

Н. В. Зуєвська, д.т.н., проф.,

Л. В. Шайдецька, к.т.н., доц.,

КПІ ім. Ігоря Сікорського

В. Є. Губашова

Департамент спеціальних та гідротехнічних робіт

ТОВ СП «Основа-Солсиф»

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ СТРУМЕНЕВО – ЦЕМЕНТАЦІЙНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ҐРУНТОВИХ ОСНОВ

N. Zuievskia, Dr. Eng. Sc., Prof.

L. Shaidetska, Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

V. Gubashova,

Department of special and hydraulic works of LLC JV Osnova-Solsif

PROSPECTS FOR THE USE OF JET-GROUTED EXECUTION OF THE SOIL BASE

Мета. Метою роботи є розгляд перспективності застосування струменевої цементації в умовах щільної міської забудови. На прикладі розглянутих інженерно-геологічних умов показати можливість широкого застосування ґрунтоцементних елементів. **Завдання.** Розглянути основні характерні ознаки струменевої цементації, які переважають над традиційними геотехнічними технологіями. Показати можливість виконання ґрунтоцементних елементів не тільки в умовах підсилення ґрунтових основ, але й умовах протифільтраційних елементів при виконанні огородження котлованів. Представити діапазони міцнісних характеристик ґрунтоцементного матеріалу для ґрунтових умов України. **Результати дослідження.** Тип і фізико-механічні властивості ґрунтів, в яких виконується струменево-цементацийний елемент, будуть одними з основних чинників, які впливають на геометричний розмір елементів і міцність ґрунтоцементного матеріалу. **Наукова новизна.** Зібрані та проаналізовані міцнісні характеристики ґрунтоцементного матеріалу та представлені діапазони їх числових значень дозволять використовувати їх для майбутнього проектування струменево-цементацийних елементів у різних ґрунтових умовах України без наявної особистої напрацьованої практичної бази. **Висновки та практичне значення.** У прогресуючому ритмі забудови міської території гостро стоїть питання виконання нового будівництва в безпосередній близькості до існуючих будівель, або реконструкція тих, що знаходяться в аварійному стані. Завдяки своїм особливостям і позитивним сторонам технологія струменевої цементації дозволяє вирішити будівельні проблеми там, де інші геотехнології не мають можливості бути застосованими. Низький динамічний вплив дозволить виконувати ґрунтоцементні елементи при підсиленні будівель та споруд в аварійному стані, низька водоникність – використовувати струменево-цементацийні елементи в якості протифільтраційних, як поодиначних, так і в сумісній роботі з іншими елементами конструкцій огородження котлованів. Числові дослідні значення міцності матеріалу, отриманого при виконанні струменевої цементації, дозволить спрогнозувати міцнісні характеристики майбутніх ґрунтоцементних елементів.

Ключові слова. Струменево цементация, ґрунтоцементні елементи, ґрунтові умови, міцнісні характеристики.

ВСТУП

Актуальність теми. Струминеве цементування з'явилося в якості альтернативи хімічному ін'єктуванню, яке було не тільки дорогим, але і токсичним методом. У 1970-х «колонне поліпшення» стало доступною технологією [1]. Потім розроблена і випробувана на практиці технологія поліпшення будівельних властивостей ґрунтів поширилася, в першу чергу, на території Японії, Європи, потім Південної і Північної Америки, Далекого Сходу, Азії та Африки.

На території Сполучених Штатів Америки струменева цементация отримала широке застосування і розповсюдження в різних областях починаючи з початку 1980-х [2].

Таким чином, геотехнологія, заснована на одночасному руйнуванні і перемішуванні ґрунту високонапірним струменем розчину в режимі "mix-in-place", дійшла до наших днів як технологія струменевої цементации ґрунту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Технологія струменевої цементации або струменеве ін'єктування (Jet grouting method) - сучасна геотехнічна технологія перетворення будівельних властивостей ґрунтів з метою їх поліпшення.

Широко відомі дослідження явища руйнування природної структури ґрунту високонапірним струменем вченими Miki G. [3], [4], Tornaghi R. [5], Shibazaki M. [1], [6], Kauschinger J.L. та інших [7], [8], Bell A.L. [9], Covil C.S. і Skinner A.E. [10]–[13].

Постановка завдання. Основною ідеєю технології струменевої цементации є здійснення процесів з метою зміни характеристик ґрунтів, створення на їх основі матеріалів з необхідними властивостями і формування із зазначених матеріалів підземних елементів заданих форми і розмірів.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Залежно від кількості потоків рідини, що беруть участь в процесі формування струменево-цементацийних елементів, технологія поділяється на однокомпонентну, двокомпонентну та трикомпонентну струменеву цементацию.

Однокомпонентний метод струменево-цементацийної технології полягає в тому, що і руйнування і цементация ґрунту відбувається за допомогою цементного розчину, що подається під високим тиском (кілька десятків МПа) в єдиному потоці через насос до струменевого монітора. На виході з монітора швидкість струменя розчину зменшується дуже швидко, руйнівна ефективність однокомпонентного (простого) струменя у напрямку від осі свердловини обмежена, "радіус дії" простого струменя в ґрунті дорівнює кільком десяткам сантиметрів. В результаті обробки ґрунту однокомпонентним струменем формується колона від 0,4 до 1,4 м в діаметрі.

В двокомпонентній технології існує два методи: перший - руйнування і цементация ґрунту відбувається за допомогою двох рідин, які транспортуються окремо один від одного до монітора, другий - руйнування і цементация ґрунту виконується за допомогою однієї рідини, оточеної потоком повітря, а рідина і повітря так само подаються до сопла окремо один від одного.

В двокомпонентній технології з водою застосовуються дві рідини - це вода і розчин. Ґрунт руйнується за допомогою струменя води під високим тиском, що подається у верхню частину монітора (кілька десятків МПа), в той же час цементування відбувається за допомогою відокремленого струменя розчину під низьким тиском (кілька МПа), що подається в нижню частину монітора. В даний час ця технологія рідко застосовується на території Європи і США.

В двокомпонентній технології з повітрям застосовуються два потоки - повітря і розчин. Руйнування і цементация ґрунту, так само як і в однокомпонентній технології,

відбуваються за допомогою струменя розчину, поданого під тиском в кілька десятків МПа, але функції розмивання струменя розчину допомагає кільцеподібний струмінь повітря, що подається окремо під дуже низьким тиском (кілька сотень кПа) з компресора до монітора. Струмінь стисненого повітря підтримує швидкість струменя розчину з віддаленням від сопла. Передбачається, що він створює оболонку навколо струменя розчину і захищає від тертя.

Сутність трикомпонентної технології полягає в тому, що руйнування і цементация ґрунту відбувається за допомогою трьох потоків (вода, повітря і розчин), що подаються до монітора окремо.

Так само, як і в двокомпонентній технології з водою, ґрунт руйнується за допомогою струменя води під високим тиском, а цементация відбувається струменем розчину, що подається під низьким тиском. Як і при двокомпонентній технології з повітрям, ефективність руйнуючого струменя (на цей раз у воді) поліпшена кільцевим струменем повітря.

Тип і фізико-механічні властивості ґрунтів, в яких виконується струменево-цементацийний елемент, будуть одними з основних чинників які впливають на геометричний розмір елементів і міцності ґрунтоцементного матеріалу.

Burk G.K. в 2002 році [2] представив діапазон ґрунтів, в якому незв'язні ґрунти відносно легко зруйнувати і вони є фактично само ерозійними при обробці їх таким турбулентним впливом, а в іншому кінці шкали - пластична глина, яку важко зруйнована.

В залежності від типу та консистенції ґрунту, а також його водо насичення, колони струменевого ін'єктування будуть мати різну форму та структуру поверхні [9]. (рис.1)

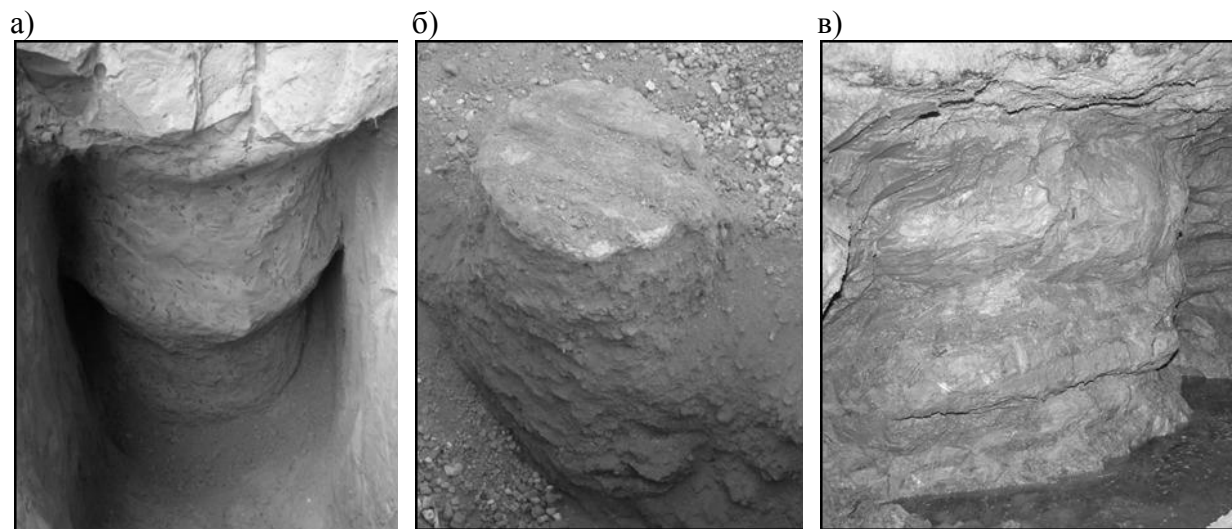


Рисунок 1 – Ґрунтоцементні колони, виконані на території України: а) в супісках, б) техногенні ґрунти – шлаки доменного виробництва, в) заторфований суглинок

Технологія струменевого ін'єктування дозволяє використовувати її при вирішенні різних завдань підземного будівництва, а саме: підземні несучі і протифільтраційні конструкції, горизонтальні або похилі плити, елементи будівель і споруд, штучні основи, стіни і підлоги заглиблених приміщень, в тому числі підземних гаражів, підсилення фундаментів існуючих будівель і споруд, підпірні стіни, огорожі котлованів, горизонтальні підземні протифільтраційні екрани, протизсувні конструкції,

закріплення ґрунтів масивів для проходки підземних тунелів, колодязі великого діаметру з днищами і багато інших споруд.

При будівництві глибоких виїмок в обводнених ґрунтах, спорудженні дамб і виконанні підземних конструкцій будівель нижче рівня ґрунтових вод практично завжди стоїть завдання або водозниження, або влаштування протифільтраційних елементів з низькою проникністю.

Завдяки низькій водопроникності (на прикладі досліджень О.А. Маковецького [14] коефіцієнт фільтрації - $1,4-1,6 \cdot 10^{-6}$ см/с) ґрунтоцементний матеріал використовується для вертикальних і горизонтальних протифільтраційних екранів, гідроізоляційних бар'єрів для гребель різних видів, постійних і тимчасових діафрагм.

Наприклад, при виконанні конструкції огороження котловану в м. Києві в обводнених умовах для запобігання припливу ґрунтових вод в котлован і виносу ґрунту, в міжпальовому просторі виконують колони струменевого ін'єктування (рис. 2).



Рисунок 2 – Схема виконання колон струменевого ін'єктування та зріз висвердленого керна на контакті ґрунтоцементної колони і бурової палі

На рис.2 на зрізі керна, який був висвердлений з конструкції огороження котловану, в правій частині - бетон, матеріал палі огороження, в лівій - ґрунтоцементний матеріал колони струменевого ін'єктування. При виконанні ґрунтоцементної колони високонапірний струмінь цементного розчину «сканує» поверхню бурової палі і створює щільне з'єднання двох елементів, що добре простежується на рис. 2.

Також досить поширеним є виконання плоских панелей струменевого ін'єктування (рис.3).

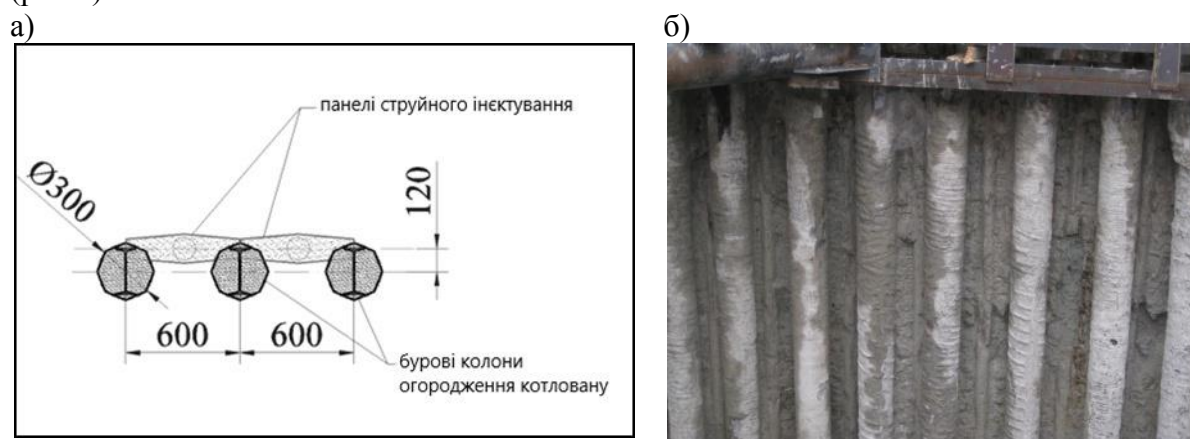


Рисунок 3 – Виконання плоских панелей струменевого ін'єктування в м. Львові:
 а) схема виконання; б) огороження котловану з паль $\varnothing 300$ мм і виконані між ними панелі струменевого ін'єктування

Міцність ґрунтоцементного матеріалу струменево-цементнаційних елементів відіграють важливу роль, особливо коли ці елементи використовуються для підсилення ґрунтового масиву існуючих будівель або для майбутнього будівництва.

Прийнявши до уваги міцності на стик ґрунтоцементного матеріалу, інженер-проектувальник зможе оцінити яке навантаження можуть сприйняти струменево-цементнаційні елементи.

Ґрунтуючись на досвідних даних виконання ґрунтоцементних елементів, виконаних в різних інженерно-геологічних умовах на території України компанією "Основа-Солсиф", наведемо порівняльний аналіз отриманих результатів міцності на стиск (таблиця 1).

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз міцності на стиск ґрунтоцементного матеріалу

№, п/п	Тип ґрунту	Фізико-механічні характеристики ґрунту			Міцність на стиск ґрунтоцементного матеріалу, МПа
		γ , т/м ³	c, кПа	ϕ , град	
1	Делювіально-зсувні піщані ґрунти (об'єкт на пр. Шевченка, м.Київ)	1,84	8	18	11,9...23,8
2	Суглинок м'якопластичний заторфований (об'єкт "Будівля банку Універсальний", м.Львів)	1,69	19	6	3,7...6,7
3	Супісок лесовидний, просідний (об'єкт "Будівля Лейпциг", м.Київ)	1,65	10	22	4,2...12,6
4	Супісок пилуватий твердий (об'єкт "Андріївська церква", м.Київ)	1,60	35	24	10,2...14,3
5	Шлаки насипні доменного виробництва (реконструкція в м.Єнакієве)	1,85	2	36	4,8...11,2

Найнижчий показник міцності на стиск в заторфованих ґрунтах (3,7 МПа), а найвищий з отриманих – в піщаних ґрунтах (23,8 МПа).

Для порівняння та аналізу отриманих даних візьмемо графік залежності міцності ґрунтоцементного матеріалу від типу ґрунту та віку зразка, що був опублікований L. W. Wong, D.H. Ju, P.J. Wu. "Control of Ground Movements caused by jet grouting" на Міжнародній конференції "Техніки поліпшення ґрунту" в Мокау [15].

В результаті порівняння отриманих чисельних даних значень міцності на стик ґрунтоцементного матеріалу на рис. 4 можна виділити те, що всі значення виходять за

діапазони міцності, що були запропоновані авторами. Навіть такий ґрунт як техногенний – шлаки доменного виробництва, при обробці показав результат як гравійний та піщаний – 8 МПа.

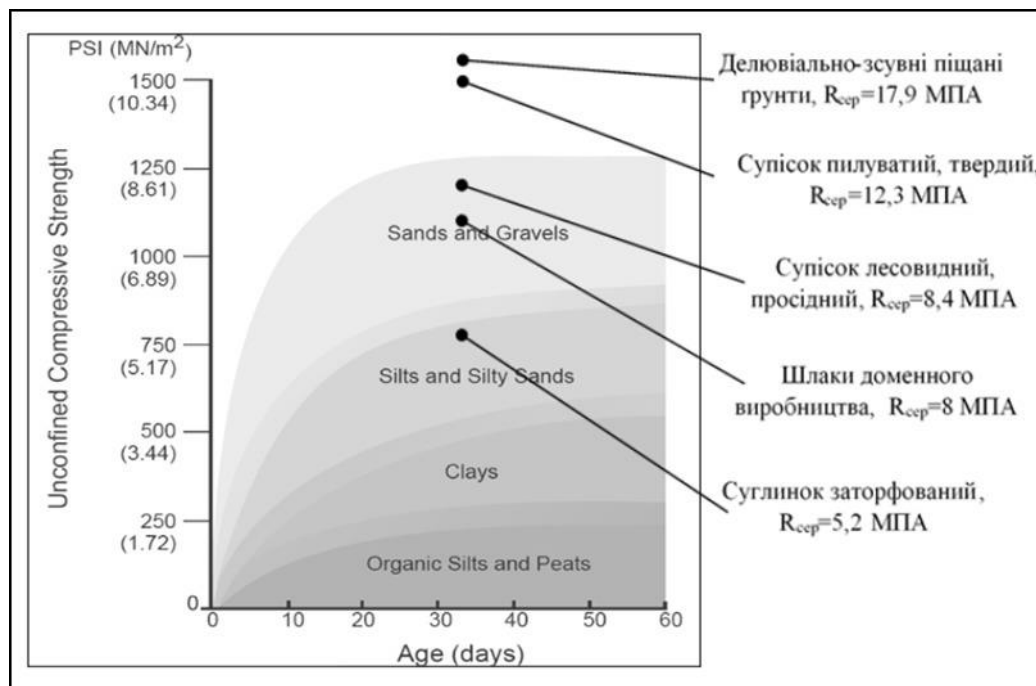


Рисунок 4 – Порівняння отриманих даних з літературними [15]

ВИСНОВКИ

Технологія струменевого ін'єктування характеризується такими перевагами, як низький динамічний вплив при виконанні ґрунтоцементних елементів, та не габаритним буровим обладнанням. І перша, і друга перевага дозволять виконувати струменеві-цементацийні колони для підсилення ґрунтової основи при реконструкції історичних будівель та споруд, що знаходяться в аварійному стані, не призводячи до подальшої їх руйнації.

Зібрані та проаналізовані дослідні дані з різних будівельних об'єктів з різноманітними ґрунтовими умовами дозволили створити діапазони міцнісних характеристик ґрунтоцементного матеріалу для ґрунтів України, які включають в себе і піщані, і суглинисті, і, навіть, техногенні ґрунти.

Дослідні матеріали характеристик ґрунтоцементних елементів дозволять використовувати їх в подальшому проектуванні та виконанні струменевого ін'єктування в різних інженерно-ґелогічних умовах.

REFERENCE

- [1] M. Shibazaki, State of practice of jet grouting, *Geotechnical Special Publication No. 120: Grouting and Ground Treatment*, vol. 1, pp. 198-217, 2003. doi.org/10.1061/40663(2003)7
- [2] G. K. Burke, The state of the art of jet grouting in the United State, *Proceedings of the 9th International on Piling on Deep Foundations*, France, Nice, 2002.

- [3] G. Miki, Soil improvement by jet grouting, *Proc. 3rd Int. Geotechnical Seminar on Soil Improvement Method*, Singapore, 1985.
- [4] G. Miki, Technical progress of jet grouting method and its newest type, *Proceeding of the international conference on in situ soil and rock reinforcement*, Paris, France, 1984.
- [5] R. Tornaghi, A. Pettinaroli, Design control criteria of jet grouting treatment, *Symposium International Sur l'Amélioration des Sols en Place*, Paris, France, 2004.
- [6] M. Shibazaki, M. Yokoo, H. Yoshida, Development oversized Jet Grouting, *Grouting and ground treatment, Proceedings of the Third International Conference*, vol. 1, no. 120, pp. 294-302, 2003.
- [7] J. L. Kauschinger, E. B. Perry, R. Hankour, Jet grouting: state of the practice, *Grouting/soil improvement and geosynthetics, ASCE Geotech. Spec. Publ*, vol. 1, no. 30, pp. 169-181, 1992.
- [8] J. L. Kauschinger, R. Hankour, E. B. Perry, Methods to estimate composition of Jet Grout bodies, *Grouting soil improvement and geosynthetics*, vol. 1, no. 30, pp. 194-205, 1992.
- [9] Material of company JV "Osnova-Solsif", Kyiv, Ukraine.
- [10] P. Croce, A. Flora, Analysis of single-fluid jet grouting, *Géotechnique*, vol. 50, no. 6, pp. 739-748, 2000.
doi.org/10.1680/geot.2000.50.6.739
- [11] P. Croce, A. Flora, G. Modoni, *Jet Grouting, Technology, Design and Control*, New York: CRC Press Taylor&Francis Group, 2014.
- [12] P. Croce, G. Modoni, Numerical modelling of jet-grouted foundations, *5th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Paris, France, 2002.
- [13] P. Croce, A. Flora, G. Modoni, Experimental investigation of Jet-grouting, *Foundation and Ground Improvement Proceedings of the Conference American Society of Civil Engineers*, Blacksburg, Virginia, Jun. 9-13, 2004.
- [14] O. A. Makoveckij, I. I. Husainov, Опыт применения струйной цементации для устройства подземных частей жилых комплексов, *Svit geotekhniki*, vol. 4, pp. 20-23, 2012.
- [15] L. W. Wong, D. H. Ju, P. J. Wu, Control of Ground Movements caused by jet grouting, *International Conference on Ground Improvement Techniques*, Macau, China, 1997.

Стаття надійшла до редакції 30.03.2020.