



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Šarūnas Bertašius

**STIKLO PLUOŠTO ARMATŪROS SUKIBTIES IR TERMINIO
ATSPARUMO SAVYBIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Doc. dr. Rėda Bistrickaite

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

**STIKLO PLUOŠTO ARMATŪROS SUKIBTIES IR TERMINIO
ATSPARUMO SAVYBIŲ TYRIMAS**

Magistro baigiamasis projektas
Statybos inžinerija (kodas M6026N21)

Vadovas

doc. dr. Rėda Bistrickaitė

Recenzentas

prof. dr. Danutė Vaičiukynienė

Projektą atliko

Šarūnas Bertašius

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Statybos ir architektūros fakultetas

(Fakultetas)

Šarūnas Bertašius

(Studento vardas, pavardė)

Statybos inžinerija M6026N21

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Stiklo pluošto armatūros sukibties ir terminio atsparumo savybių tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 19 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Šarūno Bertašiaus**, baigiamasis projektas tema „Stiklo pluošto armatūros sukibties ir terminio atsparumo savybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Bertašius, Šarūnas. Stiklo pluošto armatūros sukibties ir terminio atsparumo savybių tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Rėda Bistrickaitė; Kauno technologijos universitetas, statybos ir architektūros fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: technologijos mokslai, statybos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *stiklo pluoštas, sukibimas, aukšta temperatūra, ugnis, ištraukimo bandymas, kompozitinės medžiagos.*

Kaunas, 2017. 51 p.

SANTRAUKA

Magistro baigiamajame projekte buvo atliktas stiklo pluošto armatūros sukibimo su betonu tyrimas. Tyrimo metu atliktas armatūros ištraukimo bandymas su 66 kubelių formos bandiniais su armatūra. Dalis bandinių, kuriems buvo atliktas armatūros ištraukimo bandymas, buvo paveikti aukštos temperatūros. Šiems bandiniams prieš armatūros ištraukimo bandymą atliktas ugniai atsparumo bandymas. Atlikus bandymą pastebėta, kad bandiniai 1 h paveikti gaisro sukeltos temperatūros prarado daugiau nei 50 % sukibimo jėgos tarp kompozitinės armatūros ir betono. Siekiant sumažinti kompozitinės armatūros ir betono sukibimo jėgos praradimą turi būti imtasi tokių priemonių kaip apsauginio betono sluoksnio didinimas ar apsauginių, aukštai temperatūrai atsparių, dangų naudojimas. Tyrimo metu panaudotos apsauginės betono dangos sumažino kompozitinės armatūros ir betono sukibimo jėgos praradimą iki 30 %.

Bertašius, Šarūnas. *Investigation of Bond Strength and Thermal Resistance Characteristics of Glass Fiber Reinforced Polymer Rebars: Master 's thesis in in Civil Engineering / supervisor assoc. prof. Rėda Bistrickaitė. The Faculty of civil engineering and architecture, Kaunas University of Technology.*

Research area and field: technology science, civil engineering

Key words: *glass fiber, bond, high temperature, fire, pull-out test, composite materials.*

Kaunas, 2017. 51 p.

SUMMARY

The investigation of bond strength of glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebar was carried out in Master 's final project. A total of 66 cube-shaped specimens with rebar were subjected to the pullout test. Some of specimens were affected by high temperature prior to the pull-out test. The fire resistance test was carried out for these samples before the pull-out test were conducted on them. Test results showed more than 50 % reduction in bond strength between GFRP and concrete after 1 *h* of exposure to high temperature triggered by fire. To reduce the effect of fire on bond strength between GFRP and concrete, measures such as increasing protective concrete layer or using high temperature resistant concrete coating must be taken. The protective concrete coating used in this research showed only up to 30% loss of bond strength between GFRP and concrete.

TURINYS

ĮVADAS.....	6
1. KOMPOZITINE ARMATŪRA ARMUOTOS KONSTRUKCIJOS.....	7
1.1. Kompozitinės armatūros naudojimo tikslai ir pritaikymo sritys.....	7
1.2. Kompozitinės armatūros struktūra	9
1.3. Kompozitinės armatūros savybės.....	12
2. Kompozitinės armatūros ir betono sąveika	18
2.1. Armatūros ir betono sukibimas	18
2.2. Įtempių perdavimas.....	19
2.3. Sukibimo įtempių perdavimo stadijos.....	19
2.4. Kompozitinės armatūros ir betono sukibties ypatumai.....	21
3. PASIRUOŠIMAS EKSPERIMENTINIAMS TYRIMAMS	25
3.1. Tyrimų metodas	25
3.2. Naudojamos medžiagos	26
3.3. Bandinių gamyba	29
4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	32
4.1. Atsparumo ugniai bandymas.....	33
4.2. Gniuždymo bandymas.....	36
4.3. Armatūros ištraukimo bandymas	38
5. EKSPERIMENTINIAI REZULTATAI	40
IŠVADOS	47
LITERATŪROS SĄRAŠAS	48

IVADAS

Mažėjant gamtiniams ištekliams, visos pramonės šakos siekia šiuos išteklius panaudoti kuo efektyviau ir dėl šios priežasties nemažai lėšų yra skiriama atlikti inovatyvių ir optimalių sprendinių paieškai. Statybos pramonė suinteresuota ir nemažai dėmesio skiria naujų konstrukcinių sprendinių paieškai, kurie padidintų konstrukcijų ilgaamžiškumą, saugą ir patikimumą.

Kompozitinės armatūros tiek fizikinės, tiek mechaninės savybės ženkliai skiriasi nuo mums žinomos paprastos plieninės armatūros. Tokie kompozitinės armatūros trūkumai kaip nedidelis tamprumo modulis, didelis temperatūrinio plėtimosi koeficientas, silpnas cheminis kompozitinės armatūros sukibimas su betonu, trapus suirimo pobūdis bei stiprio sumažėjimas laikui bėgant riboja platesnį kompozitinės armatūros panaudojimo mastą.

Šiuo metu kompozitinės medžiagos naudojamos vis platesnėse žmogaus veiklos srityse, todėl magistro baigiamojo darbo tema susieta su kompozitinėmis medžiagomis.

Kompozitinės armatūros sukibimo su betonu savybės aukštose temperatūrose aptiriamos pakankamai ribotame skaičiuje atliktų bandymų ir aprašytų straipsnių. Dauguma tyrimų atlikta kai konstrukcijos yra stiprinamos jų išorėje arba tiriamos pačių konstrukcijų su stiklo pluošto armatūra mechaninės savybės.

Tyrimo objektas – baigiamajame darbe tiriama stiklo pluošto kompozitinės armatūros su betonu sukibtis ir temperatūros įtaka sukibties savybėms.

Darbo tikslas – atlikti stiklo pluošto polimerinės armatūros sukibties savybių tyrimą ir iširti auštos temperatūros poveikį šios armatūros sukibimui su betonu.

Keliami uždaviniai:

- Atlikti literatūros analizę;
- Atlikti temperatūrinio poveikio bandymą su stiklo pluošto armatūra;
- Atlikti stiklo pluošto armatūros ištraukimo bandymą;
- Apskaičiuoti stiklo pluošto armatūros sukibimo jėgą su betonu ir palyginti gautus rezultatus;
- Gautus rezultatus palyginti su kitų autorių atliktų panašių tyrimų rezultatais;

1. KOMPOZITINE ARMATŪRA ARMSUOTOS KONSTRUKCIJOS

1.1. Kompozitinės armatūros naudojimo tikslai ir pritaikymo sritys

Dešimtmečius plienas plačiai naudojamas kaip armuojamoji medžiaga betoninėms konstrukcijoms. Nepaisant savo stiprumo plienas nėra idealus armavimo sprendimas koroziją sukeliančiose ir elektromagnetinius reiškinius sukeliančiose aplinkose. Įprastų gelžbetoninių konstrukcijų pleišėjimas yra vienas iš pagrindinių veiksnių, sukeliančių plieninės armatūros korozijos vystymąsi. Gelžbetoninių konstrukcijų pleišėjimas kai kuriais atvejais gali vykti ne tik konstrukcijos tempiamoje zonoje, bet taip pat ir visame elemento tūryje. Betonas gali supleišėti dėl vandens pertekliaus mišinyje, greito betono kietėjimo, suvaržytų traukimosi deformacijų, temperatūrinių poveikių, taip pat ir dėl išorinių apkrovimų bei poveikių. Ilgametė gelžbetoninių statinių eksploataavimo patirtis, pavyzdžiui, tiltų, rodo, kad plyšiai atsiranda ir naudojant iš anksto įtemptą armatūrą. Riboto pločio plyšiai, eksploatuojant gelžbetonines konstrukcijas neagresyvioje aplinkoje, yra leidžiami, tačiau visiškai priešingai yra, kai konstrukcijos eksploatuojamos agresyvioje išorinėje aplinkoje, pavyzdžiui, tiltai, talpyklos ar estakados. Netinkamai įvertintas agresyvios aplinkos poveikis, nuolat veikiantis konstrukcijos paviršių, kartu su išoriniu apkrovimu, gali stipriai paveikti armatūrą korozija jau po kelerių metų konstrukcijos eksploatacijos. Minėtos priežastys statybinių konstrukcijų projektuotojus skatina ieškoti ir tobulinti alternatyvių medžiagų, kurios būtų ne tik atsparios korozijai, ilgaamžės, bet ir ekonomiškos. Dėl savo savybių polimerinė armatūra (angl. *fiber reinforced polymer FRP*) yra viena iš alternatyvų įprastinei plieninei armatūrai [1].

Statybos pramonėje stiklo pluošto armatūra turi kelias pagrindines panaudojimo sritis.

Magnetinio ir elektromagnetinio neutralumo poreikio pastatai.

Plienine armatūra armuotos konstrukcijos gali sukurti nepageidaujamus magnetinius laukus. Elektromagnetiniai trikdžiai kelia nepatogumų ypač mobiliųjų telekomunikacijų ir gynybos pramonės technologijoms vietovėse, kuriose yra ryšių perdavimo stočių ir ryšių priėmimo prietaisų. Magnetinis neutralumas taip pat aktualus ligoninėse, kur yra naudojama magnetinio rezonanso įranga. Tokių statinių, kurių armavimui naudojamas plienas gali sukelti nepageidaujamus trikdžius arba armatūrą gali būti neleistinai paveikta, pavyzdžiai – medicininės patalpos, mokslinių tyrimų laboratorijos, elektrinės ir aukštosios įtampos transformatorinės [2].

Pakrančių ir jūrų konstrukciniai elementai ir statiniai.

Armatūros korozijos problemos pašalinimas reikalingas betoninių konstrukcinių pakrančių elementų ir statinių, kurie yra nuolat veikiami druskingo jūros vandens, kurio



1.1 pav. Kompozitinės armatūros naudojimas statiniams, kuriuose naudojama specialioji įranga („Schöck Bauteile GmbH“) [2]



1.2 pav. Kompozitinės armatūros naudojimas elektrinėse ir transformatorinėse („Schöck Bauteile GmbH“) [2]

poveikis sukelia greitą ir intensyvią plieninės armatūros koroziją. Armatūros korozijos problema taip pat egzistuoja ir yra nepageidaujama chemijos ir kitų pramonės įmonių pastatų konstrukcijose, baseinuose, nuotekų valymo įrenginiuose bei plonuose konstrukciniuose elementuose [3].

Infrastruktūros elementai.

Infrastruktūroje naudojami elementai dažnai turi būti pakeisti arba remontuojami dėl korozijos paveiktos plieninės armatūros. Todėl viena iš plačiausių kompozitinės armatūros



1.3 pav. Kompozitinės armatūros naudojimas pakrantės statiniams („Schöck Bauteile GmbH“) [2]



1.4 pav. Kompozitinės armatūros naudojimas tiltų statyboje („Schöck Bauteile GmbH“) [2]

panaudojimo sričių yra tiltų paklotą laikančių plokščių armavimas. Paklotą laikančios plokštės yra nuolat veikiamos agresyvių druskų poveikio, atmosferos, ciklinių ir dinaminių apkrovų. Šiomis sąlygomis eksploatuojamos tiltų pakloto plokštės pleišėja ir tai sukelia intensyvią plieninės armatūros koroziją [3]. Greitųjų traukinių ir tramvajų bėgiai tarnauja kaip elektrinio signalo perdavimo terpė, todėl šių linijų plokštės turi būti įžeminamos, kad netrikdytų signalų

perdavimui. Naudojant kompozitinę armatūrą įžeminimo priemonės yra nereikalingos ir bėgiai gali būti montuojami arti indukcinį ričių, kurios reikalingos geležinkelio valdikliams [2].

Požeminiai statiniai ir talpyklos.

Įvairūs požeminiai statiniai ir rezervuarai taip pat dažnai yra veikiami agresyviosios aplinkos poveikio, todėl šių statinių elementams yra svarbi apsauga nuo korozijos. Dažnai miesto metro, nuotekų ir kiti požeminiai infrastruktūros objektai yra įrengiami naudojant tunelių gręžimo mašinas, kurioms yra sudėtinga gręžti plienu armuotas atramines sienas. Kompozitinės armatūros lengvas pjaustymas yra puikus laikinas betoninių konstrukcijų sustiprinimo sprendimas tokiose konstrukcijose kaip diafragminės sienos, kurios bus gręžiamos tunelių gręžimo mašinomis. Pragręžimas su gręžimo mašinomis tampa daug paprastesnis ir mažiau imlus rankiniam darbui [3].

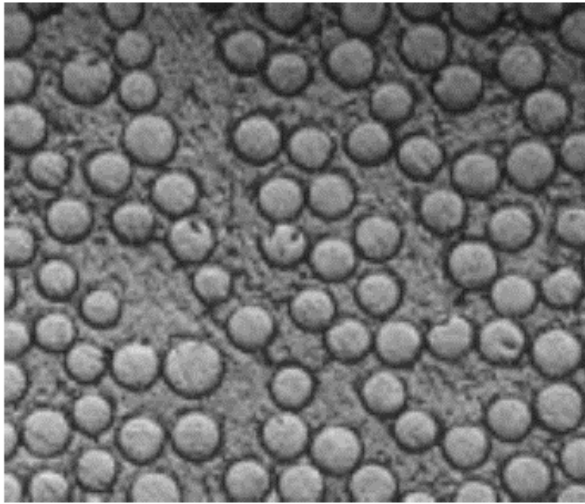
Elementų palengvinimas ir remontavimas.

Didelis kompozitine armatūra armuotų konstrukcijų stiprumas gali būti išnaudojamas siekiant sumažinti armuojamų konstrukcijų armavimo procentą. Palyginti mažas svoris, gali turėti tam tikrų praktinių privalumų statybose, tačiau atsižvelgus į didelę betono masę, nereikia tikėtis, kad mažas armatūros masės sutaupymas gali būti labai reikšmingas. Kita vertus, kai kuriais atvejais lengva naudojamos armatūros masė gali pagreitinti statybos procesus uždaroje patalpose, kur sudėtinga dirbti dideliame darbuotojų skaičiui. Kompozitinės armatūros lengvumas taip pat yra privalumas susidūrus su konstrukcijų remonto atvejais [2].

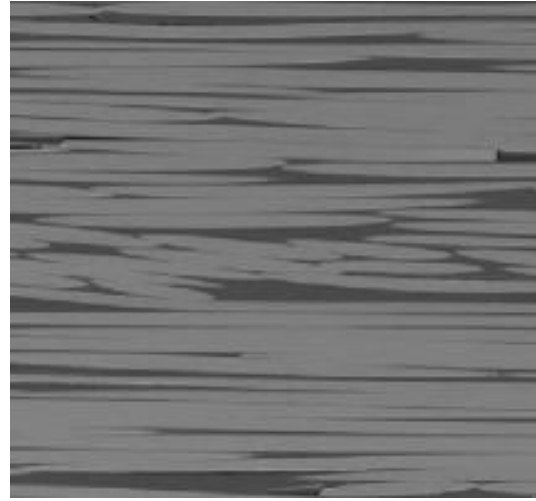
1.2. Kompozitinės armatūros struktūra

Kompozitai medžiagos pagamintos iš dviejų ar daugiau skirtingų medžiagų. Kai kuriais atvejais skirtingos medžiagos gali būti pagamintos tos pačios medžiagos pagrindu. Kompozito savybės visiškai skiriasi nuo jį sudarančių sudedamųjų dalių savybių. Vienas pagrindinių kompozitinės medžiagos privalumų yra tas, kad sudedamųjų dalių savybės papildo viena kitą ir taip gaunamos reikiamos medžiagos savybės [4].

Kompozitinės armatūros strypai pagaminti iš trijų pagrindinių sudedamųjų dalių: pluošto gijų, polimerinės matricos (dervos) ir priedų. Priedai apima kietiklius, plastifikatorius, atsparumo smūgiui modifikatorius, antioksidantus, antipirenus, šviesos stabilizatorius, antistatikus, putodarius, šilumos stabilizatorius ir kitas mažais kiekiais dedamas medžiagas kaip pigmentai ar užpildai. Kompozitinėje armatūroje naudojamų priedų aptarimas pateiktas Alexander H. TULLO [5] straipsnyje.



1.5 pav. Kompozitinės armatūros skersinis pjūvis [6]



1.6 pav. Kompozitinės armatūros išilginis pjūvis [2]

Kompozitinei medžiagai pluošto gijos suteikia reikiamą stiprumą, o polimerinės matricos paskirtis sujungti pluošto gijas į visumą ir jas apsaugoti. Polimerinė matrica pluošto gijas turi saugoti nuo pažeidimų ruošimo, gamybos ir eksploatacijos laikotarpiu. Matrica pluošto gijas atskiria ir joje pasiskirsto ir apkrovos yra perduodamos pluoštui. Matrica turi būti suderinta su pluoštu tiek chemiškai, tiek termiškai, kadangi ji atlieka svarbų vaidmenį kontroliuojant įtempių ir deformacijų funkcijas ir saugo pluoštą nuo aplinkos poveikio [3].

Stiklo pluoštas.

Plačiausiai kompozitinių medžiagų gamybai, dėl santykinai nedidelės kainos, naudojamas stiklo pluoštas. Stiklo pluošto polimerinei kompozitai plačiai naudojami įvairiose srityse, tokiose kaip kosmoso pramonė, automobilių, jūrų ir karinė pramonė. Šio pluošto populiarumą lemia geras atsparumas korozijai, lengvumas, dielektrinės charakteristikos ir geresnės bangų slopinimo charakteristikos nei metalų [7].

Stiklas yra neorganinė, amorfinė, kieta medžiaga, kuri sudaryta daugiausiai iš silicio dioksido SiO_2 (50–75 % masės). Stiklo stiprumas priklauso nuo gaminio matmenų, todėl kuo mažesnio skersmens (paprastai 4–34 μm) gijos, tuo stiklo tempiamasis stipris didesnis. Tai galima paaiškinti tuo, kad esant mažam elemento skerspjūviui, sumažėja vidinių defektų skaičius ir padidėja medžiagos stipris. Stiklo pluoštas gaminamas stiklo lydinių nukreipiant per purkštukus, vadinamus filjerėmis. Tokiu būdu gaminant pluoštą yra naudojamos 1,6–2 mm skersmens platinos lydinio filjerės, kuriuose išdėstomi keli šimtai purkštukų. Plonos stiklo gijos formuojamos stiklo lydiniiui tekant per purkštukus. Gijų skersmeniui įtakos turi purkštuke esančio stiklo temperatūra ir lydinio tekėjimo greitis. Stiklo pluošto gamybos metu gijos padengiamos danga (klijais), kuri apsaugos atskiras pluošto gijas nuo mechaninių pažeidimų ir pagerina sukibimą su polimerine derva [8].

Polimerinei armatūrai dažniausiai stiklo pluoštas yra gaminamas trijų tipų: E, S, AR. E – stiklo pluošto pavadinimas siejamas su didele elektrine varža (angl. *Electric glass*) ir yra plačiai pritaikomas plastikų armavimo pramonėje. Šio tipo pluoštas yra pigiausias. S – stiklo pluoštas turi didesnį stiprumą tempiant ir tamprumo modulį nei E – stiklo pluoštas, šio pluošto pavadinimas siejamas panaudojimu statybose (angl. *Structural glass*). Tiek E, tiek S tipo stiklo pluoštai yra neatsparūs šarmų poveikiui, todėl kartais naudojamas AR – stiklo pluošto tipas, kurio pavadinimas susijęs su atsparumu šarmams (angl. *Alkali-Resistant glass*) [9].

1.1 lentelė. Pluoštų fizikinės ir mechaninės savybės [3]

Pluošto tipas	Tankis	Tempiamasis stipris	Tamprumo modulis	Didžiausias tempimo deformacijos	Šiluminio plėtimosi koeficientas	Puasono koeficientas
	kg/m^3	MPa	GPa	%	$10^{-6}/^{\circ}C$	
E – stiklas	2500	3450	72,4	2,4	5,0	0,22
S – stiklas	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
AR – stiklas	2270	1800–3500	70–76	2,0–3,0	–	–
Anglis (įprastas)	1700	3700	250	1,2	Nuo –0,6 iki –0,2	0,20
Anglis (didelio tamprumo modulio)	1950	2500–4000	350–800	0,5	Nuo –1,2 iki –0,1	0,20
Anglis (didelio stiprio)	1750	4800	240	1,1	Nuo –0,6 iki –0,2	0,20
Aramidas (Kevlar 29)	1440	2760	62	4,4	–2,0 išilginis 59 radialinis	0,35
Aramidas (Kevlar 49)	1440	3620	124	2,2	–2,0 išilginis 59 radialinis	0,35
Aramidas (Kevlar 149)	1440	3450	175	1,4	–2,0 išilginis 59 radialinis	0,35
Aramidas (Technora H)	1390	3000	70	4,4	–6,0 išilginis 59 radialinis	0,35
Aramidas (SVM)	1430	3800–4200	130	3,5	–	–
Bazaltas (Albarrie)	2800	4840	89	3,1	8,0	–

Dėl kai kurių stiklo pluošto savybių trūkumų statybos pramonėje yra naudojamos ir kitos pluoštų rūšys, pavyzdžiui, anglies, aramido ar bazalto. Pluoštų fizikinės ir mechaninės savybės pateiktos 1.1 lentelėje.

Matrica (derva).

Kompozitinei armatūrai naudojamos matricos yra polimerinės medžiagos, kurios dažnai vadinamos plastikais. Matrica kompozite atlieka tiek konstrukcinį, tiek apsauginį vaidmenį: išlaiko pluoštą vietoje ir sujungtą; perduoda įtempius pluoštui; užtikrinti barjerą nuo neigiamos aplinkos, tokios kaip cheminės medžiagos ir drėgmė; apsaugoti gijų paviršių nuo mechaninio poveikio. Matrica turi mažai įtakos esant apkrovoms, kurios sukelia tempimo įtempius, tačiau daro gana didelę įtaką kompozitą veikiant gniuždymo apkrovoms ir sulaiko pluoštą nuo klupimo ir neleidžia jam išlinkti, taip pat padeda pluoštams atlaikyti skersines jėgas. Matrica kompozite paprastai užima nuo 30 iki 60 % tūrio [9].

Pagal technologines savybes kompozitams gaminti naudojamos matricos yra skiriamos į dvi pagrindines grupes: termoreaktyviosios ir termoplastinės dervos [10, 11, 12].

Termoreaktyviosios dervos yra polimerai, turintys tinklinę struktūrą. Tinklinės struktūros polimerai gaunami iš linijinių polimerų juos veikiant didelės energijos spinduliais ar šildant su specialiais priedais. Šios dervos beveik nesideformuoja, kaitinamos nesilydo ir išlaiko formą ir būseną. Jos netinka pakartotiniam perdirbimui ir kaitinamos negrįžta į klampų būvį, o esant aukštai temperatūrai termiškai suyra [13].

Termoplastinės dervos turi linijinę arba šakotą struktūrą. Šios rūšies polimerai minkštėja didėjant temperatūrai ir kietėja vėl atvėšę. Jeigu nepasikeičia cheminė sudėtis ir molekulinė struktūra, šie polimerai gali daug kartų iš kietos ir labai elastingos būsenos pasidaryti klampiai takūs ir atvirkščiai. Dėl nestipraus polimero grandžių tarp molekulinio ryšio gaminiai yra elastingi ir netrapūs [13].

1.3. Kompozitinės armatūros savybės

Nors kompozitinės armatūros pagrindiniai pranašumai, lyginant su įprastine plienine armatūra, pasižymi tuo, kad jiems būdingas kelis kartus didesnis stipris nei plieno, atsparumas agresyvioms aplinkoms, lengvas apdirbimas ir nedidelis svoris, tačiau kompozitinė armatūra turi ir trūkumų. Kompozitinės armatūros naudojimas betoninėse konstrukcijose ženkliai paveikia fizikines ir mechanines armatūros savybes. Kompozitinė armatūra gali būti suprojektuota ir pagaminta taip, kad atitiktų specialus reikalavimus ir tiktų tam tikroms taikymo sritims. Kompozitinių armatūros strypų projektavimas susideda iš daugybės kintamųjų: pluošto

ir matricos pasirinkimo, matricos ir pluošto tūrio dalių parinkimo, pluoštų orientacijos ir kokybės kontrolės gamybos proceso metu. Šie veiksniai turi įtakos kompozito strypų savybėms jas nustatant. Kompozitinės armatūros savybės nustatomos eksperimentiniais tyrimais ir mikromechaniniais principais. Šie principai pagrįsti pluošto ir matricos savybių ir tūrio arba masės dalies įtakos kompozitinio elemento savybėms įvertinimu [1].

Tankis.

Kompozitinės armatūros tankis nustatomas atsižvelgiant į naudojamos dervos ir armuojamo pluošto medžiagų tankius bei šių medžiagų užimamą tūrio dalį kompozite:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m, \quad (1.1)$$

čia: ρ_c – kompozitinės armatūros tankis; ρ_f – pluošto tankis; ρ_m – matricos tankis; V_f – pluošto tūrio dalis; V_m – matricos tūrio dalis.

Pasinaudojus [3] literatūroje pateiktais pluoštų ir termoreaktyviųjų dervų tankiais, pateikta dažniausiai naudojamų polimerinių strypų tankių lentelė, kai kinta pluošto užimamo tūrio dalies reikšmė $V_f = 0,5 - 0,75$.

1.2 lentelė. Kompozitinės armatūros tankiai, kai pluošto tūrio dalis $V_f = 0,5 - 0,75$ [3]

Pluoštas Matrica	Anglies	Aramido	Stiklo	Plienas
Poliesterio	1430–1650	1310–1430	1750–2170	7850
Epoksidinė	1440–1670	1320–1450	1760–2180	
Vinilo esterio	1440–1630	1300–1410	1730–2150	

Pagal 1.2 lentelėje pateiktus duomenis matyti, kad polimerinė armatūra yra nuo 4 iki 6 kartų lengvesnė už plieninę, kas lemia lengvesnį naudojimą statybos aikštelėje ir mažesnius transportavimo kaštus.

Šiluminio plėtimosi koeficientas.

Polimerinės armatūros šiluminio plėtimosi koeficientas priklauso nuo pluošto ir dervos tipo savybių bei komponentų užimamo tūrio dalies. Polimerinės matricos ir stiklo pluošto medžiagos yra izotropinės medžiagos, aramido ir anglies medžiagų pluoštuose pasireiškia didelis savybių anizotropiškumas. Izotropinių medžiagų šiluminio plėtimosi koeficientas skersine ir išilgine pluoštui kryptimi yra vienodas. Šiluminio plėtimosi koeficientui išilgine pluoštui kryptimi daugiausiai įtakos turi pluošto savybės, o skersine pluoštui kryptimi – polimerinė matrica.

1.3 lentelė. Plieninės ir polimerinės armatūros šiluminio plėtimosi koeficientai ($V_f = 0,5 - 0,75$) [3]

Kryptis	Šiluminio plėtimosi koeficientas ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)				
	plienas	nerūdijantis plienas	stiklo	anglies	aramido
Išilginis, α_L	11	10 iki 16,5	6 iki 10	-9 iki 0	-6 iki -2
Skersinis, α_T	11	10 iki 16,5	21 iki 23	74 iki 104	60 iki 80

Neigiamos šiluminio plėtimosi koeficiento reikšmės rodo, kad kylant temperatūrai pluoštai susitraukia, o krintant – ilgėja. Paprastai betonas yra laikomas izotropine medžiaga ir jo šiluminio plėtimosi koeficientas svyruoja nuo $7 \cdot 10^{-6}$ iki $13 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [14].

Polimerinės armatūros šilumos plėtimosi koeficiento nustatymo būdai buvo sukurti JSCE [15] ir ACI 440K komiteto [16].

Šiluminis poveikis polimerinei armatūrai.

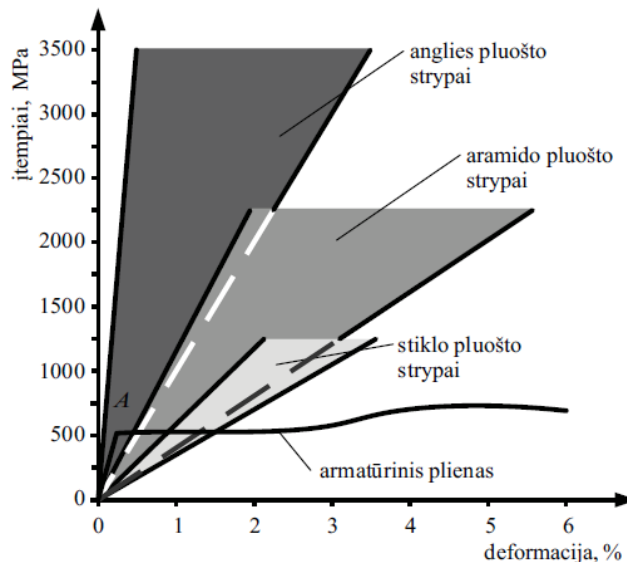
Priimta, kad ne visi šilumos poveikiai turi ardomąjį poveikį kompozitinei armatūrai, kai kuriais atvejais poveikis gali būti naudingas ir panaikinti defektus kompozite. Aukštoje temperatūroje polimerinė derva suminkštėja ir pradeda plastifikuotis dėl padidėjusio molekulių judrumo, kas sukelia dervos ir kompozitinio elemento fizikinių ir mechaninių savybių pokyčius ir padidina drėgmės absorbciją [17]. Polimerinė armatūra neturėtų būti naudojama didesnėje nei tam tikroje temperatūroje, dar kitaip vadinamoje stiklėjimo temperatūroje T_g (angl. *glass transition*). Šioje temperatūroje matrica pereina iš minkštos plastiškos būsenos į standžią ir kietą būseną. Temperatūros T_g vertės priklauso dervos tipo ir paprastai kinta 70 iki 175 $^{\circ}\text{C}$: nuo 70 iki 100 $^{\circ}\text{C}$ poliesterio dervai, nuo 70 iki 163 $^{\circ}\text{C}$ vinilo esterio dervai ir nuo 95 iki 175 $^{\circ}\text{C}$ epoksidinei dervai [18]. Projektuojant polimerine armatūra armuojamas konstrukcijas yra rekomenduojama užtikrinti, kad medžiagos kritinė temperatūra būtų bent 30 $^{\circ}\text{C}$ žemesnė už stiklėjimo temperatūrą T_g . Viršijus stiklėjimo temperatūrą T_g , pluoštai ir toliau laiko tam tikrą apkrovą savo kryptimi, tačiau sumažėja polimerinės armatūros tempiamasis stipris dėl sumažėjusio matricos ir pluošto sukibimo. Eksperimentai atlikti gerokai viršijus stiklėjimo temperatūrą T_g parodė, kad polimerinės armatūros mechaninių savybių, tokių kaip kerpamasis ir lenkiamasis stipriai, rodikliai sumažėja [19,20].

Sukibimo stiprumas tarp polimerinės armatūros strypų ir betono priklauso nuo polimerinės dervos savybių strypo paviršiuje [21]. Kai temperatūra yra arti stiklėjimo temperatūros T_g , matricos mechaninės savybės ženkliai suprastėja ir matrica nebegali perduoti betone esančių įtempių pluoštui. Sukibimo jėgos sumažėjimas aprašytas Katz ir kitų [22] atlikus bandymus, kai temperatūra buvo didesnė nei T_g : pastebėtas 20-40 % sukibimo stiprumo

sumažėjimas strypų su kritine temperatūra $T_g = 60-124\text{ }^\circ\text{C}$, kurie buvo išbandyti $100\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje ir 80-90 % sukibimo stiprumo sumažėjimas prie $200\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros [23].

Tempimas.

Pagrindiniai veiksniai turintys įtakos polimerinės armatūros tempimo savybėms (tempiamasis stipris ir tamprumo modulis) yra sudedamųjų dalių (pluoštų ir matricos) savybės ir jų užimamo tūris bei pasiskirstymas, cheminė bei fizikinė šių dalių sąveika, gamybos technologija ir gamybos metu atliekama kokybės kontrolė. Betonui armuoti dažniausiai naudojamos kompozitinės armatūros įtempių ir deformacijų diagramos pateiktos 1.7 pav. Iš palyginimui pateiktos plieninės armatūros įtempių ir deformacijų priklausomybės matyti, kad, priklausomai nuo kompozitinės armatūros tipo, plieninės armatūros tempiamasis stipris yra iki 7 kartų mažesnis, bet ribinės deformacijos irimo metu yra didesnės [1].



1.7 pav. Kompozitinės ir plieninės armatūrų įtempių ir deformacijų diagramos [1]

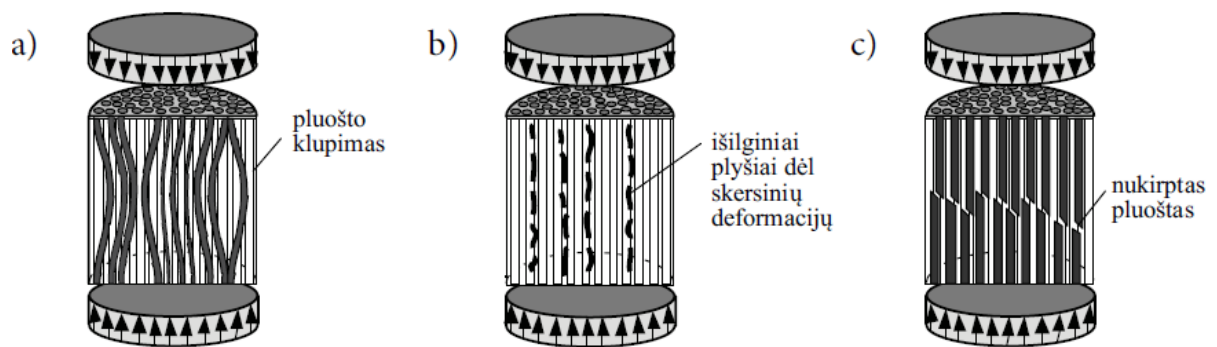
Plieno strypai naudojami gelžbetoninėse konstrukcijose turi aiškia plastinę stadiją. Veikiant tempimo įtempiams strypai tampriai deformuojasi ir vėliau plastiškai suyra. Kompozitiniai strypai neturi plastinės stadijos, iki suirimo deformuojasi tampriai ir suyra trapiai. Kompozitinių strypų trapus suirimas lemia staigų ir trapų polimeriniais strypais armuotų betoninių elementų suirimą [1].

Kompozitinės armatūros strypų tempiamasis stipris skiriasi ir kintant armatūros skerspjūvio plotui. 40 % stiklo pluošto armatūros tempiamojo stiprio sumažėjimas buvo gautas Faza ir kt. [24] ištyrus ir palyginus skirtingų gamintojų armatūras, kai armatūros skersmuo buvo padidintas nuo 9,5 iki 22,2 mm. Šis tyrimas parodė, kad būtina atkreipti dėmesį į strypų gamintojo pateikiamus armatūros stiprius skirtingam skerspjūviui. Kompozitinės armatūros

strypai gali būti gaminami ne tik tiesūs, bet ir su lenkimais ir pasukimais, tačiau lyginant su tiesiais strypais taip prarandama apie 40-50 % tempiamojo stiprio. Šis stiprio sumažėjimas atsiranda dėl pluošto susiraukšlėjimo ir įtempių koncentracijos [3].

Gniuždymas.

Kompozitinės armatūros strypų nerekomenduojama naudoti betono gniuždomoje zonoje. Kompozitinę armatūrą sudarančių pluošto gijų skersmuo sudaro tūkstantąsias milimetro dalis ir todėl pluoštas negali priešintis gniuždomajam poveikiui. Eksperimentiškai sunku nustatyti tikslias polimerinės armatūros strypų gniuždomąsias savybes, nes jos labai priklauso nuo bandinio geometrijos ir naudojamo bandymo metodo. Gniuždomosios kompozitinės armatūros strypų suirimo atvejai priklauso nuo kompozitą sudarančių medžiagų savybių ir jų proporcijų. Išskiriami trys pagrindiniai polimerinės armatūros suirimo atvejai: suklumpa pluošto gijos, armatūra suyra kaip betonas dėl skersinių deformacijų ir nukerpamos pluošto gijos [1].



1.8 pav. Kompozitinės armatūros gniuždymo suirimo atvejai: a – suklumpant pluošto gijoms; b – dėl skersinių deformacijų; c – nukerpamos pluošto gijos [1]

Valkšnumas.

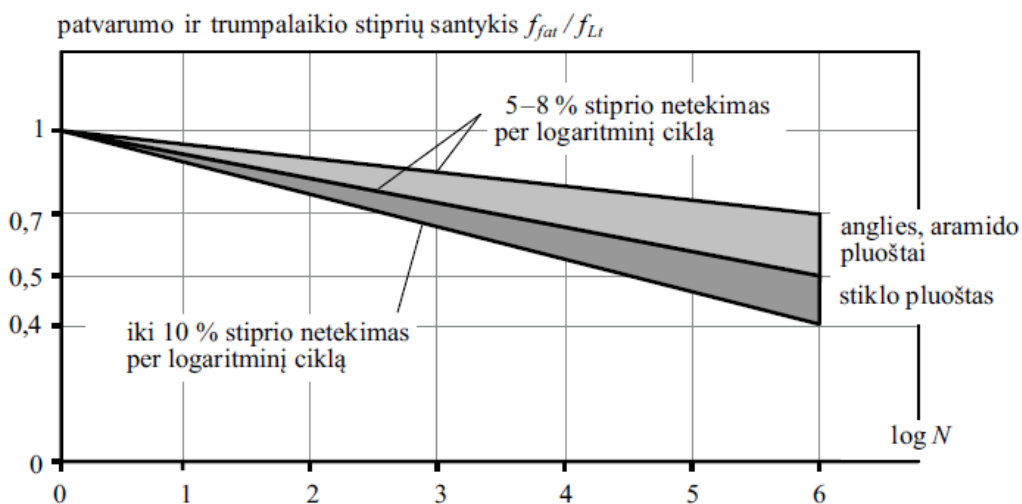
Valkšnumas yra medžiagos savybė lėtai ir dėsningai deformuotis laikui bėgant nuo pastovios, nekintančios išorinės apkrovos. Paveikus medžiagą išorinei apkrovai atsiranda pradinės trumpalaikės deformacijos, kurios lėtai auga išorinei apkrovai išliekant pastovaus dydžio. Ilgainiui atsirandantis deformacijų prieaugis vadinamas ilgalaikėmis deformacijomis arba tiesiog valkšniosiomis deformacijomis. Šios deformacijos apibūdina bendrą medžiagos deformaciją nuo apkrovimo pradžios iki pasirinkto laiko momento. Polimerinės armatūros strypų valkšnumas aiškinamas matricos savybėmis. Kompozitinės armatūros matrica yra tampriai plastinė medžiaga ir joje pasireiškia labai pakankamai didelės plastinės deformacijos. Pluoštas lyginant su matrica pasižymi labai nedideliu valkšnumu, todėl kompozitinės armatūros strypų valkšniųjų deformacijų dydis priklauso matricos ir pluošto santykio: didesnis dervos kiekis – didesnės valkšniosios deformacijos [1].

Relaksacija.

Relaksacija yra procesas, kurio metu deformacijai nekintant įtempiai medžiagoje mažėja. Relaksacijos reiškinys dažniausiai sutinkamas kai kalbama apie iš anksto įtemptas armuotojo betono konstrukcijas. Stiklo pluoštas pasižymi dideliu statiniu nuovargiu ir iš anksto įtemptoms betono konstrukcijoms naudojamas rečiau nei anglies ar aramido pluoštas. 50 metų atskaitiniam laikotarpiui aramido pluošto polimerinės armatūros relaksacijos intensyvumas sudaro nuo 18 iki 24 %. Eksploatacijos metu armatūros strypė jėga sumažėja nuo 18 iki 24 %. Anglies pluošto relaksacijos intensyvumas sudaro nuo 2 iki 4 % tam pačiam laikotarpiui. Didžiausią poveikį relaksacijos intensyvumui turi pradinis įtempių dydis. Kuo didesne apkrova paveikiama konstrukcija tuo intensyvesnė relaksacija vyksta [1].

Nuovargis.

Medžiagos nuovargis yra reiškinys, kai dėl pasikartojančio apkrovos veikimo ciklų yra pažeidžiama medžiagos vidinė struktūra. Dėl šių medžiagos pažeidimų paprastai sumažėja trumpalaikis medžiagos stipris ar tamprumo modulis. Medžiaga dėl nuovargio gali suirti veikiant įtempiams daug mažesniems už trumpalaikį medžiagos stiprį. Polimerinės armatūros nuovargis susijęs su vidinėje medžiagos struktūroje vykstančiais procesais, tokiais kaip matricos mikropleišėjimas, pluošto gijų pažeidimas ir ryšių suardymas tarp pluošto ir matricos. Kompozitinės medžiagos pasižymi geru atsparumu nuovargiui ir patyrus kelis milijonus apkrovos ciklų gali išlaikyti daugiau nei 50 % pradinio trumpalaikio stiprio. Iš statyboje naudojamų kompozitinės armatūros rūšių nuovargis labiausiai pasireiškia stiklo pluošto kompozituose. Per kiekvieną logaritminio gyvavimo etapą jų trumpalaikis stipris sumažėja apie 10 %, o po milijono ciklų – apie 60 % [3]. Atsižvelgiant į apkrovos ciklų skaičių 1.9 pav. pateiktas įvairių pluoštų trumpalaikio stiprio kitimas.



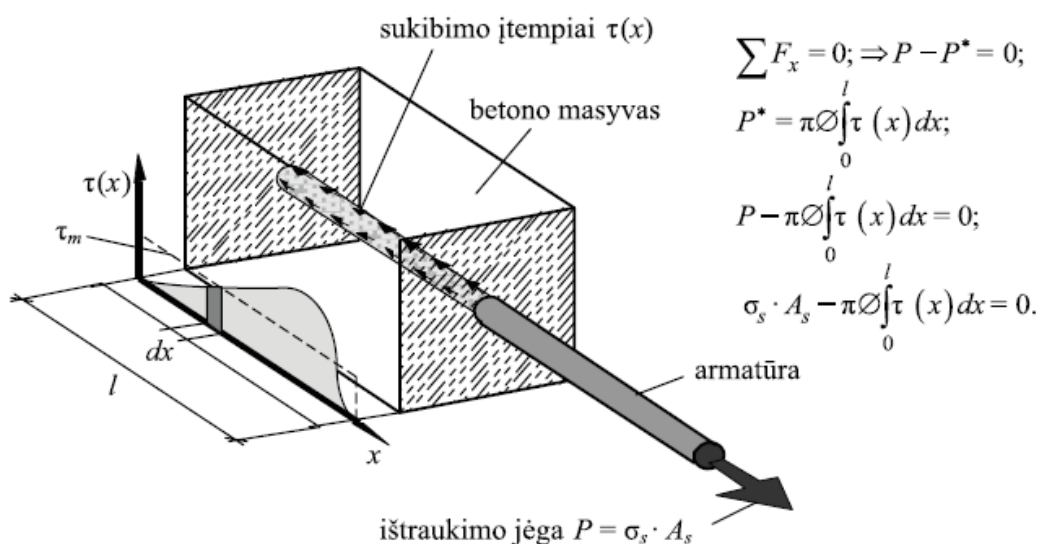
1.9 pav. Kompozitinių strypų trumpalaikio stiprio mažėjimas dėl nuovargio [1]

2. KOMPOZITINĖS ARMATŪROS IR BETONO SAŲEIKA

Sukibimas tarp betono ir armatūros yra pagrindinis veiksnys užtikrinantis kompozito veikimą kaip vienalytės medžiagos. Siekiant užtikrinti veiksmingą kompozito kaip vientisos medžiagos veikimą reikia užtikrinti sukibimą tarp armuojančios medžiagos ir betono. Dėl šio efekto betono ir armatūros sąlyčio paviršiuje vyksta įtempių perdavimas. Polimerinės armatūros ir betono sąveika priklauso nuo armatūros savybių ir nuo daugelio konstrukcinių ir technologinių veiksnių. Nors armatūros ir betono sąveiką apibūdina kai kurie universalūs dėsniai, galiojantys tiek plieninei tiek kompozitinei armatūrai, polimerinės armatūros sukibimo sąveika skiriasi nuo plieninių strypų sąveikos daugeliu atžvilgių. Plieninių strypų sąveika pirmiausia siejama su mechaniniais veiksniais dėl strypų rumbelių sąveikos su betonu [3].

2.1. Armatūros ir betono sukibimas

Sukibimas (angl. *bond*) yra reiškinys, kurio metu dėl armatūros ir betono tarpusavio sąveikos betone atsirandantys įtempiai yra perduodami armatūrai ir atvirkščiai. Sukibimo sąveikos kokybę nulemia armatūros inkaravimas, užleistinių sandūrų ilgis, plyšio plotis, atstumas tarp plyšių ir bendros konstrukcijos deformacijos. Sukibimo įtempiai armatūros ir betono sąveikos zonoje pasiskirsto netolygiai. Sukibimo reiškinį geriausiai atspindi armatūros strypo ištraukimas iš betono masyvo (2.1 pav.), kai iš jo yra ištraukiama tam tikro inkaravimo ilgio l , ir skersmens \emptyset armatūra [1].



2.1 pav. Armatūros ir betono sukibimo samprata [1]

2.2. Įtempių perdavimas

Traukiant armatūros strypą iš betoninio masyvo išorinė jėga sukelia įtempių atsiradimą. Sukibimo įtempių susidarymas betono ir armatūros sąlyčio vietoje yra sudėtingas procesas, kuris apima kelis pagrindinius reiškinius: cheminį sukibimą (adheziją), trintį ir mechaninį inkaravimą [1].

Adhezija yra traukos jėga, kuri susidaro tarp skirtingų kūnų paviršių. Adheziją lemia molekulinės sąveikos jėgos dėl besiliečiančių kūnų molekulių suartėjimo. Strypui esant betone, adhezija pasireiškia tarp cemento matricos ir armatūros stypo paviršiaus. Konstrukciniu požiūriu sukibimas dėl adhezijos nėra patikimas, kadangi jungtys dėl šios sąveikos jėgų yra suardomos esant labai mažiems poslinkiams.

Trinties jėgų dedamoji pasireiškia suirus cheminiams ryšiams tarp armatūros ir betono. Trinties jėgos veikia kol armatūros strypas turi sąlytį su betonu ir nėra visiškai ištraukiamas. Šios jėgos dydis priklauso nuo armatūros paviršiaus šiurkštumo ir stypo skersinio apspaudimo jėgos [1].

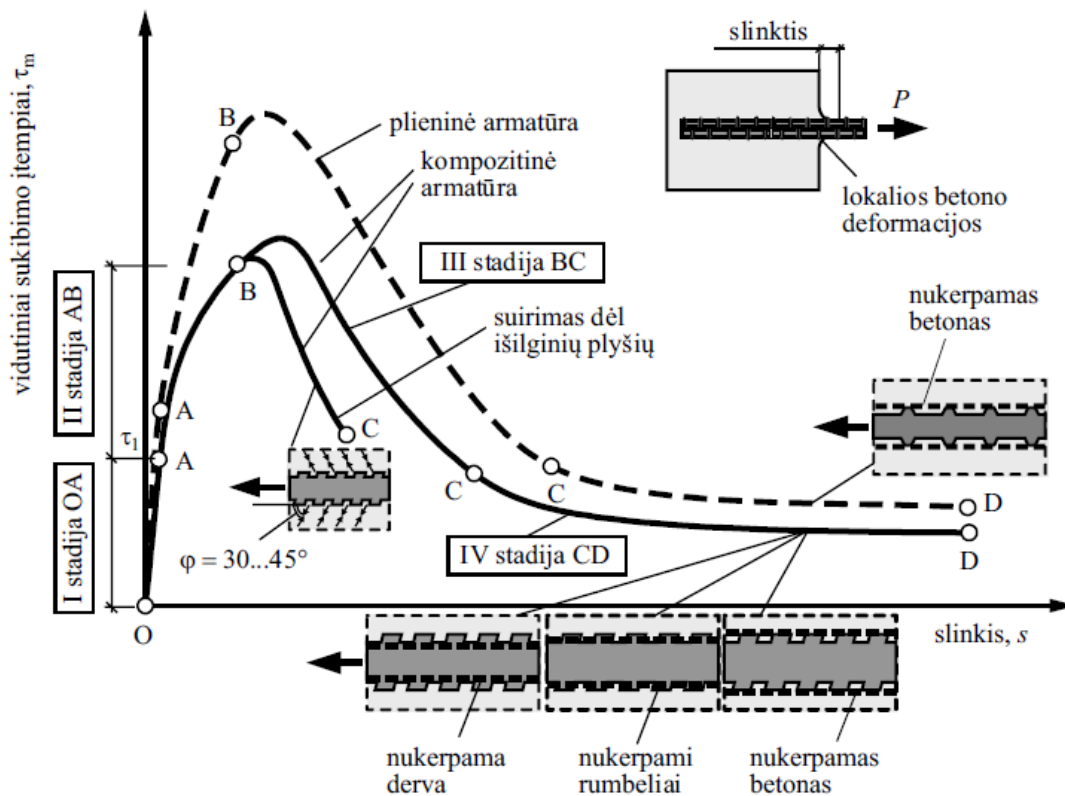
Mechaninio inkaravimo sukibimo dedamoji susidaro tarp armatūros rumbelių ir betono. Mechaninis inkaravimas sudaro didžiausią sukibimo dedamosios dalį. Rumbuotosios armatūros atveju mechaniniam inkaravimui tenka apie 70-75 % visos sukibimo jėgos, apie 15-20 % trinties jėgoms ir apie 10 % adhezijai [1].

2.3. Sukibimo įtempių perdavimo stadijos

Polimerinės armatūros sukibimo su betonu mechanikoje vyrauja panašūs dėsniai kaip ir plieninės armatūros mechanikoje. Dėl skirtingų kompozitinės armatūros fizikinių ir mechaninių savybių atsiranda tam tikrų ypatumų. Šie ypatumai susiję su:

- Kompozitinės armatūros tiek skersine, tiek išilgine kryptimi tamprumo modulis ženkliai mažesnis nei plieninės armatūros.
- Kompozitinės armatūros šlyties modulis gerokai mažesnis nei plieninės armatūros.
- Polimerinės dervos šlyties (kerpamasis) stipris mažesnis lyginant su plieniu.
- Skiriasi armatūros iš kompozitinės medžiagos ir plieno temperatūrinio plėtimosi koeficientas.

Kompozitinės armatūros sukibimo stadijos geriausiai matomos analizuojant vidutinių sukibimo įtempių ir slinkties diagramas, kurios yra suskirstomos į keturias polimeriniai armatūrai būdingas sukibimo įtempių perdavimo stadijas [1].



2.2 pav. Kompozitinės armatūros sukibimo įtempių perdavimo stadijos [1]

I stadija. Pirmojoje stadijoje, kurią atvaizduoja diagramos OA dalis, pasireiškia cheminė sukibimo jėgos dedamoji, kurios metu susidaro nedidelės slinkties reikšmės, o sukibimo įtempių ir slinkties priklausomybės kreivė yra artima tiesinei. Ši dalis nedaug skiriasi nuo plieninės armatūros pirmosios sukibimo įtempių perdavimo stadijos. Skirtumas tik tas, kad kompozitinės armatūros cheminio sukibimo įtempių reikšmė mažesnė. Tai lemia tokios priežastys kaip polimerinių dervų savybė atstumti vandenį (hidrofobiškumas) ir ypatingai lygus armatūros paviršius. Dėl mažos sukibimo įtempių reikšmės lygaus paviršiaus kompozitinės armatūros strypai praktikoje nenaudojami. Dažniausiai strypų paviršius apdirbamas ir padengiamas smėliu arba formuojami rumbeliai. Dėl apdirbto ir nelygaus paviršiaus pagerėja cheminė ir mechaninė sukibimo įtempių dedamosios [1].

II stadija. Antrojoje stadijoje, kurią atvaizduoja diagramos AB dalis, prasideda mikropleišėjimas sąlyčio zonoje. Ties armatūros rumbeliais atsiveria skersiniai mikroplyšiai, slinkties ir įtempių diagrama pereina į netiesinį pobūdį, dėl kompozitinės armatūros minkštumo, ji kur kas lengviau suglemžiama nei plieninė. Kompozitinės armatūros rumbelių viršūnėse skersiniai mikroplyšiai susidaro vėliau nei plieninės armatūros naudojimo atveju. Tyrėjų manymu, kompozitinė armatūra yra net efektyvesnė už plieninę armatūrą šioje apkrovos stadijoje [21].

III stadija. Trečiąją stadiją atvaizduoja *BC* diagramos dalis. Joje intensyviai auga skersiniai mikroplyšiai. Analogiškai kaip ir plieninei armatūrai dėl didėjančios slinkties pasireiškia vidinis slėgis į betoną ir nuo armatūros paviršiaus pradeda plisti išilginiai plyšiai. Dėl mažesnio nei plieninės armatūros kompozitinės armatūros tamprumo modulio gaunamos ženkliai didesnės išilginės deformacijos, o tuo pačiu anksčiau ir intensyviau pasireiškia išilginis betono pleišėjimas. Jeigu nėra pakankamo armatūros suvaržymo, gali įvykti suirimas dėl išilginių plyšių. Esant pakankamai suvaržytam išilginių plyšių plitimui, trečiojoje apkrovos stadijoje pasiekiami didžiausieji sukibimo su betonu įtempiai, kuri didėjant slinkčiai pradeda palaipsniui mažėti dėl sąlyčio zonos pažeidimų ir pereina į ketvirtąją sukibimo įtempių perdavimo stadiją [21].

IV stadija. Ketvirtojoje stadijoje, kurią atvaizduoja *CD* diagramos dalis, išorinei jėgai priešinasi tik trinties jėgos, kurios veikia tarp armatūros ir betono. Plieninės armatūros naudojimo atveju rumbeliai nukerta betoną, esantį ties jų viršūnėmis. Kompozitinės armatūros naudojimo atveju ketvirtoje stadijoje galimi keli suirimo pobūdžiai:

- Nukerpama kompozitinės armatūros strypo derva. Sukibimo įtempių dydis šiuo atveju nepriklauso nuo betono stiprio, kadangi suirimas vyksta pačioje armatūroje. Padidinus betono klasę sukibimo įtempiai nepadidėja.
- Nukerpami kompozitinės armatūros rumbeliai. Šis suirimo pobūdis galimas tada, kai kompozitinės armatūros rumbeliai yra nepakankamo pločio, rumbelių žingsnis per didelis arba naudojamas didelio stiprio betonas.
- Nukerpamas tarp rumbelių esantis betonas. Suirimo pobūdis analogiškas kaip ir plieninės armatūros naudojimo atveju. Šiuo atveju sukibimo įtempių dydis priklauso nuo betono kerpamojo stiprio.
- Priklausomai nuo to, kokios medžiagos parinktos naudojimui (betono ir armatūros sudėties ir savybių) galimi ir tarpiniai suirimo variantai [25].

2.4. Kompozitinės armatūros ir betono sukibties ypatumai

Kaip ir armavimo plienine armatūra atveju, yra daug veiksnių, kurie turi įtakos polimerinės armatūros sukibimo sąveikai su betonu. Atlikta daugybė skirtingų tyrimų su skirtingomis analitinėmis programomis, kurių metu analizuojami veiksniai ir jų įtaka armatūros sukibimo sąveikai su betonu. Skirtingai nei plieninės armatūros armavimo atveju, nėra standartinio polimerinės armatūros paviršiaus apdirbimo būdo, todėl tyrėjai daugiausiai dėmesio skiria armatūros paviršiaus modifikacijų analizavimui [25].

Skerspjuvio forma.

Kompozitinės armatūros skerspjuvis nebūtinai gali būti tik apskritas. Kartais būna gaminami ir stačiakampiai, ir lakštiniai arba vamzdiniai strypai. Dėl modifikuotos skerspjuvio formos padidėja strypo paviršiaus plotas, o kartu pagerėja ir visos sukibimo įtempių dedamosios. Nepaisant to, strypai, kurių forma briaunota, sukelia ženkliai didesnę vidinį slėgį kontakto paviršiuje, todėl gali greičiau atsiverti išilginiai plyšiai ir sukibimo įtempiai dėl to sparčiai mažėja. Statybos pramonėje dažiausiai naudojami apskritojo skerspjuvio polimerinės armatūros strypai su specialia danga ar įvairiomis paviršiaus modifikacijomis [1].

Paviršiaus tipas.

Dėl polimerinių dervų hidrofobiškumo ir labai lygaus armatūros paviršiaus kompozitinės armatūros strypų cheminė sukibtis su betonu yra labai silpna. Paprastai dėl šių priežasčių polimerinės armatūros paviršius specialiai apdirbamas. Apdirbimo metu gali būti deformuojama paviršiaus derva ar suformuojami rumbeliai, klijuojamas papildomas spiralinis pluoštas, strypai padengiami smėliu. Nedideli paviršiaus nelygumai, tokie kaip padengimo smėliu atveju, yra labai efektyvūs esant nedidelėms slinkties reikšmėms pirmojoje ir antrojoje sukibimo įtempių perdavimo stadijose. Kitose stadijose skersinė strypo deformacija tampa pakankamai didelė ir nedideli paviršiaus nelygumai gali staiga prarasti sukibtį. Šio reiškinio galima išvengti kompozitinę armatūrą gaminant su rumbeliais. Gera mechaninė sukibtis visose stadijose yra užtikrinama, jeigu rumbelio aukštis h yra ne mažesnis kaip 5,4 % strypo skersmens \emptyset [1].

Kompozitinės armatūros rumbelių plotis ir išdėstymas nėra standartizuoti, kadangi priklauso nuo kompozitą sudarančių elementų savybių. Dėl mažo dervos kerpamojo stiprio rumbelių plotis yra daug didesnis nei plieninės armatūros. Strypo aukšti ir tankūs rumbeliai gerai sukimba su betonu ir priešinasi ištraukimui. Iš kitos pusės, aukšti ir tankūs rumbeliai sukelia vidinį slėgį ir išilginį pleišėjimą. Dėl šios priežasties tokie strypai gali būti mažiau efektyvūs už strypus su žemais rumbeliais [1].

Skersinis suvaržymas.

Skersinis slėgis, kuris sukelia gniuždymo įtempius betone, daro teigiamą įtaką armatūros ir betono sukibimo sąveikai. Tai sulėtina betono pleišėjimą plokštumoje, statmenoje gniuždymo kryptiai ir padidina trinties jėgą tarp armatūros ir betono. Dėl mažesnio polimerinės armatūros tamprumo modulio skersine kryptimi šis reiškinys reikšmingesnis armuojant plienine armatūra. Apspaudimo jėga išsklaidoma, kai armatūros strypas yra deformuojamas. Išoriniam slėgiui sukeltam betone tempimo įtempius vyksta priešingas procesas – armatūros sukibimas su betonu pastebimai silpnėja [26].

Skersinės deformacijos koeficientas.

Polimerinės armatūros Puasono koeficientas yra labai panašus kaip ir plieno $\nu = 0,27 - 0,3$. Esant tam pačiam apkrovimo lygiui, lyginant su plienu polimerinės armatūros išilginės deformacijos tiek kartų didesnės, kiek mažesnis jos tamprumo modulis. Dėl to kompozitinėje armatūroje susidaro didesnės skersinės deformacijos ir mažėja strypo skersmuo, kas lemia blogesnę sukibimą su betonu. Tačiau skersinės deformacijos turi ir teigimą pusę sukibimui. Gaminant iš anksto įtemptus elementus, kai atleidžiama įtempta armatūra, dėl įtempių nuostolių strypai sutrumpėja ir padidėja jų skersmuo. Tai padidina sukibimo įtempių dedamąsias [1].

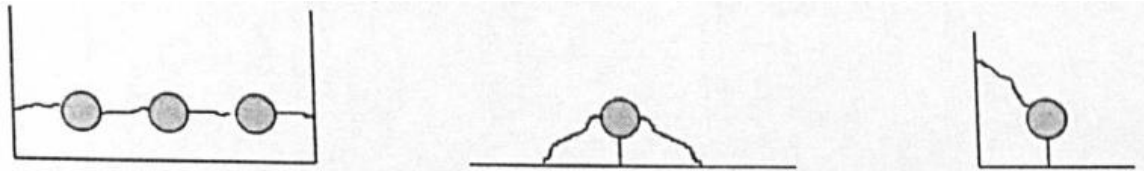
Temperatūrinio plėtimosi koeficientas.

Betono ir plieno temperatūrinio plėtimosi koeficientai yra labai panašūs apie $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, todėl kintančios temperatūros poveikis sukibimui praktiškai neturi jokios įtakos. Kompozitinės armatūros temperatūrinio plėtimosi koeficientas išilgine pluoštui kryptimi priklauso nuo pluošto tipo ir stiklo pluoštui yra panašus į betono apie $\alpha_L = 10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Sukibimui didesnę įtaką daro temperatūrinio plėtimosi koeficientas skersine pluoštui kryptimi. Jis daugiausiai priklauso nuo armatūros gamyboje naudojamos dervos tipo. Dėl šios priežasties kompozitinės armatūros skersinis temperatūrinio plėtimosi koeficientas gali skirtis nuo betono nuo 5 iki 8 kartų. Didėjant temperatūrai kompozitinė armatūra sukelia gerokai didesnę vidinį slėgį į betoną negu plieninė armatūra, todėl išilginiai plyšiai atsiveria greičiau. Dėl lengvesnio polimerinės armatūros suglemžimo ji ir pati sugeria dalį plėtimosi energijos. Skersinis temperatūrinis plėtimasis gali būti kompensuotas skersinių deformacijų dėl Puasono efekto [1].

Apsauginis betono sluoksnis.

Apsauginis betono sluoksnis atlieka pasyvaus armatūros suvaržymo vaidmenį ir neleidžia išilginiams plyšiams pasiekti konstrukcijos paviršiaus. Apsauginis betono sluoksnis paprastai priklauso nuo aplinkos agresyvumo klasės ir atsparumo gaisrui reikalavimų. Kompozitinė armatūra yra daug atsparesnė aplinkos poveikiams negu plieninė armatūra ir jai apsauginis betono sluoksnis nustatomas pagal atsparumo gaisrui reikalavimus. Išilginių plyšių susidarymo atžvilgiu dėl kompozitinės armatūros ypatumų trečiojoje apkrovimo stadijoje reikalingas didesnis apsauginio betono sluoksnis. Siekiant išvengti išilginių plyšių patekimą į konstrukcijos paviršių rekomenduojama, kad apsauginis betono sluoksnis būtų ne mažesnis kaip $4-5 \varnothing$ armatūros skersmenys [1].

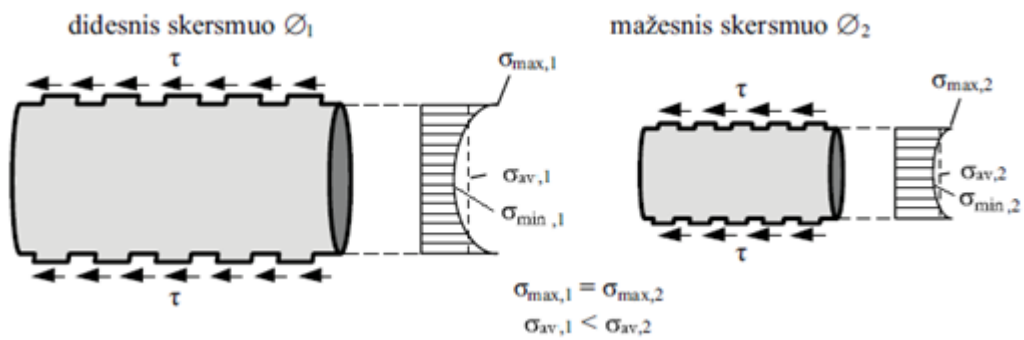
Naudojant armatūra su rumbeliais sukibimo įtakai turi ir elemento armatūros išdėstymas skerspjuvyje, kuris gali suformuoti betoną skeliančių įtrūkimų atsiradimą. Skeliamųjų įtrūkimų susidarymas ir sukibimo įtempiai yra tiesiogiai susiję su armatūros išdėstymu elemento skerspjuvyje (2.3 pav.). Šiuos įtrūkimus plačiau aprašė Nagatomo ir Kaku [27].



2.3 pav. Skeliamųjų įtrūkimų formavimasis: šoninis skilimas, V formos skilimas, kampinis skilimas [26]

Strypo skersmuo.

Atliktų bandymų rezultatai parodė, kad didėjant armatūros skersmeniui sukibimo įtempiai mažėja. Kompozitinėje armatūroje šis efektas yra daug labiau pastebimas nei plieninėje armatūroje dėl armatūros skersinių deformacijų. Polimerinių strypų šlyties modulis lyginant su plienu yra gerokai mažesnis ir labiausiai priklauso nuo armatūros dervos savybių. Kai kompozitinis strypas yra veikiamas tempimo jėgos, dėl nedidelio šlyties modulio, atsiranda netolygus normalinių įtempių pasiskirstymas strypo skerspjūvyje, kaip pavaizduota 2.4 pav.



2.4 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas tempiamajame kompozitiniame strype [1]

Sukibimo įtempiai, kurie susidaro strypo ir betono sąlyčio vietoje, yra tiesiogiai proporcingi normaliniams įtempiams strype σ_{max} . Apskaičiuoti „tikrieji“ sukibimo įtempiai (strype veikianti jėga dalinama iš strypo paviršiaus ploto) yra proporcingi vidutiniams įtempiams strype σ_{av} . Didėjant strypo skersmeniui, skirtumas tarp σ_{max} ir σ_{av} didėja, o apskaičiuoti strypo „tikrieji“ sukibimo įtempiai mažėja. Fiziškai įtempiai σ_{max} didelio ir mažo skersmens strype bus vienodi. Šis reiškinys anglų kalbos literatūroje yra vadinamas *shear lag effect* [25].

Betono stipris.

Betono stipris sukibimo įtempius įtakoja kai vyksta betono kirpimas. Kompozitiniams strypams jis turi įtakos tik iki tam tikros ribos, apie 30-40 MPa. Naudojant stipresnį betoną kirpimas vyksta per polimerinę dervą ir rumbelius, dėl to didėjant betono stipriui sukibimo įtempiai nebedidėja. Betono stipris veikiant tempimo įtempiams turi teigiamą įtaką ir dėl to,

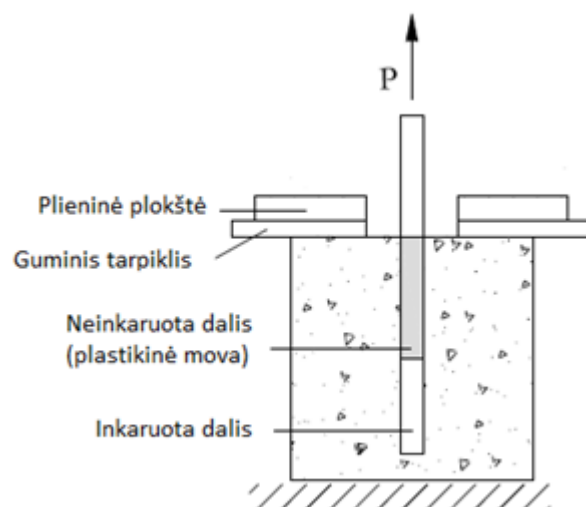
kad suvaržo išilginių plyšių atsiradimą ir plitimą, todėl tai pagerina armatūros elgsenos efektyvumą antroje ir trečioje sukibimo įtempių perdavimo stadijose [26].

3. PASIRUOŠIMAS EKSPERIMENTINIAMS TYRIMAMS

Buvo atliktos kelios serijos armatūros ištraukimo bandymų siekiant ištirti kompozitinės armatūros sukibimo su betonu savybes. Bandymams buvo suformuotos dvi serijos bandinių. Pirmosios serijos bandiniams buvo atlikti atsparumo ugniai bandymai – imituotas realus gaisras. Antrosios serijos bandiniams buvo atliekami armatūros ištraukimo bandymai, kai inkaruoti armatūros galai buvo padengta įvairiomis dangomis. Šiame skyriuje aprašomi bandymui atlikti pasirinkti metodai, medžiagų savybės ir bandinių paruošimas.

3.1. Tyrimų metodas

Ekperimentiniam armatūros ir betono sąveikos įvertinimui dažniausiai naudojamas armatūros ištraukimo bandymas (angl. *pull-out test*). Nors armatūros ištraukimo bandymo metu bandiniuose sukuriamos apkrovimo sąlygos retai pasitaiko praktikoje, šie bandymai plačiai pritaikomi dėl savo efektyvumo ir paprastumo siekiant palyginti skirtingų armatūros strypų sukibimą su betonu. Bandymams yra taikomos dvi bandinių grupės – ilgo ir trumpo inkaravimo ilgio bandiniai. Šiuose eksperimentiniuose sukibimo įtempių tyrimuose buvo panaudoti trumpo inkaravimo bandiniai, kai inkaruojamoji strypo dalis sudaro 3-5 \varnothing naudojamos armatūros skersmenis. Tokia atveju galima priimti, kad sukibimo įtempiai pasiskirstę tolygiai per visą inkaravimo ilgį.



3.1 pav. Ištraukimo bandymo schema vidutinių sukibimo įtempių nustatymui

Pasirinktas ištraukimo bandymo metodas turi kelis trūkumus, kurie daro įtaką bandymo rezultatams. Šio bandymo metu betone susidaro gniuždymo įtempiai dėl bandinio rėmimosi į plieninę plokštę. Siekiant išvengti skersinių mikroplyšių susidarymo varžymo, inkaruota strypo dalis yra perkeliama toliau nuo atraminės reakcijos (3.1 pav.). Dėl skersinių mikroplyšių suvaržymo sukibimo įtempiai gaunami didesni nei yra realūs. Bandinio rėmimosi į plieninę plokštę metu susidaro trinties jėgos, kurios varžo skersines betono deformacijas ir padidina gaunamus sukibimo įtempius. Trinties efektas yra mažinamas panaudojus guminius tarpiklius tarp bandinio ir plieninės plokštės [1].

Atliekant ištraukimo bandymą, betono ir armatūros sąlyčio zonoje veikiantys vidutiniai sukibimo įtempiai apskaičiuojami išmatavus veikiančią jėgą ir ją padalijus iš armatūros paviršiaus ploto:

$$\tau_{av} = \frac{P}{\pi \cdot \phi \cdot l} \quad (3.1)$$

čia: P – ištraukimo jėgos reikšmė; ϕ – armatūros strypo skersmuo; l – sukibusios su betonu strypo dalies ilgis.

3.2. Naudojamos medžiagos

Betonas.

Betonas ištraukimo bandymo bandiniams gaminti buvo paruoštas laboratorijoje. Jo sudėtis pateikta 3.1 lentelėje. Dėl palankių darbo sąlygų ir galimybių bandiniai buvo suformuoti dviem maišymais. Pirmuoju maišymu buvo suformuoti bandiniai atsparumo ugniai ir armatūros ištraukimo bandymui. Antruoju maišymu buvo suformuoti bandiniai armatūros ištraukimo bandymui, kai armatūra buvo padengta įvairiomis dangomis. Kiekvieno maišymo metu buvo suformuota po tris kontrolinius bandinius (100 mm kubeliai) betono gniuždomojo stiprio nustatymui, kurie buvo kietinami tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir tiriamieji bandiniai. Ugnies atsparumo bandymui bandiniai su armatūra buvo padengti apsauginės betono dangos sluoksniu su skirtingomis apsauginio sluoksnio sudėtimis. Lygiagrečiai bandiniams su armatūra buvo suformuoti ir bandiniai su apsauginės betono dangos sluoksniu be armatūros, tam kad būtų išmatuota temperatūra bandinio viduje ir jų stiprumas po terminio bandymo. Iš viso buvo suformuota po tris kiekvienos rūšies bandinius.

3.1 lentelė. Betono mišinio sudėtis

Medžiagos	Žymėjimas ir matavimo vienetai	Kiekis 1 m ³ betono mišinio
Cemento kiekis	C, kg	305,02
Vandens kiekis	V, l	130,25
Stambaus užpildo kiekis	S _t , kg	839,48
Smėlio kiekis	S _m , kg	1068,07
Vandens ir cemento santykis	V/C	0,43
Betono mišinio tankis	kg/m ³	2342,82

Armatūra.

Bandymams atlikti buvo panaudota stiklo pluošto kompozitinė armatūra su vinilo esterio derva, kuri buvo pristatyta iš vieno gamintojo tos pačios gamybos partijos. Plieninė S-500 klasės armatūra buvo gauta iš statybos aikštelės, kurioje buvo rišami armatūros tinklai. Bandymams naudojamos armatūros skersmuo pasirinktas vienodas – 10 mm. Siekiant nustatyti kompozitinės armatūros skerspjūvio plotą reikia naudoti standartizuotus bandymus, pavyzdžiui, pagal standartą ACI 440.3R-04 [28] arba ISO 10406-1:2015 [29]. Bandymams naudojamos armatūros strypų vidutiniai geometriniai parametrai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Naudojamos armatūros rūšys

Armatūros tipas	Paviršius struktūra	Skersmuo, mm	Skerspjūvio plotas, mm ²	Kiekis, vnt.
Plieninė-PL	rumbuota	10	0,785	3
GFRP-N	su papildomu spiraliniu pluoštu	10	0,785	27
GFRP-Y1	su papildomu spiraliniu pluoštu ir ceolitinės (sintetinis ceolitas y) atliekos danga su epoksidine derva	10	0,785	3
GFRP-Y2	su papildomu spiraliniu pluoštu ir ceolitinės (sintetinis ceolitas y) atliekos danga su poliesterine derva	10	0,785	3
GFRP-M1	su papildomu spiraliniu pluoštu ir metalinių konstrukcijų valymo šratų atliekos danga su epoksidine derva	10	0,785	3
GFRP-M2	su papildomu spiraliniu pluoštu ir metalinių konstrukcijų valymo šratų atliekos danga su poliesterine derva	10	0,785	3
GFRP-S1	su papildomu spiraliniu pluoštu ir smėlio (0/4 fr.) danga su epoksidine derva	10	0,785	3

3.2 lentelės tęsinys

GFRP-S2	su papildomu spiraliniu pluoštu ir smėlio (0/4 fr.) danga su poliesterine derva	10	0,785	3
GFRP-A1	su papildomu spiraliniu pluoštu ir sintetinio ceolito Na-A danga su epoksidine derva	10	0,785	3
GFRP-A2	su papildomu spiraliniu pluoštu ir sintetinio ceolito Na-A danga su poliesterine derva	10	0,785	3
GFRP-T1	su papildomu spiraliniu pluoštu ir tobermorito danga su epoksidine derva	10	0,785	3
GFRP-T2	su papildomu spiraliniu pluoštu ir tobermorito danga su poliesterine derva	10	0,785	3
GFRP-H1	su papildomu spiraliniu pluoštu ir hidrosodalito (ceolitas) danga su epoksidine derva	10	0,785	3
GFRP-H2	su papildomu spiraliniu pluoštu ir hidrosodalito (ceolitas) danga su poliesterine derva	10	0,785	3

Pagrindinės armatūros strypų, kurie buvo naudojami atliekant bandymus, savybės pateiktos 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Pagrindinės naudotos armatūros fizikinės ir mechaninės savybės

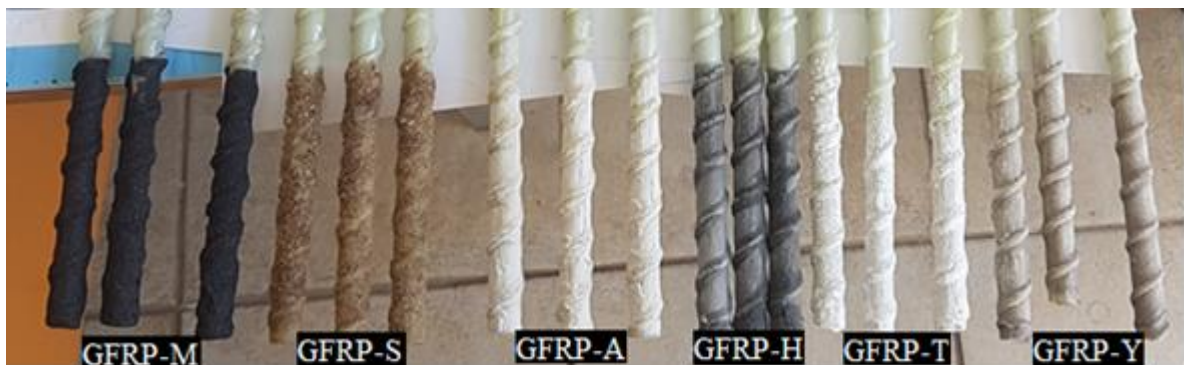
Savybė	Vienetai	Plieninė armatūra S-500 klasės	Stiklo pluošto armatūra
Tankis	t/m^3	7,85	1,9
Stiprumo riba tempiant	MPa	500	1000
Tamprumo modulis tempiant	GPa	200	45
Šiluminio laidumo koeficientas	W/mK	45	0,4
Temperatūrinis linijinio plėtimosi koeficientas	$10^{-6}/K$	11-13	9-12
Santykinis pailgėjimas	%	14	2,2
Elektros laidumas		laidi	nelaidi
Atsparumas korozijai		neatspari	atspari

3.3. Bandinių gamyba

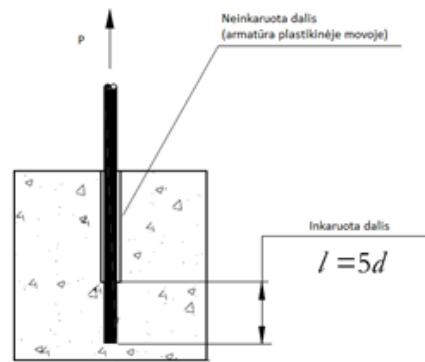
Strypų paruošimas.

Bandymui armatūra buvo supjaustyta į 400 mm ilgio strypus. Antros serijos bandinių armatūros galai, apie 100 mm ilgio, buvo padengti dviejų rūšių, epoksidine ir poliesterine, dervomis su 6 rūšių skirtingomis mineralinėmis medžiagomis: metalinių konstrukcijų valymo šratų atliekomis, smėliu (0/4 fr.), sintetiniu ceolitu Na-A, hidrosodalitu (ceolitas), tobermoritu ir ceolitine atlieka (sintetinis ceolitas y). Dangomis padengtos armatūros strypai pavaizduoti 3.2 pav.

Prieš įbetonuojant armatūros strypus, strypai buvo pažymėti ir paruošti taip, kad inkaravimo ilgis visų strypų būtų vienodas ir armatūros strypai būtų įbetonuojami betoninio kubelio viduryje. Inkaruojami į betoną armatūros galai buvo įmaiti į plastikinius vamzdelius tam, kad būtų suformuota tam tikro ilgio inkaruojamoji strypo dalis. Pagal tarptautinio standarto ISO 10406-1:2008 [29] nurodymus kompozitinės armatūros ištraukimo bandymui, buvo pasirinktas inkaravimo ilgis lygus $l = 5d$. Paruoštos įbetonavimui armatūros (3.3 (a) pav.) ir jos padėties bandinyje (3.3 (b) pav.) schemas pavaizduotos 3.3 pav.



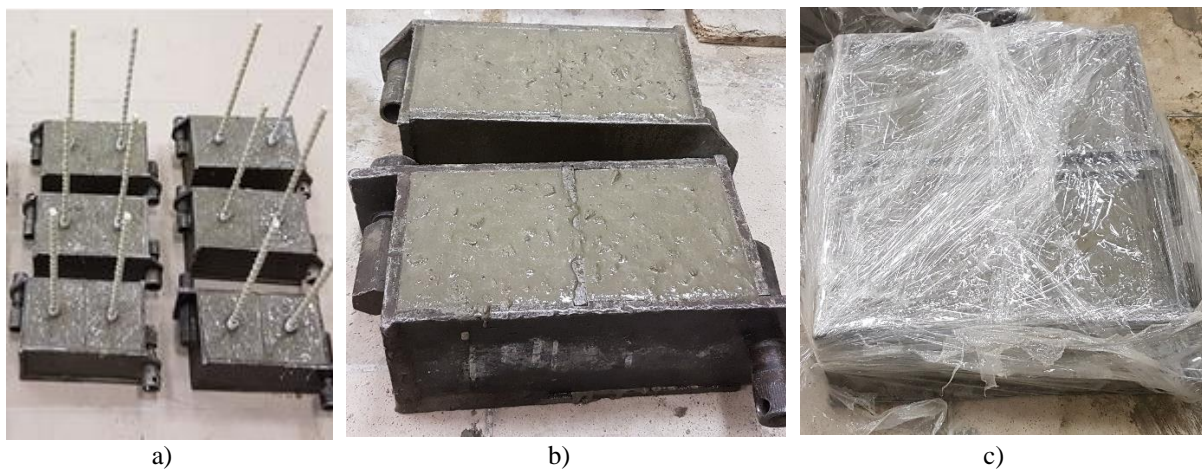
3.2 pav. Armatūros galų padengimas dangomis. Iš kairės į dešinę: metalinių konstrukcijų valymo šratų atliekomis, smėliu (0/4 fr.), sintetiniu ceolitu Na-A, hidrosodalitu (ceolitas), tobermoritu ir ceolitine atlieka (sintetinis ceolitas y).



3.3 pav. Armatūros paruošimas: a – įbetonavimui paruošta armatūra; b – armatūros padėtis bandinyje

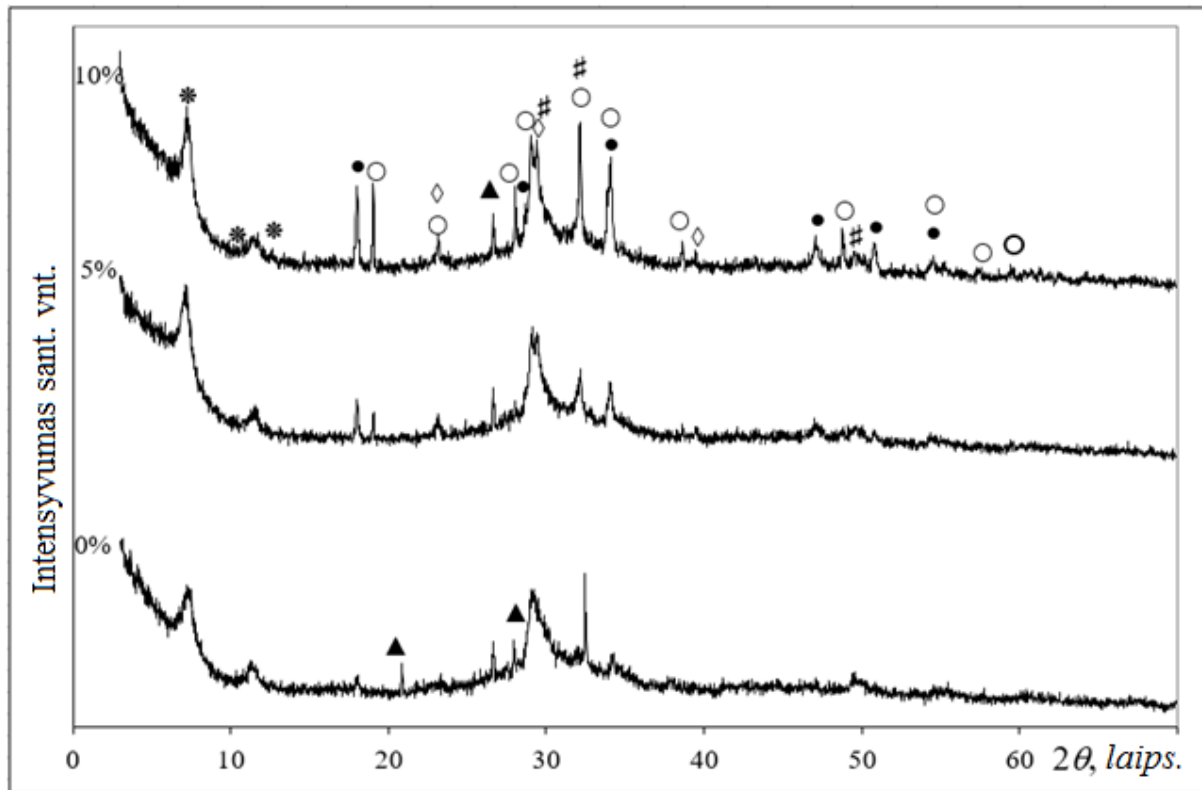
Formų paruošimas, užpildymas betonu ir kietinimo procesas.

100 mm betono kubeliams formuoti buvo naudotos dvivietės formos pagamintos iš plieno. Prieš bandinių formavimą formų vidus buvo išteptas plonu alyvos sluoksniu, kad betonas neprikibtų prie formų vidinių sienelių. Betonas į formas buvo klojamas vienu sluoksniu ir tankinamas ant vibrostendo. Tankinant betoną vibrostendū armatūros strypai buvo išdėstomi formos viduryje iki reikiamos žymos ant plastikinės movos (3.4 (a) pav.). Lygiagrečiai bandiniams su armatūra tokiomis pačiomis sąlygomis buvo formuojami ir kontroliniai bandiniai (3.4 (b) pav.). Paruoštos formos buvo apdengtos plėvele (3.4 (c) pav.) ir paliktos kietėjimui parą kambario temperatūros aplinkoje.

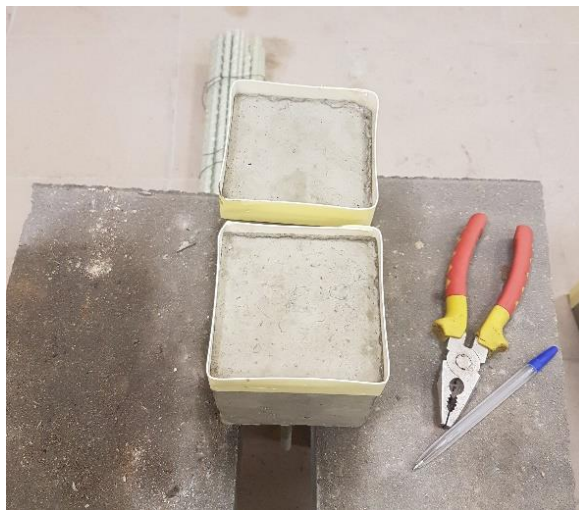


3.4 pav. Bandiniuose išdėstyti armatūros strypai (a), suformuoti kontroliniai bandiniai (b) ir suformuotų bandinių apdengimas plėvele (c)

Praėjus parai po bandinių suformavimo, bandiniai buvo išimti iš formų. Bandiniai, kurie buvo skirti atlikti atsparumo ugniai bandymui, buvo padengti apsauginės betono dangos sluoksniu (3.6 pav. (a)). Danga buvo pagaminta iš šarmu aktyvuoto šlako su skirtingais fosfogipso kiekiais mišinyje: 0, 1, 3, 5, 7 ir 10 %. Dangos rentgenodifrakcinės kreivės pateiktos 3.5 pav. Atlikti apsauginės dangos tyrimai parodė, kad geriausios dangos savybės pasiekiamos su optimaliu natrio sulfato Na_2SO_4 kiekiu, kai fosfogipso kiekis mišinyje vyrauja nuo 1 iki 5 %. Betonų kubeliai, kurie buvo formuojami lygiagrečiai betono bandiniams su armatūra taip pat buvo padengti apsauginės betono dangos sluoksniu (3.6 pav. (b)) su skirtingais fosfogipso kiekiais mišinyje, tik padengimas vyko formose, kadangi jose nebuvo armatūros ir ji netrukdė padengimui. Padengti apsauginėmis dangomis bandiniai buvo palikti per naktį apsauginės betono dangos sluoksnio rišimuisi ir sukibimui su betonu.



3.5 pav. Šarmu aktyvuoto šlako dangos rentgenodifrakcinės kreivės. Žymenys: ● - portlanditas Ca(OH)_2 , ◊ - kalcitas CaCO_3 , ▲ - kvarcas SiO_2 , ○ – natrio sulfatas Na_2SO_4 , * - kalcio aluminio silikato hidratas $\text{Ca}_{5,57}\text{Al}_{12,3}\text{Si}_{12}\text{O}_{49,2}\text{H}_{2,34}$, # - kalcio silikato hidratas $\text{Ca}_{1,5}\text{Si}_{3,5}\text{O}_{3,5}\text{xH}_2\text{O}$



a)



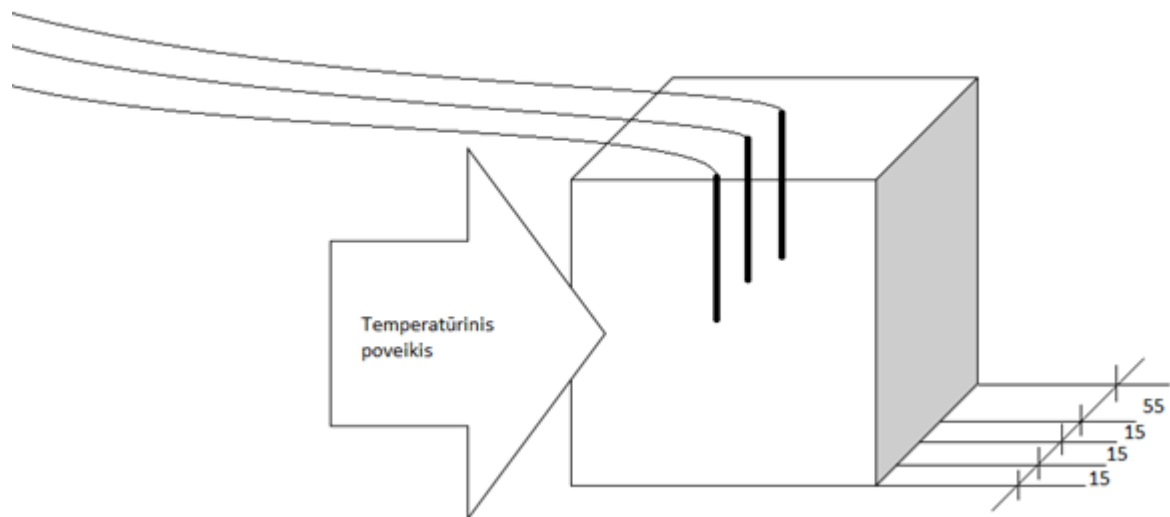
b)

3.6 pav. Bandinių padengimas apsauginiu tinko sluoksniu: a – su armatūra; b – be armatūros

Po bandinių padengimo apsauginės betono dangos sluoksniu, visi bandiniai išformuojami praėjus parai. Visi bandiniai buvo sužymėti pagal armatūros tipus ir apsauginių dangų sluoksnius. Bandiniai po išformavimo buvo perkelti į laboratorijos kietinimo patalpą, sudėti į lentynas ir palikti tolimesniam kietėjimui iki kol kietėjimo laikas pasiekė bendrą 28 parų

kietėjimo laiką. Laboratorijos bandinių kietinimo patalpos temperatūra buvo nustatyta 20 ± 2 °C laipsnių temperatūrai ir 95 % aplinkos drėgnei.

Po 28 parų kietėjimo kontroliniuose bandiniuose be armatūros, su apsauginės betono dangos sluoksniu buvo išgręžtos skylutės termoporoms. Iš viso kiekviename bandinyje buvo išgręžtos trys 3 mm skersmens ir 50 mm gylio skylutės. Temperatūrai skirtingose betono sluoksniuose nuo kaitinamos plokštumos nustatyti buvo pasitelktos K tipo termoporos. Termoporos buvo įmontuotos taip, kad išmatuotų temperatūrą bandinio centre. Termoporos skylutėse buvo išdėstytos intervalu po 15 mm nuo temperatūros poveikio paviršiaus. Bandinio su termoporomis schema pateikta 3.7 pav.



3.7 pav. K tipo 3 termoporos iki bandinio centro

4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

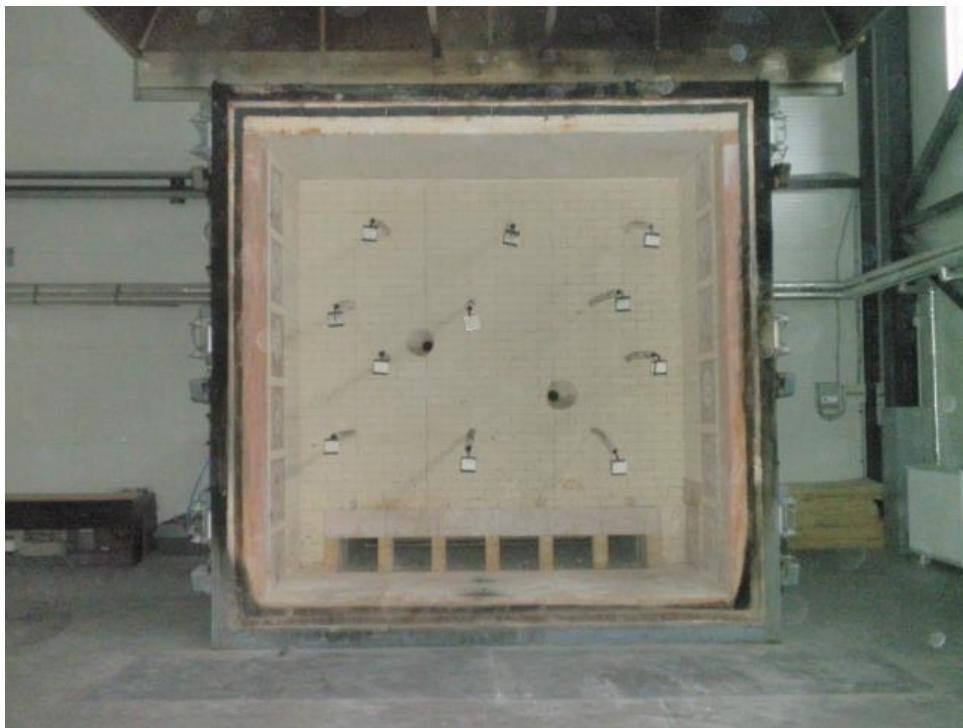
Šiame skyriuje aprašomi bandymai, kurie buvo atlikti tiriant stiklo pluošto armatūros sukibimą su betonu ir terminį atsparumą. Pirmiausia buvo atliktas atsparumo ugniai bandymas, kurio metu suformuoti bandiniai buvo paveikti temperatūromis, kurios susidaro gaisro metu. Po atsparumo gaisrui bandymo, visiems bandiniams su armatūra buvo atliktas armatūros ištraukimo bandymas. Skyriuje pateikti bandymams naudoti įrengimai, bandymų eiga ir bandymu metu gauti rezultatai.

4.1. Atsparumo ugniai bandymas

Atsparumo ugniai bandymas atliktas pagal Lietuvoje galiojantį standartą LST EN 1364-1:2015 [30], kuris skirtas nelaikančiųjų elementų atsparumo ugniai bandymams. Bandymams buvo naudota krosnis (4.1 pav.), kuri iš vienos pusės uždengiama bandomąja 3000x3000 mm siena. Bandymų krosnis naudoja dujinį kurą. Dujų degikliai krosnyje įmontuoti vertikaliai iš abiejų krosnies pusių. Krosnies viduje sumontuotos termoporos, skirtos matuoti krosnies temperatūrą krosnies viduje, kuri turi atitikti kreivės lygtį:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (3.1)$$

čia: T – vidutinė krosnies temperatūra, Celsijaus laipsniais; t – laikas, minutėmis.

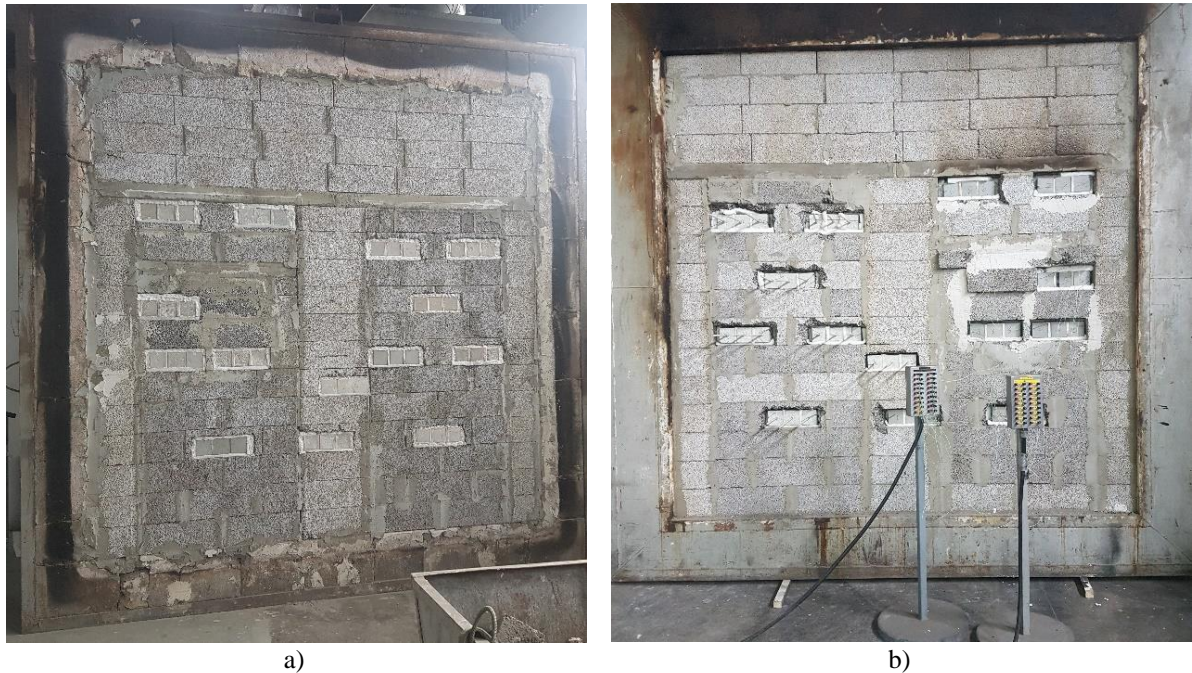


4.1 pav. Atsparumo ugniai bandymo krosnis¹

Atsparumo ugniai tyrimui bandiniai buvo sugrupuoti ir sujungti po tris atskiriant juos keramikos krosnių priedu – kaolino vieta. Bandiniai iš šonų atskirti ugniai atsparia kaolino vata tam, kad būtų sumažintas temperatūros veikimas į bandinių šonus. Į bandinius su išgręžtomis skylutėmis buvo sudėtos termoporos su išvestais laidų galais jų prijungimui į kontaktinę. Bandomoji krosnies 3000x3000 mm siena buvo sumūryta iš keramzito 150x185x490 mm blokelių naudojant plonasluoksnį mūro mišinį. Bandomoje sienoje buvo suformuotos angos, į kurias buvo įtvirtinti sugrupuoti ir sujungti bandiniai. Tarpai tarp sienose suformuotų angų ir

¹ <http://www.gtcentras.lt/bendroji-informacija-3>

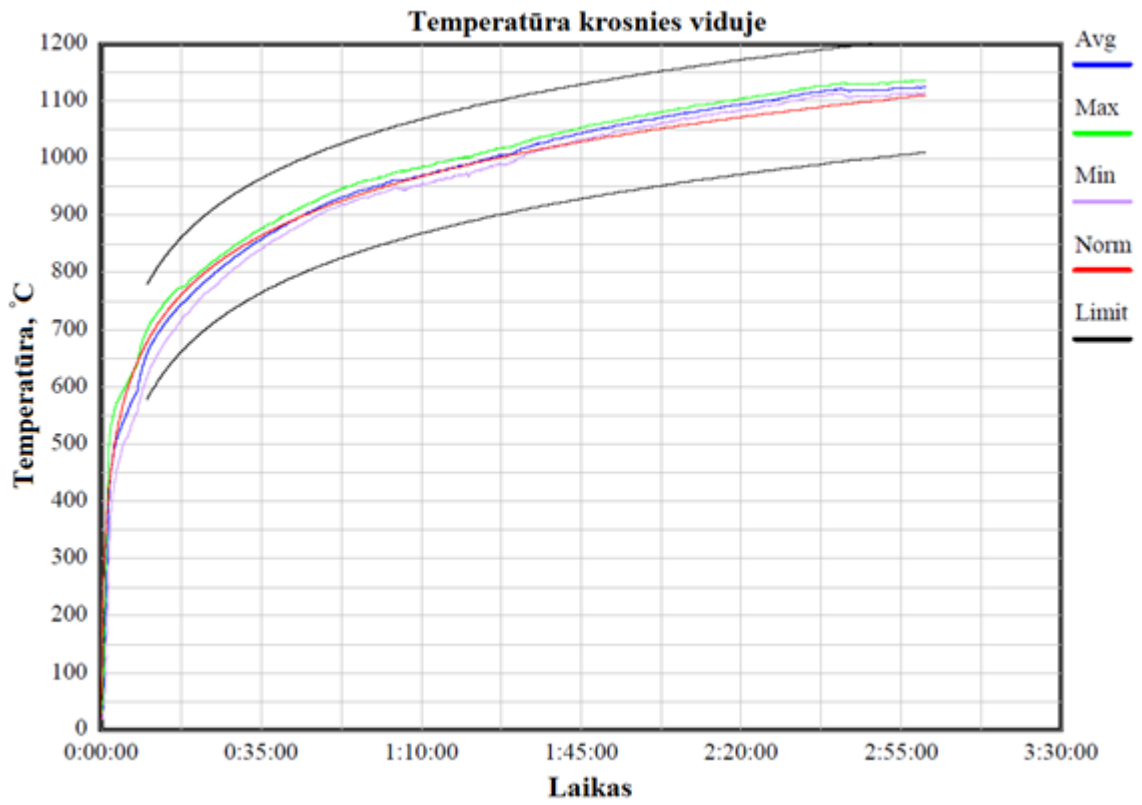
bandinių taip pat buvo aptaisyti ugniai atsparia kaolino vata, kaip parodyta 4.2 (a) pav. Galiausiai atvira krosnies plokštuma uždengta su bandomąja siena ir joje esančiais bandiniais. Uždengus krosnį bandomąja siena iš termoporų išvesti laidai buvo sujungti į kontaktinę (4.2 (b) pav.) ir pradėtas atsparumo ugniai bandymas.



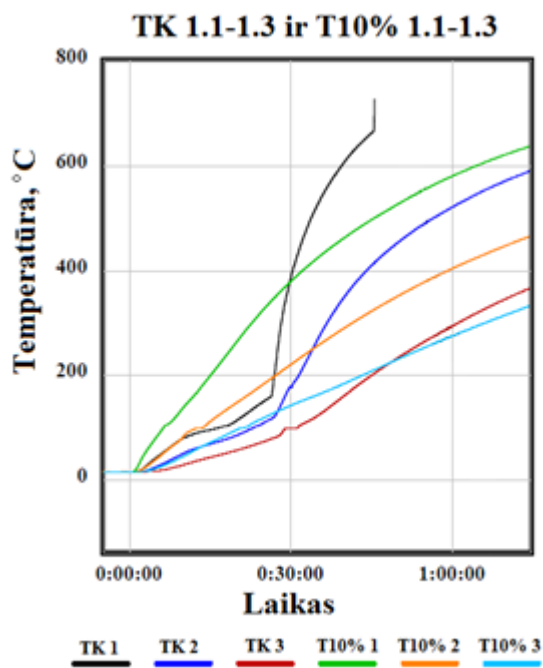
4.2 pav. Bandomosios sienos vaizdas: a – iš temperatūros poveikio pusės; b – iš išorinės pusės

Atsižvelgiant į tai, kad kompozitinės armatūros strypai nėra atsparūs aukštos temperatūros poveikiui bandiniams su kompozitine armatūra atsparumo gaisrui bandymas atliktas vieną valandą. Po vienos valandos aukštos temperatūros poveikio jie buvo išmontuoti iš krosnies sienos. Kontroliniai bandiniai su apsaugine danga buvo palikti bandomoje sienoje ir toliau veikiami gaisro sukeliama temperatūra iki trijų valandų poveikio.

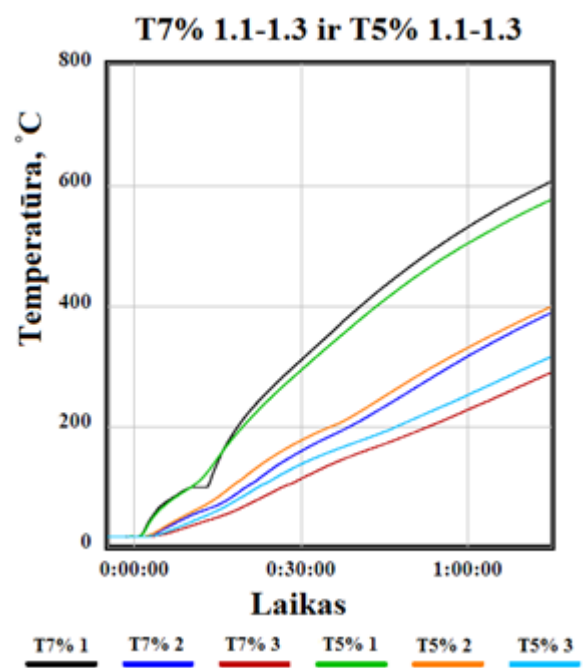
Bandymo metu duomenys iš termoporų buvo registruojami kompiuterine programa. Termoporų temperatūros pokyčių registravimo laikas 3 sekundės. Kiekvienos termoporos išmatuota temperatūra kintant laikui pavaizduota toliau pateiktuose grafikuose.



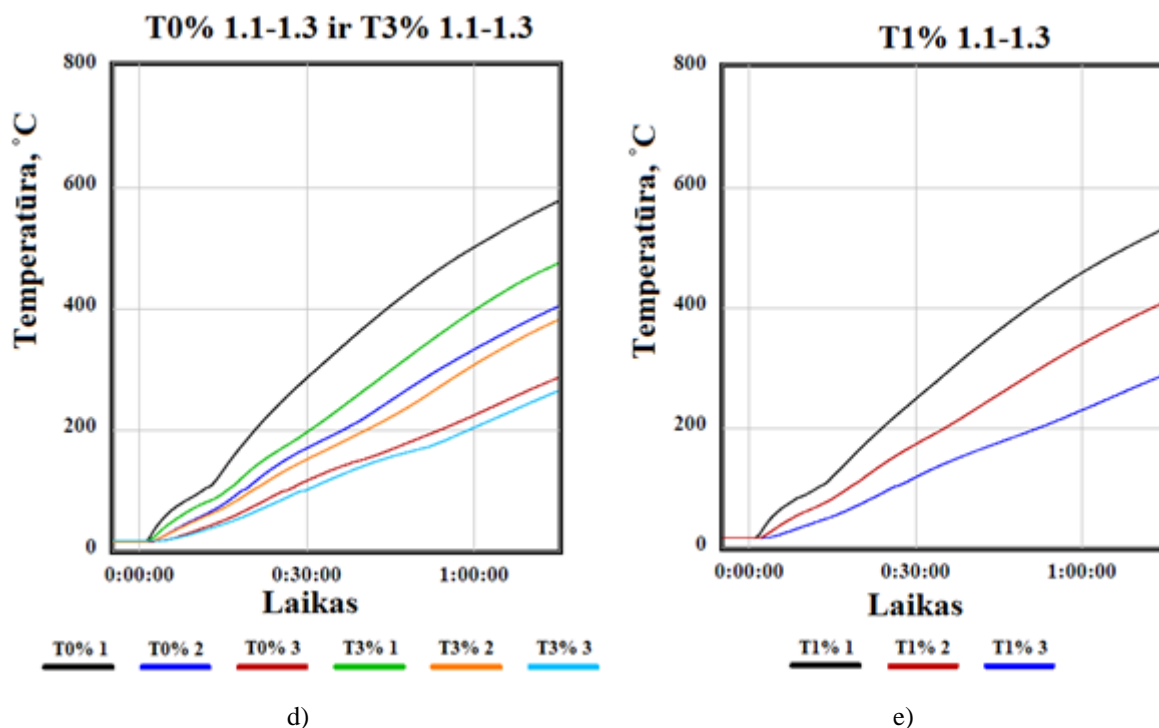
a)



b)



c)



4.3 pav. Atsparumo ugniai bandymų metu išmatuotų temperatūrų kreivės: a – temperatūra krosnies viduje; b – kontrolinių bandinių TK ir bandinių su 10 % fosfogipso kiekiu mišinyje dangą; c – bandinių su 7 % ir su 5 % fosfogipso kiekiu mišinyje dangą; d – bandinių su 0 % ir su 3 % fosfogipso kiekiu mišinyje dangą; e – bandinių su 1 % fosfogipso kiekiu mišinyje dangą (paskutinis skaičius prie bandinio pavadinimo nurodo termoporos vietą nuo temperatūrinio poveikio paviršiaus)

Termoporomis išmatuotų temperatūrų vertės po vienos valandos pateiktos 4.1 lentelėje. Lentelėje pateiktos visų trijų kiekvieno bandinio termoporų temperatūrų vertės.

4.1 lentelė. Termoporomis išmatuotų temperatūrų vertės po 1 h

Bandinys	Termopora – 1 (15 mm nuo veikiamo paviršiaus)	Termopora – 2 (30 mm nuo veikiamo paviršiaus)	Termopora – 3 (45 mm nuo veikiamo paviršiaus)
TK	686 °C (po 45 min)	522 °C	295 °C
T0%	502 °C	334 °C	225 °C
T1%	460 °C	341 °C	231 °C
T3%	398 °C	308 °C	205 °C
T5%	505 °C	331 °C	252 °C
T7%	531 °C	317 °C	229 °C
T10%	581 °C	405 °C	266 °C

4.2. Gniuždymo bandymas

Bandinių gamybos metu buvo formuojami kontroliniai bandiniai rezultatų palyginimui po bandymo. Betono sudėtis pateikta 3.1 lentelėje. Betono gniuždomajam stipriui nustatyti, tiek kontrolinių bandinių, tiek bandinių po bandymo, buvo panaudota „Automax 5“ gniuždymo

mašima (4.4 (a) pav.), kuri atitinka Lietuvoje galiojančio standarto LST EN 12390-4:2003 [31] keliamus reikalavimus. Kontrolinių ir bandinių po atsparumo ugniai bandymo betono gniuždomojo stiprio rezultatai pateikti 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Betono gniuždomasis stipris

Nr.	Svoris, g	l, mm	b, mm	h, mm	Tankis, kg/m ³	Jėga, kN	Stipris gniuždant, MPa	Vidurkis, MPa
KN	2345,9	100,00	101,14	100,04	2319	589,0	55,28	56,53
KN	2340,8	99,81	101,10	99,98	2320	610,7	57,50	
KN	2359,1	100,69	100,25	100,69	2321	626,4	56,80	
TK	2205,9	101,73	101,23	100,09	2140	309,7	33,82	32,37
TK	2122,5	101,60	99,19	100,12	2104	286,5	30,92	
T0%	2005,4	100,73	90,45	101,41	2170	369,4	40,53	39,87
T0%	2008,5	101,54	89,68	100,56	2193	357,1	39,21	
T1%	2025,1	101,59	90,15	101,92	2170	414,3	45,21	45,39
T1%	2041,7	100,26	91,22	100,86	2213	419,1	45,57	
T3%	2054,0	100,36	91,75	102,40	2178	437,0	47,41	47,31
T3%	2043,2	100,58	91,43	103,19	2153	432,0	47,21	
T5%	2000,0	101,00	89,90	100,96	2182	357,9	39,38	38,74
T5%	2017,7	101,51	91,34	102,21	2129	344,0	38,09	
T7%	1999,1	100,79	90,80	101,63	2149	330,1	36,03	36,17
T7%	1998,6	100,17	89,59	101,03	2204	325,1	36,31	
T10%	1983,4	100,29	89,54	101,16	2183	355,5	34,43	33,24
T10%	1978,3	100,67	89,00	101,13	2183	323,0	32,05	



a)



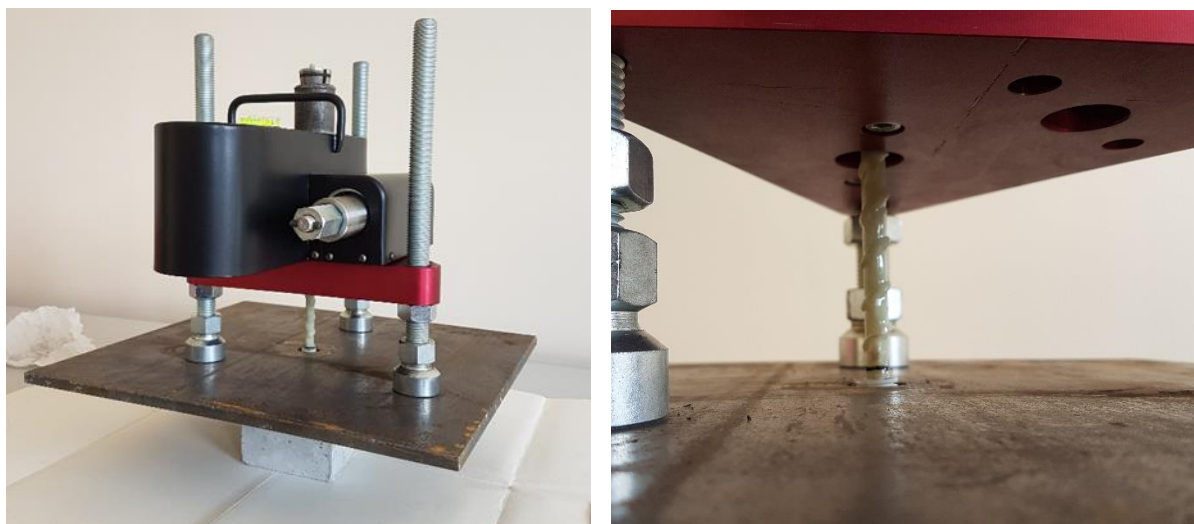
b)

4.4 pav. Vaizdai po bandymų: a – bandinys po gniuždomojo; b – bandiniai po terminio poveikio be gniuždomojo

Betono bandiniai po atsparumo ugniai bandymo bėgant laikui pradėjo savaime irti (4.4 (a) pav.). Tai paaiškina keli aukštoje temperatūroje vykstantys procesai. Didesnėje nei 100 °C temperatūroje vanduo pasišalina iš kalcio hidrosilikatų. Temperatūrai pasiekus apie 450 °C prasideda kalcio hidroksidų skilimas, o temperatūrai pakilus iki 750 °C prasideda kalcio karbonatų skilimas.

4.3. Armatūros ištraukimo bandymas

Eksperimentinio armatūros ištraukimo bandymo atlikimas pavaizduotas 4.5 pav. Naudojant pasirinktą metodą ant bandinio su armatūra buvo uždėta plieninė 10 mm plokštė su 20 mm skersmens skylė centre. Trinties sukeliamiems neigiamiems efektams sumažinti, tarp plieninės plokštės ir bandinio buvo įmontuotas guminis tarpiklis. Armatūra bandymo mechanizme buvo įtvirtinta trijų dalių kūgio formos spraustu. Armatūros ištraukimo bandymui panaudotas „Model 2008 heavy duty tension tester“ įrenginys.



4.5 pav. Armatūros ištraukimo bandymo atlikimas

Iš viso buvo atlikti 66 armatūros ištraukimo bandymai iš 66 bandinių. 36 bandinių stiklo pluošto armatūra buvo padengta šešiomis skirtingomis mineralinių medžiagų dangomis su dviejų rūšių dervomis, paruošiant po tris bandinius su kiekviena danga. 18 atsparumo ugniai bandinių su stiklo pluošto armatūra buvo padengti apsauginėmis betono dangomis su skirtingais fosfogipso kiekiais mišiniuose. 9 bandiniai su stiklo pluoštu buvo kontroliniai, 3 iš jų buvo atliktas atsparumo ugniai bandymas be betono padengimo apsaugine danga. Taip pat rezultatų palyginimui buvo išbandyti ir 3 bandiniai su plienine $\varnothing 10$ S500 klasės armatūra. Bandymo metu gautos armatūros ištraukimo jėgos pateiktos 4.3 lentelėje.

4.3 lentelē. Armatūros ištūkimo jēga

Nr.	Ištūkimo jēga, kN	Vidurkis, kN	Nr.	Ištūkimo jēga, kN	Vidurkis, kN
KN	20,4	20,77	S1	13,6	12,27
KN	21,7		S1	11,2	
KN	20,2		S1	12,0	
KN	20,1	21,17	A1	9,2	8,43
KN	22,2		A1	7,9	
KN	21,2		A1	8,2	
TK	9,1	9,30	T1	12,5	12,80
TK	8,6		T1	14,2	
TK	10,2		T1	11,7	
T0%	13,9	13,97	H1	8,9	9,40
T0%	14,3		H1	10,1	
T0%	13,7		H1	9,2	
T1%	14,9	14,37	Y2	16,5	15,90
T1%	13,7		Y2	15,9	
T1%	14,5		Y2	15,3	
T3%	14,4	14,93	M2	12,6	11,70
T3%	14,9		M2	10,9	
T3%	15,5		M2	11,6	
T5%	13,8	13,40	S2	9,5	10,20
T5%	12,1		S2	10,1	
T5%	14,3		S2	11,0	
T7%	14,1	13,33	A2	13,4	13,53
T7%	12,3		A2	13,1	
T7%	13,6		A2	14,1	
T10%	10,5	11,57	T2	17,1	16,43
T10%	13,1		T2	16,6	
T10%	11,1		T2	15,6	
Y1	9,1	9,20	H2	16,0	16,37
Y1	9,5		H2	15,6	
Y1	9,0		H2	17,5	
M1	11,1	12,43	PL	24,3	24,43
M1	12,3		PL	23,8	
M1	13,9		PL	25,2	

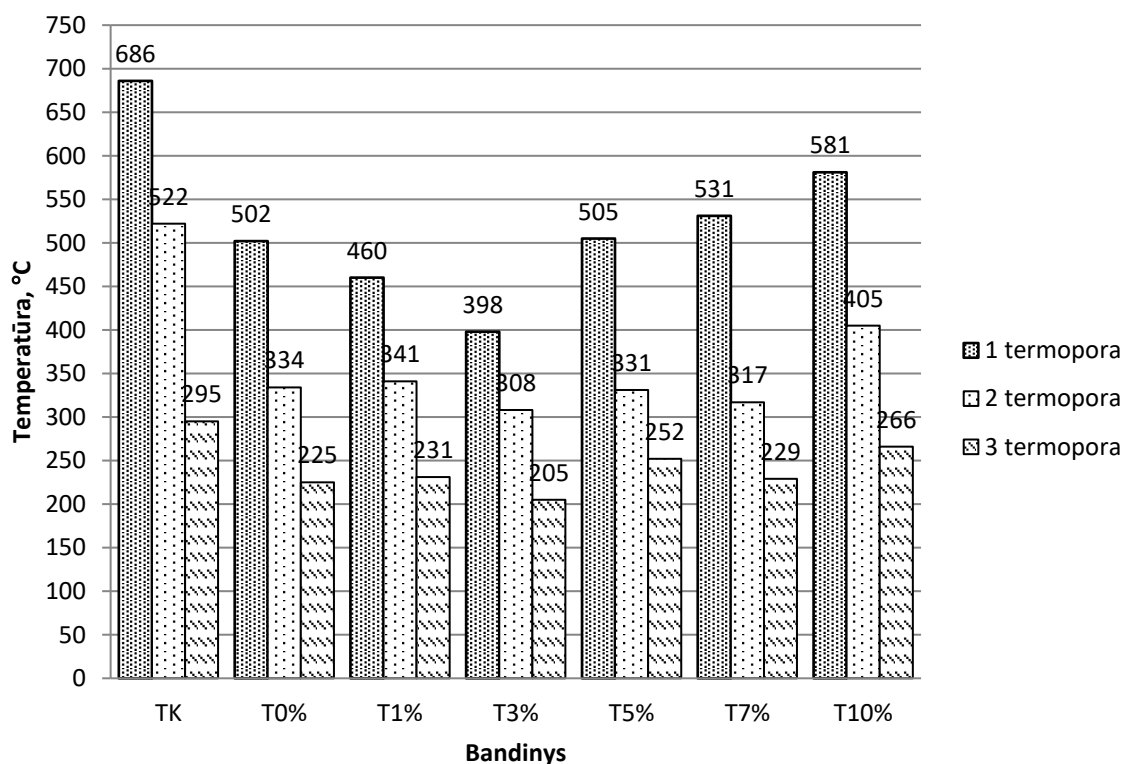
* KN žymi kontrolinius temperatūros nepaveiktus bandinius; TK žymi kontrolinius temperatūros paveiktus bandinius be apsauginės betono dangos; T % žymi temperatūros paveiktus bandinius su apsaugine betono danga su skirtingais fosfogipso kiekiais mišinijje; Bandinių su armatūra, kurie padengti apsaugine betono danga numeriai pažymėti pagal 3.2 lentelėje naudojamoms armatūroms rūšis;

5. EKSPERIMENTINIAI REZULTATAI

Šiame skyriuje aptariami atsparumo gaisrui, gniuždymo ir armatūros ištraukimo eksperimentinių bandymų metu gauti rezultatai. 90 kubelio formos bandinių buvo išbandyti, tam kad būtų įvertinta kompozitinės armatūros ir betono sukibtis.

Atsparumo ugniai bandymas.

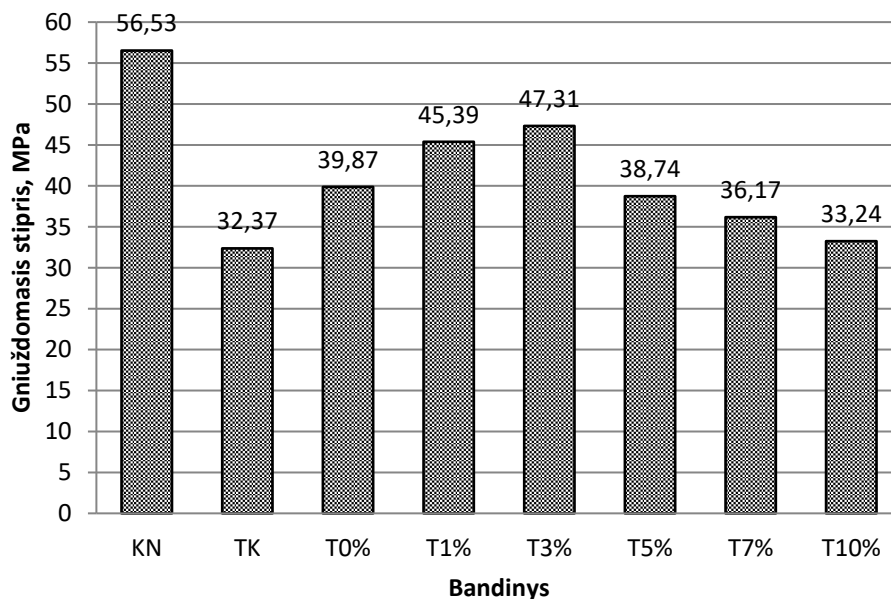
Atsparumo ugniai bandymo metu kontrolinio bandinio be apsauginio betono sluoksnio pirmojoje termoporoje buvo pasiekta didžiausia 686 °C temperatūra. Ši temperatūra pasiekta praėjus 45 min. Po šios užfiksuotos temperatūros termopora dėl karščio poveikio sudegė ir pradėjo rodyti netikslūs rezultatus. Apsauginės betono dangos padarė nemažą įtaką temperatūros didėjimui bandinių viduje. Pirmosiose bandinių su apsauginėmis betono dangomis termoporose išmatuotos temperatūros, lyginant su kontrolinio bandinio be apsauginės betono dangos, buvo nuo 105 iki 288 °C, t. y. nuo 15 iki 40 % žemesnės. Toliausiai nuo temperatūros veikiamo paviršiaus esančių termoporų skirtumai buvo žemesni. Kontrolinio bandinio be apsauginės betono dangos trečiojoje termoporoje išmatuota 295 °C temperatūra, o bandinių su apsauginėmis betono dangomis temperatūros buvo nuo 29 iki 90 °C žemesnės, t. y. nuo 10 iki 30 % žemesnės. Temperatūrų palyginimui skirtingose termoporose 5.1 pav. pateiktos išmatuotų temperatūrų vertės.



5.1 pav. Termoporomis išmatuota bandinių temperatūra

Gniuždymo bandymas.

Betono gniuždomojo stiprio nustatymas betono kubeliams po atsparumo ugniai bandymo atliktas tam, kad būtų galima nustatyti aukštos temperatūros poveikį betono stipriui gniuždant. 2.4 poskyryje minėta, kad betono stipris sukibimo įtempius įtakoja kai vyksta betono kirpimas, bet tik iki tam tikros ribos, apie 30-40 MPa. Naudojant stipresnį betoną kirpimas vyksta per polimerinę dervą ir rumbelius, todėl dar didinant betono stiprį sukibimo įtempiai nedidėja. Kontrolinių bandinių vidutinis stiprumas gniuždant nustatytas 56,53 MPa. Po trijų valandų atsparumo ugniai bandymo labiausiai sumažėjo kontrolinio terminio bandinio gniuždomasis stipris. Jis sumažėjo iki 32,37 MPa, o tai sudaro 43 % gniuždomojo stiprio sumažėjimą lyginant su kontroliniu temperatūros nepaveiktu bandiniu. Mažiausiai gniuždomojo stiprio prarado kubeliai su apsaugine betono danga, kurioje buvo 3 % fosfogipso kiekis – iki 47,31 MPa, t. y. 16 % stiprumo gniuždant praradimas lyginant su kontroliniu temperatūros nepaveiktu bandiniu. Visų bandinių stiprumas gniuždant pateiktas 5.2 pav.



5.2 pav. Kontrolinių bandinių be temperatūros poveikio ir bandinių po atsparumo ugniai bandymo stiprumai gniuždant

Armatūros ištraukimo bandymas.

Atlikus armatūros ištraukimo bandymą antros serijos bandiniams, kurių armatūros galai buvo padengti skirtingomis mineralinėmis medžiagomis, buvo pastebėtas visų bandinių ištraukimo jėgos sumažėjimas, o tai yra ir sukibimo jėgos sumažėjimas, lyginant su kontrolinių bandinių duomenimis. Sukibimo įtempiai su betonu bandiniams apskaičiuoti pagal 3.1 formulę,

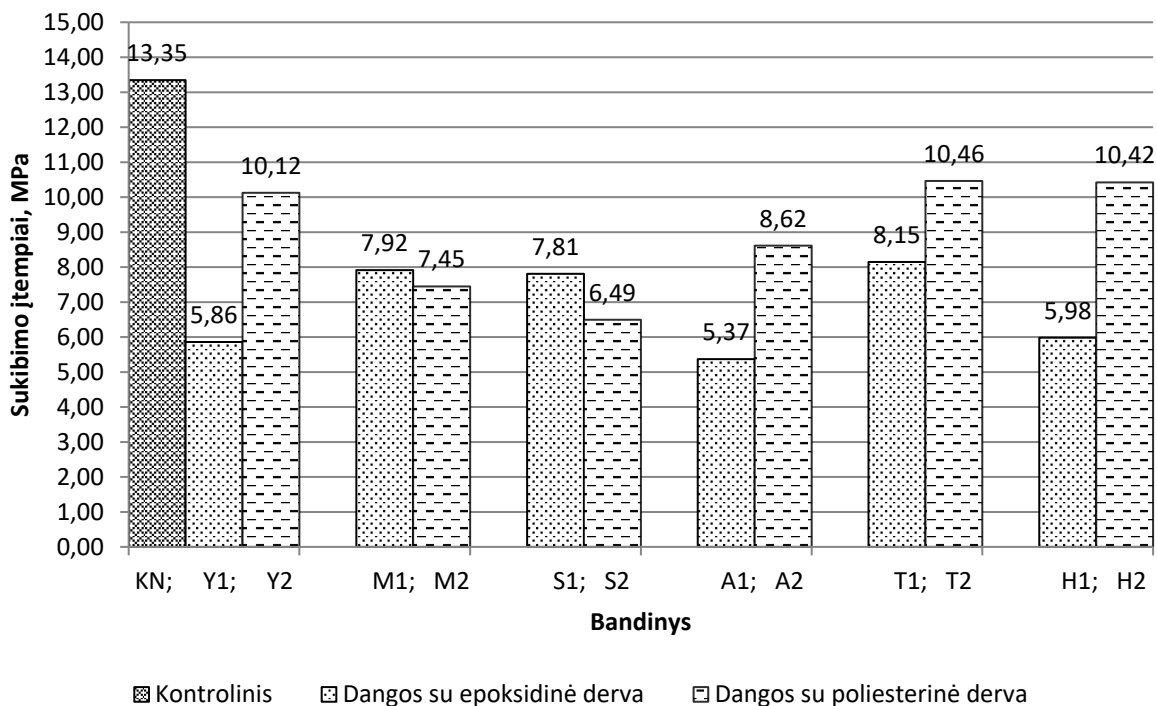
ištraukimo jėgą padalijant iš įinkaruotos strypo dalies paviršiaus ploto. Apskaičiuotos sukibimo įtempčių vertės pateiktos 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Bandinių su padengtais armatūros galais sukibimo įtempčių vertės

Nr.	Ištraukimo jėga, <i>kN</i>	Sukibimo įtempčiai, <i>MPa</i>	Vidurkis, <i>MPa</i>	Nr.	Ištraukimo jėga, <i>kN</i>	Sukibimo įtempčiai, <i>MPa</i>	Vidurkis, <i>MPa</i>
KN	20,4	13,0	13,22	KN	20,1	12,8	13,48
KN	21,7	13,8		KN	22,2	14,1	
KN	20,2	12,9		KN	21,2	13,5	
Y1	9,1	5,8	5,86	Y2	16,5	10,5	10,12
Y1	9,5	6,0		Y2	15,9	10,1	
Y1	9,0	5,7		Y2	15,3	9,7	
M1	11,1	7,1	7,92	M2	12,6	8,0	7,45
M1	12,3	7,8		M2	10,9	6,9	
M1	13,9	8,8		M2	11,6	7,4	
S1	13,6	8,7	7,81	S2	9,5	6,0	6,49
S1	11,2	7,1		S2	10,1	6,4	
S1	12,0	7,6		S2	11,0	7,0	
A1	9,2	5,9	5,37	A2	13,4	8,5	8,62
A1	7,9	5,0		A2	13,1	8,3	
A1	8,2	5,2		A2	14,1	9,0	
T1	12,5	8,0	8,15	T2	17,1	10,9	10,46
T1	14,2	9,0		T2	16,6	10,6	
T1	11,7	7,4		T2	15,6	9,9	
H1	8,9	5,7	5,98	H2	16,0	10,2	10,42
H1	10,1	6,4		H2	15,6	9,9	
H1	9,2	5,9		H2	17,5	11,1	

Kontrolinio bandinio su stiklo pluošto armatūra sukibimo įtempčiai gauti 13,35 *MPa*. Lyginant su kontroliniu bandiniu, mažiausiai, apie 22 %, sukibimo įtempčiai sumažėjo armatūros su danga iš tobermorito ir poliesterio dervos, o daugiausiai, apie 60 % sukibimo įtempčiai sumažėjo armatūros su danga iš sintetinio ceolito Na-A ir epoksidinės dervos. Atsižvelgus į visus gautus rezultatus, armatūros su dangomis iš epoksidinės dervos sukibimo įtempčiai gauti nuo 39 iki 60 % mažesni, o armatūros su dangomis iš poliesterinės dervos sukibimo įtempčiai gauti nuo 22 iki 51 % mažesni nei kontrolinių bandinių. Didžiausią įtaką kompozitinės armatūros sukibimo dedamajai su betonu daro mechaninis inkaravimas.

Mažesnius sukibimo įtempių rezultatus galima paaiškinti tuo, kad padengiant armatūros galus dangomis, buvo sumažinta mechaninio inkaravimo dedamoji dėl sumažėjusių vijų, iš papildomo pluošto, aukščio. Vijos buvo nepakankamai giliai inkaruotos į betoną ir todėl sumažėjo sukibimo įtempių reikšmės. Dangos, kuria buvo padengti armatūros galai, įtaka armatūros sukibimui buvo mažesnė nei armatūros vijų iš papildomo pluošto. Apskaičiuotų sukibimo įtempių grafikas pavaizduotas 5.3 pav.



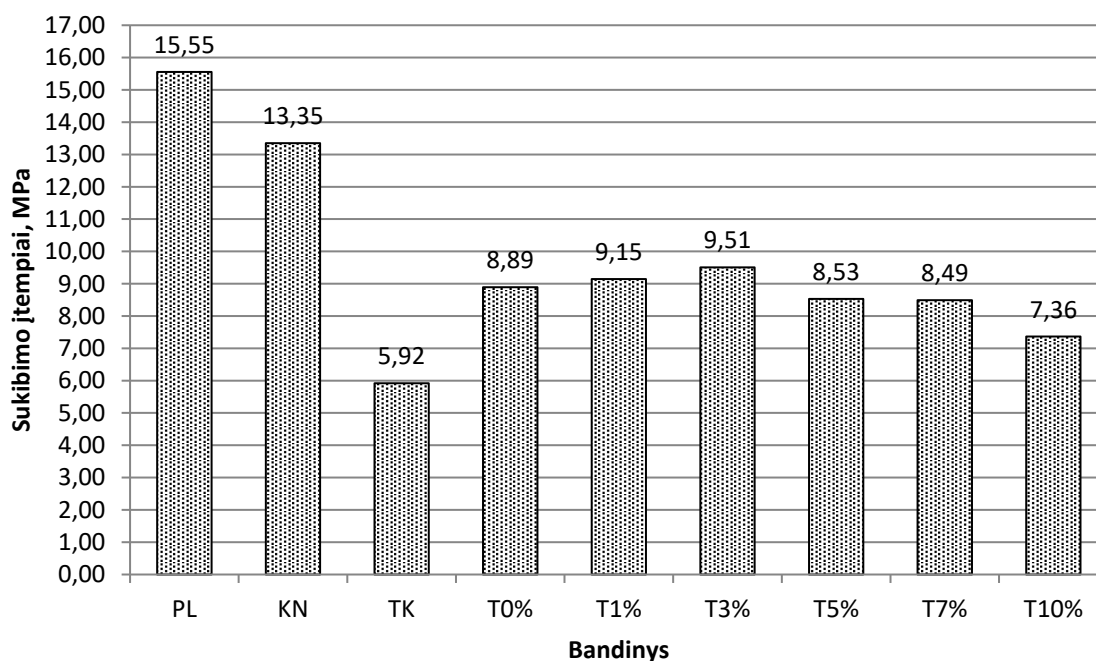
5.3 pav. Bandinių su dangomis padengtais armatūros galais sukibimo įtempių vertės

Kontrolinio bandinio su plienine S500 klasės armatūra sukibimo įtempiai gauti 15,55 MPa. Kontrolinio bandinio su stiklo pluošto armatūra sukibimo įtempiai gauti 13,35 MPa. Po atsparumo ugniai bandymo, temperatūros paveiktai armatūrai atlikus armatūros ištraukimo bandymą buvo gautos ženkliai sumažėjusios bandinių sukibimo įtempių reikšmės. Temperatūros paveikto bandinio be apsauginės betono dangos sukibimo įtempiai lyginant su kontroliniu stiklo pluošto armatūros bandiniu buvo gauti 56 % mažesni sukibimo įtempiai. Didžiausias sukibimo įtempių reikšmės išlaikė bandiniai su apsaugine betono danga naudojant 3 % fosfogipso kiekio mišinyje. Šio bandinio sukibimo įtempiai buvo 29 % mažesni nei kontrolinio bandinio. Visi bandiniai su apsaugine betono danga išlaikė didesnes sukibimo įtempių reikšmes lyginant su temperatūros paveiktu bandiniu be apsauginės betono dangos. Apskaičiuotos sukibimo įtempių reikšmės po atsparumo ugniai bandymo pateiktos 5.2

lentelėje. Sukibimo įtempių grafikas po atsparumo ugniai bandymo pavaizduotas 5.4 pav. Bandiniai po atsparumo ugniai ir armatūros ištraukimo bandymų pateikti 5.5 pav.

5.2 lentelė. Bandinių po atsparumo ugniai bandymo sukibimo įtempių vertės

Nr.	Ištraukimo jėga, <i>kN</i>	Sukibimo įtempiai, <i>MPa</i>	Vid., <i>MPa</i>	Nr.	Ištraukimo jėga, <i>kN</i>	Sukibimo įtempiai, <i>MPa</i>	Vid., <i>MPa</i>
KN	20,4	13,0	13,35	T1%	14,9	9,5	9,15
KN	21,7	13,8		T1%	13,7	8,7	
KN	20,2	12,9		T1%	14,5	9,2	
KN	20,1	12,8		T3%	14,4	9,2	9,51
KN	22,2	14,1		T3%	14,9	9,5	
KN	21,2	13,5		T3%	15,5	9,9	
TK	9,1	5,8	5,92	T5%	13,8	8,8	8,53
TK	8,6	5,5		T5%	12,1	7,7	
TK	10,2	6,5		T5%	14,3	9,1	
PL	24,3	15,5	15,55	T7%	14,1	9,0	8,49
PL	23,8	15,2		T7%	12,3	7,8	
PL	25,2	16,0		T7%	13,6	8,7	
T0%	13,9	8,8	8,89	T10%	10,5	6,7	7,36
T0%	14,3	9,1		T10%	13,1	8,3	
T0%	13,7	8,7		T10%	11,1	7,1	



5.4 pav. Bandinių po atsparumo ugniai bandymo sukibimo įtempių vertės



5.5 pav. Bandiniai po atsparumo ugniai ir armatūros ištraukimo bandymų: a – su plienine armatūra; b – kontrolinis temperatūros nepaveiktas; c – kontrolinis temperatūros paveiktas; d – su 0 % fosfogipso kiekio danga; e – su 1 % fosfogipso kiekio danga; f – su 3 % fosfogipso kiekio danga; g – su 5 % fosfogipso kiekio danga; h – su 7 % fosfogipso kiekio danga; j – su 10 % fosfogipso kiekio danga

Kitų autorių atliktų tyrimų rezultatai.

Kompozitinės armatūros sukibimo su betonu savybės aukštose temperatūrose aptariamos pakankamai ribotame skaičiuje straipsnių ir eksperimentų. Dauguma eksperimentų atlikta kai konstrukcijos yra stiprinamos jų išorėje.

El-Gamal [32] atliko eksperimentinį tyrimą siekiant iširti padidėjusios temperatūros įtaką stiklo pluošto kompozitinės armatūros ir betono sukibimo savybėms. Eksperimento metu bandiniai su stiklo pluošto armatūra buvo kaitinami krosnelėje 100, 200, 300 ir 350 °C temperatūrose skirtingus laiko intervalus 1, 2 ir 3 h. Bandymo metu armatūra buvo inkaruota kiaurai bandinį ir temperatūros poveikis armatūrai buvo tiesioginis. Tyrimo rezultatai parodė, kad po 1 h sukibimo jėga sumažėja 4, 13, 16 ir 17 %, po 2 h – 12, 14, 25, 52 %, po 3 h – 19, 21, 36, 51 %.

Alsayed ir kt. [33] eksperimento metu bandiniai su stiklo pluošto armatūra buvo kaitinami krosnelėje. Bandymų rezultatais nustatyta, kad 40 mm storio betono sluoksniu padengtos armatūros tempiamasis stipris po 1 h 100, 200 ir 300 °C temperatūroje sumažėja apie 3, 12 ir 17 %, o nepadengtos 9, 20 ir 22 %. Padengtos betonu armatūros tempiamasis stipris po 2 h 100, 200 ir 300 °C temperatūroje sumažėja apie 8, 17 ir 25 %, o nepadengtos 16, 23 ir 30 %. Padengtos betonu armatūros tempiamasis stipris po 3 h 100, 200 ir 300 °C temperatūroje sumažėja apie 11, 21 ir 35 %, o nepadengtos 21, 29, ir 42 %.

Hamad ir kt. [34] 150 mm kubelius su 100 mm ilgio inkaruota armatūra kaitino 3 h dujinė krosnyje. Atlikus tyrimą gauta, kad po 3 h stiklo pluošto armatūros su betonu sukibimo jėga sumažėjo apie 27 % prie 125 °C, 50 % prie 250 °C, 79 % prie 325 °C temperatūros.

IŠVADOS

1. Atlikus literatūrinių duomenų analizę nustatyta, kad pateiktuose moksliniuose darbuose nėra tyrinėta kompozitinės armatūros ir betono sukibtis aukštos temperatūrose (iki 1000 °C). Tai ypač svarbu konstrukcijoms gaisro atveju.
2. Atlikus temperatūrinio poveikio bandymą kompozitinei medžiagai iš stiklo pluošto armatūros ir betono, nustatyta, kad nenaudojant apsauginio geopolimerinio glaisto sukibimo jėga tarp armatūros ir betono sumažėja daugiau nei 2 kartus t. y. 56 %.
3. Naudojant 10 mm apsauginio glaisto sluoksnį buvo išlaikyta ženkliai didesnė sukibimo jėga. Ji sumažėjo nuo 29 iki 45 %.
4. Geriausi rezultatai buvo gauti naudojant ugniai atsparią geopolimerinę dangą su 3 % fosfogipso kiekiu mišinyje.
5. Buvo nustatyta betono ir kompozitinės armatūros, kurios galai buvo dengti skirtingomis mineralinėmis medžiagomis, bandinių ištraukimo jėgos sumažėjimas. Galima daryti prielaidą, kad kompozitinės armatūros sukibimo jėgai su betonu didesnę įtaką daro mechaninis inkaravimas. Panašaus pobūdžio tyrimus rekomenduojama atlikti su lygaus paviršiaus kompozitine armatūra.
6. Apibendrinus tyrimus galima teigti, kad siekiant sumažinti kompozitinės armatūros ir betono sukibimo jėgos praradimą dėl aukštos temperatūros poveikio turi būti didinamas apsauginio betono sluoksnio storis arba naudojamos ugniai atsparios dangos. Užtikrinti konstrukcijų atsparumą ugniai taip pat galima padidinus naudojamos armatūros inkaravimo ilgį.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. KAKLAUSKAS, Gintaris ir kt. *Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos: vadovėlis*. Vilnius: Technika, 2012. ISBN 978-609-457-349-1.
2. Schöck ComBAR®. *Reinforce safely without steel* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2017-02-19]. Prieiga per: <http://www.schoeck-combar.com/comb/combar-grfp-reinforcement/combar--184>
3. Task Group 9.3 FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures. (2007). *FRP reinforcement in RC structures: technical report*. Stuttgart: Sprint-Digital-Druck, 2007. ISBN 978-2-88394-080-2.
4. GANGARAO, H. V. S., T. NARENDRA, and P. V. VIJAY. *Reinforced Concrete Design With FRP Composites: book*. Boca Raton (FL): CRC, 2007. ISBN 978-0-8247-5829-5.
5. TULLO, A. H. Plastics additives' steady evolution. *Chemical & Engineering News* [interaktyvus]. 2000, 78(49), 21-31 [žiūrėta 2017-02-21]. Prieiga per: doi: 10.1021/cen-v078n049.p021
6. Aslan FRP: *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Rebar - Aslan™ 100 series FIBERGLASS REBAR* [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2017-03-11]. Prieiga per: <http://www.aslanfrp.com/Media/Aslan100.pdf>
7. ASI, O. Mechanical Properties of Glass-Fiber Reinforced Epoxy Composites Filled with Al₂O₃ Particles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [interaktyvus]. 11/2008, 28(23), 2861-2867 [žiūrėta 2017-03-11]. Prieiga per: doi: 10.1177/0731684408093975
8. GARDINER, G. The making of glass fiber. *Composites Technology: magazine* [interaktyvus]. 04/2009 [žiūrėta 2017-03-16]. Prieiga per: <http://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber>
9. MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design: book*. Boca Raton (FL): CRC, 2007. ISBN 978-0-8493-4205-9.
10. BOYLE, M. M., C. J. MARTIN, and J. D. NEUNER. Epoxy resins. *ASM Handbook* [interaktyvus]. 2001, 21, 78-89 [žiūrėta 2017-03-16]. Prieiga per: <http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>
11. PEPPER, T. Polyester Resins. *ASM Handbook* [interaktyvus]. 2001, 21, 90-96 [žiūrėta 2017-03-16]. Prieiga per: <http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>

12. The Composite Materials Handbook: Polymer Matrix Composites Materials Properties. Lancaster, USA: U.S. Department of Defense, 2002 [žiūrėta 2017-04-10]. ISBN:978-1-59124-489-9.
13. KIZINIEVIČ O., R. ŽURAUSKIENĖ. *Inovatyvios polimerinės statybinės medžiagos ir dirbiniai: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika, 2012. ISBN 978-609-457-165-7.
14. NEVILLE, A. M. *Properties of Concrete: book*. 5th ed. Harlow, UK: Addison Wesley Longman Limited, 1996. ISBN: 0-582-23070-5.
15. JSCE-E 536-1995 *Test method for coefficient of thermal expansion of continuous fiber reinforcing material* [interaktyvus]. 1995 [žiūrėta 2017-04-11] Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan. Prieiga per: <http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/newsletter/newsletter01/recommendation/FRP-bar/contents2-2.htm>
16. BENMOKRANE, B. et al. Test Methods to Determine Properties of FRP Rods for Concrete Structures. In: COSENZA, E., G. MANFREDI, and A. NANNI, eds. *Composites in Constructio, A Reality: proceedings of the international workshop*. Reston (VA): American Society of Civil Engineers, 2002, 75-83. ISBN 9780784405963.
17. KARBHARI, V. M. et al. Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure. *Journal of Composites for Construction* [interaktyvus]. 2003, 7(3) [žiūrėta 2017-04-12]. Prieiga per: doi: 10.1061/(ASCE) 1090-0268 (2003)7:3(238)
18. BOOTLE, J., F. BURZESI, and L. FIORINI. Design Guidelines. *ASM Handbook* [interaktyvus]. 2001, 21, 388-395 [žiūrėta 2017-04-12]. Prieiga per: <http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>
19. KUMAHARA, S., Y. MASUDA, and Y. TANANO. Tensile Strength of Continuous Fiber Bar under High Temperature. In: NANNI, A. and DOLAN, C. W. eds. *Fiber-Reinforced-Plastic for Concrete Structures: International Symposium*. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute, 1993, 138, 731-742. ISBN: 9780870316364.
20. WANG, N., and J. T. EVANS. Collapse of Continuous Fiber Composite Beam at Elevated Temperatures. *Journal of Composites* [interaktyvus]. 1995, 26(1), 56-61 [žiūrėta 2017-04-12]. Prieiga per: doi: [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(94\)P3630-J](https://doi.org/10.1016/0010-4361(94)P3630-J)
21. Task Group Bond Models. *Bond of reinforcement in concrete: state of art report*. Stuttgart: Sprint-Digital-Druck, 2000. ISBN 2-88394-050-9.

22. KATZ, A., N. BERMAN, and L. C. BANK. Effect of high temperature on bond strength of FRP rebars. *Journal of Composites for Construction* [interaktyvus]. 1999, 3(2) [žiūrėta 2017-04-18]. Prieiga per: doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:2\(73\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(73))
23. ACI Committee 440. ACI 440.1R-06: *Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars*. American Concrete Institute (ACI), 2006. ISBN: 9780870312106.
24. FAZA S. S., H.V.S. GANGARAO. Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete. In: HENSHER, D., and L. ANSELIN *Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Properties and Applications* [interaktyvus]. 1993, 42, 167-188 [žiūrėta 2017-04-19]. ISBN: 9781483291437 Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89689-6.50012-4>
25. BAENA MUNOZ, Marta. *Study of bond behaviour between FRP reinforcement and concrete: PhD Thesis* [interaktyvus]. University of Girona, 2010 [žiūrėta 2017-04-22]. ISBN: 978-84-694-2484-1. Prieiga per: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7771/tmbm.pdf;jsessionid=B0C2B1571F0D9E5B044B372BEC112B6F?sequence=2>
26. ACHILLIDES, Zenon. *Bond behaviour of FRP bars in concrete: PhD Thesis* [interaktyvus]. University of Sheffield, 1998 [žiūrėta 2017-04-22]. Prieiga per: <http://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/14698>
27. NAGATOMO, K., and T. KAKU. Bond behaviour of deformed bars under lateral compressive and tensile stress. *International Conference Bond in Concrete from Research to Practice: Proceedings Topics*. Riga: Riga Technical University, 1992.
28. ACI Committee 440. ACI 440.3R-04: *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*. Michigan: American Concrete Institute, 2004. ISBN 9780870311628.
29. International Organization for Standardization. [ISO 10406-1:2015] *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods - Part 1: FRP bars and grids*. Switzerland: International Organization for Standardization, 2015.
30. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1364-1:2015]. *Nelaikančiųjų elementų atsparumo ugniai bandymai. 1 dalis. Sienos (tapatus EN 1364-1:2015) = Fire resistance tests for non-loadbearing elements - Part 1: Walls: Europos*

- standartas EN 1364-1:2015 turi Lietuvos standarto statusą.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015.
31. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 12390-4:2003]. *Betono bandymas. 4 dalis. Stipris gniuždant. Bandymo mašinų techniniai reikalavimai (tapatus EN 12390-4:2000) = Testing hardened concrete - Part 4: Compressive strength - Specification for testing machines: Europos standartas EN 12390-4:2000 turi Lietuvos standarto statusą.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003.
 32. EL-GAMAL, S. Bond strength of glass fiber-reinforced polymer bars in concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [interaktyvus]. 2014, 33(23), 2151-2163. [žiūrėta 2017-04-16]. Prieiga per: doi: 10.1177/0731684414555408
 33. ALSAYED, S et al. Performance of glass fiber reinforced polymer bars under elevated temperatures. *Composites Part B: Engineering* [interaktyvus]. 2012, 43(5), 2265-2271. [žiūrėta 2017-04-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.034>
 34. HAMAD, R. J. A., M. A. M. JOHARI, and R. H. HADDAD. Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, 142, 521-535. [žiūrėta 2017-05-06]. Prieiga per: <https://doi-org.ezproxy.ktu.edu/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.113>