

УДК 691.328:666.972

## МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ФІБРОБЕТОНІВ (Огляд)

О. Є. АНДРЕЙКІВ<sup>1</sup>, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ<sup>2</sup>, І. Я. ДОЛІНСЬКА<sup>2</sup>,  
О. К. РАЙТЕР<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Львівський національний університет ім. Івана Франка;

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Проаналізовано і синтезовано результати досліджень деформування і руйнування фібробетонів. Подано огляд праць із таких питань: розвиток і застосування фібробетонних технологій, основні параметри будови фібробетонів і особливості їх деформування і руйнування та методи оцінювання міцності і довговічності.

**Ключові слова:** композитні матеріали, фібробетони, деформування, руйнування, міцність, довговічність, асортименти фібр, матриця.

Розвиток різних типів новітнього будівництва тісно пов'язаний зі створенням матеріалів з керованими і заздалегідь заданими властивостями. Це потрібно не тільки для забезпечення належної міцності, довговічності й корозійної тривкості елементів конструкцій, але й для встановлення їхніх інших функціональних властивостей. Основу таких матеріалів і складають композити, до яких належать скло-, металокомпозити, залізобетони, які у багатьох випадках доцільно вважати гомогенними ортотропними лінійно-пружними матеріалами з певними усередненими значеннями механічних і фізичних характеристик.

Відомо, що вже на стадії виробництва таких матеріалів, технологічних процесів їх обробки та виготовлення з них елементів конструкцій або вже на початку їх експлуатації у них виникають дефекти типу тріщин. Такі дефекти під впливом експлуатаційних чинників спочатку поволі, але безупинно розвиваються, досягаючи з часом певного критичного розміру. Тому утворення і розвиток тріщини є тут основним механізмом вичерпання ресурсу елементів конструкцій з композитних матеріалів. Цими питаннями і займається механіка руйнування неперервно армованих композитів [1, 2].

**Розвиток і застосування фібробетонних технологій.** Бетон це, мабуть, найпопулярніший будівельний матеріал протягом останніх сторіч. Будівельники завжди прагнули збільшити його міцність і одночасно знизити витрати. Бетони на будівельному майданчику стали не просто заливати в опалубку, їх почали заздалегідь армувати металевими прутами. Армований бетон, поєднуючи в собі якості каменю і металу, став суттєво міцнішим. Але винахідники згадали про простіший спосіб армування будівельних матеріалів, який застосовували ще єгиптяни. Для посилення цегли до складу вводили соломку або навіть кінський волос. Цегла ставала міцнішою і легшою, не тріскалася під час висихання. Експериментували з різними матеріалами і в 1874 р. англієць А. Берардо зареєстрував суміш різних матеріалів як домішку в бетон. У 1918 р. у Франції Х. Альфсен застосував метод армування бетону сталевими або дерев'яними волоками, а через 25 років в Англії розроблено перший фібробетон [3, 4]. Однак перші переконливі, науково обґрунтовані концепції цілеспрямованого формування фібробетону як

композиційного матеріалу розроблено лише в останні десятиліття [5]. Суттєво розвивали і застосовували фібробетон у Японії. У 1980 р. кількість використаної в цій країні сталеві фібри досягла 3000 t, з яких 2500 t виготовлено з вуглецевої і ~ 500 t з нержавної сталі [6].

Досвід таких розвинених країн, як США, Великобританія, Німеччина, Франція й Австралія, переконливо довів техніко-економічну ефективність застосування фібробетону в будівельних конструкціях [7–12]. У будівельній практиці США сталеві фібробетон широко використовують для монолітних підлог промислових будинків, покривів в аеропортах і доріг з важкими транспортними навантаженнями [13]. У зарубіжній практиці широко застосовують фібробетон з різноманітною фіброю: сталеву, скляну, вуглецевою, поліпропіленовою тощо [6, 14–16]. Варто виділити застосування фібробетонів у дорожньому й тунельному будівництві, будівництві морських платформ і гребель, а також підлог промислових будинків, терміналів тощо. Найцікавішими прикладами є: конструкції тунелів метрополітену в Осло (Норвегія); кріплення гідротехнічного тунелю  $\varnothing 2,34$  m у Карсінгтоні (Великобританія); тунель Хеггура й газопровідні тунелі під дном Північного моря (Норвегія); залізничні тунелі в Канаді; колекторні тунелі метрополітену в Гамбурзі (Німеччина) і Ліоні (Франція); автодорожній тунель довжиною 6,63 km “Енасан-2” (Японія) [8]. В Австралії однією з основних областей застосування сталеві фібробетону є виготовлення дорожніх покривів з інтенсивним рухом транспорту. У Німеччині понад 25% індустриальних підлог зі сталеві фібробетону [17]. Великий досвід застосування фібробетону з використанням сталеві, скляної, базальтової й поліпропіленові фібри є в Росії [3]. Перші роботи щодо одержання дисперсно-армованих бетонів зі застосуванням сталевих волокон, пов’язують з ім’ям В. П. Некрасова, який ще в 1907 р. виконав комплекс робіт з дослідження бетону, регулярно й хаотично дисперсно-армованого відрізками дротів малих діаметрів. Запропоновано вводити в бетонну суміш металеву “вовну”, стружку й інші подібні матеріали [9]. У російській практиці будівництва фібробетон застосовують для виготовлення збірних конструкцій. Перший практичний досвід застосування сталеві фібробетону зареєстрований у 1979 р. під час будівництва монолітного днища прямокутного резервуара розміром 12×18 m для зберігання технічної води на Північній водопровідній станції в Ленінграді.

В Україні також інтенсивно застосовують фібробетонні технології, головню в монолітному будівництві [18, 19]. Разом з тим прикладами успішного використання тут сталеві фібробетону є: монолітні та збірні покриви доріг, настили мостів, берегозахисні елементи; злітно-посадкові смуги аеродромів; обробка склепінь, тунелів, у тому числі і метрополітенів; фундаменти під устаткування ударної і динамічної дії (важкі преси, молоти, прокатні стани тощо); конструкції збірного залізобетону (палі, лотки, труби, шпали, збірні плити доріг і промислових підлог), тротуарна плитка різної конфігурації, бордюри, розділові смуги, водопропускні труби, шумозахисні панелі, тонкостінні покриви автобусних зупинок тощо.

**Основні параметри будови фібробетонів та їхні особливості.** Фібробетон отримують введенням в цементну суміш армувального волокна коротко порізаного або у вигляді сітки [7–9, 13, 17]. Матеріал для армування бетону використовують різний, і від цього залежить назва та класифікація фібробетону. Класифікація фібробетону за матеріалом фібри така: фібра металева (переважно сталь), скляна, зі синтетичних волокон, з натуральних матеріалів (базальт, азбест), змішана. Волокна у складі фібробетону розташовані довільно і їх вводять різними способами – традиційним змішуванням, напиленням, за преміксінгу. Для отримання спрямованого розташування волокон у фібробетоні за сталеві фібри використовують магнет, а фібру з штучних матеріалів укладають у вигляді сітки ниток. Для кожного типу фібри застосовують свою технологію виробництва фіб-

робетону. Виготовляють сталеві фібробетонні суміші частіше в стандартних бетоннозмішувачах. Для рівномірного розподілу волокон в обсязі сталеві фібробетону додають пластифікатори, фібри вводять дозовано, а обсяг замісу зменшують на 25...30%. Суміш укладають звичайним способом, застосовуючи стандартний інструмент, яким також вводять фібри на основі натуральних матеріалів. Склофібробетон і фібробетон на основі синтетичних волокон виготовляють шляхом розпилення (пневмонабризгу) і преміксінга. Перший спосіб застосовують безпосередньо на об'єкті. Напилюють під тиском зі застосуванням спеціального устаткування через пістолет-напилювач. Синхронно подається дрібнозернистий бетонний розчин і рубана фібра, вони перемішуються в пістолеті-напилювачі. За нанесення розчину таким способом можлива одночасна обробка великих площ. Армували бетон сталевими волокнами на початку минулого століття [3, 4, 18]. Розрізняють волокна гладкої і рифленої форм, а також з потовщеними кінцями (для поліпшення зчеплення) [5]. Сталеві волокна в основному мають високу границю міцності за розтягу (від 1000 до 2500 МПа) і завдяки високому модулю пружності особливо привабливі як фіброармовані. Оскільки їх зчеплення з матрицею здебільшого досить слабке, то границя міцності за розтягу часто не досягається. Довжина сталевих волокон  $\varnothing 0,2...1$  mm у фібробетонах  $\sim$  до 50 mm. Суттєва їх перевага – пластичність, що є важливою характеристикою для приготування бетонної суміші.

На розподіл і орієнтування волокон впливає розмір заповнювача. Оскільки в дрібнозернистому будівельному розчині всі частинки ще можуть вільно переміщатися між волокнами, то всі зерна заповнювача з розміром, що перевищує середню теоретичну відстань між волокнами, обов'язково призведуть до нерівномірного розподілу. Що більший розмір заповнювача, то вираженіший цей ефект, який негативно впливає як на характеристики свіжої бетонної суміші (наприклад, виникнення блокувань), так і затверділого бетону. Максимальний розмір зерна в основному не повинен перевищувати третину довжини волокна. На орієнтацію волокон впливає консистенція свіжої бетонної суміші, напрямок бетонування, геометрія будівельного елемента та інші чинники. Орієнтація волокон, своєю чергою, істотно діє на механічні характеристики фібробетону [5].

Сьогодні номенклатура армувальних елементів суттєво розширена. Для армування використовують різні органічні й неорганічні волокна такі, як скло, поліпропілен, вуглецеві волокна тощо [8, 17].

В останні роки в зарубіжній практиці все частіше застосовують фібробетони з армуванням із синтетичних волокон, які високоміцні, корозійнотривкі в різних середовищах [8, 17]. Сьогодні досить добре вивчені фібробетони на основі сталі, скла й деревини [20, 21], менше – дисперсно-армовані бетони на синтетичних і вуглецевих волокнах. Склофібробетони, які мають порівняно з бетонами на сталевій фібрі вищу тривкість у корозивних середовищах, менше застосовують на практиці. Це обумовлено невеликими обсягами виготовлення таких арматур. Для склофібробетону використовують, здебільшого, луготривке скловолокно. Грунтуючись на результатах, отриманих у вітчизняній і світовій практиці, особливу увагу варто приділити створенню різних видів неорганічних матриць не тільки на основі цементу й гіпсу, але й зі застосуванням різних видів композиційних в'язучих, модифікованих комплексними органічними домішками й дисперсним наповнювачем [9]. Застосовуючи дисперсне армування, ефективно підвищують морозотривкість бетону [11], незважаючи на деяке збільшення при цьому кількості капілярних пор. Волокна фібри сприймають розтягальні напруження, які виникають під час заморожування води в порах матеріалу. Також не можна не враховувати утримувальний ефект волокон, який перешкоджає відшаруванню й відколюванню фрагментів бетону від конструкції (зразка) під час заморожування й відта-

вання. Зміна характеристик фібробетонів пояснюється із принципу створення композитів, які ґрунтуються на спільній роботі матеріалів з різними фізико-механічними властивостями [15]. Фіброю можуть бути сталеві, полімерні, скляні, вуглецеві, базальтові й інші волокна [19–24]. Якість роботи дисперсно-армованих композитів залежить від чинників, які забезпечують спільну роботу елементів структури: зчеплення волокон з матрицею та їх інертність один до одного. У цементних бетонах волокна з матрицею зчіплюються як внаслідок фізичної адгезії, обумовленої нерівностями на поверхні волокон, так і через механічне заклинювання фібри частками матриці [25, 26]. Залежно від взаємодії між волокнами фібри з матрицею, їхньої орієнтації й концентрації по-різному відбувається деформація й руйнування армованого композита [20]. Введення волокон суттєво збільшує залишкову міцність матеріалу, а його руйнування відбувається за вищих значень деформації. Навантаження деформації зсуву в контактній зоні волокон й матриці обумовлено розходженням між їхніми модулями пружності. Постійне зусилля зсуву на кінцях фібри супроводжується зростанням розтягальних напружень з віддаленням від кінців фібри. За незначного ступеня армування фіброю в поперечному перерізі з'являється ефект концентрації напружень через наявність кінців фібр. Волокна фібри здатні нести деяке навантаження, прикладене до композита вже після розтріскування матриці (за даними – до 2 МПа). Але для цього об'ємний вміст фібри в композиті має бути вищий деякого “критичного”. Внаслідок гальмування тріщиноутворення волокнами, дисперсне армування матриці підвищує ударну міцність, тобто критичний коефіцієнт інтенсивності напружень або тріщиностійкість композита [17]. Дисперсне армування зменшує прогин зразків за навантаження, а вже після утворення тріщини в армованих бетонах напруження за згину значно вище, ніж у неармованих. Тобто фібра підвищує якість бетону, зокрема й завдяки своєму розтягу й роботі волокон після появи тріщин [17].

У літературі відомо багато інших суто експериментальних досліджень впливу густини, орієнтації, розміру і закріплення сталевих волокон на механічні властивості фібробетонів [27–31], де також оптимізовані ці параметри з точки зору міцності фібробетонів і їх деформативності. Досліджено [32] підвищення міцності залізобетону на розтяг шляхом додавання сталевих волокон. При цьому оптимізовано міцність фібробетону за розмірами їх арматури та густини сталевих волокон.

Сталеві волокна додають в бетони не тільки на основі цементу. Так, досліджено [33] геополімерний бетон на основі шлаку, у праці [34] до бетону додається зола, а у працях [35, 36] досліджені бетони, до яких додається діоксин кремнію. Легкі та вапнякові агреговані бетони зі сталевими волокнами вивчали у праці [37].

Сьогодні в інженерній практиці ефективно застосовують фібробетони не зі сталевими волокнами, що підвищує, насамперед, їх корозійну тривкість. Так, досліджено [38–40] вплив густини і розмірів поліпропіленових волокон на міцність і деформативність фібробетонів, а також їх застосування для елементів будівельних конструкцій, зокрема для мостів. У будівельній практиці досить часто використовують базальтові волокна, зокрема для підвищення міцності на розтяг залізобетонів [41]. Для цього оптимізовано вміст базальтоволокон.

У будівництві відповідальних споруд і елементів конструкцій широко застосовують гібридні фібробетони зі змішаним складом фібр. Так, досліджено [42] оптимізацію складу сталевих і вуглецевих волокон гібридного фібробетону для отримання їх максимальної міцності і деформативності. Оцінено [43] міцність і деформативність важкого бетону, армованого склопластиковою і сталевією арматурою. Досліджено [44] три види бетонів: звичайний (PC), сталепластиковий, армований сталевими волокнами (SFRC), та полімерно-модифікований (SFRPMC).

Показано, що додавання полімеру до SFRPMC підвищує його пластичність і тривкість за ударного навантаження. Досліджено [45] гібридні фібробетони з різними волокнами: сталевими, пропіленовими, суміш сталевих і залізно прокованих, суміш сталевих і пропіленових. При цьому встановлені оптимальні склади волокон для збільшення деформативності і пластичності фібробетонів. Досліджено [46] фібробетони, в склад яких входять сталеві волокна і крихта каучуку, отримана з відходів переробки зношених автомобільних шин. Показано, що такий склад фібробетону підвищує його тріщиностійкість і збільшує деформативність.

У попередніх працях досліджували характеристики фібробетонів за однократного статичного або ударного навантаження. Деякі фібробетони мають відносно достатню тривкість проти довготривалого циклічного навантаження. В зв'язку з цим досліджено [47–51] втомну міцність фібробетонів, які використовують в елементах конструкцій, за змінного навантаження. При цьому встановлено, що додавання волокон не збільшує границю витривалості в багатоцикловій області, але вигідно перевищує її в малоцикловій.

Важливе значення під час виготовлення фібробетонів має встановлення процентного складу фібри та її розмірів. Особливо це стосується довжини фібр, щоб підвищити тріщиностійкість. Оптимальний процентний склад волокон у фібробетонах досліджували експериментально [52–54]. Тут на основі експериментальних досліджень залежність міцності фібробетону від процентного складу фібри подано схематично (рис. 1а).

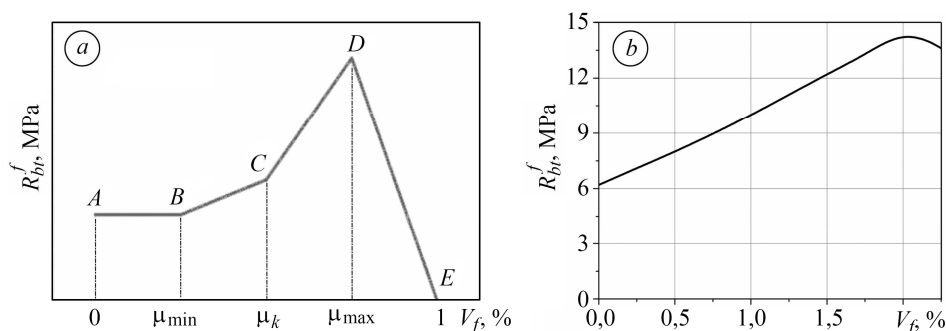


Рис. 1. Залежність міцності фібробетону (схема) [52] (а) та базальтофібробетону [53] (b) від об'ємного вмісту фібри.

Fig. 1. Dependence of fiber reinforced concrete strength (scheme) [52] (a) and of basalt fiber reinforced concrete [53] (b) on content of fibre.

При цьому експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано нелінійну зміну міцності композита залежно від граничного об'ємного насичення бетону армувальними волокнами. При цьому на лінії, яка характеризує зміну міцності фібробетону за його армування волокнами в межах від нуля до одиниці, виділено 4 ділянки і, відповідно, 3 характерні значення меж об'ємного армування (рис. 1а). Як бачимо, в межах ділянки *AB* міцність дисперсно-армованого бетону практично не відрізняється від міцності цементної матриці, що визначається малим насиченням бетону волокнами, коли вони досить далеко віддалені один від одного і практично не взаємодіють. Цю ділянку можна назвати “зоною розсіяного армування”. Точка *B* відповідає умові, коли з моменту появи у бетонній матриці тріщин, прикладене навантаження сприймає фібра і забезпечує несучу здатність. Ділянка *BC* визначає так звану “зону зосередженого армування”, а точка *C* – момент злиття контактних зон, які виникли під час структуроутворення поблизу поверхні розділу фібра–матриця, і утворення об'ємного фіброцементного каркасу. Ділянка *CD* характеризує подальше, причому інтенсивніше, підвищення міцності

фібробетону в “зоні каркасного армування”, що є результатом ущільнення цементного каменю між волокнами. Точка *D* відповідає досягненню максимальної міцності фібробетону, після якої спостерігаємо її зниження, викликане зменшенням товщини матричного шару настільки, що матеріал проявляє схильність до розшарування навіть за невеликих навантажень. Встановлено [53, 54], що точка *D* для деяких бетонів і волокон може відповідати ~ 2% вмісту фібри (рис. 1*b*).

Також великий вплив на міцність, особливо тріщиностійкість фібробетонів, має щільність бетону і напрям волокон. Як показано результатами експериментальних досліджень, найбільша тріщиностійкість фібробетонів досягається тоді, коли більшість волокон, або всі, паралельні напрямку прикладеного зусилля. У низці випадків це дало змогу [55] підвищити границю міцності матеріалу в умовах розтягу у 6 разів, за згину – у 5 разів, за стиску – на 90%, опір тріщиноутворенню – у 5 разів, ударну в’язкість – у 35 разів, опір стиранню – у 4 рази, морозотривкість – у 4 рази. Крім цього, відзначено збільшення водонепроникності і опору вибуховому навантаженню. За армування неорганічними фібрами зростає вогнетривкість у 20 разів, відсутня схильність до гниття, пліснявіння, пошкодження шкідниками і композиція не розкладається за впливу радіації.

Суттєве зменшення в’язкості матриці, за якої можливо її армувати будь-якими фібрами за знижених водоцементних відношень і без використання поверхнево-активних речовин, можна досягти застосуванням віброекструзійного способу формування, розробленого в НТУУ “КПІ”. Крім того, цей спосіб дає можливість орієнтувати фібри вздовж осі формування, тобто ефективніше використовувати армувальні властивості фібр і виготовляти тонкостінніші вироби порівняно з традиційною технологією. Основні положення цього способу і устаткування для його реалізації подані в працях [55–62].

**Деформування і руйнування фіброзалізобетонів.** У традиційно армованому залізобетоні розрив бетону може трапитись через збільшення обсягів одного або декількох мікроруйнувань, які з низки причин отримали переважний розвиток порівняно з іншими. В бетонній матриці, рівномірно пронизаній фібровою арматурою, зростання внутрішніх тріщин блокується. При цьому згладжується концентрація напружень у бетоні і в результаті бічного тиску стрижнів на нього створюється складний напружений стан. Складові сил бічного тиску зчеплення прагнуть притиснути внутрішні поверхні тріщин одна до одної. В такому дисперсно-армованому бетоні виникають передумови для плавного нагромадження мікроруйнувань по всьому об’єму за дії механізму гальмування їх росту [63–65]. Обмеження розвитку внутрішніх тріщин у всьому бетонному об’ємі означає підвищення граничного технічного розтягу бетону. Приймають такі передумови деформування і руйнування елемента за згину. З ростом зовнішнього навантаження до руйнування формуються чотири стадії напружено-деформованого стану [63–65].

У стадії *Ia* прийнято, що напружено-деформований стан фіброзалізобетонного елемента до утворення тріщин в його розтягнутій зоні, тобто коли фібробетон розтягнутої зони зберігає суцільність і працює під впливом навантаження квазіпружної деформації розтягнутої зони, не перевершує граничного значення. Зусилля в розтягнутій зоні в основному сприймаються фібробетонним шаром. При цьому роль розтягнутої робочої арматури несуттєва.

*Стадія Ib.* Зі збільшенням навантаження перетин елемента розтягнутої зони продовжує працювати пружно, нульова лінія лежить нижче центральної осі за згину балки. За подальшого збільшення навантаження відбувається таке: фібробетонний шар перетину працює пружно, але в крайніх волокнах розтягнутої зони починають розвиватися непружні деформації, які характеризують появу тріщини на поверхні елемента. Ця тріщина відразу не доходить до рівня робочої арматури (як це є в залізобетоні) і її виявлення неможливе. На цій стадії напружено-дефор-

мованого стану фіброзалізобетонного згинного елемента прийнято розраховувати момент тріщиноутворення, коли розтягнутий фібробетонний шар працює пружно з граничною деформацією крайнього волокна.

*Стадія II.* За подальшого збільшення навантаження в фібробетоні розтягнутої зони утворюються суміжні тріщини з незначними приростами як за висотою, так і за шириною. Якщо в залізобетонному елементі утворення тріщин означає вихід з роботи бетону розтягнутої зони, то в фіброзалізобетонному елементі такого виходу немає. Тут кожна мікротріщина заблокована фібрами, які не дають їй безперешкодно розвиватися. При цьому характерне утворення весь час нових суміжних тріщин і, відповідно, зменшення відстані між ними. У перетинах з тріщинами починають з'являтися помітні непружні деформації арматури, що свідчать про наближення напружень в арматурі до умовної границі плинності, тобто кінця стадії II. Ефект, що утримує розвиток тріщини після їх появи, в розрахунках названий як частка участі фібр в роботі фіброзалізобетонного згинального елемента під навантаженням. При цьому з підвищенням відсотка фібрового армування (починаючи з 1%) збільшується і частка участі фібр у роботі елемента, а саме, в роботі розтягнутої зони перетину. Епюра нормальних напружень в бетоні стиснутої зони, зі збільшенням навантаження завдяки розвитку непружних деформацій бетону, поступово викривляється. Максимальне напруження поступово переміщається з краю в глибину перетину, а нульова лінія піднімається вгору. Стадія II зберігається чимало часу і характерна для експлуатаційних навантажень ( $\approx 65\%$  від руйнуючих), оскільки під час експлуатації багатьох елементів допускається поява тріщин. Матриця скріплює фрезеровані фібри в єдиний моноліт і є середовищем, що передає навантаження на них, а в разі розриву окремих волокон перерозподіляє напруження. На стадії II розраховують розкриття тріщин і кривизну (жорсткість) елементів з урахуванням роботи фібробетонного шару.

*Стадія III* характеризується руйнуванням фіброзалізобетонного елемента. З вичерпанням несучої здатності фібробетонного шару напруження в арматурі досягають умовної границі плинності, а в бетоні – тимчасового опору осьовому стиску.

Досліди показують, що у фіброзалізобетоні згинальні елементи на відміну від залізобетонних під впливом зовнішнього навантаження мають дещо інший напружено-деформований стан. Річ в тому, що фіброве армування залізобетонних елементів істотно підвищує жорсткість, тріщиностійкість і міцність конструкції. Очевидно, що фіброві армування суттєво диференціюють дію тих чи інших чинників, за якими зазвичай оцінюють роботоздатність конструктивного елемента. На граничній стадії роботи фіброзалізобетонного елемента фібри все ще беруть участь у його роботі, відчуваючи зі зростанням навантаження все більше напруження. За досягнення фібрами граничних значень відбувається вихід з роботи всього елемента. Після чого деформації (напруження) швидко зростають. Водночас руйнування елемента може статися як за похилого, так і за нормального перерізу. Очевидно, що напруження в арматурі при цьому будуть більші умовної границі плинності. Проміжок між вичерпанням несучої здатності фібробетонного шару і до повного руйнування згинального елемента є порівняно невеликий через те, що фрезеровані фібри завдяки своїм унікальним властивостям (великій питомій поверхні зчеплення, нерівній поверхні) не висмикуються і з досягненням границі міцності тільки розриваються. Одночасно з виходом з роботи фібробетонного шару деформації в арматурі швидко зростатимуть, не відчуваючи при цьому стримувального ефекту, і зрештою розривається основна робоча арматура.

**Механізми руйнування фібробетонів.** Для оптимізації структури фібробетонів треба знати, за якими механізмами вичерпується їх міцність і довговічність. В цьому напрямку багатьма авторами виконані як аналітичні, так і експеримен-

тальні дослідження зі застосуванням різних руйнуючих методик, а також засобів фіксації кінетики руйнування навантажених мікрооб'ємів фібробетону та його складових. Детально проаналізована при цьому поверхня руйнування.

Суттєвим механізмом дії волокна в бетоні є “зшивання” тріщин, який у найкращому випадку повинен здійснюватися на всіх розглянутих рівнях (мікро-, мезо-, макро-).

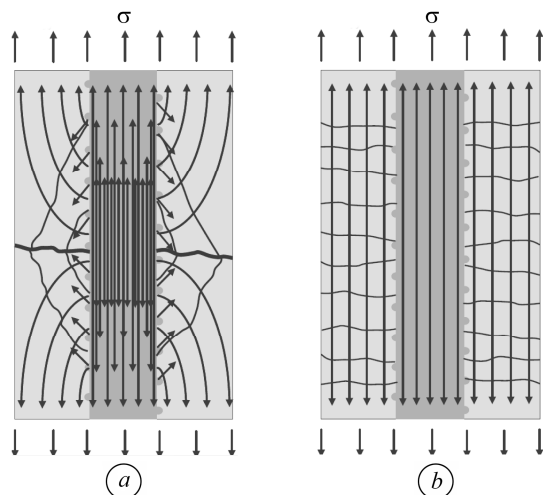


Рис. 2. Система тріщин і потік силових ліній у звичайному залізобетоні (а) і з квазіпластичною матрицею (б) [5].

Fig. 2. System of cracks and a flow of force lines in the ordinary reinforced concrete (a) and with the quasi-plastic matrix (b) [5].

На рис. 2 і 3 схематично подано [5] зображення тріщин в звичайному залізобетоні з крихкою (а) і з квазіпластичною матрицею (фібробетон) (б), а також відповідні потоки силових ліній. Внаслідок утворення великої

кількості дрібних рівномірно розподілених в квазіпластичній матриці тріщин сталеві арматура локально не перевантажується. Ці тріщини допомагають сталі нести навантаження на розтяг, при цьому деформації бетону і сталі здебільшого є сумісними (рис. 3).

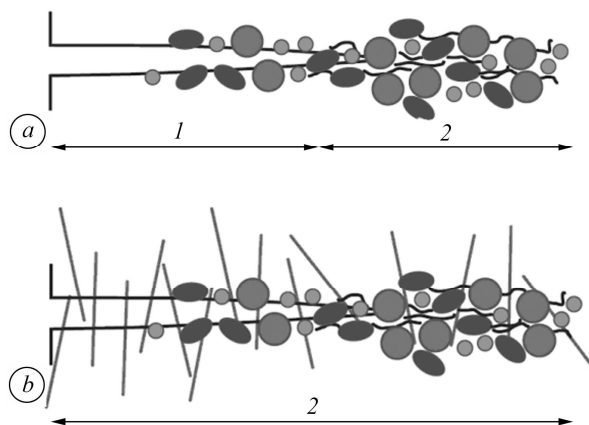


Рис. 3. Подання тріщини в неармованому (а) і фіброармованому бетоні (б): 1 – тріщина без напруження; 2 – тріщина, що передає напруження [5].

Fig. 3. Presentation of a crack in unreinforced (a) and fiber reinforced concrete (b): 1 – crack without stress; 2 – crack transmits stress [5].

Фіброармування за навантаження має збільшувати границю міцності (або пластичність бетону) як за розтягу, так і за стиску, підвищувати стійкість до тріщиноутворення і здатність до поглинання енергії. Рівномірно розподілене в матриці армування з міцних волокон стримує розкриття тріщин (рис. 3а) і за значних деформацій розтягу сприяє некрихкій деформації матеріалу, що супроводжується великою кількістю дуже тонких і, переважно, нешкідливих тріщин.

Здебільшого у бетон додають короткі волокна, які, залежно від технології виробництва і геометрії будівельного елемента [5], діють у всіх напрямках (неорієнтовані); спрямовані тільки в одній площині, наприклад як у фіброторкретбетоні, або розташовані в переважному напрямку, як у бетонних елементах, ви-



готовлених методом екструзії. Як альтернативу для визначених областей застосування можна використовувати суцільні довгі волокна, укладені в напрямку очікуваних розтягальних напружень, як наприклад, для бетону з текстильним армуванням. Залежно від розподілення і напрямку волокон можуть бути істотні відмінності в міцності і пластичності композиційних матеріалів.

У фібробетоні можна розрізнити два основних механізми дії фібри: протидія природу мікротріщин і протидія розширенню тріщин на мезо- і макрорівнях [5]. У твердіючому бетоні завжди виникають мікротріщини, які утворюються внаслідок ранніх вимушених напружень і власних напружень, наприклад, в результаті усадки бетону або відведення тепла під час гідратації цементу.

Здебільшого вони виникають у пористій зоні контакту цементний камінь–зерно заповнювача. Зі збільшенням навантаження починається ріст таких тріщин. За потрапляння основи тріщини на волокно подальше її поширення на деякий час припиняється, оскільки волокно сприймає розтягальні зусилля, які діють на основу тріщини, вона стабілізується.

Оскільки виникає безліч коротких дуже тонких невидимих мікротріщин, то для ефективного запобігання їх розвитку є велика кількість волокон з малим діаметром. Їх довжина при цьому має другорядне значення, оскільки на цій стадії розвитку тріщини не відбувається жодних відносних переміщень між волокнами і матрицею цементного каменю. Подальше зростання навантаження призводить до збільшення ширини і довжини мікротріщин і до їх зрощення у великі тріщини. При цьому волокна переміщуються відносно матриці цементного каменю, внаслідок чого сприймають розтягальні зусилля і передають їх через поверхні тріщини. Таким чином, поширення тріщини і її розкриття зупиняються.

Протидія волокон розкриттю тріщини може зникати через два принципово різних механізми (рис. 4) [5]: повний розрив волокон; висмикування волокон з матриці. Який з цих механізмів домінуватиме, залежить від міцності і геометрії волокон, а також від їх зчеплення з матрицею.

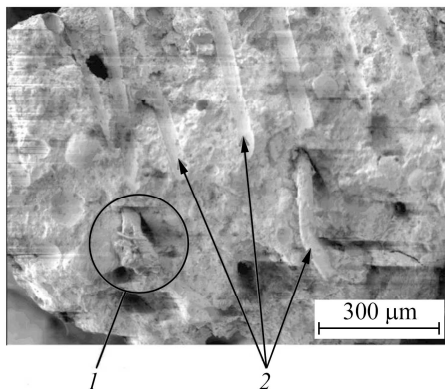


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Механізми відмови фібри у фібробетоні:  
1 – розрив фібри; 2 – висмикування фібри [5].

Fig. 4. Mechanisms of fibre refusal in fiber reinforced concrete:  
1 – fibrium rupture; 2 – fibre drawing out of the concrete [5].

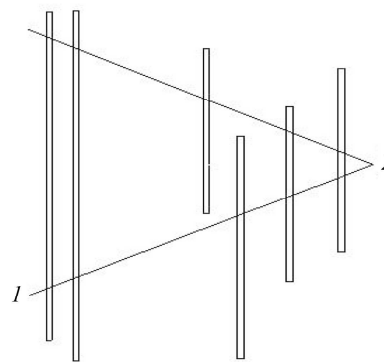


Рис. 5. Fig. 5.

Рис. 5. Схема поширення тріщини у фібробетоні [54]:  
1 – зона витягування волокна із матриці композита; 2 – вершина тріщини.

Fig. 5. The scheme of crack growth in fiber reinforced concrete [54]:  
1 – zone of fibre drawing out from the composite matrix; 2 – crack tip.

Очевидно, для ізотропних матеріалів критичне значення навантаження підвищується зі збільшенням пластичності. Однак це ж стосується і армованих композитів, для підвищення в'язкості яких рекомендовано використовувати матрицю і волокна з високими пластичністю і границею плинності. Разом з тим у композиційних матеріалах існують і інші механізми підвищення в'язкості руйнування, наприклад, створення величезної кількості поверхонь розділених волокон з матрицями, які є енергетичним бар'єром на шляху розповсюдження тріщин. Така дисипація енергії створює додаткову тривкість до руйнування границь поділу фаз поблизу верхин тріщини (зона точки 2 на рис. 5) і витягування волокон з матриці композита (зона точки 1 на рис. 5) [54].

Таким чином, в'язкість руйнування композита (фібробетону) залежить від вигляду та властивостей вихідних компонентів, а також від об'ємного співвідношення між ними, головню від насичення матриць армувальними волокнами, і зрештою визначається міцністю границь поділу фаз. При цьому, якщо довжина волокон більша за деяку критичну, то більшість з них в момент руйнування композита розривається, і тріщиностійкість його буде невисока. Тому основний вклад в опір руйнуванню композита вноситиме енергія, яка затрачається на витягування волокон з матриці.

У фіброзалізобетонних згинальних елементах тріщиноутворення триває аж до руйнування [54, 66, 67]. Якщо в залізобетонних елементах тріщини порівняно швидко досягають деякого граничного значення, мало подовжуючись після цього до початку руйнування, то в фіброзалізобетонних елементах розвиток тріщин як за висотою, так і за шириною розкриття відбувається дуже повільно. Пояснюється це тим, що в них присутній механізм гальмування розвитку тріщин. Після появи тріщин фібри не дадуть їм безперешкодно розвиватися, а сприятимуть появи нових тріщин (рис. 6). Таке тріщиноутворення спостерігаємо до руйнування фіброзалізобетонних згинальних елементів. Якщо балка закріплена на кінцях, то тріщини у фібробетоні з'являються з обох сторін балки за її триточкового згину (рис. 7).

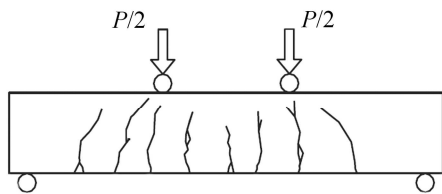


Рис. 6. Fig. 6.

Рис. 6. Схема тріщиноутворення у фібробетоні за чотириточкового згину балки [66].

Fig. 6. The scheme of cracks formation in fiber reinforced concrete under four-point bending of the beam [66].

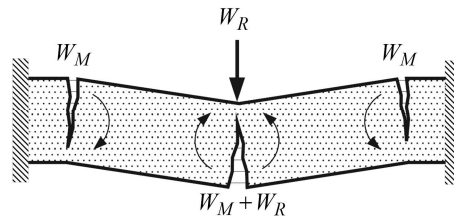


Рис. 7. Fig. 7.

Рис. 7. Схема механізму тріщиноутворення у фібробетоні за триточкового згину балки зі защемленими кінцями [67].

Fig. 7. The scheme of cracks formation mechanism in fiber reinforced concrete under the three-point bending of the beam with fixed ends [67].

Запропоновано [68] механізми (рис. 8) і моделі тріщиноутворення у фібробетонах на основі концепцій механіки руйнування. Вважають, що початкові мікротріщини у фібробетоні уже є, оскільки вони можуть утворюватись під час його виготовлення або за початкових незначних навантажень, які не враховуються під час оцінювання довговічності деталей об'єкта. Під мікротріщинами тут розумі-

ють дефекти типу тріщин, розміри яких за довжиною співмірні з віддальми між армувальними фібрами, а ширина їх розкриття  $\sim 0,005 \text{ mm}$ .

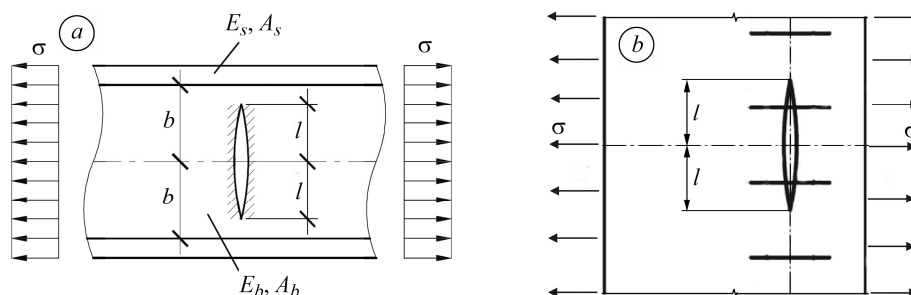


Рис. 8. Схеми послідовного утворення і поширення тріщини у фібробетонах [68]:  
 а – тріщина між фібрами; b – тріщина перетинає фібри.

Fig. 8. Schemes of successive formation and growth of the crack in fiber reinforced concrete [68]: a – crack between fibres; b – crack crosses fibres.

**Методи оцінки стану фібробетонів, їх міцності і довговічності.** Експлуатація відповідальних елементів будівельних конструкцій із фібробетонів вимагає створення надійних методів оцінки стану і розрахунку їх міцності і довговічності для уникнення непередбаченого руйнування і можливої катастрофи. Оцінювання стану фібробетонів потрібне не тільки після певного часу їх експлуатації, але відразу після виготовлення. Річ у тому, що на сьогодні не існує технологій для виготовлення фібробетонів, які би гарантували відсутність дефектів. Тому розробляють багато різних руйнівних і неруйнівних методів для дослідження структури і дефектності фібробетонів. При цьому перевагу надають неруйнівним методам [69–82]. Для фібробетонів зі сталевими волокнами найпоширенішими є магнетні методи [69–72]. В їх основу покладено експериментально встановлені залежності між магнетною проникливістю, густиною волокон, їх напрямком і розміщенням. Застосовано [74–76] індуктивний метод, в основу якого покладено залежності між індуктивністю та вмістом сталевих волокон і напрямком їх розміщення.

Розроблено [77–79] систему широкосмугового неруйнівного контролю різних фібробетонів, зокрема SFRC. Матеріал SFRC розглянуто як діелектричну суміш, утворену тонкопровідними металевими включеннями та середовищем носієм. Таку електромагнетну модель, яку засновано на підході Максфела–Гарнета, використовують для встановлення співвідношень між електромагнетними властивостями SFRC і густиною фібр. Запропоновано [80] підхід для визначення густини сталевих волокон і їх орієнтації за допомогою рентгенівської мікротомографії. Для встановлення стану фібробетонних плит запропоновано [81, 82] метод ультразвукової діагностики. На відміну від залізобетонів фібробетони можуть чинити значний опір стиранню. Особливо це важливо для покриття доріг. Розроблено [83] спеціальну установку для вимірювання поверхневої зносотривкості плит фібробетону.

Зазначені вище методи є ефективними під час визначення будови і стану фібробетонів, але ними важко скористатися, коли треба встановити кінетику розвитку пошкоджуваності навантаженого елемента будівельної конструкції. Для цього найефективнішим може бути метод акустичної емісії [84, 85]. З його допомогою можна за акустограмою [85] фіксувати кінетику наростання з часом об'ємної пошкоджуваності в елементі будівельної конструкції з фібробетону під навантаженням. Визначаючи за акустограмою швидкість наростання об'ємної пошкоджуваності і її критичне значення, можна зробити прогноз залишкового ресурсу досліджуваного елемента і запобігти аварії будівельної конструкції. Така

логічна схема застосування методу акустичної емісії для діагностування сповільненого руйнування фібробетонних елементів будівельних конструкцій є аналогічна тій, яку вже давно використовують в інженерній практиці металевих конструкцій і машинобудуванні [85].

Встановивши структуру розміщення волокон у фібробетоні, визначають міцність елемента будівельної конструкції і прогнозують його залишковий ресурс. Для цього відомо низка аналітичних і експериментально-математичних методів. Так, у працях [86–90] визначають міцність сталеві фібробетонних конструкцій на основі розрахункової схеми (моделі) за відповідних навантажень і впливу навколишнього середовища. Несучу здатність сталеві фібробетонних елементів визначають з огляду на такі передумови: для розрахункового перерізу вважають справедливою гіпотезу про лінійний розподіл деформацій вздовж його висоти; зв'язок між напруженнями та деформаціями сталеві фібробетону приймають у вигляді стандартної діаграми [90]. За критерій вичерпання несучої здатності фібробетонного перерізу приймають руйнування розтягнутого фібробетону за досягнення фібровими деформаціями граничних значень  $\epsilon_c$ . Розрахунок виконують за нелінійною деформаційною методикою, суть якої у тому, що враховується приріст не зусиль, а деформацій у перерізі. Опір сталеві фібробетону на стиск приймають рівним розрахунковому опору бетону матриці, а на розтяг – визначають залежно від класу бетону матриці за міцністю на стиск, форми і розмірів перерізу елемента, а також від типу використаної фібри.

Схема розрахунку сталеві фібробетонних елементів конструкцій за граничними станами подана в праці [91]. Він враховує такі граничні стани: повна непридатність для експлуатації через втрату несучої здатності та непридатність для нормальної експлуатації внаслідок утворення чи надмірного розкриття тріщин, прогинів, появи граничних значень деформацій  $\epsilon_c$  тощо. Аналогічну методику розрахунку фібробетонних елементів конструкцій, яку використовують у Німеччині, описано в праці [5]. Вона регламентована Німецьким комітетом залізобетонних конструкцій (DAfStb) [92]. При цьому розрізняють еквівалентну границю міцності для оцінки експлуатаційного стану (малі значення ширини тріщин) і для граничного навантаження (великі значення ширини тріщин). Відповідно до цього, в методиці класифіковано сталеві фібробетони на підставі залишкової міцності за розтягу і згину за двома класами: L1 – для малих деформацій (експлуатаційний стан); L2 – для значних деформацій (стан граничного навантаження).

У працях [53, 54, 68, 93–99] розрахунок міцності залізобетонів і в тому числі фібробетону виконано на основі концепцій механіки руйнування, де враховано не тільки тріщиностійкість бетону, але і сили зчеплення між матрицею і армувальними волокнами, які визначають експериментально за витягування армувального волокна із куба бетону [100–102].

Таким чином, тут коротко викладені основні концепції механіки деформування і руйнування фібробетонів, особливості їх будови, розрахунку міцності та довговічності, виготовлення і застосування.

### **ВИСНОВКИ**

Зроблено структурований огляд праць з проблем деформування і руйнування фібробетонів, їх виготовлення і оптимізації структури, діагностування їх стану і складу, визначення міцності і довговічності фібробетонних елементів конструкцій. При цьому подано коротку історичну довідку про виникнення і розвиток фібробетонних технологій в країнах світу.

На основі аналізу і синтезу результатів можна зробити такі висновки.

Підвищення міцності фібробетонів на стиск, розтяг за згину, осьовий розтяг залежить від збільшення діаметра й об'ємного вмісту фібри, причому це збільшує і жорсткість бетонної суміші, що негативно впливає на її легкоукладність.

Експериментально встановлено, що для металевих фібр оптимальний діаметр (з точки зору міцності фібробетону) може бути в межах 0,8...1,0 mm, а об'ємний вміст – 2...3% об'єму бетонної суміші.

Д. Ромуальді і Д. Менделем аналітично показано і експериментально підтверджено, що у волокнистих фібробетонах з довільною орієнтацією фібр в деформуванні ефективно беруть участь лише 41% волокон. Деякі вчені вважають, що міцність фібробетонів залежить від середньої віддалі між геометричними центрами волокон і не залежить від їх довжини. Очевидно, що зі зменшенням віддалі між волокнами міцність фібробетону суттєво збільшується, хоча їх об'ємний вміст у ньому може залишатися незмінним за використання тонших волокон, що дуже важливо і перспективно за застосування високоміцних волокон.

Для створення композиційного матеріалу з високим рівнем тріщиностійкості необхідно застосовувати волокна для армування з такими розмірами, за яких вони не розриваються, а витягуються з матриць під час зародження та розвитку тріщин, тобто біля вершин тріщин створюється фіброва зона передруйнування.

На розподіл і орієнтування волокон впливає розмір заповнювача. Оскільки у дрібнозернистому будівельному розчині всі частинки ще можуть вільно переміщатися між волокнами, то всі зерна заповнювача з розміром, що перевищує середню теоретичну відстань між волокнами, обов'язково призведуть до нерівномірності їх розподілу. Що більший розмір заповнювача, то вираженіший цей ефект, який негативно впливає як на характеристики свіжої бетонної суміші (наприклад, виникнення блокувань), так і затверділого бетону. Максимальний розмір зерна в основному не повинен перевищувати третину довжини волокна.

Деякі фібробетони мають відносно достатню тривкість проти довготривалого циклічного навантаження. В зв'язку з цим деякі автори досліджували втомну міцність фібробетонів, які використовують в елементах конструкцій під дією змінного навантаження. При цьому встановлено, що додавання волокон не збільшує границю витривалості в багатоцикловій області, але вигідно перевищує її в малоцикловій.

*РЕЗЮМЕ.* Сделан анализ и синтез результатов исследований деформирования и разрушения фибробетонов. Приведенный обзор работ по данным вопросам структурирован так: развитие и применение фибробетонных технологий, основные параметры строения фибробетонов и особенности их деформирования и разрушения, методы оценки прочности и долговечности.

*SUMMARY.* The deformation and fracture of fiber concrete analyzed and synthesized. The review of studies on this problem is structured according to the following sections: development and application of fiber concrete technologies, basic parameters of structure of fiber concrete and their features, deformation and fracture of fiber concrete, mechanisms of fiber concrete fracture, methods for assessing the state of fiber concrete: their strength and durability.

1. Божидарнік В. В., Андрейків О. Є., Сулим Г. Т. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів: у 2-х т. – Т. 1: Основи механіки руйнування неперервно армованих композитів. – Луцьк: Надстир'я, 2007. – 400 с.
2. Божидарнік В. В., Андрейків О. Є., Сулим Г. Т. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів: у 2-х т. – Т. 2: Математичні методи механіки руйнування неперервно армованих композитів. – Луцьк: Надстир'я, 2007. – 424 с.
3. Железобетон в XXI веке: Состояние и перспективы развития бетона и железобетона в России. – М.: Готика, 2001. – С. 216–223.
4. Баженов Ю. М., Фаликман В. Р. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: Материалы I Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона (9–14 сентября 2001 г.). – М.: Ассоциация “Железобетон”, 2001. – Т. 1. – С. 91–101.
5. Мещерин В. Предупреждение трещинообразования в бетоне с помощью фиброармирования // Бетон и железобетон. – 2012. – № 1 (6). – С. 50–57.

6. *Фибробетон в Японии*. Экспресс-информация. Строительные конструкции. – М.: ВНИИИС Госстроя СССР, 1983. – 26 с.
7. *ВСН 56-97 “Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций”*. – М., 1997. – 178 с.
8. *Сталефибробетон и конструкции из него*. Сер. “Строительные материалы”. – М.: ВНИИТПИ, 1990. – Вып. 7.
9. *Стеклофибробетон и конструкции из него*. Сер. “Строительные материалы”. – М.: ВНИИТПИ, 1990. – Вып. 5.
10. *Хун Д. Л.* Свойства бетонов, содержащих микрокремнезем и углеродное волокно, обработанное силанами // Экспресс-информация. – 2001. – Вып. 1. – С. 33–37.
11. *Ulra-Hochfester Beton*. Perspective für die Betonfertigteileindustrie // Beton und Fertigteiletechnik. – 2003. – № 1. – P. 16–19.
12. *ACI 440.1R-2006*. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. – American Concrete Institute, 2006. – 440 p.
13. *Сычева Л. И., Воловика А. В.* Материалы, армированные волокном / Пер. изд.: Fiberglass-reinforced materials. – М.: Стройиздат, 1982. – 180 с.
14. *Selvadurai A.P.S.* The opening of an elastically bridges penny shaped flaw in a fibre reinforced composite by concentrated surfase loads // Wiss. Z. – 1982. – № 2. – P. 187–190.
15. *Schmidt M.* 50 Jahre Entwicklung bei Zement, Zusatzmittel und Beton. Schriftenreihe Baustoffe // I M. Schmidt Centrum Baaustoffe und Material-prufund. – 2003. – № 2. – P. 189–198.
16. *Kyrlov B. A. and Trambovetsky V. P.* Investigation of Fibre- Reinforced Materials in the USSR // II Paper 8.5, RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Cement and Concrete. – London: Ed. A. M. Neville, 1975. – P. 419–424.
17. *Рабинович Ф. Н.* Дисперсно-армированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.
18. *Довженко О. О., Юрко І. А., Кравченко В. В.* Застосування фібробетону в Україні. Властивості дисперсно-армованих бетонів // Коммунальное хозяйство городов. – 2009. – № 90. – С. 267–272.
19. *Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М.* Дисперсно-армований бетон – надійний та ефективний матеріал для транспортного будівництва (продовження) // Транспортное строительство Украины. – 2007. – № 5. – С. 16–20.
20. *Рабинович Ф. Н.* Применение фиброармированных бетонов в конструкциях промзданий // Фибробетон и его применение в строительстве: Труды НИИЖБ. – М., 1979. – С. 27–38.
21. *Рабинович Ф. Н.* Некоторые вопросы дисперсного армирования бетонных материалов стекловолокном // Дисперсно-армированные бетоны и конструкции из них: Тезисы докл. Республ. совещан. – Рига, 1975. – С. 68–72.
22. *Рабинович Ф. Н., Курбатов Л. Г.* Применение сталефибробетона в конструкциях инженерных сооружений // Бетон и железобетон. – 1984. – № 12. – С. 22–25.
23. *Kordts S.* Selbstverdichtender Beton // Forschungskolloquium des DafStb. – Düsseldorf, 2002. – S. 109–120.
24. *Kleingelhofer P.* Neue Betoueverflissiger auf Basis Polycarboxylat // II Proc. 13., Ybasil. Weimar. – 1997. – Bd. 1. – P. 491–495.
25. *Magumdar A.* Glass fiber reinforced cement. – London, 1991. – 356 с.
26. *Kar J. N. and Pal A. K.* Strength of fibre-reinforced concrete // Proc. ASCE: J. Structural Division. – 1972. – **98**, № 5. – P. 1053–1068.
27. *She Xiaokang, Xue Yadong.* Summary of Behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete // Int. Conf. on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE 2011) (22–24 April 2011). – Lushan, 2011 – P. 800–803.
28. *Prasath P. and Silambarasan D.* An Experimental Investigation On Flexural Behaviour Of Stainless Steel Fiber Reinforced Concrete Beam Elements // Int. Conf. on Current Trends in Engineering and Technology (3 July 2013). – Coimbatore: IEEE, 2013. – P. 146–152.
29. *Song P. S. and Hwang S.* Mechanical properties of high-strength steel fibre-reinforced concrete // Construction and Building Materials. – 2004. – **18**, № 9. – P. 669–673.
30. *The prediction of bending strengths in SFRSCC using Computational Fluid Dynamics (CFD) / A. Orbe, R. Losada, E. Rojí, J. Cuadrado, A. Maturana // Construction and Building Materials. – 2014. – **66**. – P. 587–596.*

31. *Seong-Cheol Lee, Joung-Hwan Oh, and Jae-Yeol Cho.* Compressive Behavior of Fiber-Reinforced Concrete with End-Hooked Steel Fibers // *Materials (Basel)*. – 2015. – № 8 (4). – P. 1442–1458.
32. *Mohammad Ghasemi, Mohammad Reza Ghasemi, Seyed Roohollah Mousavi.* Investigating the effects of maximum aggregate size on self-compacting steel fiber reinforced concrete fracture parameters // *Construction and Building Materials*. – 2017. – **162**. – P. 674–682.
33. *Srinivasan Karunanithi.* Experimental Studies on Punching Shear and Impact Resistance of Steel Fibre Reinforced Slag Based Geopolymer Concrete // *Advances in Civil Engineering*. – 2017. – P. 1–9.
34. *Atis C. D. and Karahan O.* Properties of steel fibre reinforced fly ash concrete // *Construction and Building Materials*. – 2009. – **23**, № 1. – P. 392–399.
35. *Ramadoss P.* Combined effect of silica fume and steel fiber on the splitting tensile strength of high-strength concrete // *Int. J. of Civil Engng.* – 2014. – **12**, № 1. – P. 96–103.
36. *Nili Mahmoud and Afroughsabet V.* Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete // *Int. J. of Impact Engineering*. – 2010. – **37**, № 8. – P. 879–886.
37. *Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete / R. V. Balendran, F. P. Zhou, A. Nadeem, A. Y. T. Leung // Build Environ.* – 2002. – **37**, № 12. – P. 1361–1367.
38. *Gao Jianhua.* On the application of polypropylene fiber reinforced concrete in the bridge deck Maintenance // *Int. Conf. on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*. – Zhangjiajie, Hunan China, 2012. – P. 460–464.
39. *Zhang Ming.* Double-K Fracture Analysis on Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beams with Standard Three-point Bending // *Int. Conf. on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE 2011) (22–24 April 2011)*. – Lushan: IEEE, 2011. – P. 242–245.
40. *Simultaneous effects of fiber and glass on the mechanical properties of self-compacting concrete / Hamoon Fathi, Tina Lameie, Mehdi Maleki, Rshwan Yazdani // Construction and Building Materials.* – 2016. – **133**. – P. 443–449.
41. *Wang Jun and Zhang Ye.* Experimental Research on Mechanical and Working Properties of Non-dipping Chopped Basalt Fiber Reinforced Concrete // *IEEE 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*. – 2010. – **4**. – P. 635–637.
42. *Weimin Song and Jian Yin.* Hybrid Effect Evaluation of Steel Fiber and Carbon Fiber on the Performance of the Fiber Reinforced Concrete // *Materials (Basel)*. – 2016. – № 9 (8). – P. 704.
43. *Прочность и деформативность изгибаемых элементов из тяжелого бетона, армированных стеклопластиковой и стальной арматурой / X. Мерват, Д. Р. Маилян, П. П. Польской, А. М. Блягоз // Новые технологии.* – 2012. – № 4. – С. 147–152.
44. *Yiping Liu, Liqun Tang, and Xiaoqing Huang.* Damage Behavior of Steel Fiber Reinforced and Polymer Modified Concrete under Impact Loading // *Key Engineering Materials*. – 2007. – P. 543–548.
45. *Pantazopoulou S. J. and Zanganeh M.* Triaxial tests of fibre-reinforced concrete // *J. of Mater. Civil Engng.* – 2001. – **13**, № 5. – P. 340–348.
46. *Ahmed Tareq, Noamana B. H., and Abu Bakara Hazizan Md. Akil.* The Effect of Combination between Crumb Rubber and Steel Fiber on Impact Energy of Concrete Beams // *Procedia Engng.* – 2015. – **125**. – P. 825–831.
47. *Paulo B., Joaquim A., and Paulo A. A.* Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression // *Cemconcomp Cement & Concrete Composites*. – 2002. – **24**. – P. 211–217.
48. *Yin W. and Hsu T. C.* Fatigue behaviour of steel fibre reinforced concrete in uniaxial and biaxial compression // *ACI Materials J.* – 1995. – **92**. – P. 71–81.
49. *Experimental Study on Steel Fiber Reinforced Concrete Columns under Low Cyclic / Rong Xu, Yanru Zha, Jianwen Bai, Minghai Bai // Second Int. Conf. on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE 2012) (15–17 July)*. – Inner Mongolia: IEEE, 2011. – P. 3144–3147.
50. *Paulo B. Cachim, Joaquim A. Figueiras, and Paulo A. A. Pereira* Fatigue model for steel fiber-reinforced concrete // *ICCM-12*. – 1999. – P. 756–765.
51. *Karthik S., Kalaivani M., and Easwaran P.* Fatigue behaviour of steel fibre reinforced concrete – a review // *Int. Research J. of Engng and Technol.* – 2016. – **3**, № 4. – P. 2064–2068.

52. Пухаренко Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: Дис. д-ра техн. наук. – СПб, 2005. – 315 с.
53. Розрахункова модель фібробетону на міцність за розтягу / В. П. Силованюк, Р. Я. Юхим, А. Є. Лісничук, Н. А. Івантишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 3. – С. 39–45.  
(Computational model of the tensile strength of fiber-reinforced concrete / V. P. Sylovanjuk, R. Ya. Yukhym, A. E. Lisnichuk, N. A. Ivantyshyn // Materials Science. – 2015. – **51**, № 3. – P. 340–347.)
54. Пантелеєв Д. А. Полиармированные фибробетоны с использованием аморфно металлической фибры: Дис. канд. техн. наук. – СПб, 2016. – 156 с.
55. Андреев І. А. Процес віброекструзії фібробетону. – К.: НТУУ “Київський політехнічний ін-т”, 2016. – 194 с.
56. Андреев І. А., Царенко О. І. Віброударна екструзія фібробетону // Хімічна промисловість України. – 2001. – № 2. – С. 46–48.
57. Андреев І. А., Валуйскова С. С. Фібробетон. Удосконалення процесу отримання тонкого шару цементно-піщаного розчину під час віброекструзії // Хімічна промисловість України. – 2012. – № 4 (111). – С. 27–29.
58. Андреев І. А., Довжик М. Т. Орієнтування дисперсної арматури під час плинину фібробетонної суміші в каналах бункера віброекструдера // Вісник НТУУ “Київський політехнічний інститут”. Сер. “Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. – 2009. – № 1 (3). – С. 29–32.
59. Андреев І. А., Фурманська В. В. Ефективність дисперсного армування при віброекструзії фібробетону // Вісник НТУУ “Київський політехнічний інститут”. Сер. “Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. – 2008. – № 1. – С. 19–22.
60. Андреев І. А., Полторацька Н. В. Віброекструзія фібробетонних виробів з поперечним орієнтуванням дисперсної арматури // Керамика: наука и жизнь. – 2010. – № 4 (10). – С. 56–63.
61. Андреев І. А., Комкіна Н. В. Орієнтування дисперсної арматури при віброекструзії фібробетону у круглому кільцевому каналі // Керамика: наука и жизнь. – 2011. – № 3 (13). – С. 43–49.
62. Воронін Л. Г., Андреев І. А., Комкіна Н. В. Фібробетонні труби. Процес віброекструзійного формування // Хімічна промисловість України. – 2011. – № 6 (107). – С. 38–40.
63. Опбул Э. К., Седип С. С. Прочность и трещиностойкость изгибаемых элементов из дисперсно-армированного железобетона с высокопрочной арматурой без предварительного напряжения // Вестник Тувинского гос. ун-та. Технические и физико-математические науки. – 2014. – № 3. – С. 43–54.
64. Куликов А. Н. Экспериментально-теоретические исследования свойств фибробетона при безградиентном напряженном состоянии в кратковременных испытаниях: Автореф. канд. техн. наук. – Ленинград, 1974. – 26 с.
65. Хозин В. Г., Гиздатуллин А. Р., Куклин А. Н. Особенности деформирования и разрушения бетонных балок, армированных композитной арматурой различных диаметров // Механика разрушения строительных материалов и конструкций. – 2014. – С. 354–361.
66. Ильин Д. А. Композитная арматура на основе стеклянных и углеродных волокон для бетонных конструкций: Дис. канд. техн. наук. – М., 2017. – 141 с.
67. Westerberg Bo. Some Quistions Concerning the design of Steel Fibre Concrete Slabs on Ground // Workshop proceeding from a nordic miniseminar. – Stockholm, 2001. – P. 11–22.
68. Морозов В. И., Пухаренко Ю. В., Хегай А. О. Моделирование микротрещинообразования фибробетона методами механики разрушения // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2011. – **7**, № 3. – С. 125–13.
69. Framework for the design and analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete structures / A. Orbe, J. Cuadrado, R. Losada, E. Rojí // Construction and Building Materials. – 2012. – **35**. – P. 676–686.
70. Calibration patterns for predicting residual strengths of steel fibre reinforced concrete (SFRC) / A. Orbe, J. Cuadrado, R. Losada, E. Rojí // Composites Part B: Engineering. – 2014. – **58**. – P. 408–417.



71. *An Improved Method for Steel Fiber Reinforced Concrete Analysis* / M. Faifer, R. Ottoboni, S. Toscani and L. Ferrara // *Int. Instrumentation and Measurement Technology Conf. Proceedings* (12–16 May 2012). – Graz: IEEE, 2012. – P. 1896–1901.
72. *Marco Faifer, Roberto Ottoboni. Nondestructive Testing of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Using a Magnetic Approach* // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2011. – **60**, № 5. – P. 1709–1717.
73. *Influence of Fiber Properties on the Inductive Method for the Steel-Fiber-Reinforced Concrete Characterization* / Pablo Juan-García, Josep M. Torrents, Rubén D. López-Carreño, Sergio H. Pialarissi Cavalaro // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2016. – **65**, № 8. – P. 1937–1944.
74. *Jurij Karlovšek, Norman Wagner, Alexandar Scheuermann. Frequency-dependant dielectric parameters of Steel Fiber Reinforced Concrete* // *14<sup>th</sup> Int. Conf. on Ground Penetrating Radar (GPR)* (4–8 June 2012). – Shanghai: IEEE, 2012. – P. 510–516.
75. *Inductive method for assessing the amount and orientation of Steel Fibers in Concrete* / J. M. Torrents, A. Blanco, P. Pujadas, A. Aguado, P. J. García, M. A. Sánchez // *Materials and Structures*. – 2012. – **45**. – P. 1577–1592.
76. *UHF Antenna Design for the Estimation of Fiber Density of Steel Fiber Reinforced Concrete* / Marta Sanchez, Ivan Peña, Amaia Arrinda, David de la Vega, David Guerra, Unai Gil // *9<sup>th</sup> Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP)* (13–17 April 2015). – Lisbon: IEEE, 2015. – P. 1–4.
77. *Broadband Propagative Microwave Imaging of Steel Fiber Reinforced Concrete Wall Structures* / Gemma Roqueta, Lluís Jofre, Jordi Romeu, Sebastián Blanch // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2010. – **59**, № 12. – P. 3102–3110.
78. *Roqueta G., Romeu J., and Jofre L. Time Domain Reflection Technique for Microwave Non Destructive Testing of Steel Fiber Reinforced Concrete* // *IEEE Proceedings of the Fourth Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP)*. – Barcelona, 2010. – P. 1–5.
79. *Faifer M., Ottoboni R., and Toscani S. A Compensated Magnetic Probe for Steel Fiber Reinforced Concrete Monitoring* // *IEEE*. – Kona: SENSORS, 2010. – P. 698–703.
80. *Multiscale Shannon's Entropy Modelling of Orientation and Distance in Steel Fiber Micro-Tomography Data* / John P. Chiverton, Olubisi Ige, Stephanie J. Barnett, Tony Parry // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2017. – **26**, № 11. – C. 5284–5297.
81. *Štoller Jiří and Dvořák Petr. Field tests of high performance fiber reinforced concrete slabs: Impact of contact and distant explosions* // *Int. Conf on Military Technologies (ICMT)* (19–21 May 2015). – Brno: IEEE, 2015. – P. 1–5.
82. *Пухаренко Ю. В., Голубев В. Ю., Хегай А. О. Об оценке трещиностойкости сталефибробетона ультразвуковым методом* // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2009. – № 9. – С. 50–51.
83. *Özgül Eren, Khaled Marar, and Tahir Çelik. Effects of Silica Fume and Steel Fibers on Some Mechanical Properties of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete* // *J. of Testing and Evaluation*. – 1999. – **27**, № 6. – P. 380–387.
84. *Андрейків А. Е., Лисак Н. В. Методи акустическої емісії в дослідженні процесів руйнування*. – К.: Наук. думка, 1989. – 176 с.
85. *Скальський В. Р., Андрейків О. Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії*. – Львів: Вид. центр ЛНУ ім. І. Франка, 2006. – 330 с.
86. *Сунак О. П., Сунак П. О. Оцінювання надійності сталефібробетонних елементів*. – Луцьк: ЛДТУ, 2001. – 142 с.
87. *Бабич С. М., Дробишинець С. Я. Робота і розрахунок згинальних сталефібробетонних елементів*. – Луцьк: ЛНТУ, 2012. – 194 с.
88. *Андрійчук О. В., Бабич С. М. Сталефібробетонні безнапірні труби*. – Луцьк: ЛНТУ, 2012. – 150 с.
89. *Розрахунок сталефібробетонних згинальних елементів за міцністю нормальних перерізів* / С. О. Ужegov, О. А. Ужегова, Р. В. Пасічник, О. В. Андрійчук, С. А. Дробишинець // *Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві*. – 2015. – № 3. – С. 179–184.
90. *ДСТУ-Н Б В.2.6-XX: 20XX. Конструкції будинків і споруд. Дисперсноармовані залізобетонні конструкції. Наставова з проектування та виконання робіт*. – К.: Мін-во регіонального розвитку та будівництва України, 2011. – 49 с.

91. Андрійчук О. В., Гречко О. Г. Основні аспекти розрахунку та проектування сталевібро-бетонних конструкцій // Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві. – 2015. – № 3. – С. 3–10.
92. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) / Richtlinie Stahlfaserbeton. – Entwurfstand, 2008. – Р. 21.
93. Андрейків О. Є., Лучко Й. Й., Гембара Т. В. Метод визначення коефіцієнта інтенсивності напружень в залізобетонних елементах з тріщинами при згині // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1992. – № 3. – С. 104–110.  
(Ahdreikiv O. E., Luchko I. I., and Gembara T. V. Method of determining bending stress intensity coefficients for cracked ferroconcrete components // Soviet Materials Science. – 1992. – 28, № 3. – Р. 299–304.)
94. Андрейків О. Є., Лучко Й. Й., Гембара Т. В. Розрахунок залізобетонних балочних елементів методами механіки руйнування. – Львів: ФМІ, 1993. – 56 с.
95. Прогнозування міцності фібробетону за стиску / В. П. Силованюк, А. Є. Ліснічук, Р. Я. Юхим, Н. А. Івантишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 52, № 3. – С. 35–41.  
(Prediction of the strength of fibrous concrete in compression / V. P. Sylovanyuk, A. E. Lisnichuk, R. Ya. Yukhym, N. A. Ivantyshyn // Materials Science. – 2016. – 52, №3. – Р. 330–338.)
96. Marukha V. I., Panasyuk V. V., and Solovanyuk V. P. Injection Technologies for Repair of Damaged Concrete. – Netherlands: Springer, 2014. – 230 p.
97. Прогнозування тріщиностійкості цементного каменю та фібробетону / В. П. Силованюк, Р. Я. Юхим, Н. А. Івантишин, А. Є. Ліснічук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – 51, № 4. – С. 120–124.  
(Prediction of the crack resistance of cement stone and fibrous concrete / V. P. Sylovanyuk, R. Ya. Yukhym, N. A. Ivantyshyn, A. E. Lisnichuk // Materials Science. – 2016. – 51, № 4. – Р. 570–575.)
98. Солодкий С. Й., Турба Ю. В. Експериментально-статичне моделювання тріщиностійкості бетонів, армованих поліпропіленовою фіброю // Міжвуз. зб. “Наукові нотатки”. – 2014. – № 46. – С. 512–515.
99. Юрьев А. Г., Панченко Л. А., Серых И. Р. Новые подходы к формированию строительных конструкций на основе углеродных наносистем // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 19–20.
100. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном / В. Г. Хозин, А. А. Пискунов, А. Р. Гиздатуллин, А. Н. Куклин // Известия КГАСУ. – 2013. – № 1 (23). – С. 214–220.
101. Бенин А. В., Семенов С. Г. Экспериментальные исследования сцепления композитной арматуры с плоской навивкой бетоном // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 9. – С. 74–76.
102. Моделирование процесса выдергивания стеклопластиковой арматуры из бетонного блока / А. В. Коковцева, А. С. Семенов, С. Г. Семенов, А. В. Бенин // Сб. тр. конф. с междунар. участием “XIII неделя науки СПбГПУ”. – Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2013. – С. 182–184.

Одержано 22.01.2018