

DETERMINATION OF RELATIONSHIP $\sigma(\#)$ OVER THE YIELD STRESS OF CONCRETE REINFORCING STEELS

G. Marčiukaitis & A. Šneideris MSc (Eng).

To cite this article: G. Marčiukaitis & A. Šneideris MSc (Eng). (1999) DETERMINATION OF RELATIONSHIP $\sigma(\#)$ OVER THE YIELD STRESS OF CONCRETE REINFORCING STEELS, Statyba, 5:4, 237-244, DOI: [10.1080/13921525.1999.10531470](https://doi.org/10.1080/13921525.1999.10531470)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/13921525.1999.10531470>



Published online: 26 Jul 2012.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 47

TEMPIAMOSIOS ARMATŪROS $\sigma(\epsilon)$ PRIKLAUSOMYBĖS VIRŠ TAKUMO RIBOS NUSTATYMAS

G. Marčiukaitis, A. Šneideris

1. Įvadas

Konstruktinės statybinės medžiagos, tokios kaip betonai, armatūra ir pan., po apkrova deformuojasi skirtingai. Šis konstrukcijų deformavimasis vyksta skirtingai, sukeldamas įvairios formos ir dydžio įtempių būvį [1, 2]. Yra daug veiksnių, kurie lemia lenkiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių-deformacijų būvį. Iki tam tikros ribos šis būvis kinta ir, esant linijiniam valkšnumui, jo kitimas stabilizuojasi. Pasikeitus sąlygoms jis gali keistis: įtempių-deformacijos betone ir armatūroje gali padidėti arba šiek tiek sumažėti. Didžiausią būvio pasikeitimą, kai nepažeista konstrukcija, sukelia įvairių poveikių (apkrovų, temperatūros ir pan.) pokyčiai.

Pastatus modernizuojant ir rekonstruojant, labai dažnai reikia įvertinti konstrukcijų būvį ir jas stiprinti.

Stiprinant konstrukcijas papildoma armatūra, turi būti nustatyta, kaip panaudojama jų tempiamojoje zonoje esanti armatūra ir likęs jos laikymo galios resursas. Skaičiavimais vertinant šią armatūrą būtina atsižvelgti į tai, kokią įtempių-deformacijų būvio stadiją ji jau yra pasiekusi.

Tačiau, nežinant faktinių betono ir armatūros įtempių, negalima tiksliai įvertinti betono ir tempiamosios armatūros laikomosios galios resurso (likučio). Pridedant papildomos armatūros reikia žinoti, kokią apkrovos dalį galės perimti esama armatūra ir ar ji nėra pasiekusi savo ribinės laikomosios galios.

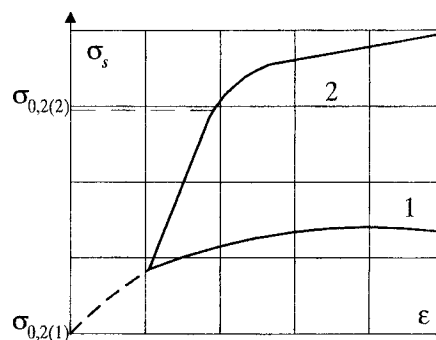
Kaip parodyta 1 pav., esama ir papildomai po tam tikro laiko pridėta armatūra apkrovus deformuos skirtingai. Pasikeičia gniuždomosios betono zonos būvis ir visas įtempių-deformacijų būvis. Tarp skirtingose stadijose esančių armatūrų vyksta įtempių persiskirstymas. Visa tai svarbu įvertinti, nustatant stiprinamų konstrukcijų laikomąją galią ir jų deformacijas.

Norint įvertinti šių įtempių persiskirstymą, kad geriau abi armatūros būtų panaudojamos, būtina žinoti ar-

matūros įtempių-deformacijų analitines išraiškas. Be to, visas $\sigma(\epsilon)$ priklausomybes reikia žinoti, norint įvertinti konstrukcijų būvį visose stadijose, įskaitant ir suirimą.

Projektavimo normose nurodyta, kad, kai lenkiamasis elementas stiprinamas po apkrova, didesne kaip 65% nuo skaičiuojamosios, elementų normalinių pjūvių laikomoji galia mažėja. Tačiau tokio mažėjimo pagrįsto pagrindimo nėra. Todėl būtina žinoti esamos ir stiprinant papildomai pridėtos armatūrų įtempius-deformacijas, jų tarpusavio persiskirstymą toliau eksploatuojant konstrukciją.

Yra pasiūlyta įvairių konstrukcijų stiprinimo ir skaičiavimo būdų [3, 4]. Tačiau tokie skaičiavimai sudėtingi ir jais neįvertinamos stiprinamų konstrukcijų medžiagų plastinės deformacijos.



1 pav. Armatūros įtempių-deformacijų diagrama: 1 – esančios elemente, 2 – papildomai pridėtos

Fig 1. Stress-strain curves for the reinforcement: 1 – placed in the structure, 2 – added on structure as additional reinforcement

Konstrukcijas, sustiprintas iš anksto įtemptomis tempėmis arba papildoma neįtemptą armatūrą, galima skaičiuoti ir iš stiprumo sąlygos, taikant formules paprastoms gelžbetoninėms konstrukcijoms skaičiuoti. Tačiau tai neleidžia įvertinti armatūros įtempių-deformacijų būvio virš takumo ribos. Nustatyta, kad stiprinimo metodui parinkti ir skaičiavimo tikslumui didelę reikšmę turi įtempiai konstrukcijos armatūroje (ypač kritiniu atveju,

kai jie viršija takumo ribą), papildomos armatūros panaudojimas ir įrašų persiskirstymas tarp šių armatūrų. Tam būtina žinoti įtempių-deformacijų priklausomybes įvairiose armatūros būvio stadijose.

2. Armatūros $\sigma(\epsilon)$ diagramų aprašymo analizė

Gelžbetoninių konstrukcijų armatūra kinta kartu su betonu. Priklausomybė tarp įtempių-deformacijų tempimajai armatūrai, esančiai betone, būtų išreiškiama idealia diagrama, jei plyšiams atsiradus iš karto būtų pašalintas sukibimas tarp betono ir armatūros per visą ilgį tarp plyšių. Tačiau iš tikrųjų atsiradus plyšiams sukibimas tarp betono ir armatūros jei ir pašalinamas, tai tik nedideliuose ruožuose, esančiuose prie pat plyšio. Šių ruožų ilgis priklauso nuo armatūros paviršiaus kokybės, nuo armavimo procento, armatūros skersmens, kitų faktorių ir kai kuriais atvejais gali būti labai mažas. Todėl ideali įtempių-deformacijų diagrama tinka tik pjūviams su plyšiais. Tačiau praktiškai šios diagramos naudojamos taikant koeficientus, įvertinančius betono tarp plyšių įtaką armatūros būviui.

Šiuo metu daugiausia rekomenduojamą $\sigma_s(\epsilon_s)$ diagramų aprašymų, skirtų armatūrai, išreiškiama laipsniniais daugianariais arba tiesinėmis trupmeninėmis funkcijomis.

Paprastai armatūrinių plienų $\sigma_s(\epsilon_s)$ priklausomybės nėra analogiškos betono priklausomybėms, nes jų pagrindą sudaro visiškai skirtingos funkcijos. Tai griauna formulių vienareikšmiškumą ir apsunkina gelžbetoninių elementų pjūvio įtempių-deformacijų vertinimo matematinį modelį.

Yra pasiūlyta [5] analitinė stipriosios armatūros tempimo diagrama, susidedanti iš dviejų ruožų – pirmasis nuo 0 iki $\sigma_{0,02}$, antrasis nuo $\sigma_{0,02}$ iki σ_u . Antrąjį ruožą aprašant nepriklausomaisiais dydžiais imami $\sigma_{0,2}$; $\bar{m}_{s,4} = \sigma_u / \sigma_{0,2}$ ir E_s . Taikant logaritminę ir atvirkštinę funkcijas, antrojo ruožo aprašymui yra gauta tokia priklausomybė:

$$\sigma_s = S - K \frac{\ln C_1 (\epsilon_s + L)}{C_2 (\epsilon_s + L)}, \quad (1)$$

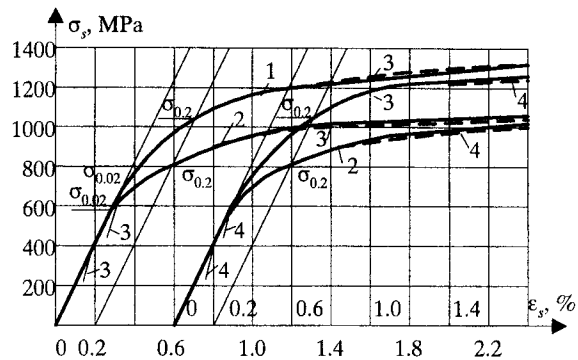
S ir K – funkcijos, rodančios armatūros charakteristikų įtaką įtempių-deformacijų priklausomybei, C_1 , C_2 ir L rodo tų pačių charakteristikų įtaką armatūros deformacijoms.

Apdorojant eksperimentines kreives gauti koeficientai S , K ir L , kurių išraiškas įstačius į (1) priklausomybę, gaunama tokia formulė:

$$\sigma_s = S - K \frac{\ln 10 (\epsilon_s \cdot 10^3 + L)}{\epsilon_s \cdot 10^3 + L}. \quad (2)$$

Priklausomybei $\sigma_s(\epsilon_s)$ gauti buvo taikytos eksperimentinės stipriųjų armatūrinių plienų tempimo diagramos (2 pav.). Artėjimo funkcija:

$$\epsilon_s = \frac{K_0}{A - \sigma_0} + D. \quad (3)$$



2 pav. A_T VI ir A_T V klasių armatūrų tempimo diagramos: 1 ir 2 – vidutinės statistinės diagramos; 3 – pagal (2) formulę; 4 – pagal (4) formulę

Fig 2. Stress-strain curves for the reinforcement A_T VI and A_T V class: 1 and 2 – average statistic curve; 3 – according to formula (2); 4 – according to formula (4)

Įvertinus galimus tamprumo modulio nukrypimus nuo vidutinių reikšmių, ši priklausomybė igauna tokia išraišką:

$$\epsilon_s \cdot 10^3 = \frac{K_0}{A - \sigma_0} - D + \frac{\sigma_s (1,9 \cdot 10^5 - E_s)}{1900 \cdot E_s}, \quad (4)$$

A , D ir K_0 – koeficientai, kuriais įvertinamas armatūros klasės tipas.

Laikoma [6], kad tikslesnis įtempių-deformacijų diagramos aprašymas yra toks:

$$\epsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} + m \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta \right)^3, \quad (5)$$

$m = \frac{0,002}{(1 - \eta)^3}$, o santykinė tamprumo riba η pateikiama

funkcijomis $\sigma_{0,05}$ ir $\sigma_{0,2}$: $\eta = 1 - 2,7 \frac{\sigma_{0,2} - \sigma_{0,05}}{\sigma_{0,2}}$.

(5) lygties dešinės pusės antroje dalyje aprašomos tiesiai plastinės deformacijos, t. y. deformacijos virš takumo ribos.

Gaunama tempimo po apkrova diagramos išraiška tiesiai plastinėms deformacijoms:

$$\varepsilon_s = \begin{cases} \frac{\sigma_s}{E_s} + m_1 \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - \eta_1 \right)^{n_1}, & \sigma_y \leq \sigma_s \leq \sigma_{0,2}; \\ \frac{\sigma_s}{E_s} + m_1 \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - \eta_1 \right)^{n_1} + m_2 \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - 1 \right)^{n_2}, & \sigma_{0,2} \leq \sigma_s \leq \sigma_{0,5}; \\ \frac{\sigma_s}{E_s} + m_1 \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - \eta_1 \right)^{n_1} + m_2 \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - 1 \right)^{n_2} + m_3 \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - \eta_3 \right)^{n_3}, & \sigma_{0,5} \leq \sigma_s \leq \sigma_u. \end{cases} \quad (6)$$

Pateiktas variantas remiasi eksperimentinių priklausomybių splainų interpoliavimu. Dažniausiai taikomi kubiniai splainai. [7] pateikta analitinė išraiška aprašymo, jungiančio σ_s ir ε_s , forma pakankamai tiksliai sutampa su eksperimentiniais viso diapazono (nuo 0 iki σ_{su}) rezultatais.

Rengiant Euronormas buvo siūloma [8] aprašymui imti tokią bazinę unifikotą betonui ir armatūrai $\sigma(\varepsilon)$ diagramų funkciją, gautą remiantis kreivaisiais splainais:

$$v_s = \frac{k\eta_s - \eta_s^2}{1 + (k - 2)\eta_s}, \quad (7)$$

čia $\eta_s = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{S0}}{\varepsilon_{SR} - \varepsilon_{S0}}, v_s = \frac{\sigma_s - \sigma_{S0}}{\sigma_{SR} - \sigma_{S0}}$

indeksai 0 ir R reiškia nagrinėjamo diagramos ruožo pradžią ir pabaigą.

Stipriųjų plienų diagramos (3 pav. a) skaidomos į tris ruožus: tiesinį ir du kreivuosius, kurie aprašomi viena ir ta pačia priklausomybe (7), kuri gali transformuotis į skirtingas išraiškas.

3 pav. pavaizduotas splainas turi fiksuotus taškus 0, A, B, C su koordinatėmis 0,0; $\sigma_{el}, \varepsilon_{el}$; $\sigma_{0,2}, \varepsilon_{0,2}$; σ_u, ε_u .

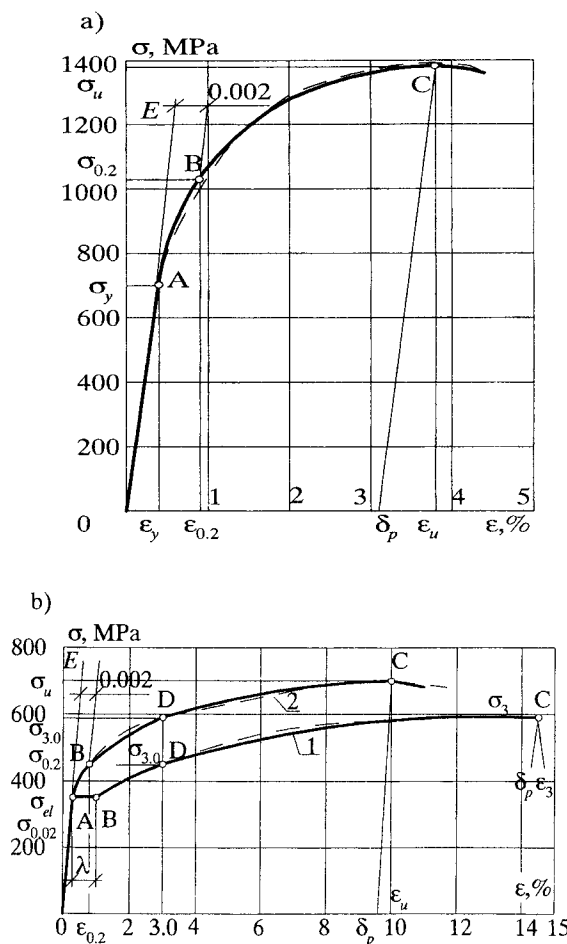
Irašant į formulę (7) reikšmes $\sigma_{S0}, \varepsilon_{S0}$ ir $\sigma_{SR}, \varepsilon_{SR}$, atitinkančias kiekvieno ruožo galus [9] kiekvienam ruožui gaunamos atitinkamos lygtys. Šio metodo analizė rodo, kad ruožui virš takumo ribos aprašyti, t. y. kai $\varepsilon_{0,2} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_u$, taikoma formulė:

$$\sigma_{S3} = \sigma_{0,2} + (\sigma_u - \sigma_{0,2}) \frac{k_{S3}\eta_s - \eta_s^2}{1 + (k_{S3} - 2)\eta_s}; \quad (8)$$

$$\eta_s = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{0,2}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{0,2}}.$$

Tempimo diagrama pirmame ruože išreiškiama tiese, antrame – parabole, trečiame – (8) lygtimi. Dydis k_{S3} randamas iš lygčių sistemos, sudarytos iš kreivių (3 pav. a, ruožai 0 – C), einančių per mazginius taškus, ir bendros liestinės vienodo kreivumo sąlygos iš kairės ir dešinės nuo taško B.

Reikia pažymėti, kad ir Euronormose [10–12] pateikiamas armatūros deformavimosi tempiant pobūdis yra panašus į 3 pav. pateikiamą. Tačiau $\sigma(\varepsilon)$ diagramos aprašymo analitinė išraiška nepateikiama, nors ji turi būti labai artima (7) lygčiai.



3 pav. Stipriosios (a) ir paprastos (b) armatūros deformavimosi diagramos: 1 – paprastos minkštosios armatūros, 2 – sustiprintos tempimu

Fig 3. Stress-strain curves for the high (a) and low (b) strength reinforcement: 1 – normal mild steel reinforcement, 2 – strengthened reinforcement

Plienų su takumo aikštele diagramos taip pat dalijamos į tris ruožus (3 pav. b), iš kurių du aprašomi pasviraja ir horizontaliaja tiesėmis, trečias – kreive pagal (7). Mazginiai taškai 0, A, B, C, D turi atitinkamas koordinatas: 0,0; $\sigma_{el}, \epsilon_{el1}$; $\sigma_{el}, \epsilon_{el2}$; $\sigma_{3,0}, \epsilon_{3,0}$; σ_u, ϵ_u . Tarpinio mazgo D taikymas, rekomenduotas [6], leidžia lengvai nustatyti nežinomą dydį k iš lygties, gautos kreivei einant per šį tašką 3-iajame ruože:

$$\sigma_{S3}(\epsilon_{3,0}) = \sigma_{3,0}, \quad (9)$$

$\sigma_{3,0}$ – įtempiai, atitinkantys $\epsilon_{3,0} = 3\%$ deformacijas.

Kiekviename ruože diagrama aprašoma lygtimis įvertinant tokias kraštines sąlygas:

$$0 \leq \epsilon_S \leq \epsilon_{el1}, \quad \sigma_{S1} = E_S \epsilon_S; \quad (10)$$

$$\epsilon_{el1} \leq \epsilon_S \leq \epsilon_{el2}, \quad \sigma_{S2} = \sigma_{el}; \quad (11)$$

$$\epsilon_{el2} \leq \epsilon_S \leq \epsilon_u,$$

$$\sigma_{S3} = \sigma_{el} + (\sigma_u - \sigma_{el}) \frac{k_{S3} \eta_S - \eta_S^2}{1 + (k_{S3} - 2) \eta_S}; \quad (12)$$

$$\eta_S = \frac{\epsilon_S - \epsilon_{el2}}{\epsilon_u - \epsilon_{el2}}.$$

Iš (10) lygties ir (12) formulės nustatomas dydis:

$$k_{S3} = \frac{(\sigma_u - \sigma_{el}) \eta_{3,0} - (\sigma_{3,0} - \sigma_{el}) \left(2 - \frac{1}{\eta_{3,0}} \right)}{\sigma_u - \sigma_{3,0}}. \quad (13)$$

Tai rodo, kad pagal šį pasiūlymą armatūros deformavimąsi virš takumo ribos galima aprašyti (11) ir (12) lygtimis.

Yra pasiūlyta dėl paprastumo kreivuosius diagramos $\sigma_s(\epsilon_s)$ ruožus tarp mazgų 0, A, B, C pakeisti tiesėmis ir siekiant didesnio tikslumo trečią ruožą rekomenduojama aproksimuoti dviem tiesėmis, taikant tarpinį mazgą D. Taip gaunamos atkarpinės – tiesinės $\sigma_s(\epsilon_s)$ diagramos, sudarytos iš 4 ruožų.

Analitinė $\sigma_s(\epsilon_s)$ priklausomybės išraiška bendruoju atveju užrašoma taip:

$$\sigma_S = \sigma_{S0} + \bar{E}_S (\epsilon_S - \epsilon_{S0}), \quad (14)$$

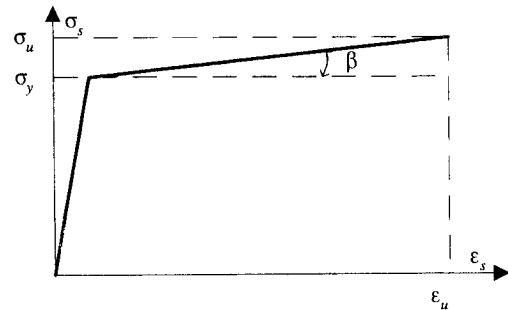
čia $\bar{E}_S = \frac{\sigma_{SR} - \sigma_{S0}}{\epsilon_{SR} - \epsilon_{S0}}$ – atskiro ruožo tiesės posvyrio kampas. Akivaizdu, kad pirmame ruože diagramos \bar{E}_S reikšmė sutampa su plieno tamprumo moduliu E_S . Ruožų

galai aprašomi tomis pačiomis koordinatėmis, kaip ir kreivųjų diagramų ruožai, įvertinant papildomą tašką D.

Praktiniam skaičiavimui tiesinę $\sigma_s(\epsilon_s)$ priklausomybę virš takumo ribos siūloma taikyti ir Euronormose [10–12]. Šios diagramos tiesios dalies (4 pav.) posvyrio kampas β priklauso nuo armatūros savybių. Laikoma, kad didžiausias pailgėjimas iki $\sigma_{max} \epsilon_s = \epsilon_u \leq 10\%$. Labai plastiškai armatūrai, kai $\epsilon_u > 5\%$, $\sigma_u/\sigma_y = 1,08$ ir kai $\epsilon_u > 2,5\%$, $\sigma_u/\sigma_y = 1,05$. Visais atvejais laikoma, kad $E_S = 200 \text{ kN/mm}^2$. Vadinasi, galima laikyti, kad posvyrio kampas β yra:

$$\beta = \text{tg} \frac{\sigma_u - \sigma_y}{\epsilon_u - \frac{\sigma_u}{E_S}}. \quad (15)$$

Tai leidžia nesunkiai apskaičiuoti armatūros deformacijas virš takumo ribos. Tačiau yra įrodyta [13], kad skaičiuojant gelžbetoninių konstrukcijų deformacijas, medžiagų $\sigma(\epsilon)$ diagramos forma turi didelę įtaką rezultatų tikslumui. Todėl kreivosios diagramos analitinis aprašymas turi didelę reikšmę tikslesniam mišriai armuotų gelžbetoninių konstrukcijų būvio po apkrova aprašymui.



4 pav. Įtempių-deformacijų priklausomybė pagal Euronormas (15)

Fig 4. Stress-strain curve by Eurocode formula (15)

Mūsų atlikta $\sigma(\epsilon)$ priklausomybių analizė rodo jų įvairovę, vertinant kai kurias armatūros savybių charakteristikas.

5 pav. pateiktų $\sigma(\epsilon)$ priklausomybių grafikų, gautų pagal įvairių autorių pasiūlytas formules ((2), (4), (5), (7), (15)), analizė rodo skirtingus rezultatus, palyginti su eksperimentiniais duomenimis.

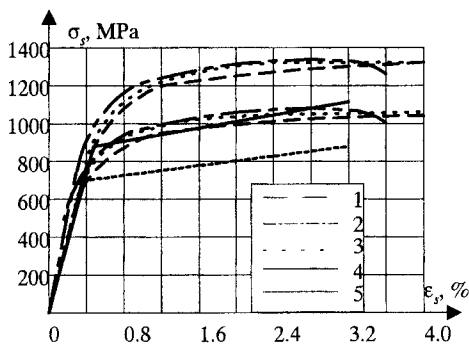
3. Įvairių klasių armatūrų deformavimosi apibendrinimas analitinis aprašymas

Kaip rodo atlikta analizė, nėra nusistovėjusios metodikos ir analitinės išraiškos aprašyti tampriai plastinius

armatūros įtempius-deformacijas. Daugumai šių būdų yra artima arba toliau tobulinama tokia lygtis [7]:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} + C \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_s \right)^n \quad (16)$$

Ji rekomenduojama plienams, kurių $\sigma_u / \sigma_{0,2} \approx 1,05 \div 1,17$. Reikia pažymėti, kad šios ribos daugeliu atvejų atitinka tarptautinių standartų reikalavimus [10–12].



5 pav. Teorinių priklausomybių palyginimo analizė armatūrai A_T VI ir A_T V; 1 – pagal (2, 4) formules; 2 – pagal (5); 3 – pagal (7); 4 – pagal Euronormas (15) A_T VI armatūrai; 5 – pagal Euronormas (15) A_T V armatūrai

Fig 5. Agreement of theoretical stress-strain curves of A_T VI and A_T V reinforcement; 1 – by formulas (2, 4); 2 – by formula (5); 3 – by formula (7); 4 – by Eurocode formula (15) for A_T VI reinforcement; 5 – by Eurocode formula (15) for A_T V reinforcement

Mūsų atlikta analizė taip pat rodo, kad (16) priklausomybė gali būti taikoma įvairių klasių armatūros deformavimuisi aprašyti. Ją palyginus su eksperimentiniais duomenimis [14], matyti, kad koeficientas η_s lygus santykiui $\sigma_{0,2} / \sigma_u$. Koeficiento n reikšmę reikia imti atsižvelgiant į $\sigma_{0,2} / \sigma_u$ santykį, o koeficiento C reikšmę – priklausomai nuo plieno klasės.

C , η_s ir n koeficientai buvo taikomi įvertinant armatūros klasių savybes ir atsižvelgiant į mūsų ir [7] pateiktus eksperimentinius duomenis. Be to, sąlyginės takumo ribos viršijimui nustatyti, atsižvelgiant į (16) išraišką, siūloma tokia formulė:

$$\varepsilon_s = C \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_s \right)^{n_1} \quad (17)$$

Atlikta eksperimentinių duomenų analizė ir teoriniai skaičiavimai parodė, kad C , η_s ir n_1 koeficientų reikšmės priklauso nuo armatūros klasės (1 lent.).

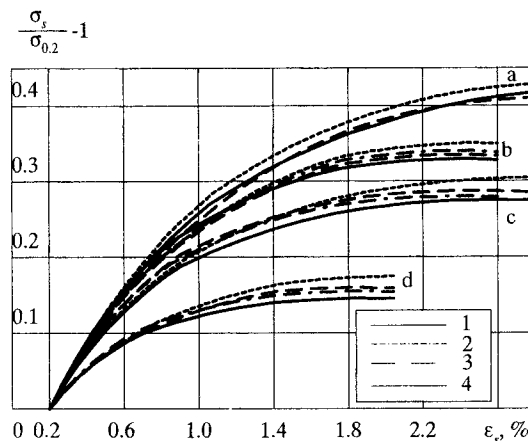
6 pav. pateikti duomenys rodo, kad mūsų pasiūlytos tampriai plastinių armatūros deformacijų skaičiavimo

metodikos rezultatai geriau sutampa su eksperimentiniais duomenimis nei skaičiavimas pagal (16).

1 lentelė. Koeficientai C , η_s ir n_1

Table 1. Coefficients C , η_s and n_1

Armatūros klasė	C	η_s	n_1
A _T IV	0,069	0,70	$n \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s}$
A IV	0,079	0,70	
A _T V	0,092	0,75	
A V	0,100	0,75	
A _T VI	0,115	0,80	



6 pav. Eksperimentinių ir teorinių kreivių palyginimas: a – armatūra A_T IV; b – A V; c – A_T V; d – A_T VI; 1 – eksperimentiniai pagal [7]; 2 – eksperimentiniai pagal [14]; 3 – teoriniai pagal (17) formulę; 4 – teoriniai pagal (16) formulę

Fig 6. Agreement of experimental and theoretical stress-strain curves for A_T IV reinforcement (a); A V reinforcement (b); A_T V reinforcement (c); A_T VI reinforcement (d); 1 – experimental by [7]; 2 – experimental by [14]; 3 – theoretical by formula (17); 4 – theoretical by formula (16)

Kadangi tikslus analitinis armatūros $\sigma(\varepsilon)$ kreivės priklausomybės aprašymas praktiškai neįmanomas, reikia įvertinti šios kreivės paklaidas. Kaip deformacijų skaičiavimo pagrindas imta tokia priklausomybė:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} + C \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{0,2}} - \eta_s \right)^{n \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s}} \quad (18)$$

6 pav. kreivių analizė rodo, kad skaičiavimo rezultatai ne tik gerai sutampa su eksperimentais, bet ir yra nepertraukiama funkcija. Kaip buvo pateikta, taip pat pagal [7], veiksniai, nulemiantys priklausomybės $\sigma(\varepsilon)$ tikslumą, yra koeficientai C , η_s ir n (18 formulė). Norint įvertinti šių veiksnių įtaką $\sigma(\varepsilon)$ diagramų formai, buvo imtos įvairios jų reikšmės (2 lent.).

2 lentelė. Koeficientų C , η_s ir n_1 reikšmės

Table 2. Values of coefficients C , η_s and n_1

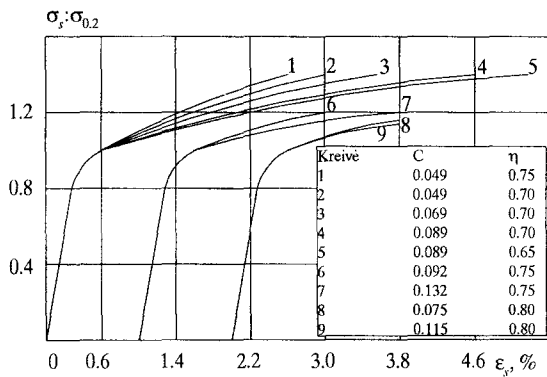
Armatūros klasė	C	η_s	n_1
A IV	0,049;0,059 0,069;0,079 0,089	0,65; 0,70; 0,75 0,65; 0,70	3; 3,5 4; 4,5
A _T IV	0,079;0,089 0,099;0,109 0,119	0,75 0,70; 0,75	
A V	0,092;0,102 0,112;0,122 0,132	0,80 0,70; 0,75	
A _T V	0,100;0,110 0,120;0,130 0,140	0,80 0,75; 0,80	
A _T VI	0,750;0,085 0,095;0,105 0,115	0,85	

$$\epsilon_s = \begin{cases} \frac{\sigma_s}{E_s}, 0 \leq \sigma_s \leq \sigma_{el1} \\ \frac{\sigma_s}{E_s}, \sigma_{el1} \leq \sigma_s \leq \sigma_{el2} \\ \sqrt{\frac{D+G\sigma_s}{1+F\sigma_s}}, \sigma_{el2} \leq \sigma_s \leq \sigma_u \end{cases}, \quad (19)$$

D, F, G – koeficientai, priklausantys nuo armatūros klasės.

Kiekvienos klasės armatūrai koeficientai yra skirtingi. Pavyzdžiui, A III klasės armatūriniam plienui $D=-0,87 \cdot 10^{-3}$; $F=-1,37 \cdot 10^{-3}$; $G=0,0014 \cdot 10^{-3}$. Tarptautiniame standarte ISO 100 80 armatūrai B500A šie koeficientai lygūs atitinkamai: $D=-0,85 \cdot 10^{-3}$; $F=-1,58 \cdot 10^{-3}$; $G=0,00167 \cdot 10^{-3}$.

Gauta eksperimentinė kreivė ir teorinių priklausomybių grafinė išraiška pateikti 8 pav.

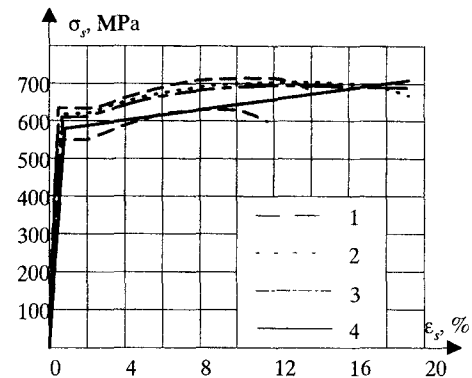


7 pav. Armatūros diagramos formos priklausomybė nuo koeficientų C , η_s ir n

Fig 7. Influence of different values of the coefficients C , η_s and n on the form of stress-strain curves of reinforcement

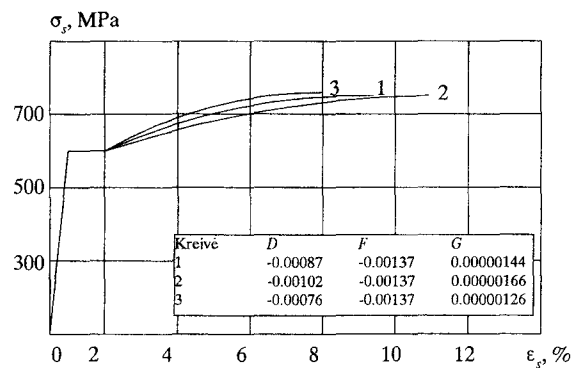
7 pav. pateikta diagrama rodo, kad priklausomai nuo armatūros savybių $\sigma(\epsilon)$ diagramos virš takumo ribų diapazonas gana platus.

Armatūrinių plienų su aiškiai išreikšta takumo aikštele $\sigma(\epsilon)$ diagramos analitiniams skaičiavimui pateikiamos apibendrintos metodikos [8, 9]. Įtempių-deformacijų kreivės išreiškiamos ne sklandžia kreive, kuri būtų aprašoma viena lygtimi, bet dalijamos į ruožus. Aprašant viena lygtimi prarandamas tikslumas takumo aikštelės ruože. Mūsų atlikti bandymai su šia armatūra leidžia pateikti išraišką, kuri pakankamai tikslai rodo minkštųjų plienų deformavimosi pobūdį. Gauta tokia analitinė priklausomybė:



8 pav. Minkštojo plieno deformavimosi schemas: 1 – eksperimentiniai pagal [15, 16]; 2 – autorių eksperimentai; 3 – teoriniai pagal (19) formulę; 4 – teorinė pagal Euronormas (15)

Fig 8. Stress-strain curves for mild steel reinforcement: 1 – experimental by [15, 16]; 2 – experimental developed by authors of the present paper; 3 – theoretical by formula (19); 4 – theoretical by Eurocode formula (15)



9 pav. Armatūros diagramos formos priklausomybė nuo koeficientų D, F ir G

Fig 9. Influence of different values of the coefficients C , η_s and n on the form of stress-strain curves of reinforcement

Palyginus šiuos duomenis matyti, kad eksperimentiniai ir teoriniai rezultatai, apskaičiuoti pagal siūlomą (19) priklausomybę, gerai sutampa. Šie tyrimai taip pat rodo, kad taikant Euronormose siūlomą metodiką minkštiesiems plienams ne visada gaunami pakankamai geri rezultatai. Joje neįvertinama krintančioji kreivės dalis, kas ypač svarbu analizuojant konstrukcijų būvį irimo stadijoje arba nustatant įrašų persiskirstymą.

Iš 9 pav. pateiktos diagramos matyti, kad priklausomai nuo armatūros savybių $\sigma(\epsilon)$ diagramos virš takumo ribų diapazonas yra gana platus.

4. Išvados

1. Analizuojant gelžbetoninių konstrukcijų deformavimąsi įvairiose stadijose, įskaitant irimo stadiją, nustatant įrašų persiskirstymą tarp įvairiai įtemptų armatūrų yra būtina žinoti tiksliai tempiamosios armatūros deformavimosi $\sigma(\epsilon)$ priklausomybes.

2. Armatūros $\sigma(\epsilon)$ diagramoms aprašyti taikoma daug įvairių priklausomybių. Jų analizė parodė, kad, skaičiuojant gelžbetonines konstrukcijas, medžiagų $\sigma(\epsilon)$ diagramos forma ir aprašymas turi didelę įtaką rezultatų tikslumui. Ypač didelę reikšmę turi diagramos dalies virš takumo ribos forma.

3. Įvairių autorių pasiūlytos priklausomybės skirtingai sutampa su eksperimentiniais rezultatais, skiriasi savo sudėtingumu ir praktinio taikymo galimybėmis.

4. Atlikus teorinius bei eksperimentinius tyrimus ir juos palyginus su kitų autorių darbais, pasirodė, kad geriausi rezultatai priklausomybei virš takumo aprašyti gaunami taikant (17) ir (19) formules.

5. Pasiūlytos lygtys ir jų koeficientai tinka įvairių klasių, taip pat ir tarptautiniame standarte ISO-100 80 reglamentuojamų savybių armatūrų $\sigma(\epsilon)$ priklausomybėms virš takumo ribos aprašyti.

Literatūra

1. A. Šneideris. Stiprinamų lenkiamų gelžbetoninių konstrukcijų pradinio įtempimų-deformacijų būvio teorinio įvertinimo prielaidos // Pirmosios respublikinės jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 1998 09 30 – 10 02, medžiaga. 1 t. V.: Technika, 1998, p. 165–171.
2. G. Marčiukaitis, A. Šneideris. Eksploatuojamų lenkiamų gelžbetoninių konstrukcijų įtempimų-deformacijų būvio įvertinimo metodų parinkimo klausimu // Statybinės konstrukcijos: kūrimas ir stiprinimas. Konferencijos, įvykusios Vilniuje 1998 m. lapkričio 20 d., pranešimų medžiaga. V.: Technika, 1998, p. 43–47.

3. Z. Kamaitis, V. Jokūbaitis. Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų atstatymas ir stiprinimas. Mokomoji knygelė. Vilnius: Technika, 1986. 92 p.
4. Д. Н. Лазовский. Теория расчета и конструирование железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений // Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 1998. 41 с.
5. Б. А. Макеров, Л. Р. Маилян. Аналитическое описание диаграммы растяжения высокопрочной арматурной стали // Новые виды арматуры и ее сварка. Всесоюзное совещание. Тезисы докладов. Волгоград, сентябрь 1982. М.: Госстрой СССР, НИИЖБ, 1982, с. 166–171.
6. В. Н. Байков, С. А. Мадатян, Л. С. Дудолодов, В. М. Митасов. Об уточнении аналитических зависимостей диаграммы растяжения арматурных сталей // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1983, № 9, с. 1–5.
7. Н. М. Мулин. Стержневая арматура железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1975. 233 с.
8. Кодекс-образец ЕКБ-ФИП для норм по железобетонным конструкциям. М.: Стройиздат, 1984.
9. ENV 10080: 1995 D. European Committee for standardization. Steel for the Reinforcement of concrete weldable ribbed reinforcing steel B 500. Technical delivery conditions for bars, coils and welded fabric. Bruxelles, 1995. 80 с.
10. British Standards Institution. Eurocode2: Design of Concrete Structures – Part I. General Rules and rules of Buildings, London, 1992. DD ENV 1922-1-1: 1992. 364 с.
11. Concrete Structures Euro-Design Handbook. Edit. by Eibl J., Berlin, Erkstand Sohn, 1995. 754 p.
12. Л. Р. Маилян. Сопротивление железобетонных статически неопределимых балок силовым воздействиям. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 1989. 176 с.
13. Г. В. Марчюкайтис. Влияние формы полных диаграмм $\sigma(\epsilon)$ материалов на прочность и кривизну изгибаемых армированных бетонополимерных материалов // Тезисы докладов республиканской конференции “Физико-механические свойства бетонов с полимерами”. Вильнюс, 1978, с. 40–43.
14. Г. В. Марчюкайтис. Исследование физико-механических свойств бетона и железобетона, пропитанных полимерами, и учет их особенностей при расчете конструкций: Дис. ... д-ра техн. н. Вильнюс – Москва, 1979. 407 с.
15. С. А. Мадатян. Общие тенденции производства и применения обычной и напрягаемой арматуры // Бетон и железобетон, 1997, № 1, с. 2–5.
16. С. А. Мадатян. Новое поколение арматуры железобетонных конструкций // Бетон и железобетон, 1998, № 2, с. 2–5.

Įteikta 1999 09 20

DETERMINATION OF RELATIONSHIP $\sigma(\epsilon)$ OVER THE YIELD STRESS OF CONCRETE REINFORCING STEELS

G. Marčiukaitis, A. Šneideris

S u m m a r y

Calculating and designing the tension zone of strengthening concrete structures and analysing its workability in stages which are close to break-up stage and distribution internal forces, existing various reinforcements, it is necessary to know

characteristics of deformation and their change. Experiments show that forms of relationship between stress and strain of concrete reinforcing steels have great influence on accuracy of determination of reinforced concrete structures during all work stages of these structures. There are various analytic expressions for describing relationship of stress-strain and deformation of reinforcement. Our analysis showed that results of calculation for the same type of reinforcement are different. Methods suggested by Eurocode 2 also do not give accurate analytic expression of $\sigma(\epsilon)$ diagrams part over yield limit.

The analysis and comparison of offered analytic $\sigma(\epsilon)$ expressions showed that the basis of a more accurate description of this relationship may be the accepted formula (16). Its application for description of $\sigma(\epsilon)$ relationship of different classes of reinforcing steel is suggested. Formula (17) is suggested for description of $\sigma(\epsilon)$ over yield point. Equation (19) is suggested for description of mild steels and deformation of reinforcement over yield limit by standard ISO – 100 80.

Gediminas MARČIUKAITIS. Professor, Doctor Habil. Head of Dept of Reinforced Concrete and Masonry Structures. Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Saulėtekio al. 11, LT-2040 Vilnius, Lithuania.

A graduate of Civil Engineering Faculty of Kaunas Polytechnic Institute (1957). PhD (1963). Research visit to the University of Illinois (1969). Doctor Habil (1980, Moscow Civil Engineering Institute). Professor since 1982. Author and co-author of 5 monographs, 4 text-books and about 300 scientific articles. Research interests: mechanics of reinforced concrete, masonry and layered structures, new composite materials, structures and investigation and renovation of buildings.

Arnoldas ŠNEIDERIS. MSc (Eng). Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Saulėtekio al. 11, LT-2040 Vilnius, Lithuania.

A graduate of Vilnius Technical University (1993, civil engineer). MSc (1995). Doctoral student (Dept of Reinforced Concrete and Masonry Structures, VGTU). Research interests: mechanics of reinforced concrete, strengthening of structures.