

© М.Ю. Мусихін¹, Г.К. Туганов¹¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ НИЗЬКОВ'ЯЗКОГО ПОЛІУРЕТАНУ В УМОВАХ СЛАБКИХ ВОДОНАСИЧЕНИХ ҐРУНТІВ

© M. Musykhin¹, G. Tuganov¹¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

JUSTIFICATION OF THE APPLICATION OF LOW-VISCUS POLYURETHANE IN CONDITIONS OF POORLY WATER-SATURATED SOILS

Мета. При просіданні конструкцій метрополітену в слабких обводнених ґрунтах застосовують різні методи закріплення. Досить поширеним є закріплення за допомогою методу струменевої цементації з додаванням різних хімічних реагентів, що є екологічно безпечними, прискорюють терміни зміцнення ґрунтового масиву та є довговічними. Обґрунтувати застосування низьков'язкого поліуретану, як метод збільшення стійкості водонасиченого ґрунтового масиву навколо тунелю метрополітену.

Методика. Аналітичним шляхом обґрунтувати спосіб зміцнення стійкості водонасиченого намивного ґрунтового масиву навколо тунелю метрополітену методом струменевої цементації з використанням низьков'язкого поліуретану. Розглянути переваги даного матеріалу та представити міцнісні характеристики.

Результати. Застосування суміші бетону та низьков'язкого поліуретану при струменевій цементації дозволяє збільшити міцнісні характеристики пал, завдяки перевагам поліуретану. Матеріал має високу щільність, озоностійкість, стійкість при високих та низьких температурах, можливість використання при значних механічних навантаженнях, при високій щільності має не велику масу, еластичний. При заповненні свердловин сумішшю розчину цементу та поліуретану у взаємодії з водонасиченим ґрунтом змінюються фізико-механічні характеристики ґрунтів та навантаження на конструкцію метротунелю. Виходячи з аналізу даних по закріпленню ґрунтового масиву, можна виділити, що для збільшення стійкості водонасиченого ґрунтового масиву доцільно застосовувати метод струменевої цементації з додаванням низьков'язкого поліуретану.

Наукова новизна. Використання низьков'язкого поліуретану, як закріплюючого матеріалу методом струменевої цементації являється високоефективним у закріпленні слабких водонасичених ґрунтів. Застосування поліуретану дасть можливість скоротити терміни робіт, зменшити кількість матеріалу, збільшити експлуатаційні характеристики.

Практична значимість. В зміцненні ґрунтів підземного простору при щільній міській забудові метод силікатизації є поширеним та зручним при зміцненні ґрунтового масиву, проте використання пал в результаті змішування ґрунту з поліуретаном не тільки зменшить терміни робіт, а й знизить вартість та збільшить швидкість твердіння пал, збільшить діапазон охоплення водонасиченого масиву біля тунелю, знизить можливість утворення протифільтраційної завіси, що являється безпечнішим для міської забудови.

Ключові слова: слабкі ґрунти, водонасичений масив, зміцнення масиву, стабілізація ґрунту, поліуретан, бетонополімер, цементація.

Вступ. Просідання конструкції метрополітену в умовах водонасичених слабких ґрунтів є актуальною проблемою мегаполісів. Обводненість ґрунтового масиву впливає на стійкість конструкції тунелю внаслідок розвитку деформацій. Задля посилення водонасиченого масиву використовують різні методи, зокрема змішування в'язких рідин та ґрунту. В'язкими матеріалами можуть слугувати цемент, рідке скло, вапно, смола та інші.

Метод силікатизації та смолизації побудований на реакціях взаємодії хімічних реагентів між собою або з хімічно-активною частиною ґрунтів. Цементация включає хімічний процес твердіння цементного розчину в порах ґрунтів, тріщинах та пустотах. Цей метод забезпечує збільшення міцнісних характеристик ґрунтів та довговічність. Хімічне ін'єктування застосовують для водонасичених ґрунтів, включаючи піски, тріщинуваті скельні породи, напів скельні породи, крупноуламкові ґрунти, суглинки, глину, лесові ґрунти.

Закріплення мерзлих та вічномерзлих ґрунтів, зазначених вище літологічних видів, можливе після їхнього попереднього відстоювання. Також діють обмеження температурних умов. Водонасичені ґрунти, швидкості ґрунтових вод, яких перевищують допустимі для кожного методу та ґрунти, що просочені нафтопродуктами не підлягають закріпленню.

В порівнянні з іншими способами хімічне ін'єктування можна здійснювати без порушення природної структури і складання ґрунтів, мінімізує деформації при проведенні робіт. За допомогою цементации можливе заповнення порожнин різних розмірів, що можуть бути утвореними за різних причин під фундаментами і в основі існуючих споруд [1].

Для розподілу та сприйняття навантаження утворюються нові стабілізаційні конструктивні елементи у вигляді ґрунтових колон. Метод струменевої цементации дозволяє змішувати на глибині пробуреної свердловини ґрунт з цементним розчином та низьков'язким поліуретаном. В результаті чого відбувається ущільнення ґрунтового масиву, за допомогою утворень несучих цементно-полімерних паль, які будуть стабілізувати навантаження, що діють на конструкцію. Бурозмішувальна технологія широко поширена при будівництві та підсиленні геотехнічного простору. Для запобігання просідання ґрунту необхідно врахувати всі інженерно-геологічні умови, визначити правильні пропорції подачі розчину, навантаження, що діють на конструкцію та щільність міської забудови. Зміцненню можуть підлягати всі водонасичені ґрунтові поклади [2].

Основна частина. Для початку проведення робіт по зміцненню водонасиченого ґрунтового масиву і формування паль необхідно провести цикл робіт, що включає інженерно-геологічні вишукування, вибір методу стабілізації ґрунту, буріння свердловини на певну глибину, нагнітання цементного розчину з додаванням низьков'язкого поліуретану.

Розглянемо три різновиди струйної цементации (рис. 1): Jet-1, Jet-2, Jet-3.

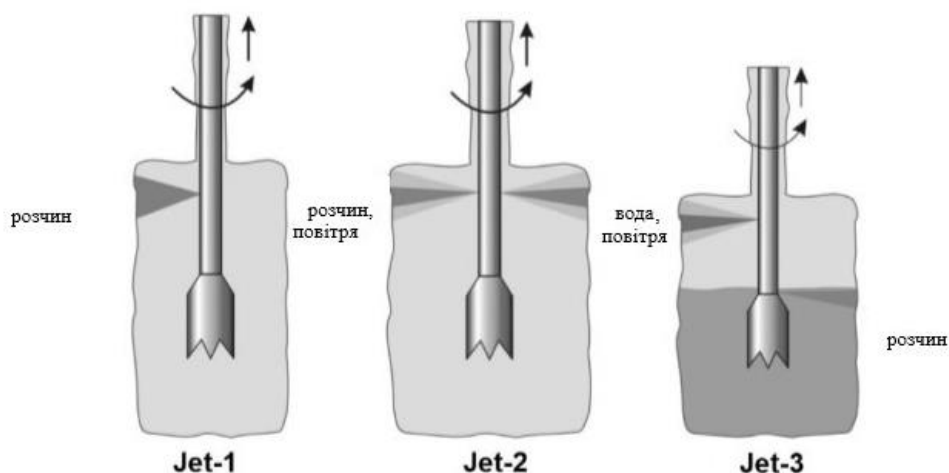


Рис. 1. Технології струйної цементації

Однокомпонентна технологія Jet-1 являється найпростішою, розчин цементу проходить крізь бурові штанги і виходить через форсунки, які встановлені в моніторі. Тиск цементного струменя руйнує ґрунт і замінює його розчином цементу та ґрунту, утворюючи однорідну масу. Дана технологія застосовується в не складних ґрунтах, діаметр паль сягає до 1 м.

Двокомпонентна технологія Jet-2 дає можливість одночасної подачі розчину та повітря, дозволяє виконувати палі більшого діаметру до 2,5 м. Являється більш ефективною в складних ґрунтах.

Трьохкомпонентна технологія Jet-3 є найскладнішою через одночасну подачу трьох компонентів. В даній технології руйнування ґрунту відбувається за рахунок струменів води та повітря, а розчин подається через форсунок, при підйомі витісняє розмитий ґрунт на поверхню. Палі мають малий вміст ґрунту та великий вміст розчину, міцність на стиск досягає до 10 МПа. Діаметр паль за цією технологією може досягати до 3 м. Важливим параметром при проведенні робіт по закріпленню ґрунтів є розхід цементу, який відповідає за якість паль та економічні показники.

Введення суміші розчину можна здійснювати двома способами:

- 1) «сухим», при взаємодії на хімічному рівні сухої суміші та порової води, в наслідок чого знижується вологість ґрунту;
- 2) «мокрим», застосування гідросуміші в'язучого і води.

Перевагою такого способу є економія заповнювача, оскільки ґрунт не видаляється, а змішується з в'язучими матеріалами та в результаті твердіння знижується осадження ґрунту до допустимих значень та збільшується жорсткість паль [3, 4]. Змінюються фізико-механічні характеристики та структура ґрунту. Речовина, яку використовують для ін'єктування повинна бути однорідною, і водонепроникною в умовах напірної води, достатність адгезії з вологими основами з бетону, термопластичних і еластичних матеріалів, низьку в'язкість, керованість при поширенні в масиві, безпечність для ґрунтових вод та питної води.

Технологія струменевої цементації має ряд переваг: може використовуватись в щільній міській забудові за рахунок компактності обладнання, надає мінімальний динамічний або коливальний вплив на сусідні споруди, швидка та ефективна в проведенні робіт, дозволяє отримувати палі різних форм та перерізів (рис. 2), що робить її більш поширеною в складних умовах та ґрунтах.

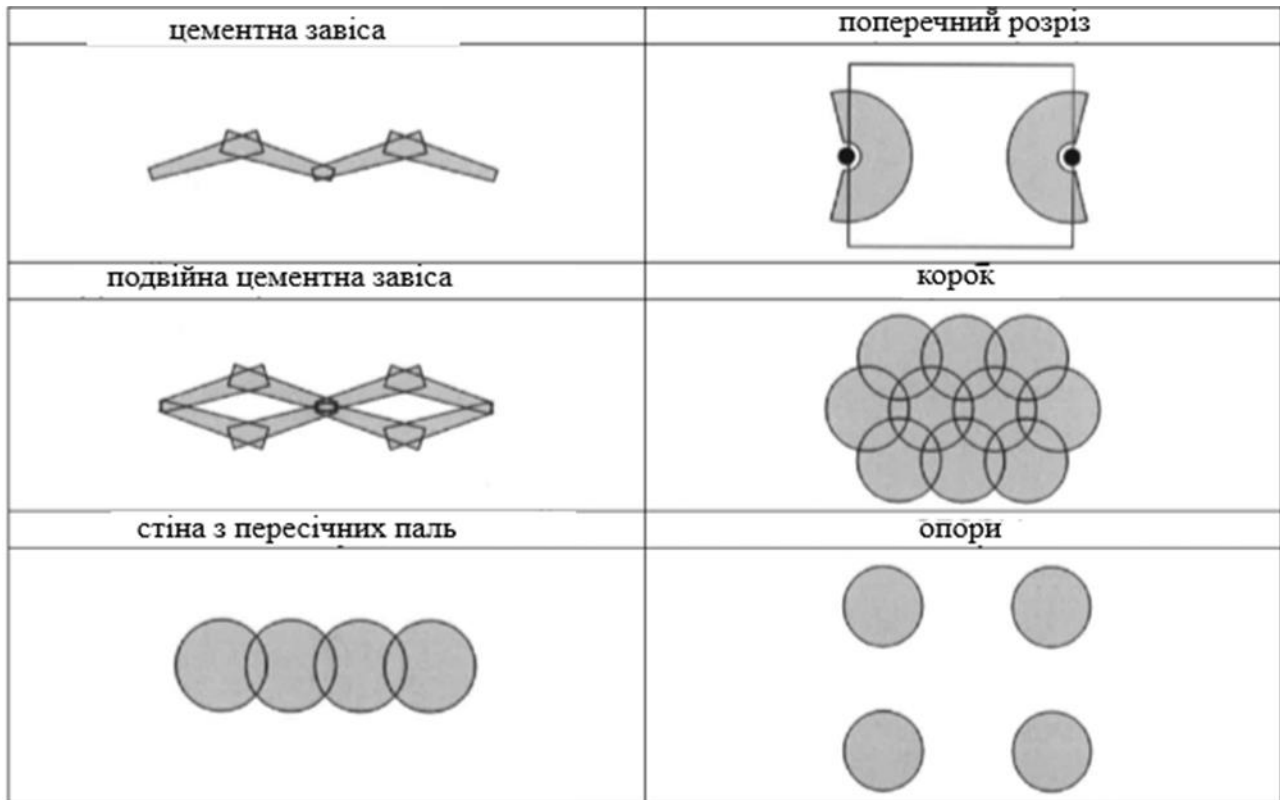


Рис. 2. Форми та перерізи паль

Застосування суміші цементу та низьков'язкого поліуретану дозволяє комплексно вирішувати проблему стійкості ґрунтових масивів. В даний час використовують дуже дрібний цемент з додаванням високореактивних хімічних розчинів на основі поліуретанів, акрилатів, епоксидних складів задля досягнення максимальних результатів.

Поліуретан (рис. 3) являє собою полімерний матеріал, в склад якого входять ізоціанати та поліол. Властивості сировини залежать від молекулярної структури. Полімер відноситься до групи еластомерів, а тому може повертатись в початковий стан після процесу розтягування. В суміші з цементом може набувати твердість та підвищену стійкість до температур. Має декілька фізичних станів: твердий, напівтвердий, рідкий. Переробляється практично всіма існуючими практичними методами: литтям, пресуванням, екструзією, заливкою на стандартному устаткуванні. На їх основі одержують всі типи полімерних матеріалів та виробів: армовані, ламіновані, наповнені, спінені, листові, у вигляді блоків, плит, волокон, панелей, плівок, профілів. Технічні властивості полімеру роблять його унікальною сировиною та перевершують гуму та метал.



Рис. 3. Зразок стрижневого поліуретану

Характеристика міцності на стиск поліуретану з різним співвідношенням суміші поліолу та ізоціанату отримано за допомогою порівняння чисельного аналізу і результату експерименту (у дослідженні Norbaya Sidek, Pyani Akmar Abu Bakar, Ahmad Aftas Azman, Abdul Samad Abdul Rahman and Wizario Anak Austin) [5] шляхом розрахунку різниці між двома наборами результатів (рис. 4) [6]. Середня різниця становить 3.3 %, що є прийнятним значенням різниці.

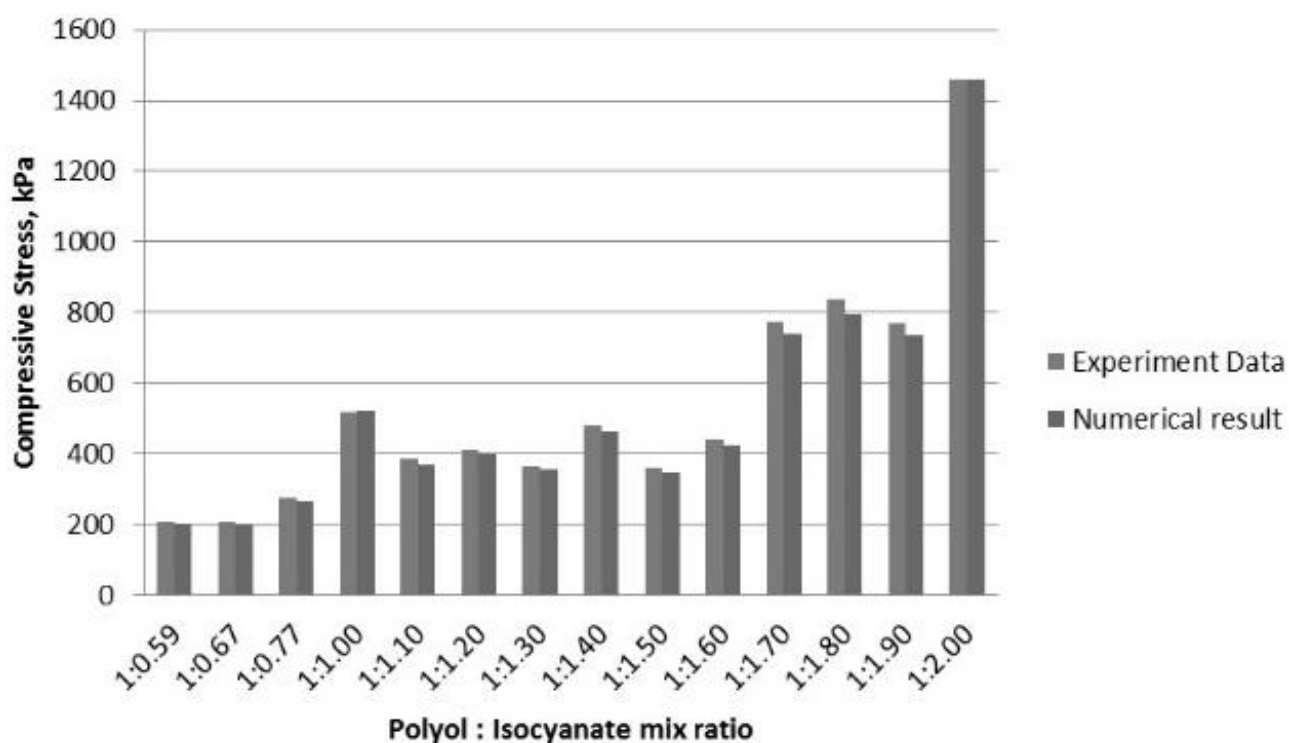


Рис. 4. Взаємозв'язок між напругою стиску та варіацією поліолу та ізоціанату на основі експериментальних та числових результатів [6]

Було розглянуто чотирнадцять співвідношень суміші та зроблено порівняння числового аналізу й експериментальних результатів.

Відповідно, ідеальним вважається співвідношення поліолу-ізоціанату 1:1, що забезпечує адекватне розширення та міцність на стиск.

Перевагами матеріалу є висока щільність сировини (до 300 кг/м^3), можливість застосовувати матеріал при значних механічних навантаженнях, експлуатація при температурах від -60 до $+80^\circ\text{C}$, високий ступінь еластичності, поганий провідник, гарна озоностійкість, при високій щільності має невелику масу, має імунітет до кислот та розчинників.

Для стабілізації слабких ґрунтів доцільно використовувати цемент і поліуретан у співвідношенні 1:1, задля надання стійкості та підвищення фізико-механічних властивостей ґрунту.

Формування ґрунтополімерних паль (рис. 5) відбувається за технологією Jet-3 в результаті змішування цементного розчину з полімером і водою.

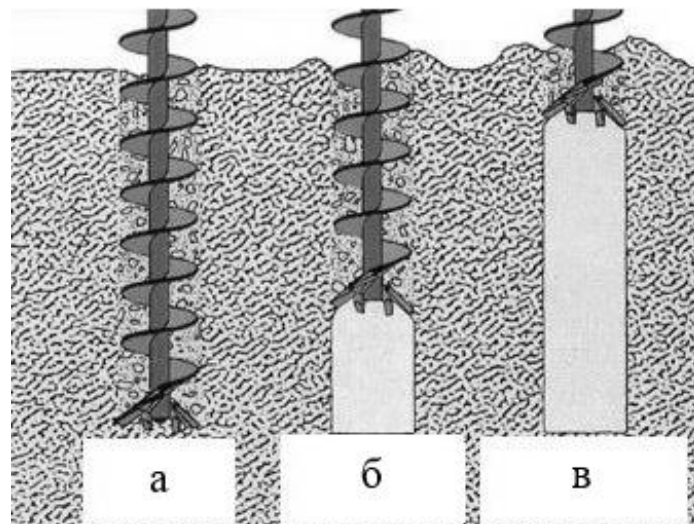


Рис. 5. Формування ґрунтоцементної палі з додаванням низьков'язкого поліуретану: а – буріння свердловини, б – заповнення свердловини розчином, в – завершення бетонування

Зміна властивостей бетону відбувається завдяки просоченню спеціальними полімерами, в результаті змішування отримуємо бетонополімер.

Бетонополімер – це конгломерат цементних бетонів і полімерних композицій, які в результаті полімеризації в поровій структурі бетону змінюють структуру і підвищують його щільність, корозійну стійкість, міцність, довговічність.

Полімери, що проникають в пори бетону утворюють нові зв'язки між компонентами. Підвищуючи опір палі до навантаження, тріщиностійкість та водонепроникність. Завдяки поліуретану підвищуються міцнісні характеристики бетону до 9 МПа .

Завдяки застосуванню поліуретану можна зменшити віброколювання конструкції, які виникатимуть в результаті руху потягів та просідання слабких ґрунтів.

Висновки. Застосування поліуретану при стабілізації слабких водонасичених ґрунтів в геотехнічному просторі дозволяє зупинити осідання та ущільнити ґрунт. Це дозволяє скоротити затрати трудових ресурсів і терміни виконання робіт.

Перелік посилань

1. Мусихін, М. Ю. (2022). Аналіз хімічного закріплення ґрунтів у підземному будівництві. У Тези ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів» (с. 68–70). Житомирська політехніка.
2. Stovnyuk, S. M., Nan, A. L., Zahoruiko, E. A., & Shaidetska, L. V. (2017). Research of hydraulic impact on the technological stability of shallow metrotunnel in dredging massives. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, (5(71)), 141–148.
<https://doi.org/10.15802/stp2017/114357>
3. Петренко, В.І., & Петренко, В.Д. (2013). Обґрунтування параметрів хімічного закріплення ґрунту в при будівництві Київського метрополітену. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2013 (4), 60-66.
<https://doi.org/10.15802/bttrp2013/26642>
4. Musykhin, M. (2022). Research of metro tunnel sediments under the conditions of a water-saturated flood massive. *Geoengineering*, (7), 56–61.
<https://doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022.267606>
5. Sidek, N., Bakar, I. A. A., Azman, A. A., Rahman, A. S. A., & Austin, W. A. (2017). Strength characteristic of polyurethane with variation of polyol to isocyanate mix ratio: A numerical analysis. У *2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/i2cacis.2017.8239028>
6. [The relationship between compressive stress and variation in polyol-isocyanate content based on experimental and numerical result] [Зображення]. (2017). IEEE Xplore.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8239028>

ABSTRACT

Purpose. Analytical justification of the method of strengthening the stability of the water-saturated alluvial soil massif around the subway tunnel by the method of jet cementation using low-viscosity polyurethane. Consider the advantages of this material and present the strength characteristics.

The methods. Analytical justification of the method of strengthening the stability of the water-saturated alluvial soil massif around the subway tunnel by the method of jet cementation using low-viscosity polyurethane. Consider the advantages of this material and present the strength characteristics.

Findings. The use of a mixture of concrete and low-viscosity polyurethane during jet cementing allows to increase the strength characteristics of piles, thanks to the advantages of polyurethane. The material has a high density, ozone resistance, stability at high and low temperatures, the possibility of use under significant mechanical loads, with a high density, it does not have a large mass, it is elastic. When filling wells with a mixture of cement and polyurethane solution in interaction with water-saturated soil, the physical and mechanical characteristics of the soil and the load on the structure of the metro tunnel change. Based on the analysis of the data on the consolidation of the soil massif, it can be highlighted that to increase the stability of the water-saturated soil massif, it is advisable to use the jet cementation method with the addition of low-viscosity polyurethane.

The originality. The use of low-viscosity polyurethane as a cementing material by jet cementation is highly effective in cementing weak water-saturated soils. The use of polyurethane will make it possible to shorten the period of work, reduce the amount of material, and increase operational characteristics.

Practical implementation. The silicification method is common and convenient for strengthening underground soil in the case of dense urban development, but the use of piles as a result of mixing soil with polyurethane will not only reduce the duration of work, but also reduce the cost and increase the speed of pile hardening, increase the range of coverage of the water-saturated massif near the tunnel, will reduce the possibility of the formation of an anti-filtration cushion, which is safer for urban development

Keywords: *weak soils, water-saturated massif, massif strengthening, soil stabilization, polyurethane, concrete polymer, cementation.*