

О.В. Хоменчук, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

Нова концепція фібронабризкбетону для геотехнічного застосування

Підвищення механічних властивостей фібронабризкбетону шляхом вибору правильного матеріалу, діаметру та довжини фібр, дозволяє застосовувати цей матеріал як кріплення гірничих виробок або вибухостійке покриття різних конструкцій. Прогнозування міцності композиту на розтягування в залежності від розмірів фібр є важливим для вибору правильних діаметру та довжини гладких фібр круглого перерізу та характеризується різними механізмами руйнування та зчепленням фібр з матрицею.

У роботі запропоновано використовувати питому площу поверхні фібр для розрахунку межі міцності фібронабризкбетону на розтягнення та наведено формули для їхнього розрахунку. При чисельному моделюванні застосовані експериментальні данні, отримані при висмикуванні фібр з матриці іншими авторами, та побудовані аналітичні залежності межі міцності на розтягнення від діаметру і довжини гладких фібр. Це дозволило встановити діапазон діаметрів при яких гладкі фібри не висмикуються, а розриваються, і, таким чином, віддають максимальну частину своєї міцності композиту при інших рівних умовах. Окрім цього, був визначений ряд довжин при яких фібри заданого діаметру також не висмикуються з бетону що сам ущільнюється і який має визначену міцність.

Визначено умови при яких армування набризкбетону гладкими фібрами може бути таким же ефективним як і армування гачкуватими фібрами.

У висновках виконано аналіз інших шляхів підвищення межі міцності на розтягнення фібронабризкбетону, і запропоновано інший спосіб уведення фібр у цементну матрицю, для досягнення максимального ефекту армування. Окрім того, названі питання, які необхідно додатково вирішити для отримання найбільш достовірної математичної моделі міцності фібронабризкбетону на розтягування, а також для здійснення запропонованого методу армування.

Ключові слова: набризкбетон; питома площа поверхні; орієнтовані фібри; висмикування; межа міцності на розтягування.

Постановка проблеми. Ідея армування крихких будівельних матеріалів фібрами з'явилася ще в античні часи, коли люди почали додавати соломі у цеглу. Сучасна технологія фібронабризкбетону (ФНБ) використовується з 1970-х років і добре зарекомендувала себе при вирішенні широкого спектру геотехнічних задач таких як: возведення обделок тунелів і кріплення підземних гірничих виробок, ремонт і посилення будівельних конструкцій, створення вибухостійких покриттів, забезпечення стійкості бортів кар'єрів, а також відкосів у дорожньому будівництві. Відносно висока межа міцності на згин і добра стійкість до розтріскування дають можливість розширити сферу застосування ФНБ до складних гірничо-геологічних умов, зменшити товщину шару і, таким чином, зменшити витрату матеріалів. Проте, не дивлячись на наведені переваги і високі експлуатаційні характеристики цього матеріалу, його максимальний потенціал досі не розкрито.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ще у 1968 році Райлі та Реддудей стверджували, що переривчасті фібри можуть додати до міцності цементного композиту не більше 6/7 своєї міцності. Для фібр з великим числом тріщин це співвідношення зменшується до 1/2 [1].

У 1974 Уоллер [2] досліджував безперервні карбонові фібри у цементній пасті, і виявив лінійний зріст модуль міцності на згин та розтягування в залежності від об'ємного вмісту. Модуль міцності композиту на розтягування сягала 300 МПа.

З тих пір не припиняється вдосконалення ФНБ, застосовуючи різні фібри і модифікації цементної матриці [3]. Чимало дослідників використовували як сталеві, так і поліпропіленові [4], полівінілхлоридні, поліетиленові, кевларові, азбестові, скловолокнові, метгласові, корундові, рослинні фібри і навіть карбонові нанотрубки [5].

Фольман та інші [6] пропонують використовувати ФНБ з високим вмістом сталевих фібр в якості вибухостійкої обделки тунелів.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є виявлення потенційних шляхів вдосконалення кінцевих характеристик ФНБ методом аналізу.

Викладення основного матеріалу. У порівнянні з сучасними шаруватими композитами, в яких фібри передають більшість своєї міцності матриці, в ФНБ фібри розподіляються хаотично у цементному камені,

що сприяє рівномірному підвищенню стійкості до розтріскування та ударної в'язкості у трьох вимірах. Проте, основну роль арматури, яка реагує на розтягнення та згинання, також грає сітка.

Для вдосконалення існуючої технології ФНБ вирішальним є прогнозування поведінки матеріалу внаслідок зміни умов армування. Головним загальноприйнятим критерієм є межа міцності на розтягування σ_p . Беручи за основу модель розподілу напружень навколо фібри запропоновану Аутватером [7], цей показник для цементних матриць, що армовані гладкими фібрами, може бути розраховано наступним чином:

$$\sigma_p = \Phi_j \cdot \frac{\tau A_f}{2} + \sigma_m \cdot V_m; \quad (1)$$

де Φ_j – коефіцієнт армування, який враховує довжину та орієнтування фібр у просторі, наявність дефектів і взаємодію фібр між собою;

τ – міцність контактної зони на зсув;

A_f – питома площа поверхні фібр у перерізі, що сприймає напруження зсуву;

σ_m і V_m – відповідно межа міцності та об'ємний вміст матриці.

Припускаючи, що товщина шару дорівнює довжині фібри і знехтуючи торцевими поверхнями фібри, питома поверхня фібр може бути розрахована наступним чином:

$$A_f = 4 \cdot V_f \cdot \frac{l}{d}; \quad (2)$$

де V_f – об'ємний вміст фібр;

l і d – відповідно довжина і діаметр фібр.

З урахуванням (2) рівняння (1) прийме наступний вигляд:

$$\sigma_p = 2 \cdot \Phi_j \cdot \tau \cdot \frac{l}{d} \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m; \quad (3)$$

Згідно експериментальних випробувань на висмикування гладких фібр, що проводилися у дослідженні Хольшемахера і Клюга [8], максимальна сила, що висмикує одну фібру діаметром 1,0 мм яка забита на глибину 25 мм у бетон що сам ущільнюється, склала 138,9 Н. Наведені параметри відповідають міцності контактної зони на зсув рівної 1,78 МПа. Використовуючи ці результати, і роблячи припущення, що міцність на зсув постійна, були отримані характеристики міцності при розтягуванні композиту в залежності від діаметру та довжини фібр, що представлені на рисунку 1.

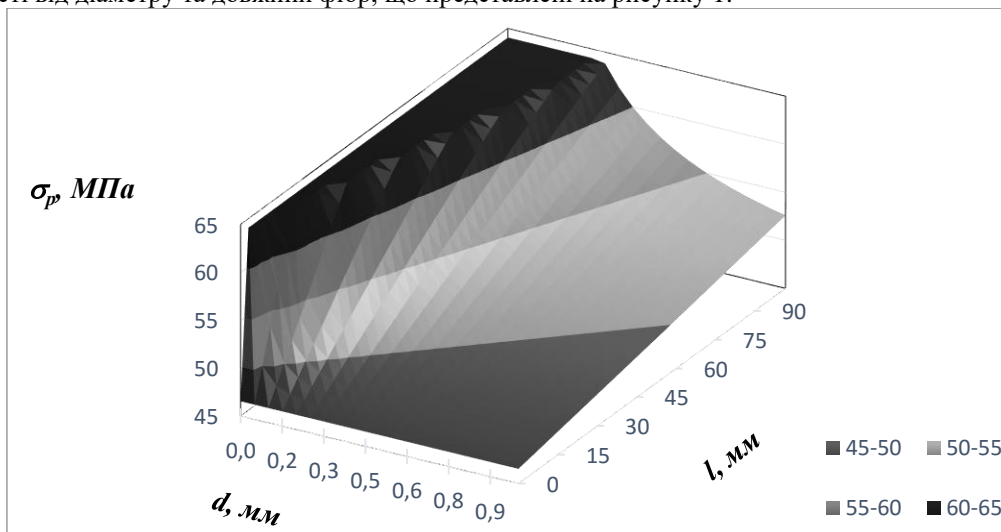


Рис. 1. Прогнозована межа міцності армованого фібрами бетону що сам ущільнюється

Для розрахунку використовувались аналогічні значення міцності на розтягування для бетону, що сам ущільнюється, і для фібр відповідно - 49 МПа і 1050 МПа, а також об'ємний вміст фібр $V_f = 0,05$ та коефіцієнт армування $\Phi_j = 0,33$.

Для врахування обох механізмів роботи композита – без та з висмикуванням фібр, розрахунок виконувався згідно алгоритму наведеного на рисунку 2.

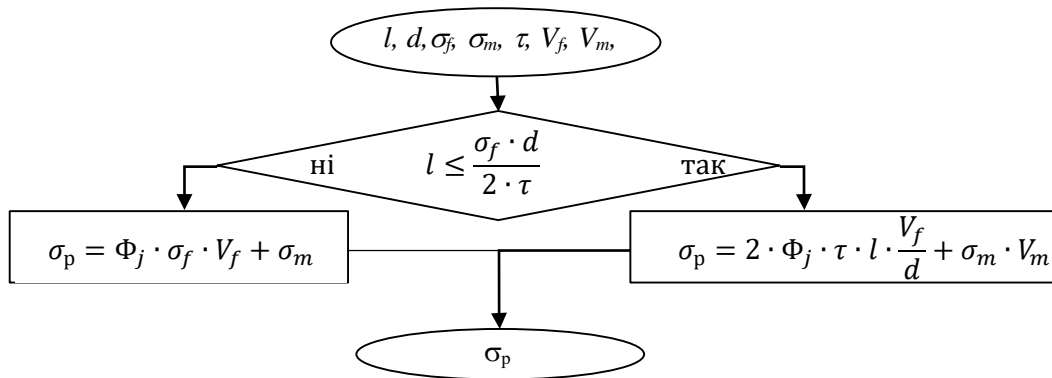


Рис. 2. Блок-схема для розрахунку міцності композиту на розтягування

Як може бути видно з рисунку 1, висмикування фібр в досить вузькому діапазоні діаметрів від 0,005 до 0,25 мм припиняється, коли довжина фібр перевищує критичне значення. Інтересний також факт полягає в тому що висмикування фібр спостерігається у всьому діапазоні діаметрів фібр довжиною до 12 мм.

Таким чином, зростання питомої площі поверхні фібр веде до зростання тертя, і, як наслідок, міцності на розтягання та ударної в'язкості.

Рисунок 3 показує як міцність ФНБ на розтягання змінюється в залежності від діаметру гладких фібр з найбільш придатною для набризкування довжиною, яка обмежується діаметром сопла рівним 50 ... 60 мм. Для запобігання утворення пробок у матеріальному трубопроводі, відповідна максимальна довжина фібр не може перевищувати 60 % діаметра сопла і може коливатися від 30 до 40 мм.

У відповідності з рисунком 3, максимальний ефект армування може бути досягнуто при використанні фібр діаметром менше 0,1 мм, коли механізм руйнування композиту змінюється з висмикування фібр на їх розрив. Проте, такий діаметр фібр не завжди може бути реалізовано у промисловому масштабі. Окрім цього, необхідно брати до уваги, що міцність на зсув може змінюватися через пористість, яка звичайно вище у набризкбетоні. Отже, це є одним з найбільш важливих напрямків дослідження, який слід виконати в найближчому майбутньому. Окрім цього, необхідне експериментальне підтвердження отриманих результатів.

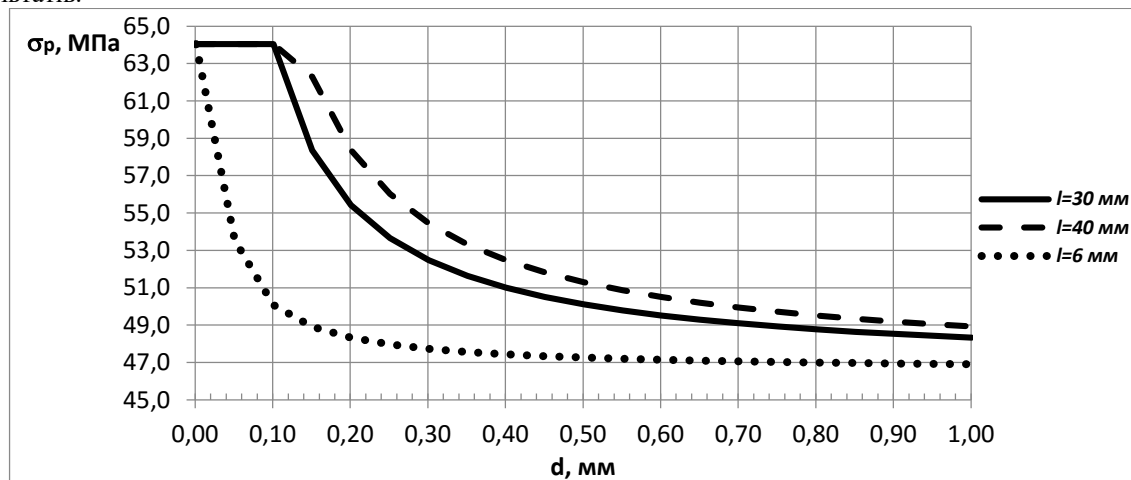


Рис. 3. Міцність бетону що сам ущільняється на розтягування в залежності від діаметра сталевих гладких фібр довжиною 6, 30 і 40 мм

Гачкуваті фібри мають краще зчеплення та широко використовуються там де гладкі фібри не здатні забезпечити необхідний ефект. Тим не менше, скачкоподібний характер роботи гачкуватих фібр не завжди корисний, особливо в умовах підземної розробки. Крім того, відповідно дослідження проведеним Грюневальдом [9], напруження зчеплення гачкуватих фібр зменшується зі зменшенням діаметру, ймовірно через зменшення жорсткості фібр.

Технологія набризкбетону, з одного боку, накладає певні вимоги на спосіб армування покриття, що зводиться. Фібри можуть додаватися у суміш безпосередньо як у соплі, так і у набризкмашині. З другого боку, технологія набризкбетону уможливує виконувати армування шарів, які більше піддаються зусиллю що розтягує, збільшуючи в них вміст фібр. Окрім цього, створення шару з такою концентрацією фібр на поверхні захисного покриття допоможе створити більш стійкі до зусилля що розтягує конструкції, які більш відповідають вимогам кріплення підземних гірничих виробок [10].

Іншим шляхом підвищення міцності набризкбетону на розтягування є створення шару орієнтованих у двох просторах фібр на поверхні шару що зводиться. Це неможливо створити традиційними методами, і тому має сенс наносити фібри на шойно зведений шар набризкбетону роздільно та покривати його тонким шаром набризкбетону без заповнювача. Для максимізації ефекту армування бажано наносити безперервні орієнтовані в двох вимірах фібри, використання яких забезпечить створення екстра міцного композитного матеріалу званого армоцементом. Це дозволить підвищити коефіцієнт армування до одиниці і міцність набризкбетону на розтягування принаймні у 3 рази у порівнянні з композитом без орієнтування фібр у трьох просторах. Руйнування композиту в даному випадку буде відбуватися не при висмикуванні, а при розриві фібр. Окрім цього, роздільне нанесення дозволить застосовувати довгі переривчасті фібри, тому що діаметр сопла вже не буде обмежуватися продуктивністю компресора.

Розробка роздільного нанесення фібр пов'язана з деякими труднощами. До сих пір незрозумілий механізм руху фібр у вільному струмені, а також його вплив на кут, який утвориться між фіброю під час контакту з шойно зведеним шаром набризкбетону та напрямом головних зусиль що розтягують. Також, необхідно встановити максимальний час між нанесенням шарів і мінімальною товщиною шару армування для досягнення всеосяжного результату.

Висновки. Результати вищезазначеного дослідження можна підсумувати наступним чином:

- для досягнення максимального ефекту армування ФНБ, діаметр гладких фібр повинен бути менше 0,1 мм. Це дозволить уникнути висмикування фібр під час навантаження;
- створення нового обладнання для роздільного нанесення набризкбетону та фібр що армують дозволить використовувати всі переваги технології, зокрема зводити армоцемент, виготовлений з набризкбетону або торкретбетону і сталевих або вуглецевих безперервних чи переривчастих фібр, орієнтованих у двох просторах;
- необхідно виконати дослідження впливу пористості та корозії на механічні властивості ФНБ.

Інші перспективи дослідження можна описати як такі:

- розробка аналітичної моделі цементних композитів, армованих безперервними орієнтованими у двох просторах фібрами з урахуванням пористості та корозії для прогнозування його механічних та вибухостійких властивостей та перевірка її експериментальним шляхом;
- визначення мінімального діаметра волокон з урахуванням пористості та корозії, при якому характеристики армованого безперервними орієнтованими волокнами композитного матеріалу на основі цементу, отриманого шляхом напилювання, не змінюється або змінюється незначно;
- визначення відстані між волокнами, зменшення або збільшення якої у композиті призведе до втрат міцності.

Список використаної літератури:

1. Riley V.R. Tensile strength and failure mechanics of fibre composites / V.R. Riley, J.L. Reddaway // *Journal of Materials Science*. – Springer. – 1968. – No. 3 (1). – Pp. 41–46.
2. Waller J.A. Carbon Fibre Cement Composites / J.A. Waller ; American Concrete Institute. – 1974. – SP-44. – Pp. 143–161.
3. Модифицированные бетонные смеси для пространственных конструкций, наносимые методом набрызга // В.А. Алексеев, И.Я. Харченко, А.И. Харченко, С.И. Баженова, А.С. Бетербиев // *Вестник МГСУ*. – 2016. – № 11. – С. 48–58.
4. Development of macro synthetic fiber reinforced shotcrete in Australia / E.S. Bernard, M.J.K. Clements, S.B. Duffield, D.R. Morgan // *7th International Symposium on Sprayed Concrete: Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*. – Sandefjord, Norway. – 16–19 June, 2014.
5. Wille K. Nanoengineering ultra-high-performance concrete with multiwalled carbon nanotubes / K.Wille, K.Loh // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2010. – № 2142. – Pp. 119–126.
6. Finding a «bomb-proof» steel fibre solution / TunnelTalk. – May, 2015.
7. Outwater J.O. The mechanics of plastics reinforcement in tension / J.O. Outwater // *Mod. Plast.* – 1956. – Vol. 33, No. 7. – Pp. 156–248 ; P. 2.
8. Holschemacher K. Pull-out behaviour of steel fibres in self-compacting concrete / K.Holschemacher, Y.Klug // *First International Symposium on Design: Performance and Use of Self Consolidating Concrete*. – China. – 2005. – Pp. 523–532.
9. Grünwald S. Performance-based design of selfcompacting fibre reinforced concrete : PhD Thesis / S.Grünwald. – Delft University of technology, 2004.
10. Хоменчук О.В. К вопросу совершенствования фибронабрызгбетонной крепи горных выработок / О.В. Хоменчук, Я.В. Неделько // *Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений : сб-к науч. тр.* – Вып 19. – Донецк : «Норд – Пресс», 2013. – С. 269–270.

References:

1. Riley, V.R. and Reddaway, J.L. (1968), «Tensile strength and failure mechanics of fibre composites», *Journal of Materials Science*, No. 3 (1), Springer, pp. 41–46.

2. Waller, J.A. (1974), *Carbon Fibre Cement Composites*, American Concrete Institute, SP-44, pp. 143–161.
3. Alekseev, V.A., Harchenko, I.Ja., Harchenko, A.I., Bazhenova, S.I. and Beterbiev, A.S. (2016), «Modificirovannye betonnye smesi dlja prostranstvennyh konstrukcij, nanosimye metodom nabryzga», *Vestnik MGSU*, No. 11, pp. 48–58.
4. Bernard, E.S., Clements, M.J.K., Duffield, S.B. and Morgan, D.R. (2014), «Development of macro synthetic fiber reinforced shotcrete in Australia», *7th International Symposium on Sprayed Concrete: Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, from 16–19 June, Sandefjord, Norway.
5. Wille, K. and Loh, K. (2010), «Nanoengineering ultra-high-performance concrete with multiwalled carbon nanotubes», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2142, pp. 119–126.
6. TunnelTalk (2015), «Finding a «bomb-proof» steel fibre solution», from May.
7. Outwater, J.O. (1956), «The mechanics of plastics reinforcement in tension», *Mod. Plast.*, Vol. 33, No. 7, pp. 156–248, P. 2.
8. Holschemacher, K. and Klug, Y. (2005), «Pull-out behaviour of steel fibres in self-compacting concrete», *First International Symposium on Design: Performance and Use of Self Consolidating Concrete*, China, pp. 523–532.
9. Grünwald, S. (2004), *Performance-based design of selfcompacting fibre reinforced concrete*, PhD Thesis, Delft University of technology.
10. Homenchuk, O.V. and Nedel'ko, Ja.V. (2013), «K voprosu sovershenstvovanija fibronabryzgbetonoj krepj gornyh vyrabotok», *Sovershenstvovanie tehnologii stroitel'stva shaht i podzemnyh sooruzhenij*, sb-k nauch. tr., Vol. 19, «Nord – Press», Doneck, pp. 269–270.

Хоменчук Олег Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри розробки родовищ корисних копалин ім. проф. М.Т. Бакки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- проведення підземних виробок;
- нові вибухостійкі матеріали.

E-mail: khomenchuk@ztu.edu.ua.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2018.