



## GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ STIPRINIMO ANGLIES PLUOŠTU TECHNOLOGINIAI IR KONSTRUKCINIAI YPATUMAI

**Juozas Valivonis, Gediminas Marčiukaitis**

*Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva  
El. paštas [gelz@st.vtu.lt](mailto:gelz@st.vtu.lt)*

*Įteikta 2006-03-15; priimta 2006-06-15*

**Santrauka.** Konstrukcijoms stiprinti paskutiniu metu naudojamas anglies pluoštas, kuris yra kur kas stipresnis už plieną ir turi geresnių deformacinių savybių. Klijuojant pluoštą klijai įsigeria į paviršinius betono sluoksnius. Tai pakeičia fizines ir mechanines betono savybes, kurios priklauso nuo jo struktūros. Eksperimentiniai gelžbetoninių sijų tyrimai patvirtino klijų įsigėrimo į betoną ir betono sustiprėjimo prielaidą. Nustatyta, kad supleišėjus gelžbetoninių konstrukcijų tempiamajai zonai, betono ir anglies pluošto jungties standumas sumažėja. Jungtyje išryškėjusios šlyties deformacijos sumažina sustiprinto elemento standumą ir stiprumą. Buvo nagrinėti ir papildomi anglies pluošto tvirtinimo būdai. Nustatyta jų įtaka stiprinimo efektyvumui. Pateikta sustiprintų elementų stiprumo skaičiavimo metodika, leidžianti įvertinti anglies pluošto ir betono jungties standumą. Gauti rezultatai palyginti su eksperimentinių tyrimų rezultatais.

**Reikšminiai žodžiai:** gelžbetoninės konstrukcijos, stiprinimas, anglies pluoštas, tvirtinimo būdai, jungties standumas, efektyvumas.

## TECHNOLOGICAL-STRUCTURAL PECULIARITIES OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES STRENGTHENED WITH CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER

**Juozas Valivonis, Gediminas Marčiukaitis**

*Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania  
E-mail: [gelz@st.vtu.lt](mailto:gelz@st.vtu.lt)*

*Received 15 March 2006; accepted 15 June 2006*

**Abstract.** Carbon fiber-reinforced polymer is used for strengthening of reinforced concrete structures with externally bonded reinforcement. This fiber has more strength and better deformation properties than steel. During glueing, the glue is absorbed in the surface layer of concrete. It changes physical and mechanical properties of concrete. This effect depends on the structure of concrete. Experimental investigations sustained absorbing of glue and strengthening of concrete. The rigidity between concrete and carbon fiber polymer layer is smaller in cracked zones. Shear deformations decrease rigidity and strength in a contact zone.

The authors methods were investigated in fastening carbon fiber-reinforced polymer to concrete. The efficiency of these methods was defined. Theoretical results are compared with experimental results.

**Keywords:** reinforced concrete, strengthening, carbon fiber-reinforced polymer, mode of maintenance, stiffness of the connection, economical.

## 1. Įvadas

Eksploatuojami pastatai laikui bėgant nusidėvi, atsiranda įvairaus pobūdžio pažeidimų, kurios gerokai sumažina laikančiųjų konstrukcijų stiprumą. Dažnai keičiama pastatų paskirtis, dėl ko labai padidėja laikančiųjų konstrukcijų veikiančiosios apkrovos.

Dėl šių priežasčių esamus pastatus tenka rekonstruoti. Pastato rekonstrukcijos metu dalis laikančiųjų konstrukcijų gali būti pakeistos naujomis. Tačiau dažnai pastate yra laikančiųjų konstrukcijų, kurioms pakeisti reikėtų gana nemažai pastatą išardyti. Atsižvelgiant į tai, dėl ekonominių priežasčių rekonstruojamame pastate esamas konstrukcijas tenka stiprinti.

Konstrukcijos stiprinamos įvairiais būdais ir medžiagomis. Iki paskutinių metų gelžbetoninės konstrukcijos buvo stiprinamos dviem pagrindiniais būdais: naujų sluoksnių pribetonavimu arba naudojant metalinius elementus. Tačiau šie dar plačiai taikomi stiprinimo būdai turi daug trūkumų. Taikant apibetonavimo būdą, padidėja konstrukcijų skerspjūvio matmenys, jų sunkis, įrengimo technologija daugeliu atvejų yra sunkiai pritaikoma. Gelžbetoniniams elementams stiprinti naudojant plieninius profilius, lakštus, strypus ir pan., kyla klausimų, kaip juos įtraukti į bendrą darbą ir prižiūrėti, norint išvengti korozijos poveikių. Todėl paskutiniu metu vis plačiau naudojamos įvairios kompozitinės medžiagos ir jų dirbiniai, kurie priklijuojami prie stiprinamų konstrukcijų atitinkamo, dažniausiai tempiamojo, sluoksnio [1–8].

Tačiau stiprinant konstrukcijas klijuojamais medžiagos sluoksniais, taip pat kyla daug technologinių ir konstrukcinių problemų. Tai susiję su stiprinamos konstrukcijos ir priklijuoto sluoksnio bendro darbo užtikrinimu [6–8]. Kita vertus, kompozitinės medžiagos turi fizinių ir mechaninių savybių, gerokai besiskiriančių nuo klasikinių statybinių medžiagų betono ir plieno savybių. Todėl jas įtraukti į bendrą darbą ir išnaudoti jų savybes yra svarbu, tobulinant ne tik technologinius stiprinimo metodus, bet ir užtikrinant sustiprintų konstrukcijų patikimumą ir ekonominę naudingumą [9–12]. Tam būtina tobulinti skaičiavimo ir projektavimo metodus bei kurti naujus. Tyrimai rodo [13–15], kad nėra vieningos nuomonės dėl konstrukcijų iš betono ir lakštinių sluoksnių tempiamojoje zonoje skaičiavimo metodų. Labiausiai tai susiję su sąlyčio tarp betono ir priklijuojamo sluoksnio elgsenos įvertinimo, skaičiuojant laikomąją galią. Trūksta teorinių ir eksperimentinių duomenų apie sluoksnių jungčių srities savybes, ir mechanines, fizines ir chemines priemones, užtikrinančias jos standumą.

## 2. Kompozitinių medžiagų parinkimo konstrukcijoms stiprinti pagrindiniai reikalavimai

XXI a. ekonomika ir apskritai pažanga bus grindžiama viena iš pagrindinių prioritetinių krypčių – kompozitinių

medžiagų ir informacinių technologijų kūrimu ir naudojimu. Tai siejasi su energijos ir laiko taupymu, vis naujais proto laimėjimais ir jų taikymo tempais.

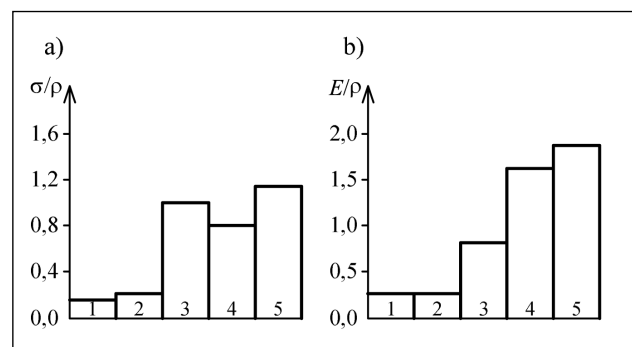
Statybos poreikiams kompozitinės medžiagos pradėtos naudoti apie XX a. vidurį, kilus būtinybei plačiau naudoti lengvesnes ir stipresnes medžiagas, leidžiančias statyti didelio aukštingumo ir didelių angų statinius.

Iš esamų ir kuriamų kompozitinių medžiagų įvairovės daug jų galima pasirinkti pagal norimus įvykdyti visai konstrukcijai keliamus reikalavimus. Gelžbetoninėms konstrukcijoms gaminti ir stiprinti turi būti panaudotos medžiagos ir gaminiai, kurie būtų nesunkiai sujungiami su betonu, būtų stiprūs, lengvi, turėtų kuo didesnę tamprumo modulį.

Dideliu šuoliu, kuriant efektyvias kompozitines medžiagas ir konstrukcijas praėjusio amžiaus viduryje, buvo boro ir jo junginių su kitais mineralais pluoštai ir gauti nauji boro kompozito plastikai, kurie 10–15 kartų stipresni nei statybinis plienas ir 3–4 kartus lengvesni. Vėliau buvo sukurti ir pradėti naudoti labai didelio tamprumo modulio ir stiprumo anglies pluoštai, suteikę galimybę gauti dar geresnių savybių kompozitus [16, 17].

Kiekvienos statybinės konstrukcijos gaminti skirtos medžiagos pagrindiniai rodikliai yra: stiprumas ( $f$ ), tamprumo ir deformacijų moduliai ( $E$ ) ir jų santykis su sunkiu ( $\rho$ ). Kaip rodo 1 pav. pateikti duomenys pagal nurodytus rodiklius, efektyviausia kompozitinė medžiaga yra anglies pluoštas. Pagal stiprumą jis 8 kartus, o pagal deformacines savybes – 7 kartus efektyvesnis už kitas kompozitines medžiagas.

1 pav. nurodyti pluoštai gelžbetoninėms konstrukcijoms stiprinti naudojami, kai iš jų pagaminamos specialios plokštės, audiniai, lynai. Šių kompozitų pagrindinės fizinės ir mechaninės savybės priklauso nuo pluošto ir jų jungiančios medžiagos – polimerų (matricos) savybių. Tokiu būdu naudojamo stiprinti gaminio konstrukcinės savybės priklauso nuo abiejų komponentų savybių. Šią priklausomybę galima aprašyti žinomu „mišinio“ dėsnium:



**1 pav.** Kompozitų komponentų lyginamieji stipriai  $\sigma/\rho$  (a) ir tamprumo moduliai  $E/\rho$  (b): 1 – plieno; 2 – aliuminio; 3 – stiklo pluošto; 4 – boro pluošto; 5 – anglies pluošto

**Fig 1.** Comparative strength  $\sigma/\rho$  (a) and modulus of elasticity  $E/\rho$  (b) of components of composite: 1 – steel; 2 – aluminium; 3 – glass fiber; 4 – boron fiber; 5 – carbon fiber

$$A_c = A_1V_1 + A_2V_2 + \dots, A_nV_n, \quad (1)$$

čia  $A_c$  – kompozito savybė;  $A_1, \dots, A_n$  – komponento savybė;  $V_1, \dots, V_n$  – atitinkamo komponento santykinis tūris ( $V = V_1 + V_c + \dots + V_n = 1$ ).

Daugeliu atvejų stiprinti naudojami anglies pluoštai į gaminių sujungiami polimerine derva, kurios kiekis (pagal tūrį) sudaro ne daugiau kaip 5 % bendro tūrio. Vadinasi, stiprinti naudojamų pluoštų gaminių stiprumas ir kitos savybės imamos tokios pat, kaip ir pluošto.

Šio straipsnio ir kitų autorių atlikti tyrimai rodo, kad anglies pluoštas iki pat tempiamosios irties dirba tampriai, o betonas beveik nuo pat pradžios tampriai ir plastiškai (2 pav.).

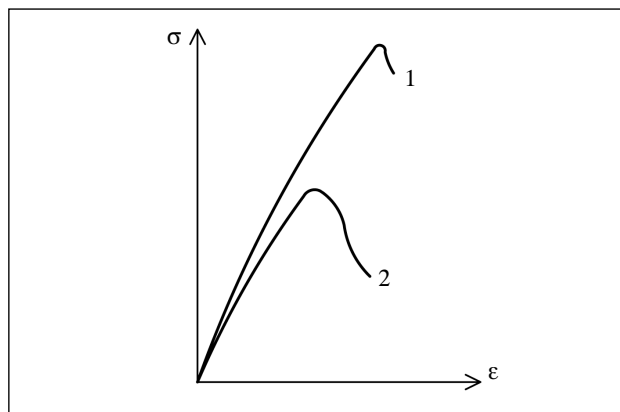
Anglies pluošto tamprumo modulis yra 6–10 kartų didesnis už betono tamprumo modulį, atsižvelgiant į betono stiprumą.

Kitas svarbus komponentas – klijai, nuo kurių priklauso bendro anglies pluošto ir betono darbo pobūdis. Pagrindinis jiems keliamas reikalavimas – kuo geresnė sukibtis su betonu ir anglies pluoštu, didesnis tamprumo modulis ir tempiamasis bei gniuždomasis stipris, nuo kurių priklauso kerpamasis stipris. Nuo sluoksnių jungties stiprumo ir standumo priklauso bendras sustiprintos konstrukcijos standis. Klijų tempiamasis stipris yra 10–11 kartų didesnis už betono tempiamąjį stiprį, o tamprumo modulis 6–8 kartus mažesnis. Tai rodo, kad veikiant šlyties įtempiams, anglies pluoštas gali pasislinkti betono atžvilgiu horizontaliaja kryptimi nesuardamas.

### 3. Betono technologinių savybių įtaka bendram anglies pluošto ir betono darbui

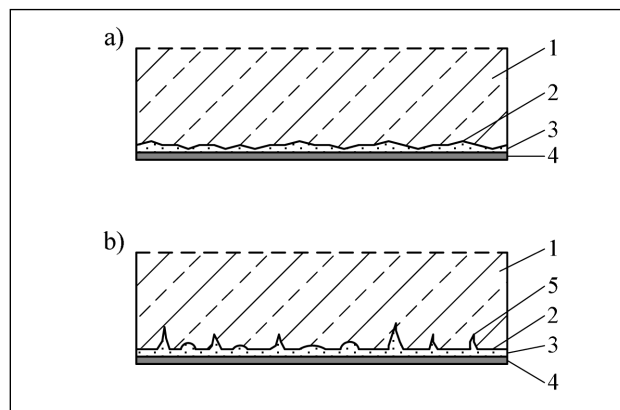
Anglies pluošto jungtyje su betono sluoksniu svarbiausias dalykas yra adhezija. Adhezijos reiškiniai ir jos įtakai dviejų sluoksnių sujungimo procesui įvertinti yra įvairių koncepcijų. Tačiau atlikti eksperimentiniai tyrimai ir teorinė analizė rodo, kad šios koncepcijos priskiriamos tik atskiro vieno tipo medžiagoms ir priklauso nuo besiliečiančių sluoksnių paviršiaus fizinės ir mechaninės būsenos. Sukietėjusiems betoniniams gaminiams ir anglies pluoštui suklijuoti ir adhezijai įvertinti tinkamiausios yra šios koncepcijos: 1) mechaninė, kuri pirmenybę teikia paviršiaus mikroreljefui; 2) absorbcinei, pagal kurią absorbuojamas adhezyvas (klijai); 3) mikroreologinė, pabrėžiant klijų išskverbimą į betono poras, kapiliarus ir kitus defektus.

Apskritai visos šios prielaidos glaudžiai susijusios. Jų tvarka ir pagrįstumas priklauso nuo visų trijų komponentų savybių bei klijavimo technologinių procesų. Be minėtų anglies pluošto ir klijų savybių, didžiausią įtaką jungties zonos savybėms turi klijų tankis ir rišlumas, nes nuo jų priklauso absorbcija ir įgertis į betoną. Kaip rodo 3 paveikslas, betono (substrato) paviršiaus nelygumai padidina klijų ir betono sąlyčio paviršių ir daugeliu atvejų jie



2 pav. Tempiamo anglies pluošto (1) ir betono (2) deformavimosi charakteris

Fig 2. Character of deformation of carbon fiber (1) and concrete (2)



3 pav. Klijų pasiskirstymas betono paviršiuje: a – tankaus betono paviršius nelygus; b – betono paviršiuje atviros poros ir kapiliarai. 1 – betonas; 2 – betono paviršius; 3 – klijai; 4 – klijais užpildytos poros ir kapiliarai

Fig 3. Distribution of glue on surface concrete: a – rigid concrete; b – concrete with pores and capillaries; 1 – concrete; 2 – surface of concrete; 3 – glue; 4 – pores and capillaries filling with glue

tampa sprauskeliais. Dėl adsorbcijos ir molekulių sąveikos gali išryškėti fizinis ir cheminis ryšys, tačiau tarp betono ir klijų jis yra labai mažas.

Sluoksnių jungties stiprumas priklauso ir nuo jungiamų sluoksnių medžiagų savybių. Be to, adheziniam stiprumui įtakos turi ir pačių sluoksnių storis [18].

Sluoksnių jungties srityje medžiagos savybės gali skirtis nuo atskirų sluoksnių medžiagų savybių. Tai patvirtina ir mūsų tyrimai su polimerais impregnuotu betonu [19, 20]. Buvo išbandyti betono pavyzdžiai, kurių kapiliarai ir poros užpildyti polimerais. Sluoksnių jungties srityje betono kietumas buvo 4–5 kartus didesnis už atitinkamų atskirų komponentų kietumą ties jų viduriu. Viena iš pagrindinių šio efekto atsiradimo priežasčių yra medžiagos dalelių dislokacijų blokavimas. Vieno sluoksnio defektai yra blokuojami kito sluoksnio nedefektiniais paviršiais. Tai sumažina įtempimų koncentraciją, juos tolygiai paskirsto tarp sluoks-

nių ir atskirų jų ruožų. Dėl to sluoksniuoti elementai yra atsparesni defektų įtakai ir gali daugiau deformuotis. Tai įrodo ir tempiamo polimerais impregnuoto betono elgsena. Tokio betono tempiamosios deformacijos 2–3 kartus didesnės už tokio pat neimpregnuoto tempiamojo elemento deformacijas. Didžiausią įtaką medžiagų sukimbamajam stipriui turi į poras ir kapiliarus įsigėrę klįjai. Tai rodo, kad betono struktūra ir jo paruošimas yra esminiai technologiniai veiksniai, lemiantys betono ir anglies pluošto jungties stiprumą.

Stiprinamų gelžbetoninių konstrukcijų betono struktūra būna jau susiformavusi. Apie jos poringumą galima spręsti pagal betono mišinio sudėtį. Mūsų tyrimai parodė, kad klįjais, kaip ir kitais polimerais, gali užsipildyti tik 1/3 kapiliarų porų. Kapiliarinis poringumas priklauso nuo daugelio technologinių veiksnių: vandens ir cemento kiekio betono mišinyje; jo išmaišymo; sutankinimo; kietėjimo sąlygų; cemento hidratacijos laipsnio ir kt. Šių veiksnių įtaką aprašo tokia priklausomybė [21]:

$$V_{\text{por.}} = \frac{B - 0,21 \cdot \alpha \cdot C}{1000}, \quad (2)$$

čia  $V_{\text{por.}}$  – poringumas;  $V$  ir  $C$  – vandens ir cemento kiekis, kg;  $\alpha$  – cemento hidratacijos laipsnis, kuris priklauso nuo pagrindinių technologinių veiksnių.

Mūsų atlikta analizė parodė, kad jis gali būti apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\alpha = \frac{15 \cdot S + 0,6 \cdot C}{C} \sqrt{\frac{f_c(t)}{f_c}}, \quad (3)$$

čia  $S$  – betono mišinio slankumas;  $f_c(t)$  – betono stipris tyrimo metu;  $f_{c,\text{max}}$  – betono stipris pasibaigus hidratacijai ( $f_{c,\text{max}} = 1,6 f_c$ ).

Jeigu nėra žinių apie gelžbetoninių konstrukcijų betono visus technologinius rodiklius, tai poringumą siūloma nustatyti pagal tokią empirinę formulę:

$$V_{\text{por.}} = \frac{0,6 \cdot V + 0,19 \cdot C}{1000} \exp(-2,6 \cdot 10^{-5} \cdot f_c). \quad (4)$$

Klįjais užpildytas santykinis porų tūris  $V_g \approx 0,35 V_{\text{por.}}$  gylyje

$$d_{\text{im}} = 0,35 \cdot \left[ \Phi_{\text{ag}} \left( \frac{V}{C} \right)^{3/2} + \frac{C}{100} - 0,1 \cdot \Phi_{\text{ag}}^{1/2} \right], \quad (5)$$

čia  $\Phi_{\text{ag}}$  – didžiausias betono užpildų diametras (mm).

Mūsų tyrimai parodė, kad  $d_{\text{im}}$  storio sluoksnyje betonas sustiprėja 1,6–1,7 karto. Toks sluoksnis laikomas pereinamoju. Geriausiai pereinamojo sluoksnio įvertinimą charakterizuoja jos deformacijų modulis ir storis. Nagrinėjamoju atveju – klįjų įgerties gylis. Tyrimai, atlikti su C20/25–C35/40 klasės betonais, ant kurių buvo tepami klįjai, parodė,

kad įsigėrimo gylis buvo 2–5 mm. Tai priklauso nuo minėtų technologinių veiksnių, nuo kurių priklauso betono poringumas. Atlikti tyrimai parodė, kad klįjai į betoną įsigeria 2–8 mm. Pereinamojoje srityje susidaro dvikomponentis kompozitinis sluoksnis, kurio matrica yra betono skeletas, o intarpai – porose ir kapiliaruose sukietėję klįjai. Tačiau ne visi šiame sluoksnyje kapiliarai ir poros užsipildo klįjais.

#### 4. Anglies pluoštu sustiprintų elementų eksperimentiniai tyrimai

Eksperimentinės sijos buvo pagamintos iš sunkiojo betono. Sijos gamintos dviem etapais. Pirmosios grupės sijų betono stipris  $f_c = 32,87 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_{cm} = 31,45 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$  ir betono sudėtis tokia:  $V/C = 0,52$ ,  $C = 350 \text{ kg/m}^3$ . Antrosios sijų grupės  $f_c = 38,27 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_{cm} = 34,1 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$  ir  $V/C = 0,51$  ir  $C = 350 \text{ kg/m}^3$ . Užpildai žvyro skalda ir  $\varnothing_{\text{max}} = 18 \text{ mm}$ . Sijų tempiamoji zona buvo armuota 2 $\varnothing$ 6 plienine armatūra, kurios  $f_y = 358 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{fu} = 460 \text{ N/mm}^2$ .

Betonui pasiekus 100 parų, kai visiškai pasireiškė betono susitraukimas, sijų tempiamoji zona buvo sustiprinta anglies pluoštu. Anglies pluošto stipris  $f_c = 3800 \text{ N/mm}^2$  ir tamprumo modulis  $E_e = 231 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ , klįjų  $f_{gc} = 80 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{gt} = 30 \text{ N/mm}^2$  ir  $E_g = 3000 \text{ N/mm}^2$ .

Prieš klįjuojant, sijų betono paviršius buvo nuvalytas metaliniu šepetiu ir pašalinti riebalai. Prieš klįjuojant betono paviršius buvo gruntuojamas. Grunto savybės artimos klįjų savybėms. Grunto klampumas mažas, todėl lengvai įsigeria į betoną, pagerindamas jo paviršinio sluoksnio fizines ir mechanines savybes bei klįjų adheziją. Buvo išbandytos 6 stačiakampio skerspjūvio (197×100 mm) 1500 mm ilgio gelžbetoninės sijos.

Kadangi anglies pluošto stipris gerokai didesnis už plieninės armatūros stiprį, todėl norint ją iki galo išnaudoti būtinas didesnis pluošto ir betono jungties stiprumas. Todėl vien klįjų jungtis ne visuomet gali užtikrinti anglies pluošto stiprumo išnaudojimo galimybes. Be to, šio išnaudojimo lygiui didelę įtaką turi jungties standumas.

Kadangi klįjai deformuojasi daugiau nei abu sluoksniai, todėl jie pasislenka vienas kito atžvilgiu.

Anglies pluošto išnaudojimo lygiui nustatyti buvo ištirti keturi skirtingi anglies pluošto jungimo prie betono būdai: 1 – klįjais tempiamojoje zonoje tarp atramų (SB6-1, SB6-2 sijos); 2 – tas pat tik atraminėje zonoje padarius 10 mm gylio įpjovą, į kurias įleistas anglies pluoštas (SC6-1 ir SC6-2 sijos); 3 – atraminėse zonose įrengiant anglies pluošto apkabas, kurios apgaubė anglies pluoštą ir betoną (SD6-1, SD6-2 sijos); 4 – klįjais per visą sijų tempiamosios zonos ilgį (SA6-1 ir SA6-2 sijos). Anglies pluošto prijungimo prie betono būdo įtakai nustatyti ir palyginti buvo išbandyta kontrolinė sija (nesustiprinta).

Sijos bandytos veikiant dviem sutelktosiomis jėgomis. Buvo matuojamos betono ir anglies pluošto deformacijos ties tarpatramio viduriu ir ties atramomis.

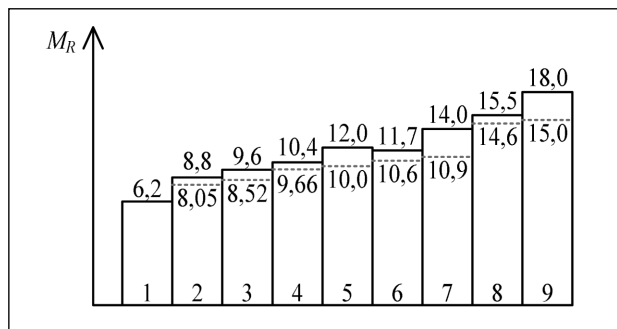
Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad anglies pluoštu sustiprintų lenkiamųjų gelžbetoninių elementų stipris labai padidėja (4 pav.).

Anglies pluošto skerspjūvio plotas sudarė 24,5 % tempiamos zonoje esančios plieninės strypinės armatūros ploto. Tačiau anglies pluošto tempiamasis stipris 8,26 karto viršijo plieninės armatūros stiprį. Todėl palyginti nedidelis anglies pluošto kiekis gerokai padidino stiprinamųjų elementų stiprį. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad eksperimentinių gelžbetoninių sijų, sustiprintų anglies pluoštu, stiprumas padidėjo 41–290 %. Tyrimai parodė, kad sijų stiprumas padidėja atsižvelgiant į anglies pluošto tvirtinimo metodą. Tuo atveju, kai anglies pluoštas prie sijos buvo priklijuotas epoksidiniais klijais neįrengiant papildomų inkarų ir neužleidžiant už atramų (SB sijos), stiprinimo efektas buvo mažiausias. Šiuo atveju stipris padidėjo 41–55 % (4 pav.). Inkarinėje zonoje įrengus sprausčius (SC sijos), jų stipris padidėjo 68–93 ir, palyginti su SB serijos sijomis, vidutiniškai buvo didesnis 22 %. Sijose su anglies pluošto apkabomis (SD sijos) stipris padidėjo 1,85–2,25 karto ir, palyginti su SB sijomis, jų stipris vidutiniškai buvo didesnis 39 %. Didžiausias efektas buvo pasiektas tuo atveju, kai anglies pluoštas buvo pritvirtintas per visą sijos ilgį ir bandymo metu jis buvo prispaustas atramos (SA sijos). Šiuo atveju gelžbetoninių sijų stiprumas padidėjo 2,5–2,9 karto ir, palyginti su SB sijomis (kai anglies pluoštas nesiekė atramų ir nebuvo papildomų inkaravimo priemonių), buvo vidutiniškai 82 % didesnis.

Tyrimai parodė, kad anglies pluoštu stiprinant gelžbetonines lenkiamąsias konstrukcijas anglies pluošto ir betono jungtyje išryškėja pasidavimas. Anglies pluošto horizontalus pasislinkimas daro įtaką sustiprinimo efektui. Kuo didesnis anglies pluošto poslinkis betono atžvilgiu, tuo mažesnis sustiprintos konstrukcijos stiprumas.

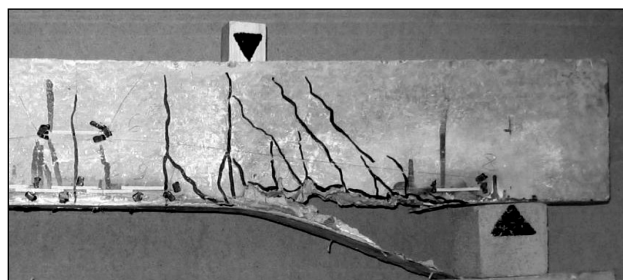
Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad anglies pluošto ir betono sąlyčio zonoje atsiranda statmenųjų bei išstrižųjų plyšių. Jie sąlyčio zonoje dažniausiai atlinksta (5 pav.) ir virš anglies pluošto suformuoja horizontaliuosius plyšius. Tyrimai parodė, kad daugeliu atvejų šie plyšiai susijungia ir atskirose zonose pažeidžia anglies pluošto ir betono jungtį. Būtina pažymėti, kad šie plyšiai nėra dideli. Dažniausiai jie jungia gretimus statmenuosius plyšius. Horizontalieji plyšiai betone buvo 2–10 mm aukščiau anglies pluošto klijų. Tai patvirtina, kad betono jungties zona dėl išgėrusių klijų sustiprėjo. Eksperimentiniai tyrimai taip pat parodė, kad šių plyšių kiekį lemia ir taikomas anglies pluošto inkaravimo metodas. Tuo atveju, kai anglies pluoštas nesiekia atramų ir nėra jokių papildomų inkaravimo priemonių, šie horizontalieji plyšiai yra didesni.

Plyšių plitimą lemia tarp anglies pluošto ir betono esančiame klijų sluoksnyje vykstančios šlyties deformacijos. Klijų tamprumo modulis yra iki 2 kartų mažesnis už betono tamprumo modulį.



4 pav. Sustiprintų sijų eksperimentinių ir teorinių stiprumų lyginimas: 1 – kontrolinė sija; 2 – SB6-1 sija; 3 – SB6-2 sija; 4 – SC6-1 sija; 5 – SC6-2 sija; 6 – SD6-1 sija; 7 – SD6-2 sija; 8 – SA6-1 sija; 9 – SA6-2 sija. Viršutinis skaičius – eksperimentinės reikšmės

Fig 4. Comparison of theoretical and experimental results of strength of strengthened beams: 1 – control beam; 2 – SB6-1 beam; 3 – SB6-2 beam; 4 – SC6-1 beam; 5 – SC6-2 beam; 6 – SD6-1 beam; 7 – SD6-2 beam; 8 – SA6-1 beam; 9 – SA6-2 beam. Top number – experimental data



5 pav. Bendras sijų suirimo vaizdas

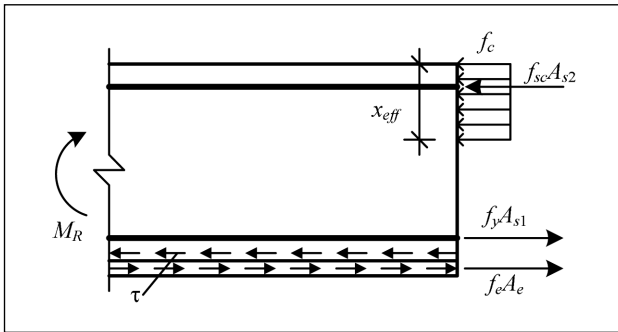
Fig 5. Character destruction of beams

Tačiau klijų tempiamasis stipris yra 10–11 kartų didesnis už betono tempiamąjį stiprį. Todėl, klijams deformuojantis, anglies pluoštas pasislenka horizontaliaja kryptimi ir betone sukelia įtempius. Dėl šių įtempių ir atsiranda horizontalieji plyšiai šalia statmenųjų plyšių.

Tuo atveju, kai gelžbetoninio elemento tempiamoji zona yra sudalyta normaliniais plyšiais bei atskirose tempiamosios zonos vietose yra horizontaliųjų plyšių, sumažėja betono ir anglies pluošto sąlyčio zonos šlyjamasis standis. Čia pasireiškia šlyties deformacijos, kurios daro įtaką konstrukcijų stipriui. Tuo atveju, kai anglies pluoštas atramos yra prispaustas reakcinių jėgų, sąlyčio zonos šlyjamąjo standžio sumažėjimas neturi didelės įtakos elemento stipriui. Visa tai rodo, kad anglies pluošto naudojimo efektyvumas priklauso nuo jungties su betonu technologinio konstrukcinio sprendimo.

## 5. Anglies pluošto ir betono jungties standumo įvertinimas skaičiuojant sustiprinimą

Projektuojant gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimą, svarbiausia apskaičiuoti jų stiprumą. Atlikti tyrimai parodė,



6 pav. Sustiprintų sijų skaičiuojamoji schema

Fig 6. Design stress distribution of strengthened beams

kad skaičiuojant būtina įvertinti anglies pluošto ir betono jungties standumą. Tai galima atlikti taikant sudėtinių strypų teoriją [22]. Atliekant šiuos skaičiavimus daroma prielaida, kad anglies pluoštas ir klijai sudaro vieną sluoksnį, o stiprinamas gelžbetoninis elementas – kitą sluoksnį (6 pav.).

Skaičiuojant tokias konstrukcijas, daromos prielaidos: gniuždomojoje zonoje įtempiai yra pastovūs ir lygūs  $\sigma_c = f_c$ ; tempiamosioje zonoje esančios plieninės strypinės armatūros įtempiai  $\sigma_s = f_y$ ; anglies pluošto įtempiai  $\sigma_e = f_e$ ; anglies pluošto ir betono sąlytis yra pasidavus; sąlyčio pasidavimas įvertinamas pasidavimo koeficientu  $\beta(x)$ .

Anglies pluoštu sustiprinto lenkiamojo gelžbetoninio elemento stiprumas, įvertinant esamą sąlyčio standumą,

$$M_R = \beta(x) \cdot M_{R0}, \quad (6)$$

čia  $M_{R0}$  – sustiprinto gelžbetoninio elemento stiprumas, darant prielaidą, kad sąlytis tarp anglies pluošto ir betono yra absoliučiai standus;  $\beta(x)$  – koeficientas, įvertinantis sąlyčio standumą.

Stipris  $M_{R0}$  gali būti apskaičiuojamas taip:

$$M_{R0} = f_e \cdot A_e (h - 0,5x_{eff} - 0,5h_e) + f_y A_{s1} (h - 0,5x_{eff} - a_{s1}). \quad (7)$$

Koeficientą, įvertinantį anglies pluošto ir betono standumą, galima apskaičiuoti naudojantis iš sudėtinių strypų teorijos gauta išraiška. Kai elementas yra veikiamas dviejų sutelktųjų jėgų,

$$\beta(x) = \left( 1 - \frac{ch(\lambda \cdot (0,5 \cdot l - a))}{\lambda \cdot x \cdot ch(0,5\lambda \cdot l)} \cdot sh(\lambda \cdot x) \right), \quad (8)$$

čia  $l$  – elemento skaičiuotinis ilgis;  $a$  – atstumas nuo atramos iki pirmos sutelktosios jėgos;  $x$  – atstumas nuo atramos iki pavoingojo pjūvio, kuriame yra tikrinamas elemento stiprumas.

Kai lenkiamasis elementas yra veikiamas tolygiai paskirstytos apkrovos,

$$\beta = \left( 1 - \frac{2(ch(0,5\lambda l) - ch(\lambda(0,5l - x)))}{x \cdot \lambda^2 (l - x) \cdot ch(0,5 \cdot \lambda \cdot l)} \right), \quad (9)$$

čia  $x$  – atstumas nuo atramos iki nagrinėjamo pavoingojo pjūvio;  $l$  – skaičiuojamasis elemento ilgis.

Sąlyčio standumą įvertinantis dydis  $\lambda$  yra apskaičiuojamas taip:

$$\lambda = \sqrt{\alpha \cdot \gamma}. \quad (10)$$

Dydis  $\alpha = \frac{b \cdot G_{weff}}{z}$ , čia  $G_{weff}$  – sąlyčio tarp anglies

pluošto ir betono šlyjamojo standžio charakteristika;  $z$  – atstumas tarp gelžbetoninio elemento svorio centro ir anglies pluošto centro.

$$\gamma = \frac{1}{A_{eff} \cdot E_{cm}} + \frac{1}{E_e \cdot A_e} + \frac{z^2}{E_{cm} \cdot I_{eff}}, \quad (11)$$

čia  $A_{eff}$  ir  $I_{eff}$  – ekvivalentinio gelžbetoninio skerspjuvio plotas ir inercijos momentas;  $A_e$  – anglies pluošto skerspjuvio plotas;  $E_{cm}$  ir  $E_e$  – betono ir anglies pluošto tamprumo moduliai.

Gelžbetoninės sijos gniuždomosios zonos aukštis  $x_{eff}$  gali būti apskaičiuojamas pagal formulę

$$x_{eff} = \frac{f_e \cdot A_e + f_y \cdot A_{s1} - f_{sc} \cdot A_{s2}}{f_c \cdot b}, \quad (12)$$

čia  $f_e, f_y, f_{sc}$  – anglies pluošto, tempiamosios ir gniuždomosios plieninės strypinės armatūros stipriai;  $A_e, A_{s1}, A_{s2}$  – anglies pluošto, tempiamosios ir gniuždomosios plieninės strypinės armatūros skerspjuvio plotai;  $f_c$  – betono gniuždomosios stipris;  $b$  – elemento skerspjuvio plotis.

Taikant pateiktą sluoksniuotųjų konstrukcijų skaičiavimo metodiką, buvo apskaičiuotas eksperimentinių sijų stiprumas. Skaičiuojant sijų stiprumą, reikia žinoti anglies pluošto ir betono jungties zonos standumą. Supleišėjusios šios zonos standumas skaičiuojamas įvertinant jungties standumo šlyčiai ekvivalentinę charakteristiką  $G_{weff}$ . Atsižvelgiant į eksperimentinių tyrimų rezultatus, ši charakteristika gali būti apskaičiuota taip:

$$G_{weff} = 0,001 \cdot K \cdot E_{cm}, \quad (13)$$

čia  $K$  – koeficientas, įvertinantis anglies pluošto tvirtinimo būdą. Kai anglies pluoštas yra pritvirtintas klijais be papildomų inkarų ir neužleidžiant už atramų,  $K = 1$ , kai yra įrengti sprauskeliai (SC serija),  $K = 1,5$ , esant anglies pluošto apkaboms (SD serija),  $K = 2,0$ , o anglies pluoštą užleidus už atramų ir eksploatacijos metu jį veikiant reakcinėms jėgoms,  $K = 35$ .

Teorinių ir eksperimentinių rezultatų lyginimas rodo

gana gerą sutaptį (4 pav.). Pasiūlytas skaičiavimo metodas, vertinantis anglies pluošto tvirtinimo prie betono būdą ir jungties standumą, gali būti taikomas tokioms konstrukcijoms skaičiuoti.

## 6. Išvados

Anglies pluošto klijavimo stiprumas priklauso nuo klijų ir betono savybių bei betono struktūros. Klijai, įsigerdami į betoną, padidina jo stiprumą, o kartu ir anglies pluošto ir betono jungties standumą.

Atlikti eksperimentiniai ir teoriniai anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių sijų tyrimai parodė, kad anglies pluošto ir betono jungtis yra pasidavi ir priklauso nuo daugelio nurodytų technologinių ir konstrukcinių veiksnių.

Atsižvelgiant į anglies pluošto tvirtinimo prie gelžbetoninių sijų būdą, sijų stiprumas padidėja 1,4–2,9 karto.

Pasiūlyta anglies pluoštu sustiprintų gelžbetoninių sijų skaičiavimo metodika, leidžianti įvertinti anglies pluošto ir betono jungties šlyjamąjį standį.

Atliktų eksperimentinių ir teorinių tyrimo rezultatų palyginimas rodo pakankamai gerą jų sutaptį.

## Literatūra

- Brena, S. F.; Bramblett, R. M.; Wood, S. L.; Kreger, M. E. Increasing flexural capacity of reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer. *ASI Structural Journal*, Vol 100, No 1, 2003, p. 36–55.
- Wenwei, W.; Guo, L. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load. *International Journal of Solids and Structures*, Vol 43, No 6, 2006, p. 1372–1387.
- Brauns, J.; Rocens, K. The effect of material strength on the behaviour of concrete-filled steel elements. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol X, No 3. Vilnius: Technika, 2004, p. 177–182.
- Leung, H. Y. Flexural capacity of concrete beams reinforced with steel and fibre-reinforced polymer (FRP) bars. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol X, No 3. Vilnius: Technika, 2004, p. 209–215.
- Lau, K. T.; Shi, S. Q.; Zhou, L. M. Estimation of stress intensity factor (K1) for an FRP bonded concrete beam using the superposition method. *Magazine of Concrete Research*, Vol 53, No 1, 2001, p. 31–41.
- Smith, S. T.; Teng, J. G. FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models. *Engineering Structures*, Vol 24, No 4, 2002, p. 385–395.
- Au, Ch.; Buyukozturk, O. Debonding of FRP plated concrete: A tri-layer fracture treatment. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 73, No 3, 2006, p. 348–365.
- Xiong, G. J.; Jiang, X.; Liu, J. W.; Chen, L. Away for preventing tension delamination of concrete cover in midspan of FRP strengthened beams. *Construction and Building Materials* (in press).
- Alaee, F. J.; Karihaloo, B. L. Retrofitting of reinforced concrete beams with CARDIFRC. *Journal of Composites for Construction ASCE*, Vol 7, No 3, 2003, p. 174–186.
- Gao, B.; Kim, J. K.; Leung, Ch. K. Y. Experimental study on RC beams with FRP strips bonded with rubber modified resins. *Composites Science and Technology*, Vol 64, No 16, 2004, p. 2557–2564.
- Maalej, M.; Leong, K. S. Engineered cementitious composites for effective FRP-strengthening of RC beams. *Composites Science and Technology*, Vol 65, No 7–8, 2005, p. 1120–1128.
- Barton, B. Characterization of reinforced concrete beams strengthened by steel reinforced polymer and grout (SRP and SRG) composites. *Materials Science and Engineering*, Vol 412, No 1–2, 2005, p. 129–136.
- Almusallam, T. H.; Al-Saloum, Y. A. Ultimate strength prediction for RC beams externally strengthened by composite materials. *Composites: Part B*, Vol 32, No 7, 2001, p. 609–619.
- Hassanen, M. A. H.; Raoof, M. Design against premature peeling failure of RC beams with externally bonded steel or FRP plates. *Magazine of Concrete Research*, Vol 53, No 4, 2001, p. 251–262.
- Lacasse, Ch.; Labossiere, P.; Neale, K. On fiber-reinforced polymer rehabilitation of alkali-aggregate reaction-damaged beams. *ASI Structural Journal*, Vol 100, No 1, 2003, p. 66–95.
- Schartz, M. M. *Composite materials*, Vol II: Processing, fabrication and applications. New Jersey, 1997. 568 p.
- Marčiukaitis, G.; Bareišis, J. Advantage and tendency of development of priority materials – composites of XXI century. In: *Proceedings of conference "Development of science and techniques in Lithuania"* (Konferencijos „Mokslo ir technikos raida Lietuvoje“ pranešimai). Vilnius: Technika, 2001, p. 168–176 (in Lithuanian).
- Fridman, A. S.; Turusov, R. A. *Properties and calculation of adhesion combination* (Свойства и расчет адгезионных соединений). Moscow: Chimia, 1990. 225 p. (in Russian).
- Marčiukaitis, G. Die Abhandigkeit des Festigkeits and Deformations Eigenschaffen das Polymers Betns von der Polymermenge. In: *Internationale Baustoff- und Silikaung*. Weimar, 1978, p. 54–56 (in German).
- Marčiukaitis, G. About calculation of strength polymer impregnated concrete as composite material. *Reinforced Concrete Structures* (Gelžbetoninės konstrukcijos), No 8. Vilnius, 1977, p. 65–73 (in Russian).
- Gorchakov, G. I. *Composition, structure and properties of concrete* (Состав, структура и свойства цементных бетонов). Moscow: Stroiizdat, 1976. 146 p. (in Russian).
- Rzhanitsyn, A. R. *Built-up bars and plates* (Составные стержни и пластинки). Moscow: Stroiizdat, 1986. 316 p. (in Russian).

**Juozas VALIVONIS**. Doctor, Associate Professor. Dept of Reinforced Concrete and Masonry Structures. Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Saulėtekio al. 11, LT–10223 Vilnius, Lithuania. E-mail: gelz@st.vtu.lt

Doctor (1986). Author of over 55 publications. Research interests: theory of reinforced concrete behaviour, composite structures, reinforced concrete bridges.

**Gediminas MARČIUKAITIS**. Professor, Doctor Habil. Dept of Reinforced Concrete and Masonry Structures. Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Saulėtekio al. 11, LT–10223 Vilnius, Lithuania. E-mail: gelz@st.vtu.lt

PhD (1963). Research visit to the University of Illinois (1969). Author and co-author of 5 monographs, 3 text-books and about 300 scientific articles. Research interests: mechanics of reinforced concrete, masonry and layered structures, new composite materials, investigation and renovation of buildings.