

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І АРМАТУРИ НА ЇХ ОСНОВІ, ЯКА ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА МОСТІВ І ШЛЯХОПРОВІДІВ ЗА КОРДОНОМ

Терещенко Т.А.

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»

Вступ

Неметалева композитна арматура на основі полімерних матеріалів, зміцнених волокном (англомовний термін *Fiber Reinforced Plastic Rebar, FRP-rebar*, де *FRP* – полімерний матеріал, зміцнений волокном), застосовується для армування бетонних конструкцій і є перспективною альтернативою сталевій арматурі. В процесі експлуатації залізобетонних конструкцій постійний вплив агресивних середовищ призводить до зниження лужності бетону і корозії арматури, що особливо актуально для мостів і шляхопроводів, проїзні частини яких піддаються інтенсивному впливу солей. Частково проблеми захисту від корозії можуть бути вирішені застосуванням сталеві арматури, вкритої епоксидними матеріалами, застосуванням спеціальних добавок до бетонних сумішей, але ефективність таких заходів є обмеженою. Застосування композитної арматури дозволяє усунути проблеми корозії. Згідно з даними *ACI (American Concrete Institute)*, на даний час найбільша чисельність комерційних будівельних проектів з застосуванням композитної арматури належить Японії. В Європі композитну арматуру вперше було застосовано в 1986 р. при будівництві шляхопроводу в Німеччині. В м. Манітоба (Канада) при будівництві моста Хеденглі (*Headingley*) в 1997 р. вперше було застосовано композитну арматуру, зміцнену двома видами волокна – скляним і вуглецевим. На даний час композитна арматура найбільш широко застосовується в Канаді, США, Японії, Німеччині і Італії. Згідно стандартів цих країн застосовується композитна арматура, виготовлена з полімерних матеріалів (матриці), армованих безперервним волокном одного з трьох типів: скляним (*glass FRP, GFRP*), вуглецевим (*carbon FRP, CFRP*), арамідним (*aramid FRP, AFRP*). В якості матриці використовують ізофталеві полієфіри, вінілові полієфіри, епоксидні смоли. Компанія *Sudaglass Fiber Technology* (Х'юстон, США) займається виробництвом композитної арматури, армованої базальтовим волокном, на базі потужностей України і Росії. Проте дані щодо арматури такого типу не внесено в чинні нормативні документи *ACI*.

Сировиною для виробництва вуглецевих волокон є органічні полімери, наприклад, ПАН – поліакрилонітріл, який піддають термічному окисненню і карбонізації при температурі не нижче ніж 1600 °С, при чому органічна молекулярна складова видалюється і залишається неорганічна структура, що складається переважно з атомів вуглецю. На даний час 50 % світових потужностей з виробництва вуглецевих волокон належать Японії, головним споживачем є США. Відомим виробником стрижневої *CFRP*-арматури є *Mitsubishi Chemical Company*, Японія, якій належить лінія продукції “*Leadline*”.

Сировиною для виробництва арамідних волокон є полімери промислової марки *Twaron* (аналог *Kevlar, Du Pont*), яка належить компанії *Teijin Aramid*, Японія. Відомими виробниками стрижневої *AFRP*-арматури є компанії *Kajima Corp.* та *Nippon Aramid Co.*, Японія, яким належить лінія продукції “*Arapree*” (*Aramid Prestressing Elements*) для армування напружених бетонних конструкцій та елементів.

Скляні волокна випускаються у модифікації *S* і *E* (*S-glass*, *E-glass*) і мають хімічний склад, % за масою: $\text{SiO}_2 \sim 65$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 25$; $\text{MgO} \sim 10$. *S*-волокно характеризується підвищеними показниками міцності при розриві, абразивної стійкості і підвищеним модулем пружності.

Стрижневу композитну арматуру виготовляють переважно методами пултрузії (протягування матеріалу крізь фільтру, нагріту до температури полімеризації) і обплетення, коли періодичний профіль поперечного перерізу формується шляхом вдавлювання волокна для обмотки в несний стрижень. Композитна арматура виготовляється з різними формами поперечного перерізу (овальний, круглий, прямокутний; суцільний або порожнистий) і видами зміцнення (наповнення фіброю; наповнення фіброю та формування поверхневої піщаної оболонки для збільшення адгезії до бетону). Стандартні значення номінального діаметру варіюються від 6 мм до 36 мм. Для арматури з овальним, прямокутним, порожнистим поперечним перерізом номінальний діаметр визначається як номінальний діаметр круглої арматури з суцільним профілем і ідентичним значенням площі поперечного перерізу. Згідно з [1] арматура класифікується і позначається за типом волокон, мінімальними значеннями опору на розтяг і модулю пружності E'_{min} , довговічністю. Позначення марок композитної арматури наводиться як *Xa-Eb-Dc* і складається з:

- позначення матеріалу волокон *X* (*X=A*-арамід; *C*-вуглець, *G*-скло);
- значення опору на розтяг *a*, МПа;
- значення модуля пружності $E=E'_{min}$, ГПа (див. табл. 1, вимоги *ISIS*);
- класу арматури *b* відповідно до значень модуля пружності (див. табл. 1, вимоги *ISIS*);
- нормованого значення показника довговічності *D*;
- класу довговічності арматури *c*.

Арматура класифікується згідно з [1] як така, що має клас 1 (висока довговічність) або клас 2 (середня довговічність) за результатами випробувань на стійкість до дії лугів, визначення водопоглинання (також у напруженому стані), температури склування та ступеню полімеризації матриці; для арматури на основі ізофталевих полієфірів призначається клас 2.

На кресленнях композитна арматура ідентифікується за літерою, яка позначає матеріал волокон (*A*, *C*, або *G*), та за значенням номінального діаметру.

Нижче розглянуто загальні фізичні і механічні характеристики композитної арматури згідно з [2] без урахування впливу таких змінних чинників, як вміст волокон, матеріал матриці, орієнтація волокон, технологія виробництва. Окремо слід зазначити, що головною особливістю композитної арматури – на відміну від сталевий – є анізотропія, тобто неоднаковість властивостей в різних відносно армування напрямках.

Таблиця 1 – Нормативні значення модулів пружності композитної арматури згідно з документами *ISIS* і *ACI*

Матеріал волокон	E'_{min} , ГПа			
	Вимоги і класифікація згідно з [1] (<i>ISIS</i>)			Вимоги згідно з [2] (<i>ACI</i>)
	Клас III	Клас II	Клас I	
Арамід	50	70	90	68,9
Вуглець	80	110	140	110,3
Скло	35	40	50	39,3

Фізичні властивості

Питома вага *FRP* становить від 1,25 г/см³ до 2,10 г/см³, що є значно нижчим за питому вагу сталі (табл. 2) і дозволяє знизити витрати на транспортування і монтаж композитної арматури у порівнянні з металевою.

Таблиця 2 – Питома вага *FRP* і сталі згідно з [2]

Сталь, г/см ³ (фунт/фут ³)	<i>GFRP</i> , г/см ³ (фунт/фут ³)	<i>CFRP</i> , г/см ³ (фунт/фут ³)	<i>AFRP</i> , г/см ³ (фунт/фут ³)
7,90 (493,00)	від 1,25 до 2,10 (від 77,8 до 131,0)	від 1,50 до 1,60 (від 93,3 до 100,0)	від 1,25 до 1,40 (від 77,8 до 88,1)

Коефіцієнти лінійного теплового розширення композитної арматури є різними в поздовжньому та поперечному напрямках та залежать від вмісту і матеріалу волокон, типу матриці. У поздовжньому напрямку цей показник залежить переважно від характеристик волокна, у поперечному – від характеристик матриці; значення цих показників наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Коефіцієнти лінійного теплового розширення *FRP* і сталі згідно з [2]*

Напрямок	Коефіцієнти лінійного теплового розширення, $\cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ ($\cdot 10^{-6}/^{\circ}F$)			
	Сталь	<i>GFRP</i>	<i>CFRP</i>	<i>AFRP</i>
Поздовжній α_L	11,7 (6,5)	від 6,0 до 10,0 (від 3,3 до 5,6)	від мінус 6,0 до 0,0 (від мінус 3,3 до 0,0)	від мінус 6,0 до мінус 2,0 (від мінус 3,3 до мінус 1,1)
Поперечний α_T	11,7 (6,5)	від 21,0 до 23,0 (від 11,7 до 12,8)	від 74,0 до 104,0 (від 41,0 до 58,0)	від 60,0 до 80,0 (від 33,3 до 44,4)
Примітка – наведено для об'ємного вмісту волокон від 0,5 до 0,7				

Від'ємні значення коефіцієнта термічного розширення вказують на те, що матеріал стискається при підвищенні температури та розширяється при зниженні температури.

Для порівняння, бетон характеризується ізотропним коефіцієнтом термічного розширення із значенням від $7,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ до $10,8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ (від $4,0 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$ до $6,0 \cdot 10^{-6}/^{\circ}F$). Оскільки для бетону і сталі ці показники є ізотропними і характеризуються близькими значеннями, бетон та сталь однаково реагують на температурні навантаження – стискаються при пониженні температури та розширюються при підвищенні температури. Для більшості комерційних видів *CFRP* $\alpha_L \sim 0$, тобто матеріал не реагує на температурні навантаження. Тому в системі *CFRP*-бетон при температурному навантаженні в обох матеріалах виникають внутрішні напруження. Наприклад, при підвищенні температури бетон в такій системі піддається навантаженню на стиск, а при пониженні температури – навантаженню на розтяг. Незалежно від типу волокон, при застосуванні композитної арматури необхідно підтвердити відсутність у бетоні напружень, які перевищують межу міцності бетону на розтяг.

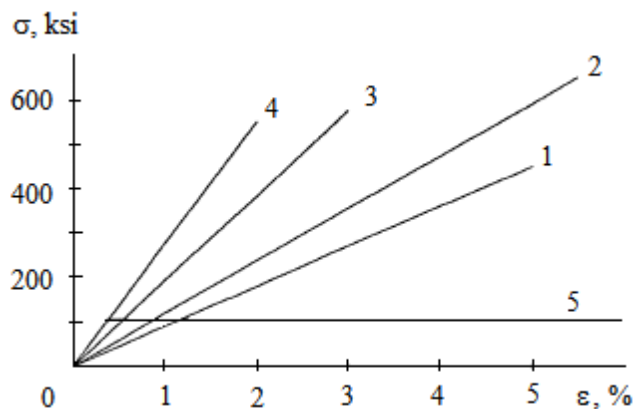
Елементи є сумісними при температурних навантаженнях при виконанні умов (для елементів, що деформуються вздовж осі) [3]:

$$\left(F \frac{L}{AE} + \alpha L \Delta T \right)_{FRP} = \left(F \frac{L}{AE} + \alpha L \Delta T \right)_{concrete},$$

де F – сила, що виникає в елементі при температурному навантаженні;
 L – довжина елемента;
 A – площа елемента;
 E – модуль пружності;
 α – коефіцієнт лінійного теплового розширення;
 ΔT – градієнт температури.

Механічні властивості

Властивості *FRP* при навантаженні на розтяг вздовж напрямку армування є комбінацією властивостей волокна і матриці. Матеріал волокон зазначених видів є крихким — на відміну від матричних полімерів, а також сталі. Діаграми навантаження волокон характеризуються пружнолінійною залежністю деформації від напруження – пластична деформація, притаманна сталі, відсутня (рис. 1). Пружнолінійним є також характер залежності деформації від напруження для *FRP*, проте діаграми навантаження *FRP* відрізняються від діаграм навантаження відповідних волокон меншим кутом нахилу до осі абсцис. Характер деформацій композитної арматури при навантаженні на розтяг не залежить від типу і вмісту волокон [4]. Таким чином, композитна арматура, на відміну від сталеві, за нормальних умов експлуатації піддається крихкому руйнуванню.



1 – залежність деформації ϵ від напруги σ для E-скла; 2 – залежність деформації від напруження для S-скла; 3 – залежність деформації від напруження для арамиду; залежність деформації від напруження для вуглецевого полімеру; залежність деформації від напруження для маловуглецевої сталі

Рис. 1. Порівняльні діаграми навантаження різних видів матеріалів волокна і сталі за даними [5]

Характеристики різних видів арматури при навантаженні на розтяг згідно з даними [2] наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Характеристики різних видів арматури при навантаженні на розтяг⁵

	Сталь	GFRP	CFRP	AFRP
Межа текучості, МПа	від 276 до 517	-	-	-
Міцність при розтягу [опір на розтяг], МПа	від 483 до 690	від 483 до 1600	від 600 до 3690	від 1720 до 2540
Модуль пружності, ГПа	200,0	від 35,0 до 51,0	від 120,0 до 580,0	від 41,0 до 125,0
Відносна деформація на межі текучості, %	від 0,14 до 0,25	-	-	-
Відносна деформація при розриві, %	від 6,0 до 12,0	від 1,2 до 3,1	від 1,2 до 1,7	від 1,9 до 4,4
Примітка – наведено для об'ємного вмісту волокон від 0,5 до 0,7				

Визначальний вплив на міцність при розтягу і жорсткість композитної арматури має вміст волокна в матриці, оскільки волокно є основним компонентом, що витримує навантаження. Для арматури одного діаметру, складу та конфігурації перерізу міцність при розтягу і жорсткість значно варіюються залежно від вмісту волокна.

На відміну від сталеві арматури міцність при розтягу композитної арматури залежить від розмірів поперечного перерізу – при збільшенні діаметру величина опору на розтяг зменшується. Такий характер залежності пояснюється ефектом запізнювання зсуву (shear lag effect⁶) матриці, внаслідок якого величина напруження волокон вздовж поверхні арматури значно перевищує напруження волокон всередині. При збільшенні діаметру композитної арматури вплив цього ефекту посилюється [6]. Для GFRP – арматури значення опору на розтяг знижується на 40 % при збільшенні діаметру від 9,5 мм до 22,2 мм. Дані щодо впливу розмірів поперечного перерізу на міцність при розтягу AFRP – арматури різняться для різних технологій виробництва. При виробництві методом обплетення зменшення величини опору на розтяг складає 2 % при збільшенні діаметру AFRP – арматури від 7,3 мм до 14,7 мм, при виробництві методом пултрузії – 7 % при збільшенні діаметру від 3,0 мм до 8,0 мм [2, 7].

Композитна арматура піддається згинанню виключно в процесі виробництва⁷. Слід ураховувати, що в місцях згину міцність виробу при розтягу значно зменшується внаслідок перегину волокон і концентрації напружень.

5 Відповідно до вимог [2] дані з випробувань композитної арматури на розтяг надаються виробником у вигляді гарантованого значення міцності [опору на розтяг] f_{fu}^* , яке обчислюється для серії не менше ніж 25 зразків як

$$f_{fu}^* = (f_{u,avb} - 3\sigma),$$

де $f_{u,avb}$ – середнє значення для серії;

σ – стандартне відхилення. Виробник також повинен надати гарантовані значення відносної деформації і модулю пружності.

6 Нерівномірний розподіл нормальних напруження в елементі, зумовлений деформацією зсуву.

7 Якщо матриця залишається термопластичною (наприклад, завдяки технології виробництва молекулярна зшивка полімеру матриці є неповною), дозволяється згинання виробів користувачем згідно з рекомендаціями виробника.

Згідно з [2] композитна арматура не рекомендується для застосування в елементах конструкцій, які працюють на стиск; також відсутні стандартні методи випробувань композитної арматури на стиск. Наведені нижче дані щодо результатів таких випробувань мають інформаційний характер. Випробування зразків композитної арматури із співвідношенням «довжина/діаметр» від 1/1 до 2/1 показало, що міцність при стиску для *GFRP*, *CFRP*, *AFRP* – арматури становить 55 %, 78 % і 20 % міцності при розтягу [2, 8]. Характер руйнування зразка арматури при стисканні залежить від вмісту та матеріалу волокон і типу матриці і руйнування відбувається внаслідок: 1) поперечного руйнування зразка; 2) мікротріщин волокон; 3) зсуву.

Більшість видів композитної арматури характеризується низькими показниками міцності при міжшаровому зсуві, оскільки *FRP* складаються з шарів незміцненої матриці, розташованих між шарами волокон, і міцність на зсув обмежується цим показником для матриці. Орієнтація волокон у напрямку, що відхиляється від осевого, дозволяє різною мірою (залежно від ступеня відхилення) підвищити міцність при міжшаровому зсуві. Цей ефект досягається застосуванням технологій обплетення, а також введенням спіралеподібних волокон.

Важливою особливістю композитної арматури є наявність повзучості (явище зростання деформації твердого тіла у часі при сталому навантаженні). Слід зазначити, що в сталевій арматурі діючих залізобетонних споруд таке явище спостерігається переважно при дії екстремально високих температур (наприклад, вплив вогню при пожежі). Найменш схильною до повзучості є *CFRP* – арматура, найбільш схильною – *GFRP* – арматура. Так, було проведено серію порівняльних випробувань на статичну втому трьох видів композитної арматури гладкого профілю з номінальним діаметром 6 мм [2, 9]. Випробування проводили за постійних нормальних умов при різних рівнях навантаження. Обчислення методом регресійного аналізу показали, що при 500000 год. (~50 років) величина напруження руйнування становить 0,29; 0,47; 0,92 від вихідної величини для *GFRP*, *AFRP*, *CFRP* – арматури відповідно. *CFRP* – арматура і *AFRP* – арматура є стійкими до дії циклічних навантажень⁸. При накладанні 1000000 циклів руйнівне навантаження для *CFRP* – арматури становить від 50 % до 70 % від вихідного навантаження. При накладанні 2000000 циклів руйнівне навантаження для *AFRP* – арматури становить від 54 % до 73 % від вихідної величини [2].

Композитна арматура не рекомендується для застосування в елементах і конструкціях, до яких пред'являються вимоги з вогнестійкості для забезпечення цілісності споруди. Для виготовлення композитної арматури рекомендовано застосовувати полімери, температура склування T_g яких перевищує максимально очікувані температури роботи споруди не менше ніж на 30 °С, проте для більшості полімерів матриці температури склування знаходяться в інтервалі від 60 °С до 125 °С [10]. При розм'якшенні композитної арматури проявляються такі небезпечні чинники, як значне зменшення міцності при розтягу і зменшення адгезії до бетону. Випробування напружених елементів (балок) показало, що втрата несної здатності при впливі високих температур відбувається внаслідок руйнування арматури в місцях анкерування або при досягненні температур, критичних для матеріалу волокна (980 °С, 175 °С, 1600 °С для *GFRP*, *AFRP*, *CFRP* відповідно) [2]. Горючість композитної арматури регулюється хімічним складом полімерів і товщиною захисного шару бетону.

⁸ При таких видах випробувань композитну арматуру піддають синусоїдальним циклічним навантаженням при частотах, які виключають спонтанний розігрів полімерних матеріалів, наприклад, 0,5 Hz для *CFRP*-арматури.

Застосування композитної арматури для армування напружених елементів і конструкцій регламентується [11].

Сертифікаційні випробування композитної арматури

Сертифікаційні випробування композитної арматури здійснюють за програмою короткочасних та тривалих випробувань. Нижче у табличному вигляді наведено дані щодо показників для сертифікаційних випробувань стрижневої арматури (за винятком деяких фізичних характеристик і геометричних параметрів).

Таблиця 5 – Вимоги до композитної арматури згідно з [1]

Найменування показника, одиниця вимірювання	Нормовані значення показника
1	2
Вміст волокон, % за об'ємом	не менше ніж 55
Опір на розтяг у повздовжньому напрямку, МПа	від 450 до 750 нормується тільки для <i>GFRP</i> – арматури; значення залежить від діаметру
Модуль пружності у повздовжньому напрямку, ГПа	зазначені в табл. 1
Максимальне відносне подовження при розтягу у повздовжньому напрямку, %	не менше ніж 1,2
Міцність зчеплення з бетоном, МПа (при визначенні методом висмикування)	не менше ніж 8
Коефіцієнт лінійного теплового розширення у поперечному напрямку, °C ⁻¹	не більше ніж 40 · 10 ⁻⁶
Порожнистість, %	не більше ніж 1,0
Водопоглинання при 50 °C, %	не більше ніж 1,0 для D2 не більше ніж 0,75 для D1
Ступінь полімеризації, % (обчислюється за результатами визначення ентальпії полімеризації методом диференціальної скану- вальної калориметрії)	не менше ніж 95 для D2 не менше ніж 98 для D1
Температура склування, °C (при визначенні методом диференціальної сканувальної калориметрії)	80 для D2 100 для D1
Стійкість до дії лугів протягом 3-х місяців – визначається як зменшення значення опору на розтяг, %	не більше ніж 30 для D2 не більше ніж 20 для D1
Стійкість до дії лугів у напруженому (деформованому) стані протягом 3-х місяців – визначається як зменшення значення опору на розтяг, %	не більше ніж 40 для D2 не більше ніж 30 для D1

Кінець табл. 1

1	2
Опір повзучості (<i>creep rupture strength, onip руйнуванню при повзучості</i>), % від значення опору на розтяг	не менше ніж 35 для <i>GFRP</i> не менше ніж 75 для <i>CFRP</i> не менше ніж 45 для <i>AFRP</i>
Втомна міцність, % від значення опору на розтяг (визначається при 2 000 000 циклів випробувань)	не менше ніж 35 для <i>GFRP</i> не менше ніж 75 для <i>CFRP</i> не менше ніж 45 для <i>AFRP</i>

Для гнутих виробів призначаються додаткові види сертифікаційних випробувань.

Загальні рекомендації з застосування композитної арматури для армування бетонних конструкцій

Низка описаних вище властивостей композитної арматури зумовлює особливості проектування армованих бетонних конструкцій. До таких властивостей належать: анізотропія, особливості виконання з'єднань арматури, інші – на відміну від сталевих арматур – показники вогнестійкості і втомної міцності, а також інший характер залежності «напруга-деформація». Виникнення пластичних деформацій сталевих арматур проявляється в надлишкових деформаціях залізобетонного елемента і свідчить про критичний стан конструкції, що не спостерігається при армуванні композитною арматурою внаслідок її крихкого руйнування. Низькі модулі пружності призводять до зниження жорсткості і збільшення прогинів бетонних конструкцій, армованих композитною арматурою, у порівнянні з залізобетонними конструкціями, при однакових витратах арматури.

В табл. 6 зведено загальні переваги і обмеження з застосування композитної арматури для армування бетонних конструкцій.

Таблиця 6

Переваги композитної арматури	Недоліки композитної арматури, які накладають обмеження на її застосування
Високі показники міцності при розтягу у поздовжньому напрямку (варіюються залежно від напрямку навантаження відносно напрямку армування)	Відсутність пластичних деформацій, крихке руйнування
Корозійна стійкість	Низькі показники міцності при розтягу перпендикулярно до напрямку армування
Відсутність магнітних властивостей	Низький модуль пружності (значення варіюються залежно від виду волокон)
Висока втомна міцність (залежить від виду волокон)	Низька довговічність скляних волокон у вологому середовищі; низька довговічність скляних, арамідних волокон у лужному середовищі
Мала питома вага (для <i>FRP</i> становить ~ ¼ від питомої ваги сталі)	Високий (у порівнянні з бетоном) коефіцієнт термічного розширення у перпендикулярному до армування напрямку
Низька термічна і електрична провідність (особливо скляних і арамідних волокон)	Горючість залежить від типу матриці і товщини захисного шару бетону

За результатами аналізу науково-технічної літератури, безумовні переваги надаються композитній арматурі при армуванні бетонних конструкцій, до яких пред'являються особливі вимоги: 1) в зв'язку з регулярним впливом сильноагресивних солей; 2) в зв'язку з моніторингом або частими обстеженнями споруд з застосуванням техніки магнітного резонансу. Згідно з [2], застосування композитної арматури за межами таких вимог не завжди є доцільним. В розглянутих бібліографічних джерелах вказано на необхідність подальших досліджень з застосування композитної арматури в елементах конструкцій, що працюють на стиск (наприклад, колони) в зв'язку з тим, що модуль пружності композитної арматури є нижчим за модуль пружності сталеві арматури.

Література

1. Specifications for Product Certification of Fiber Reinforced Polymers (FRPs) as Internal Reinforcement in Concrete Structures. 2006. ISIS Canada Research Network (*Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Winnipeg*)
2. ACI 440.1R-06 (2006). Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI Committee 440. American Concrete Institute (ACI)
3. Craig, R.R.; Philpot, T.A. *Mechanics of Materials*. – John Wiley & Sons, 2011. – 856 p.
4. Dhir, R.K.; Paine, K.A.; Newlands, M.D. *Composite Materials in Concrete Construction: proceedings of the international seminar held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5-6 September, 2002*. – London: Thomas Thelford, 2002. – 378 p.
5. *Manufacture and Performance Evaluation of FRP Rebar Featuring Ductility and Health Monitoring Capability. Final Technical Report RDT 99-005*. University of Missouri.
6. Hollaway, L.; Head, P.R. *Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure*. – Elsevier, 2001. – 316 p.
7. Faza, S. S.; GangaRao, H. V. S. *Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete // Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications, Developments in Civil Engineering*. – 1993. – V. 42. – P. 167-188.
8. Mallick, P. K. *Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design*. – New York: Marcell Dekker, Inc., 1988. – 469 p.
9. Yamaguchi, T.; Kato, Y.; Nishimura, T.; Uomoto, T. *Creep Rupture of FRP Rods Made of Aramid, Carbon and Glass Fibers // Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*. Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan. – 1997, V. 2. – P. 179-186.
10. Kollár, L. P.; Springer, G. S. *Mechanics of Composite Structures*. – New York: Cambridge University Press, 2003. – 498 p.
11. ACI 440.4R-04 (2004, reapproved 2011). *Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons*. ACI Committee 440. American Concrete Institute (ACI).