbonization, concrete protective layer, reliability, composite reinforcement.