



## PROCESAI, VYKSTANTYS BETONAVIMO IR PRADINIO KIETĖJIMO METU GELŽBETONINĖSE MONOLITINĖSE KONSTRUKCIJOSE

Vigantas Antanas Žiogas<sup>1</sup>, Svajūnas Juociūnas<sup>2</sup>, Violeta Medelienė<sup>3</sup>, Giedrius Žiogas<sup>4</sup>

*Kauno technologijos universitetas, Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>vigantas.ziogas@ktu.lt; <sup>2</sup>svajunas.juociunas@ktu.lt (corresponding author);*

*<sup>3</sup>medeliene@gmail.com; <sup>4</sup>ziogas.giedrius@gmail.com*

*Įteikta 2012 01 30; priimta 2012 05 17*

**Santrauka.** Monolitinių gelžbetoninių statinių konstrukcijų eksploatacijos trukmė ir patikimumas daugiausia priklauso nuo betonavimo technologijos ir procesų poveikių betonavimo bei pradinio kietėjimo metu. Straipsnyje nagrinėjami procesai, vykstantys betonuojant horizontaliąsias, nuožulniąsias ir vertikaliausias monolitines gelžbetonines konstrukcijas. Atlikta betono mišinio slėgio į formas analizė. Tiriama pagrindiniai betonavimo technologijos parametrai, analizuojamas jų ryšys, pateikiamas nepertraukiamo betonavimo technologijos betonavimo greitis, intensyvumas, trukmė. Atlikti teoriniai skaičiavimai ir siūlomi praktiniai sprendimai pramoninių statinių statybai, naudojant šiuolaikinę slankiųjų klojinių technologiją. Ištirta cemento tipo, superplastiklių, temperatūros įtaka šviežiai suformuoto betono struktūriniam stipriui ir betono kietėjimo kinetikai. Nustatyti reikalavimai šviežiai suformuoto betono struktūriniam stipriui, betonavimo greičiui (klojinių kėlimui), vykdant statybą nepertraukiamos betonavimo technologijos metodu. Tyrimai pritaikyti vykdant cilindrinio dumblo pūdytuvo statybą slankiaisiais klojiniais.

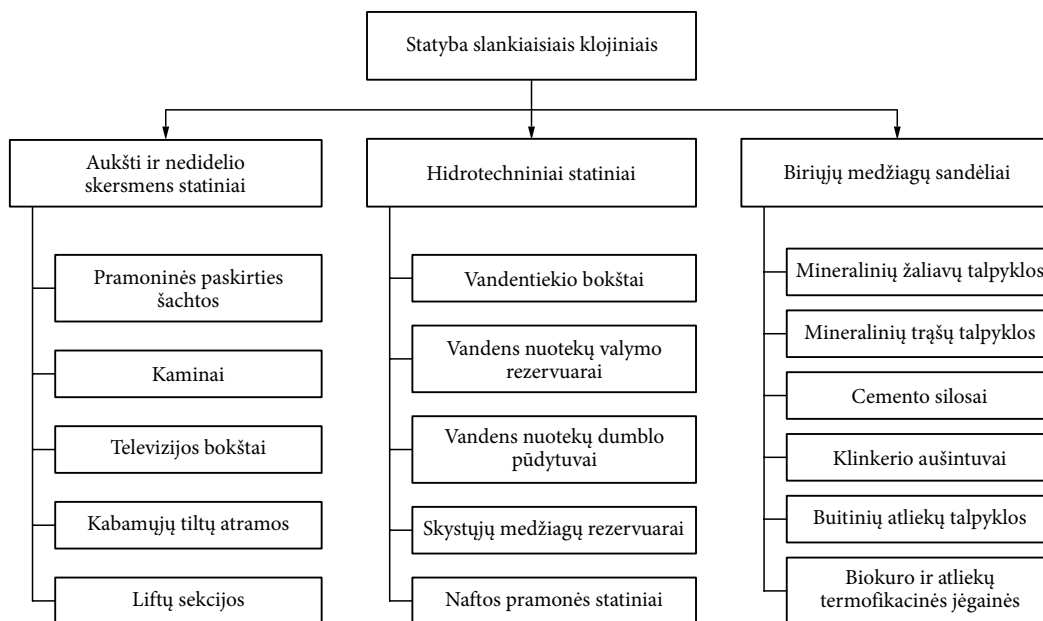
**Reikšminiai žodžiai:** betono mišinys, slėgis, nepertraukiamas betonavimas, slankieji klojiniai, betono mišinio stipris, betono struktūros intensyvaus formavimosi pradžia, klojinių kėlimo greitis.

### 1. Įvadas

Monolitinių gelžbetoninių statinių įvairių konstrukcijų eksploatacijos trukmė ir patikimumas daugiausia priklauso nuo betonavimo technologijos ir vidinių bei išorinių apkrovų poveikio betonavimo ir pradinio kietėjimo metu. Apkrovos klojiniais suvaržytoje konstrukcijoje atsiranda betonuojant ir kietėjant betonui. Nuėmus klojinius, monolitinės konstrukcijos betone atsiranda įtempiai dėl temperatūrų pokyčių, drėgmės migracijos ir vykstančių susitraukimo deformacijų. Dėl vidinių ir išorinių poveikių monolitinėse gelžbetoninėse konstrukcijose atsiranda įvairių tipų plyšių. Jų atsiranda pažeidus konstrukcijos betonavimo technologiją, nuėmus klojinius tolesnio kietėjimo ir konstrukcijos apkrovimo metu. Pastaraisiais metais užsienio šalyse ir Lietuvoje vis dažniau naudojami aukštybinių statinių monolitinių gelžbetoninių konstrukcijų statybos sprendimai. Aukštybinių pastatų ir inžinerinių sta-

tinių statyboje tobulinamos ir kuriamos šiuolaikinės pažangios statybos technologijos, naudojant specialius perstatomuosius ir slankiuosius klojinius. Naudojant slankiųjų klojinių technologiją, statomi aukštybiniai gyvenamieji, administraciniai, pramonės ir kiti inžineriniai statiniai. Slankiųjų klojinių naudojimas įvairių statinių statybose pateiktas 1 pav.

Siekiant išvengti mikro- ir makropleišėjimo (iš-tisinio) monolitinėse konstrukcijose, svarbu nustatyti, kuriame betono kietėjimo etape ir kokio technologinio proceso metu atsiranda įtempiai betone, viršijantys tuo metu leistinus dydžius. Reikia tinkamai įvertinti procesus, vykstančius betonuojant konstrukciją ir užbetonavus skirtingas betono kietėjimo sąlygas. Betonuojant konstrukcijas būtina įvertinti šiuos parametrus ir laikytis darbų atlikimo eiliškumo ir trukmių. Konstrukcija turi būti baigta betonuoti, kol dar neprasideda sutankinto betono struktūros intensyvus formavimasis  $t_{st}$ .



1 pav. Slankių klojinių naudojimas pramoninių statinių statyboje

Fig. 1. Use of moving formwork for industrial construction

Sutankinto betono mišinys intensyviai sėda 45–60 min, todėl, betonuojant aukštas konstrukcijas, rekomenduojama tarp klodų užpylimų ir sutankinimų daryti 30–45 min pertraukas. Konstrukcijas betonuojant etapais – primontuojant klojinius, neleistina montuoti klojinių, kai intensyviai formuojasi betono struktūra. Šiuo atveju betono mišinys jau nebeturi plastinių savybių, bet dar nėra betonas (neturi pakankamo stiprumo). Montuojant klojinius šiuo betono kietėjimo periodu, dėl apkrovų, smūginio poveikio ir klojinių sutempimų, anksčiau suformuotoje konstrukcijoje gali atsirasti destrukcinių plyšių. Technologinių procesų pagrindinių parametru sąveika pateikiama 2 pav.

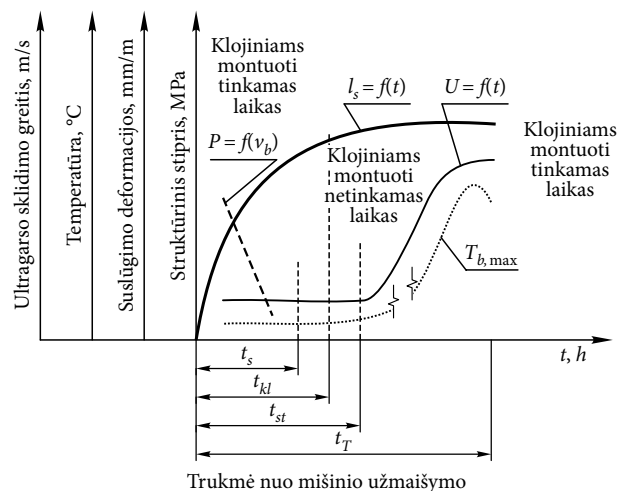
Ankstesniais tyrimais (Žiogas, Juočiušas 2005, 2007a,b) nustatyta, kad, siekiant kokybiškai įrengti monolitines betonines grindis, rezervuarų sienutes ir dugnus, masyvias pamato plokštes, tiltų konstrukcijas būtina įvertinti technologinius procesus, vidinių ir išorinių apkrovų sąveiką bei jų įtaką.

## 2. Apkrovos, veikiančios betonuojant ir šviežiai suformuotame betone

Betono mišinio slėgį į klojinius galima skaičiuoti kaip hidrostatinį slėgį  $P$ :

$$P = \rho_{bm} \cdot h, \quad (1)$$

čia  $\rho_{bm}$  – betono mišinio svoris, imamas  $24 \text{ kN/m}^3$ ;  $h$  – betono mišinio aukštis klojiniuose.



2 pav. Monolitinių gelžbetoninių konstrukcijų betonavimo technologijos parametru sąveika:  $t_s$  – betono mišinio paklojimo sluoksniais trukmė;  $t_{kl}$  – betono mišinio klodų intensyvaus slūgimo trukmė;  $t_{st}$  – pakloto ir sutankinto betono struktūros intensyvaus formavimosi pradžia;  $T_{b,max}$  – temperatūros betone kitimo kreivė

Fig. 2. Interaction of concreting technology parameters for monolithic reinforced concrete structures

Dauguma tyrimų teigiama, kad maksimalus betono mišinio slėgis susidaro  $1/3h$  nuo apačios (Teilor 1977) ir siūloma jį apskaičiuoti:

$$P_{max} = 38,8 \cdot V_b^{1/3}. \quad (2)$$

Praktikoje betono mišinio slėgiui įtakos turi betono mišinio slankumas  $S$  (mm), temperatūra  $T$  (°C) ir betono mišinio klojimo greitis  $V_b$  (m/h).

Vokietijos standartas DIN 18218 rekomenduoja betono mišinio slėgį nustatyti esant S3 betono mišinio slankumui:

$$P_b = (14V_b + 18) \cdot \frac{145 - 3T}{100}, \quad (3)$$

čia  $V_b$  – betono mišinio klojimo greitis, m/h;  $T$  – betono mišinio temperatūra, °C.

Pagal Jungtinės Karalystės rekomendacijas (CIRIA report 108) betono mišinio slėgis nustatomas taip:

$$P_b = \rho_{bm} \cdot \left( k_1 \cdot \sqrt{V_b} + k_2 \cdot k_T \cdot \sqrt{H - k_1 \cdot \sqrt{V_b}} \right), \quad (4)$$

čia  $\rho_{bm}$  – betono mišinio svoris, kN/m<sup>3</sup>;  $V_b$  – betono mišinio klojimo greitis, m/h;  $H$  – betonavimo aukštis, m;  $k_1$  – konstrukcijos skerspjūvio koeficientas ( $k_1 = 1,0$  sienoms,  $k_1 = 1,5$  kolonoms, kai sienos ilgis mažiau kaip 2 m, koeficientas imamas kaip kolonai);  $k_2$  – priedų įtakos koeficientas ( $k_2 = 0,3$  betono mišiniui be priedų,  $k_2 = 0,45$  betono mišiniui su lėtikliu);  $k_T$  – temperatūros koeficientas,  $k_T = \left( \frac{36}{T + 16} \right)^2 T$  (°C).

Pagal JAV (ACI 347R) rekomendacijas betono mišinio slėgis betonuojant kolonas nustatomas taip:

$$P_b = 7,19 + \frac{785V_b}{17,78 + T} \quad (5)$$

ir betonuojant sienas, kai  $2,14 \leq V_b \leq 3$  m/h:

$$P_b = 7,19 + \frac{1155}{17,78 + T} + \frac{244 \cdot V_b}{17,78 + T}, \quad (6)$$

ir kai  $V_b > 3$  m/h:

$$P_b = 23,5 \cdot h. \quad (7)$$

Prancūzijoje naudojamos CIB-F/B-CEB rekomendacijos ir betono mišinio slėgis parenkamas iš lentelių, imant mažesnių dydį. Betonuojant slėgis į klojinius priklauso nuo betonavimo greičio  $V_b$ , betono mišinio

slankumo  $S$  ir temperatūros  $T$ . Pagal įvairių šalių siūlomas metodikas apskaičiuoti slėgiai skiriasi: mažiausi gaunami skaičiuojant pagal Jungtinės Karalystės rekomendacijas, ir didžiausi – Prancūzijos CIB rekomendacijas. Todėl pastarųjų taikyti praktikoje nerekomenduojame, nes esant didesniems klojimo greičiams slėgis nuo kitų šalių rekomenduojamųjų skiriasi apie du kartus. Lietuvoje rekomenduojama vadovautis Vokietijos DIN 18218 standartu. Naudojantis pateiktomis priklausomybėmis, apskaičiuotas betono mišinio (S3 slankumo) slėgis, esant skirtingiems klojimo greičiams ir temperatūroms. Duomenys pateikti 1 lentelėje.

Betonuojant vertikaliąsias konstrukcijas galimi horizontalieji plyšiai virš armatūros strypų dėl per didelio betonavimo greičio, betono mišinio slankumo ir netinkamos betono mišinio sudėties (nepakankama stambaus užpildo koncentracija, per didelis V/C santykis). Plyšių atsiranda ir tada, kai virš armatūros yra plonas apsauginis sluoksnis, nes šiuo atveju šis sluoksnis neturi galimybės tolygiai sėsti. Paviršiniame sluoksnyje tarp horizontaliųjų armatūros strypų betono mišinio sėdimo deformacijos  $\epsilon_{sl}$  yra kur kas didesnės už suvaržytas deformacijas  $\epsilon_{st}$  virš armatūros strypų, t. y.  $\epsilon_{sl} > \epsilon_{st}$ . Dėl padidintų sėdimo deformacijų atsiranda ir didesni įtempiai  $\sigma_t = \epsilon_{sl} \cdot E$ .

Betonuojant vertikaliąsias monolitines konstrukcijas, betono mišinio slėgis turi ir teigiamą poveikį betono savybėms. Šiuo atveju gaunamas didesnio tankio betonas, su mažesnėmis poromis ir mažesniu jų kiekiu, nes esant didesniame vandens kiekiui betono mišinyje vanduo išstumiamas prie klojinių paviršiaus ir per klojinių sandūrų siaurus plyšelius pašalinamas. Dėl šio proceso sumažėja betono mišinio V/C santykis ir pagerėja betono fizikinės bei mechaninės savybės.

1 lentelė. Betono mišinio slėgis į klojinius

Table 1. Concrete mix pressure on formwork

Skaičiavimo metodika	Betono mišinio slėgis $P_b$ , kN/m <sup>2</sup>											
	$V_b$ , m/h	$T = 10$ °C	$T = 20$ °C	$V_b$ , m/h	$T = 10$ °C	$T = 20$ °C	$V_b$ , m/h	$T = 10$ °C	$T = 20$ °C	$V_b$ , m/h	$T = 10$ °C	$T = 20$ °C
Vokietijos (DIN 18218)	1	36,8	27,2	2	52,9	39,1	3	69	51	4	85,1	62,9
Jungtinės Karalystės (CIRIA report 108)	1	36,2	24,6	2	44,7	34,8	3	53,3	45	4	61,8	55,2
JAV (ACI347R)	1	35,4	28,0	2	63,7	48,7	3	59,6	45,7	4	94,0	94,0
Prancūzijos (CIB-F/B-CEB)	1	45	35	2	100	55	3	150	80	4	150	130

## 2.1. Procesai, vykstantys betonuojant nuožulniąsias konstrukcijas

Betonuojant nuožulniąsias konstrukcijas tenka spręsti daug klausimų, kad būtų užtikrintos betono fizikinės ir mechaninės savybės. Šiuo atveju reikia tinkamai išspręsti betono mišinio pusiausvyros sąlygas (Skrupkiūnas 1998; Žiogas 1998, 2008; Markouski, Turavets 2010), t. y. parinkti tokius betonavimo technologijos parametrus, kad betono mišinys neslinktų žemyn, būtų kokybiškai paklotas ir sutankintas. Be to, betonuojant piltuvo formos konstrukcijas, hidrostatinis slėgis kelia klojinius į viršų ir reikia spręsti klojinių tvirtinimą. Tinkamai neįvykdžius pusiausvyros sąlygų, dėl galimų poslinkių sutankinto betono paviršiuje atsiranda horizontaliųjų mikroplyšių, kurie betonui kietėjant išsivys to į plyšius.

Šviežiai suformuotas betono mišinys veikia nuožulnųjį klojinį sunkio jėga  $G = s \cdot h \cdot q \cdot g$ , kuri skaidoma į šlyties jėgą  $F_t$  ir normalinę jėgą  $F_n$ . Betono mišinys neslinks žemyn, kai atitiks sąlygą:

$$\begin{aligned} F_{tr} > F_t, \text{ t. y. } G \cdot \cos \alpha \cdot f > G \cdot \sin \alpha, \text{ nes} \\ F_{tr} &= f \cdot F_n, F_n = G \cdot \cos \alpha \text{ ir } F_t = G \cdot \sin \alpha \quad (8) \\ F_{tr} &> F_t = f \cdot F_n, \end{aligned}$$

čia  $f$  – trinties koeficientas,  $g$  – laisvojo kritimo pagreitis.

Tačiau šlyties įtempiams  $\tau$  viršijant betono ribinius šlyties įtempius  $\tau_o = h \cdot q \cdot g \cdot \sin \alpha$ , suformuotame paviršiuje atsiranda horizontaliųjų plyšių. Šlyties įtempiai šviežiai suformuotame betone  $\tau = \frac{G \cdot \sin \alpha}{s}$  arba

$$\tau = \frac{s \cdot h \cdot q \cdot g \cdot \sin \alpha}{s} \quad (9)$$

ir tada

$$\tau = h \cdot q \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (10)$$

čia  $s$  – slinkimo paviršius.

Žinant betono mišinio ribinius šlyties įtempius  $\tau_o$ , šviežiai sutankinto betono tankį  $q$  ir klojinių posvyrio kampą  $\alpha$ , leistinasis betonuojamo sluoksnio storis  $h$  surandamas taip:

$$h = \frac{\tau_o}{q \cdot g \cdot \sin \alpha}. \quad (11)$$

Tenkinant šią sąlygą, nuožulnieji betono sluoksniai neslinks ir suformuotame paviršiuje neatsiras plyšių.

Betonuojant atvirą konstrukciją ant nuožulniojo klojinio, suformuotas betonas slinks klojinio paviršiumi, kai trinties jėga  $F_{tr} < f \cdot F_n$ , t. y.  $F_{tr} < f \cdot G \cdot \sin \alpha$ .

Praktikoje betonuojamos konstrukcijos yra armuotos viengubu ar dvigubu strypynu, todėl labai pakinta betono mišinio pusiausvyros sąlygos ant nuožulnios plokštumos (klojinio). Esant viengubam

armavimui (apatinėje konstrukcijos dalyje) šviežiai suformuotas betono mišinys turi mažesnes galimybes slinkti nuožulniojo klojinio paviršiumi, nes neleidžia armatūros strypynas, ir tada  $F_{tr} > f \cdot F_n$ . Šiuo atveju galimas tik viršutinio sluoksnio poslinkis ir plyšių atsiradimas ties viršutinės armatūros horizontaliaisiais strypais. Kai betonuojama konstrukcija yra armuota dvigubu strypynu, šviežiai suformuotas betonas yra labiau suvaržytas armatūros viršutinio strypyno ir šiuo atveju pasireiškia armatūros strypo skersmens ir žingsnio įtaka.

## 2.2. Procesai, vykstantys betonuojant horizontaliąsias konstrukcijas

Užbetonavus horizontaliąją konstrukciją (pvz., monolitines betonines grindis ar gelžbetoninę plokštę), betonas, kietėdamas ir paviršiuje netekdamas vandens, traukiasi. Traukimasi varžo trinties jėga  $F_{tr} = f \cdot F_n = f \cdot q \cdot g \cdot h$ , dėl to betono paviršiuje atsiranda plyšių; pradžioje plastinių deformacijų mikroplyšių, o vėliau susitraukimo deformacijų plyšių (Turton 1978). Atsiradusių įtempių schema pateikta 3 pav., o maksimalus įtempių dydis užbetonuoto betoninių grindų segmento viduryje apskaičiuojamas taip:

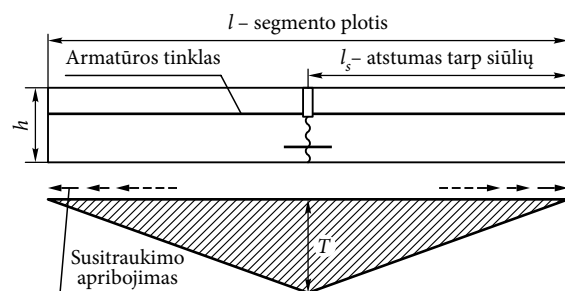
$$T = \frac{f \cdot q \cdot g \cdot h \cdot l}{2}, \quad (12)$$

čia  $l$  – grindų plokštės segmento plotis arba atstumas tarp siūlių;  $h$  – grindų plokštės storis.

Kai atsiradę įtempiai  $T$  viršija betono stiprį tempiant, betono grindyse tarp siūlių atsiranda plyšių ir ištisinių įtrūkių. Siekiant išvengti šių plyšių, viršutinis grindų plokštės sluoksnis armuojamas tinklu, kur minimalus armatūros skerspjūvio plotas apskaičiuojamas pagal šią formulę (Colin 1986):

$$S = \frac{T}{f_y}, \quad (13)$$

čia  $f_y$  – armatūros charakteristinis stipris, MPa



3 pav. Įtempių schema  
Fig. 3. Stress diagram

### 2.3. Procesai, vykstantys betonuojant vertikaliąsias konstrukcijas

Suformavus monolitinę gelžbetoninę konstrukciją, (pvz., vertikalią rezervuaro sieną) betonas klojinuose kietėja apsaugotas nuo drėgmės netekimo, nes jo viršutinė dalis po betonavimo proceso uždengiama polietileno plėvele.

Šviežiai suformuotos konstrukcijos betone vyksta tokie procesai:

- sutankinto betono mišinio slūgimas (sėdimas);
- savaiminės susitraukimo deformacijos;
- betono mišinio išilimas pradedant reaguoti cementui su vandeniu ir vykstant hidratacijos procesui (egzoterminis procesas).

Dėl dviejų pirmųjų procesų betonas traukiasi, o dėl egzoterminio proceso plečiasi. Pažymėtina, kad šie fiziniai ir cheminiai procesai vyksta esant suvaržytos būsenos, nes klojinių sistemos yra standžios, sienų abiejų pusių klojiniai sujungti skersinėmis traukėmis, tokiu būdu betonas būdamas ankstyvosios stadijos, kietėja būdamas suvaržytas, ir atsiranda sudėtingas gniuždymo bei tempimo būvis (Oh, Cha 2002). Ši būseną yra mikro- ir ištisinių plyšių išsivystymo priežastis.

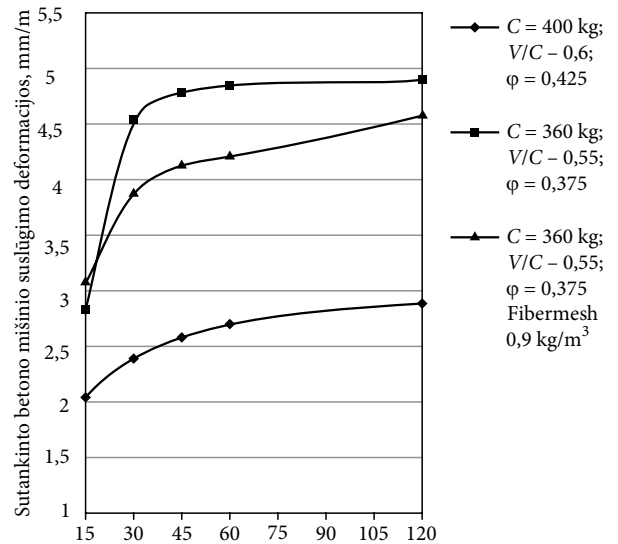
Šviežiai suformuoto betono slūgimo deformacijos intensyviai vyksta apie 45 min ir jų dydis priklauso nuo betono sudėties (cemento, stambaus užpildo kiekių, V/C santykio, betono mišinio slankumo). Šviežiai suformuoto betono sėdimo deformacijos aprašomos priklausomybe (Žiogas 2008):

$$\Delta l_s = f\left(C, \frac{V}{C}, \varphi_{st.}\right),$$

$$\Delta l_s = 2,40 + 0,5x_1 + 0,30x_2 + 0,12x_3 + 0,53x_1x_2 - 0,18x_1x_3 - 0,09x_2x_3, \quad (14)$$

čia  $C_1 - x_1$  – cemento kiekis; kitimo ribos 320–400 kg;  $\Delta C = 40$  kg;  $\frac{V}{C_1} - x_2$  – vandens ir cemento santykis; kitimo ribos 0,5–0,6;  $\Delta \frac{V}{C} = 0,03$ ;  $\varphi_{st.} - x_3$  – stambaus užpildo tūrinė koncentracija; kitimo ribos 0,325–0,425;  $\Delta \varphi = 0,05$ .

Betono mišinių slūgimo deformacijų kinetika pateikiama 4 pav. Sutankinto betono slūgimo deformacijų stabilizacijos procesas susietas su cemento rišimosi pradžia ir savaiminių susitraukimo deformacijų atsiradimu. Šio proceso metu betono mišinys, apribotas klojinių paviršiumi, negali laisvai deformuotis, nes yra klojinių apspausas – suvaržytas, ir pasireiškia betono mišinio ir klojinių trinties efektas.



4 pav. Betono mišinio sėdimo deformacija

Fig. 4. Settlement deformation of compacted concrete mix

Analogiškas procesas vyksta, kai betonuojamos aukštybinės konstrukcijos naudojant slankiuosius klojinius, tačiau čia reikia papildomai įvertinti kitus veiksnius ir atsirandančias apkrovas.

Naudojant naujausias slankiųjų klojinių sistemas, galima statyti statinį su optimalesniu konstrukcijos skerspjūviu ir geometrija, taip sumažinant medžiagų poreikį ir gaunant ekonominį efektą. Pavyzdžiui, sienų storį įmanoma keisti naudojant tarpus tarp klojinių arba keičiant atstumą tarp klojinių hidrauliniiais stūmokliais. Keitimo metu būtina užtikrinti sąlygą, kad procesas bus nenutrūkstamas, t. y. užtikrinti, kad betonuojant nesusidarytų siūlių. Norint išvengti nesklaidumų, būtina atkreipti dėmesį į tiekiamo betono savybes, jo kietėjimo kinetikos charakteristikas.

Pagrindinė charakteristika – struktūros formavimosi pradžia – laikas, kai betono mišinys pereina į betono būseną ir tai nulemia betono mišinio suklojimo bei sutankinimo reglamentuojamą laiko trukmę. Ji reikalinga norint nustatyti pirminį betono mišinio stiprį, kuris turi būti pakankamas, kad atlaikytų aukščiau užbetonuotų klodų svorį. Pažymėtina, kad betono struktūros intensyvaus formavimosi pradžia ( $t_{st}$ ) yra pagrindinis parametras, lemiantis betonavimo greitį, statybos trukmę ir darbo sąnaudas (Malatokas, Žiogas 1998). Ji nustatoma pagal anksčiau parengtą metodiką (Žiogas, Juociūnas 2003).

Betonuojant statinį ar atskirą statinio gelžbetoninę konstrukciją, betonavimo procesas vyksta nepertraukiamai, todėl šią technologiją ir įprasta vadinti nepertraukiamo betonavimo technologija. Statyba

vykdoma panaudojant 1,0 ar 1,2 m aukščio slankiųjų klojinių sistemas. Slankieji klojiniai susideda iš betonuojamą konstrukciją formuojančių sienelių – skydų, pritvirtintų prie metalinio rėmo, kurį kelia hidrauliniai domkratai, domkratų atraminių strypų, hidraulinės stoties, lazerinės įrangos vertikalumui nustatyti, darbo aikštelės ir kabamųjų vidinių bei išorinių pastolių. Klojinių kėlimo greitis, taip pat ir betonavimo intensyvumas priklauso nuo slankiųjų klojinių aukščio ir sutankinto betono mišinio intensyvaus kietėjimo pradžios (betono struktūros intensyvaus stiprėjimo pradžios) ir nustatomas pagal formulę:

$$V = \frac{h-a}{t_{st}}, \quad (15)$$

čia  $h$  – slankiųjų klojinių aukštis, m;  $a$  – betono mišinio neužpildyta klojinių aukščio dalis (0,15–0,20 m);  $t_{st}$  – betono struktūros intensyvaus stiprėjimo pradžia, h.

Cilindrinio rezervuaro betonavimo intensyvumas ( $m^3/h$ ) nustatomas taip:

$$I = \frac{h-a}{t_{st}} \cdot \pi(R_1^2 - R_2^2), \quad (16)$$

čia  $R_1$  – išorinis betonuojamos konstrukcijos spindulys, m;  $R_2$  – vidinis betonuojamos konstrukcijos spindulys, m.

Betonavimo slankiaisiais klojiniais trukmė  $t$  nustatoma:

$$t = \frac{Q \cdot t_{st}}{(h-a) \cdot p \cdot d}, \quad (17)$$

čia  $Q$  – betono poreikis monolitinio statinio statybai,  $m^3$ ;  $p$  – betonuojamos konstrukcijos perimetras, m;  $d$  – betonuojamos konstrukcijos sienutės storis, m.

Vykdam statinių statybą slankiaisiais klojiniais, būtina tinkamai įvertinti betonavimo technologijos procesą reguliuojančių išvestinių parametru sąveiką, kuri pateikiama 5 pav.

Klojiniai keliami, kai betono struktūrinis stipris  $R_{st}$  apatinėje slankiųjų klojinių dalyje yra didesnis už sukloto ir sutankinto betono mišinio slėgį  $P$ :

$$R_{st} > \rho_{bm} \cdot h_{bs}, \quad (18)$$

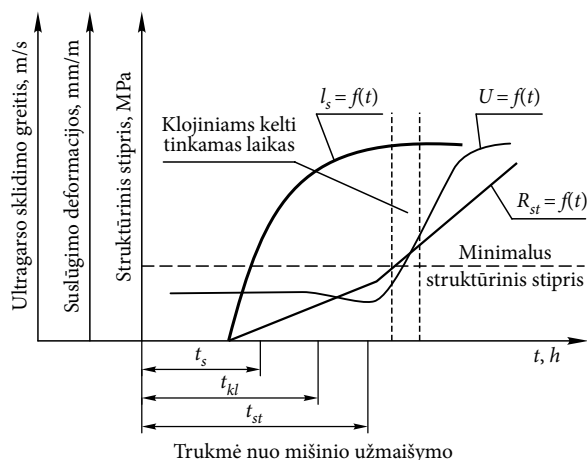
čia  $\rho_{bm}$  – betono mišinio tankis;  $h_{bs}$  – betono mišinio sluoksnio storis klojiniuose.

Kad betonuojant keliant klojinius paviršiuje neatirasėtų horizontalių plyšių, betono mišinio vertikalusis slėgis turi būti didesnis už trintį klojinių paviršiuje:

$$P_H > 2F \quad (19)$$

arba

$$\rho_{bm} \cdot d \geq f \cdot \rho_{bm} \cdot h_{bs}. \quad (20)$$



5 pav. Betonavimo procesą reguliuojančių parametru sąveika:  $t_s$  – betono mišinio suklojimo sluoksniais trukmė;  $t_{kl}$  – betono mišinio klodų intensyvaus slūgimo trukmė;  $t_{st}$  – sukloto ir sutankinto betono struktūros intensyvaus formavimosi pradžia

Fig. 5. Interaction of parameters governing concreting process

Iš (20) priklausomybės nustatome, koks gali būti minimalus betonuojamos konstrukcijos sienutės storis  $d$ :

$$d \geq f \cdot h_{bs}. \quad (21)$$

Suklojus ir sutankinus betono mišinį, iki prasišedant intensyviai struktūros formavimuisi, vyksta jo sėdimas  $\Delta l_s$ . Sutankinto betono mišinio sėdimas intensyviai vyksta iki vienos valandos ir keliant klojinius sėdimo procesas praktiškai yra pasibaigęs. Pakėlus klojinius, atsirasti horizontaliesiems sėdimo plyšiams nėra jokio pavojaus, kai užtikrinta sąlyga pagal (19) priklausomybę.

### 3. Tyrimų metodika ir naudotos medžiagos

Tyrimams buvo suprojektuotos specialios betono sudėty, kurios turėjo tenkinti dumblo pūdytuvo gelžbetoniniai konstrukcijai keliamus reikalavimus. Betono gamybai naudotas:

- cementas CEM III<sub>B</sub> 32.5N SR, kurio normalaus tirštumo teslos vandens sąnaudos – 29,2 %, rišimosi pradžia – 200 min, pabaiga – 320 min, ankstyvasis stipris po 7 parų – 22,7 MPa, standartinis stipris po 28 parų – 46,9 MPa;
- smėlio, naudojamo betonui, frakcija – 0/4 mm, atitinkantis standarto LST L 1342:2002 reikalavimus;
- granitinės skaldos frakcija – 4–16 mm, atitinkanti standarto LST L 1342:2002 reikalavimus;
- superplastiklis „Muraplast FK 63.30“ ir oro įsiurbiklis „Micro Air 201“.

Tyrimai atlikti pagal šių standartų reikalavimus:

- betono mišinio kūgio nuoslūgis pagal LST EN 12350-2:2009;
- betono mišinio struktūrinio stiprio ir sukietėjusio betono stipris pagal LST EN 12390-3:2009;
- ultragarso sklaidimo greitis kietėjančiame betone pagal parengtą metodiką.

#### 4. Betonavimo technologijos parametru slankiaisiais klojiniais tyrimas

Tyrimo tikslas – nustatyti betonavimo slankiaisiais klojiniais technologinių parametru (struktūrinio stiprio, kietėjimo kinetikos pirmomis valandomis ir paromis, klojinių kėlimo greičio, betonavimo intensyvumo) kitimą, naudojant betonus su šlakiniu cementu, superplastikliais ir keičiantis betono mišinio slankumui ir temperatūrai.

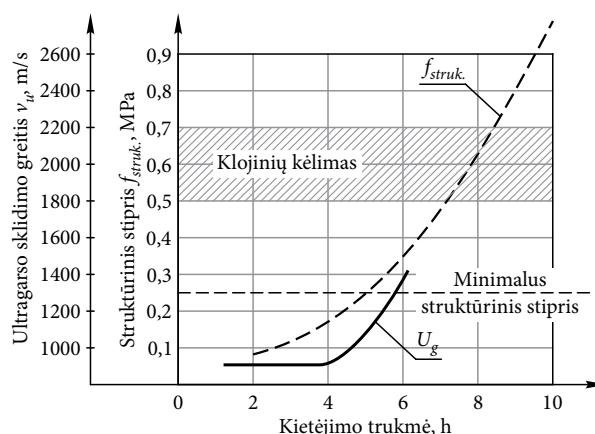
Tirtos betonų sudėty pateikiamos 2 lentelėje, o gauti tyrimo duomenys 6–8 pav.

2 lentelė. Betono sudėty 1 m<sup>3</sup>  
Table 2. Concrete mix composition, 1 m<sup>3</sup>

Betono sudėties Nr.	Cementas, kg	Smėlis, fr. 0/4, kg	Granito skalda, fr. 4/16, kg	Vanduo, kg	V/C	Cheminis priedas	
						Muraplast FK 63.30 (0,55 %)	Micro Air 201 (0,1 %)
1	415	830	998	192	0,46	2,30	–
2	415	830	998	200	0,48	2,30	0,415

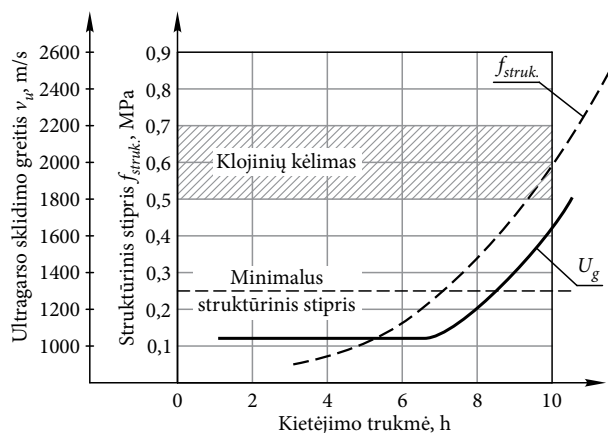
**Pastabos.** *Pirmosios betono sudėties:* betono mišinio slankumas – 115 mm, po 30 min – 50 mm; betono mišinio temperatūra – 19 °C; betono mišinio tankis – 2400 kg/m<sup>3</sup>; vandens temperatūra – 7 °C; aplinkos temperatūra – 18 °C (formavimo metu) ir kietėjimo metu – 13–15 °C. *Antrosios betono sudėties:* betono mišinio slankumas – 210–230 mm, po 30 min – 190 mm; betono mišinio temperatūra – 16 °C; betono mišinio tankis – 2400 kg/m<sup>3</sup>; vandens temperatūra – 2 °C; aplinkos temperatūra – 18 °C (formavimo metu) ir kietėjimo metu 13–15 °C.

Naudoti priedai, betono mišinio ir aplinkos sąlygos daro pastebimą įtaką betono mišinio slankumo pokyčiams iki suformavimo ir kietėjimo kinetikai pirmomis valandomis. Minimalus struktūrinis stipris (apie 0,25 MPa), kuris jau gali atlaikyti slankiuosiuose klojiniuose suformuoto betono slėgį, pasiekiamas atitinkamai po 5 ir 7 val., betono struktūra intensyviai formuotis ima atitinkamai po 4 ir 6,5 val. Pagal šiuos nustatytus betonavimo technologijos parametrus galima planuoti klojinių kėlimo greitį, betonavimo intensyvumą, betono mišinio tiekimo grafikus ir betonavimo trukmę.



6 pav. Betonavimo procesą reguliuojančių parametru ir kietėjimo trukmės priklausomybė (1 betono sudėty)

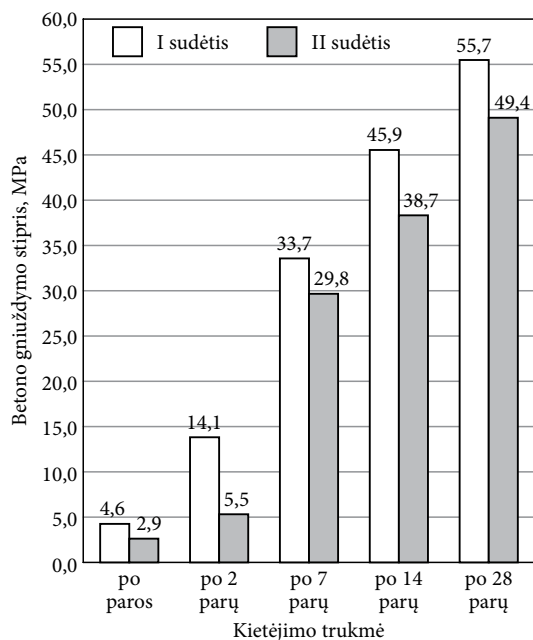
Fig. 6. Dependence of parameters governing concreting process and time (the first concrete composition)



7 pav. Betonavimo procesą reguliuojančių parametru ir kietėjimo trukmės priklausomybė (2 betono sudėty)

Fig. 7. Dependence of parameters governing concreting process and time (the second concrete composition)

Tirtų betonų struktūriniai stipriai, struktūros intensyvaus formavimosi pradžios buvo susieti su dumblo pūdytuvo betonavimo procesu slankiaisiais klojiniais statybos sąlygomis. Statybos metu slankieji klojiniai buvo pakelti (9 pav.) esant struktūriniam betono stipriui apie 0,5–0,7 MPa. Realus klojinių kėlimo greitis buvo palaikomas 0,14–0,17 m/h. Užbaigus betonuoti ir betonui kietėjus 28 paras, apžiūrėjus pūdytuvų paviršius, paviršinių betonavimo defektų ar įskilimų neužfiksuota. Atlikus betonų, suformuotų statybos sąlygomis, tyrimus nustatyta, kad betonų kietėjimo kinetika atitiko dumblo pūdytuvo betonavimo tempus, o betono stipris po 28 parų kietėjimo 19 % viršijo reikalaujamą projektinį stiprį.



8 pav. Betono mechaninių savybių tyrimo duomenys  
Fig. 8. Testing data of concrete mechanical properties



9 pav. Pūdytuvo slankiaisiais klojiniais nepertraukiamo betonavimo momentas

Fig. 9. Continuity concreting moment of sludge tank by moving formwork

## 5. Išvados

1. Betonuojant monolitines gelžbetonines konstrukcijas slėgis į klojinius kinta atsižvelgiant į betonavimo greitį, betono mišinio slankumą, temperatūros ir slėgio dydį rekomenduojama vertinti pagal DIN 18218 reikalavimus.
2. Betonuojant nepertraukiamai, reikia tinkamai įvertinti betonavimo technologijos parametru sąveiką ir jų dydžius.
3. Betonuojant statinius su slankiaisiais klojiniais, būtina nustatyti projektinio betono struktūros inten-

syvaus formavimosi pradžias, struktūrinius stiprius, kietėjimo kinetiką, įvertinti betono sudėties pagrindinius komponentus: cemento tipą, naudotus superplastikius, betono mišinio slankumo ir temperatūros kitimą ir kietėjimo aplinkos sąlygas.

4. Turint pagrindinius betonavimo slankiaisiais klojiniais technologinius parametrus, galima projektuoti statybos technologiją, betonavimo intensyvumą, statybos trukmę ir materialinį bei techninį aprūpinimą.
5. Betonuojant betono mišinio tiekėjai turi užtikrinti stabilius betono mišinio parametrus, nes pakitus vienos klasės betono mišinio slankumui ar neužtikrinus reglamentuotos temperatūros, struktūros intensyvaus formavimosi trukmė skirsis iki 2,5 valandų ir dėl to bus pažeistas betonavimo ritmas.

## Literatūra

- Colin, R. 1986. *Concrete Ground Floor (Their Design, Construction and Finish)*. Cement and concrete Association. 23 p.
- Malatokas, R.; Žiogas, V. 1998. Betonavimo slenkančiais klojiniais proceso valdymas, iš *Konferencijos „Statyba ir architektūra“ pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 240–242.
- Markouski, M. F.; Turavets, R. A. 2010. Technology of cast-in-situ inclined outer walls erection, in *Advanced Construction. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference*. Kaunas: Technologija, 177–182.
- Oh, B. H.; Cha, S. W. 2002. Realistic analysis of thermal and shrinkage stresses in concrete structures at early ages, in *Control of Creacking in Early Age Concrete, Mihashi and Wittmann (Eds.)*. Swets and Zeitlinger, 131–138.
- Skripkiūnas, G. 1998. Betono mišinio pastovumas ant nuožulnios plokštumos, iš *Konferencijos „Statyba ir architektūra“ pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 290–293.
- Teilor, W. H. 1977. *Concrete Technology and Practice*. Fourth edition. Copyright by McCraw-Hill Book Company, Australia PtyLimited. 846 p.
- Turton, C. D. 1978. Plastic cracking, *Concrete* 12(7): 29–30.
- Žiogas, V. A.; Juočiūnas, S. 2003. Monolitinių betoninių grindų įrengimo technologijų analizė, *Journal of Civil Engineering and Management* 11(2) (suppl. 1): 32–39.
- Žiogas, V. A. 2008. *Monolitinė statybos technologija*. Kaunas: Technologija. 243 p.
- Žiogas, V. A. 1998. Vandens valymo įrenginių statybų analizė, iš *Konferencijos „Statyba ir architektūra“ pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 329–333.
- Žiogas, V. A.; Juočiūnas, S. 2005. Monolitinių betoninių grindų įrengimo ypatumai naudojant plaušinį armavimą, iš *Konferencijos „Pažangioji statyba“ pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 187–192.
- Žiogas, V. A.; Juočiūnas, S. 2007a. Continuity concreting technology of massive foundation slab on piles, in *Modern Building Materials, Structures and Techniques: Selected papers of the 9<sup>th</sup> international conference. May 16–18, 2007, Vilnius, Lithuania, vol. 1, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuanian Academy of Science, International Association for*



*Bridges and Structural Engineering, European Council of Civil Engineers.* Vilnius: Technika, 453–459.

Žiogas, V. A.; Juočiušas, S. 2007b. Kauno m. vandens nuotekų biologinio valymo rezervuaro aukštų sienūčių nepertraukia-

mo betonavimo technologijos tyrimai, iš *Konferencijos „Pažangioji statyba“ pranešimų medžiaga.* Kaunas: Technologija, 190–196.

## CONCRETING AND EARLY HARDENING PROCESSES IN MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

V. A. Žiogas, S. Juočiušas, V. Medelienė, G. Žiogas

**Abstract.** The exploitation time and reliability of monolithic reinforced concrete structures largely depend on concreting technology and process influence during concreting and early setting stages. Different types of cracks in monolithic reinforced concrete structures appear due to internal and external effects. Cracks appear when the technology of structure concreting is damaged, when formwork is removed during the further setting and structures loaded period. In order to avoid micro and macro cracks in monolithic structures, it is important to measure the particular setting time moment and technological process moment when stresses that exceed the permissible values appear in concrete. The article analyses the processes that appear when horizontal, sloping and vertical monolithic reinforced concrete structures are concreted. The analysis of concrete mixture pressure on formwork is performed. The pressure which is calculated according to different countries' methodology is different: the smallest pressure is obtained calculating according to the British recommendations, and the largest pressure is obtained according to French CIB recommendations. In Lithuania, it is recommended to follow the German DIN 18218 standard. The balance conditions of concrete mixture concreting on slope surface are described. The main concreting technology parameters and their interaction are analysed; the speed, intensity and time of continuous concreting technology are presented. When the process of continuous concreting is performed, it is necessary to evaluate the interaction and values of parameters properly. Methodical theoretical calculation is presented. Practical solutions for industrial building construction applying the modern sliding formwork technology are presented. The impact of cement type, superplasticizers and temperature over the concrete mixture mobility, changes, fresh concrete structural strength and concrete setting kinetics are analysed. The main characteristics of the initial setting — the beginning of structure formation, when concrete mixture turns into concrete state — is analysed applying the ultrasonic method. The beginning of structure formation influences the regulated time of concrete mixture laying and compaction. The requirements for structural strength (permissible strength limits) and concreting rate (formwork movement) of freshly formed concrete are set when the construction is performed applying the continuous concreting technology method. The analysis is implemented performing the construction of cylindrical sludge tank with slipping formwork. While performing the analysis during concreting, it was stated that the concrete setting kinetics corresponds to the sludge tank concreting rate. The analysis performed after concreting and in 28 days of hardening revealed that there are no surface defects or cracks, and concrete strength exceeds the required sludge tank design strength.

**Keywords:** concrete mix, pressure, continuity concreting, moving formwork, strength of fresh concrete, beginning of the intensive formation structure, moving rate of formwork.

**Vigantas Antanas ŽIOGAS.** Doctor, Associate Professor of the Dept of Civil Engineering Technologies at Kaunas University of Technology (KTU). Research interests: massive building technologies, monolithic concrete floors arranging technologies, repair and strengthening technologies of concrete and reinforced concrete buildings, design composition of concrete mixes with special requirements, improvement the technology in monolithic building, research the special building technologies.

**Svajūnas JUOČIŪNAS.** Lecturer of the Dept of Civil Engineering Technologies at Kaunas University of Technology (KTU). Research interests: technologies of installation monolithic concrete floors, massive building technologies optimization of construction processes.

**Violeta MEDELIENĖ.** Doctor, Associate Professor of the Dept of Civil Engineering Technologies at Kaunas University of Technology (KTU). Research interests: industrial concrete floor coating systems, installation technologies, evaluation of engineering solutions.

**Giedrius ŽIOGAS.** Doctoral student. MSc (2009, Civil engineer). Strength and fracture Mechanics Centre at Kaunas University of Technology (KTU). Research interests: fracture mechanic of reinforced concrete structures.