

9. ЗАЗДРАВЯВАНЕ НА ПОВЪРХНОСТТА С НЕОРГАНИЧНИ И ОРГАНИЧНИ СВЪРЗВАЩИ ВЕЩЕСТВА

1.Общи сведения

Заздравяването на строителните почви на повърхността се изпълнява с технологично близки методи. Те включват разрушаване на естествената структура на почвата, последвано от смесване с различни свързващи вещества и уплътняване на готовата смес с валяци или с други уплътнителни машини. Според вида на свързващите вещества се различават:

- **заздравяване с неорганични свързващи вещества** –цимент, вар или отпадъчни материали от промишлеността и енергетиката, които имат свързващ ефект (пепел от ТЕЦ, пепел от комините на цементовите заводи, гранулиран шлак и др.) и
- **заздравяване с органични свързващи вещества** (битум и различни полимери).

Приготвянето на сместа се извършва **стационарно** или **на място**. Стационарното смесване се прави в смесителни центрове, наподобяващи бетоновите (фиг. 9.1.). Те съдържат смесител с вертикална ос, бункери за цимента и водата, транспортна лента за пренасяне на почвата, дозатори и др. Всички процеси са автоматизирани, което гарантира високо качество на сместа. Тя се пренася да мястото на използване със самосвали. Разстила се машинно и се уплътнява с валяци.



Фиг. 9.1. Смесителен център за приготвяне на циментопочвена смес и нейното разстилане и уплътняване.

При приготвянето на сместа на място, почвата и свързващите вещества се смесват със смесителни устройства, които могат да бъдат самоходни и прикачни. Първите са снабдени с дозатори за свързващото вещество и за водата (фиг. 9.2.). Смесителното устройство съдържа разположени една зад друга перки, с които цимента се смесва с почвата. Прикачните смесители представляват фрези, подобни на селскостопанските. Те работят с цименторазстилвач. Готовата смес се уплътнява с пътни валяци.

Уплътняването както при стационарното смесване, така и при смесването на място се прави при w_{opt} до достигане на ρ_{ds} . При стеснени строителни условия и за изграждане на циментопочвени пилоти се използва т.нар. пластична циментопочвена смес, която има w близко до w_L . Такава смес се приготвява стационарно и се уплътнява с леки вибрационни устройства.



Фиг. 9.2. Заздравяване на почва в пътно строителство чрез смесване на място

2. Заздравяване с неорганични свързващи вещества

Заздравяване с портландцимент (циментопочва)

С портландцимент практически могат да се заздравяват всички почви с изключение на хумусния хоризонт на растителната почва, на глинестите почви, които имат показател на пластичност $I_p > 20$ и на някои осолени почви. Най-добре се заздравяват чакълесто-песъчливите, песъчливите и песъчливо-праховите почви, които лесно се раздробяват и смесват с цимента.

Количеството на цимента q обикновено се изменя от 3 до 12% и се определя с лабораторен опит. То зависи от вида на почвата и предназначението на заздравявания материал.

Якостта на циментопочвата зависи от редица фактори, най-важните от които са количеството на цимента, степента на уплътненост на сместа, времето на нейното отлежаване и температурно-влажностния режим при

който то протича. За редица почви зависимостта между якостта на едноосен натиск σ_c и q е праволинейна, но при други представлява огъната нагоре крива.

При нашите лъсови почви, които най-често са заздравявани с портландцимент, при q от 6 до 12% след отлежаване 30 дни R_c се изменя от 1,4 до 7,0 МРа (Евстатиев, 1965, 1968). Максималната якост на едноосен натиск при т.н. оптимална зърнометрична смес достига до $R_c = 15,0$ МРа.

С увеличаване на времето на отлежаване якостта нараства значително, като на тридесетия ден R_c нараства около 1,5 пъти, отколкото след една седмица. След две години стойността на R_c при проби от типичен лъос може да се увеличи до 7 пъти в сравнение с тази на тридесетия ден.

Зависимостта между якостта и порестостта, както за много други материали, така и при циментопочвата от лъос е експоненциална (Евстатиев, 1973):

$$R_c = R_c^0 \cdot e^{-zn} \quad (1)$$

където R_c^0 е теоретично най-голямата якост при порестост $n=0$, а z е коефициент, който отчита състава на почвата и количеството на свързващото вещество.

От горната формула се вижда голямото значение на плътността, в случая изразена с n , за якостта на циментопочвата – малко увеличение на n и респективно намаление на обемната плътност на скелета ρ_d води до значително понижаване на R_c . По тази причина голямо значение има лабораторното определяне на уплътнителните характеристики и тяхното спазване в строителството. От досегашните изследвания са установени следните граници на изменение на w_{opt} и $\rho_{d,s}$ при лъсовите почви (табл. 9.1.)

Таблица 9.1. Граници на изменение на w_{opt} и $\rho_{d,s}$

Почвена разновидност	I_p (%)	w_{opt} (%)	$\rho_{d,s}$ (g/cm ³)
песъчлив лъос и лъосовиден пясък	<6	13-15	1,62-1,68
типичен лъос	6-12	14-16	1,68-1,75
глинест лъос	12-18	16-18	

Между отделните якостни параметри на лъсовите циментопочви са установени следните зависимости (Евстатиев, 1973):

- Отношението между якостта на едноосен натиск R_c и якостта на опън R_0 е $\frac{R_c}{R_0} \approx 5$;
- При типичния прахов лъос кохезията c е около 1/3 от якостта на натиск R_c

- Ъгълът на вътрешно триене φ на циментопочвата зависи от показателя на пластичност I_p (Табл. 9.2.)

Таблица 9.2. Зависимост между φ и I_p

I_p	0-5	5-8	8-12	12-30
φ	35-31	31-28	28-25	25-20

Деформационните свойства на циментопочвата зависят от същите фактори, както якостните. От изпитвания с щамп е установено, че модулът на обща деформация E_o се изменя значително с увеличаване на количеството на цимента (Табл.9.3.)

Таблица 9.3. Изменение на E_o в зависимост от q

Количество на цимента, q (%)	Модул на общата деформация, E_o (МПа)
2	50-60
4	75-85
6	90-110
10	200
15	400

Циментопочвата има число на Поасон $\mu=0,13$ и еластичен модул E при количество на цимента 6-8%, 700-800 МПа.

Циментопочвата се характеризира с нисък и устойчив във времето коефициент на филтрация k_f и при повече от приложенията може да се разглежда като практически водонепропусклив материал. От лабораторно изпитване на циментолюсови смеси с $q= 8- 10 \%$ са установени следните стойности за k_f :

- при пясъчлив и глинест лъос - $k_f < 0,005 \text{ m/24h}$;
- за прахов и глинест лъос - $k_f < 0,002 \text{ m/24h}$.

Тези стойности на k_f може да станат още по-ниски, ако към циментопочвената смес се добавят повърхностно-активни вещества или други добавки.

Както беше посочено по-горе, освен с w_{opt} циментопочва се приготвява и с $w > w_{opt}$, като се увеличава количеството на цимента. Това се прави когато не може да се приложи необходимата уплътнителна работа (например, при стеснени строителни условия) и са взети мерки срещу напукването, респективно изсъхването на циментопочвата. Водното съдържание може да достигне и даже да надхвърли w_l . Пластичната циментопочва с $w=w_l$, приготвена от лъос с $q=8-15\%$ има $R_c = 1,5 - 4,0 \text{ МПа}$ на тридесетия ден – стойности, които удовлетворяват изискванията на редица приложения. От изпитвания на проби взети от

екрани с дълговременно отлежаване е установено многократно увеличение на R_c до стойности 10 – 13 МПа (Карастанев, 1988).

Освен естествени почви с портландцимент могат да се заздравяват и отпадъчни материали. В България има значителен опит в заздравяването на отпадъци от ТЕЦ (Todorov and Evstatiev, 1994). Сгуропепелните смеси от утайниците на ТЕЦ заемат обширни площи в редица райони на страната. Те са изучени от гледна точка на приложение в ниското строителство, като е установено, че имат твърде променлив състав, както в даден утайник, така и при различните ТЕЦ (Тодоров, 1985). Най-добре се заздравяват сгуропепелите, получени от донбаски въглища от ТЕЦ с течно шлакоотделяне, например ТЕЦ “Русе”. По зърнометричен състав те съответствуват на едър до прахов пясък.

По-едрата сгуропепел от ТЕЦ “Русе”, заздравена с 10% портландцимент, при $\rho_d=1,72 \text{ g/cm}^3$ след едномесечно отлежаване има $R_c=5,05 \text{ МПа}$. По-дребната сгуропепел с $\rho_d=1,38 \text{ g/cm}^3$ при същите условия е с $R_c=1,75 \text{ МПа}$.

При сгуропепелта от ТЕЦ “Марица –3” и ТЕЦ “Бобов дол”, които са по-финозърнести и имат ρ_d между 1,0 и $0,95 \text{ g/cm}^3$ стойностите на R_c са по-малки - съответно 1,6 и 1,0 МПа.

Подобно на циментопочвите при циментосгуропепелните смеси след едногодишно отлежаване R_c нараства над 2 пъти.

Заздравяване с вар (варопочва)

Заздравяването с негасена и гасена вар на прах се използва при глинести почви с показател на пластичност $I_p > 20$ и с повишено органично съдържание. Обикновено количеството на варта е от 5 до 10%.

Негасената вар на прах се прилага най-вече при заздравяване на преувлажнени глинести почви. При гасенето на варта се ангажира част от свободната вода на почвата. Освен това настъпват благоприятни структурни изменения вследствие насищане на поглъщания комплекс с Ca^{++} .

С гасена вар на прах се заздравяват глини с нормално водно съдържание. При варопочвата за разлика от циментопочвата се установява оптимално количество на добавката, над което R_c намалява или престава да расте. Това количество при типичните глини, например, високопластичната сивозелена плиоценска глина от “Марица изток” е около 13 % с $R_c=2,3 \text{ МПа}$, а при праховите глини е 8 – 10% с $R_c=1,0 – 2,0 \text{ МПа}$.

Якостните и деформационните показатели на варопочвите зависят от същите фактори, както при циментопочвите.

Глинестите почви успешно се заздравяват с пепел от електрофилтрите на ТЕЦ с повишено съдържание на СаО (т.нар. базична пепел) и с пепел от комините на циментовите заводи, която също съдържа голямо количество свободен СаО.

Много изследвания за заздравяване на глинести почви са извършени в Полша, чийто ТЕЦ отделят пепел с голямо количество СаО.

Тъй като малко пепели у нас се получават от въглища с високо карбонатно съдържание са извършени изследвания предимно с пепел от комините на циментовите заводи. Установено е, че при добавка на пепелта в количество 2-3 пъти повече отколкото на варта се получава R_c 2,0 –4,0 МРа (Евстатиев, 1968).

Варта често е използвана за предварителна обработка при заздравяване на глинести почви с портландцимент. Това се прави с цел да се понижи w , когато е над w_{opt} или за по-добра обработваемост на почвата. Във втория случай около едно денонощие преди смесването с цимента, към почвата се добавят 1-2% вар, в резултат на което тя се раздробява и намалява лепливостта си.

Механизъм на заздравяването с портландцимент и вар

Процесите, които протичат в една смес от портландцимент, почва и вода и имащи за резултат формирането на якостта се разделят на *първични* и *вторични* (Mitchell and El Jack, 1966).

Първичните процеси са свързани с хидратацията и втвърдяването на хидратите на клинкерните циментови минерали алит и белит. В резултат на хидратацията и хидролизата се образува гел, обхващащ повече или по-малко почвените частици.

алит C_3S



белит C_2S

Гелът, описан с формула (2) т.е. $xCaO \cdot ySiO_2 \cdot nH_2O$, представлява калциев хидросиликат и схематично се означава с С-S-H.

Калциевите хидросиликати са гелообразни минерали и при нормална температура и налягане имат добре изразени само един-два рентгенографски рефлекса. В своето развитие те претърпяват морфоложки изменения, като след по-малки срокове на отлежаване имат иглообразен и пръчковиден характер, а с течение на времето се превръщат в мрежовидни фази или във фази, изградени от плоски частици с диаметър няколко микрона (фиг. 9.3. и фиг.9.4.).

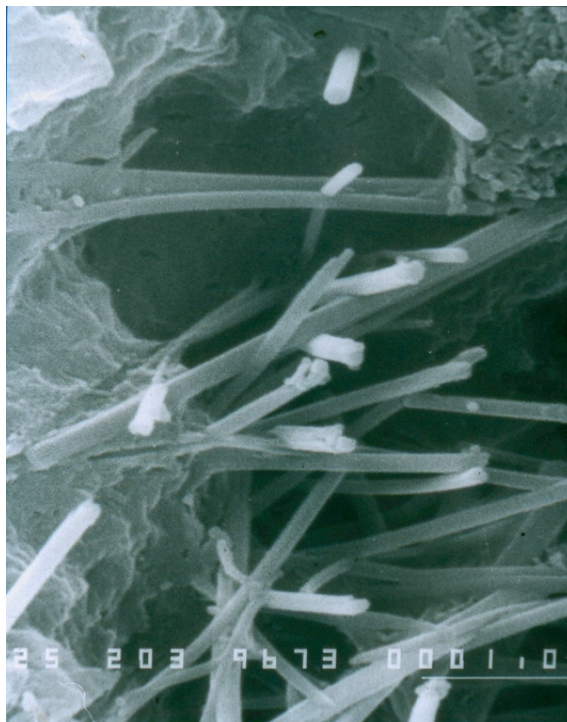
Отделената по реакция (2) вар се дисоциира в поровия разтвор:



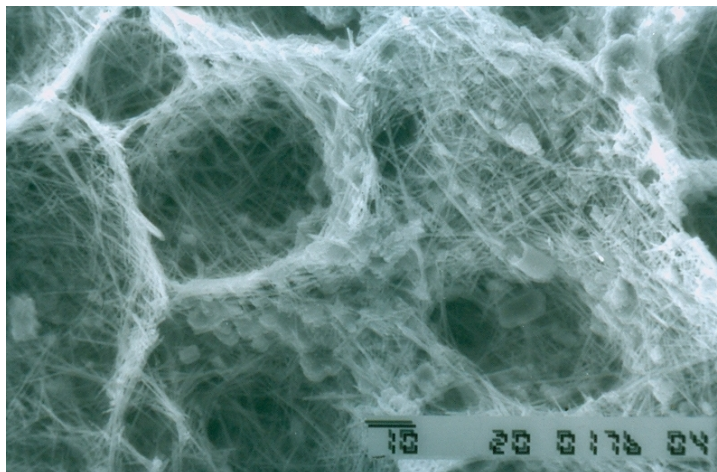
Дисоциираната вар взаимодействува със силикатите и алуминатите от почвата, в резултат на което възникват калциеви хидросиликати и калциеви хидроалуминати:



Процесите, които протичат по реакциите (4) и (5) Mitchell нарича *вторични* и те имат голямо значение за формирането на крайната якост на циментопочвата. Заедно с карбонитизацията на варта те са главните носители на якостта на варопочвата.



Фиг. 48. Игловидни калциеви хидросиликати, които свързват почвените частици в ранните срокове на отлежаване. Увеличение 20 000 пъти



Фиг. 49. Мрежовидни хидросиликати, свързващи почвените частици след 6 годишно отлежаване (от екран на водоизравнител). Увеличение 750х.

Реакциите (4) и (5) са известни още като *пуцоланови реакции*. Те най-напред са изучени в смеси от вар с вулкански скали, които в Италия се наричат пуцолани, а след това са установени и при други алумосиликатни минерали във фино дисперсно състояние.

Изследвания върху формирането на якостта на циментопочвата и варопочвата и на циментосгуропепелната смес са извършени и у нас (Евстатиев, 1984, Todorov and Evstatiev, 1994)

За формирането на якостта имат влияние и физикохимичните процеси, изразяващи се в насищане на поглъщащия комплекс с Ca^{++} , в свиване на водните обвивки около частиците и в тяхното агрегиране.

Приложения на заздравяването с неорганични свързващи вещества

Заздравяването на строителните почви е използвано главно в пътното строителство. Само в САЩ има над 1 милиард m^2 пътища, чиято основа е от заздравена местна почва. По обем на вложените заздравени почви в пътното строителство след това са Франция, Полша, Русия, Англия и други страни. Използувана е както стационарно смесване, така и смесване на място. Заздравяването с цимент и вар се прилага още в летищното, промишленото, гражданското, хидротехническото, хидромелиоративното, военното и селскостопанското строителство.

Заздравяването с портландцимент се прилага интензивно предимно след Втората световна война. От началото на осемдесетте години, то постепенно се измества от други методи, например в пътното строителство от подобряването с геосинтетични материали. През последните десет години продължава да се прилага, но далеч по-малко отколкото преди 30 – 40 години.

Заздравяването с портландцимент има най-широко приложение за изграждане на основа на различни пътища - от селскостопански и горски до първокласни магистрали. Освен това по света са построени десетки летища, стотици паркинги, селскостопански площадки, училищни дворове, хиляди километри тротоари и др. с основа от циментопочва вместо от трошен камък, чакъл или баластра.

У нас заздравяване с портландцимент на лъсова почва чрез смесване с пътна фреза е използвано при строителството на първокласен път в района на гр. Белене. В гр. Смядово е построена улица с основа от циментопочва. Заздравяване с портландцимент на пътна основа от речна баластра и отсепки е приложено в отделни участъци на пътните магистрали “Тракия” и “София-Кулата”. Заздравяване с гранулиран шлак от Кремиковци е приложено при изграждане на околоръстното шосе в София.

В началото на 60-те години на XX век, след успешни опити в лабораторията и на място, чрез смесване на място на плиоценска глина с негасена вар и нейните заместители - летяща пепел от ТЕЦ и от Циментовия завод в Димитровград, бяха заздравени участъци от временните ж.п. линии в рудник “Трояново” (Евстатиев, 1968). Временните ж.п. линии, по които се пренася глината от разкривката, се изместват непрекъснато и това създава проблеми в осигуряването на баластра и трошен камък за тяхната основа. Освен това баластрата и камъка се смесват с високопластичната глина и не може да се използват

втори път. Заздравяването се прилагаше успешно няколко години през дъждовните периоди от годината.

Уплътнена смес от сгуропепел и пепел от циментовия завод “Вулкан” е приложена при строителство на алеино – паркови настилки в Димитровград. От сгуропепелна смес, заздравена с 6% цимент през 1969 г. е изградена основата на 100 метров участък на средно натоварената улица “Босилекград” в гр. Русе. След 40 годишна експлоатация улицата е в много добро състояние.

В хидротехническото строителство с циментопочва са правени противоерозионни екрани на земнонаситни стени. (вж. гл. 11) В Калифорния е построена цяла язовирна стена от този материал. Приложенията на циментопочвата и варопочвата в промишленото, гражданското и хидромелиоративно строителство ще бъдат разгледани в следващите глави.

През Втората световна война циментопочва е използвана при строителство на военни пътища и летища, на дълговременни огневи точки и др.

В редица държави циментопочвени тухли и блокчета са използвани за строителство на жилищни и селскостопански сгради. У нас ограничено опитно производство на циментопочвени тухли е направено през 60-те години на Севлиевския керамичен завод, където се разполагаше с подходяща за целта преса.

Заздравяването с водно стъкло на повърхността се прилага рядко, например в Полша при някои техногенни почви. Водното стъкло се използва като добавка при заздравяване на пясъчливи почви с портландцимент, като допринася за увеличаване на якостта в ранните срокове на отлежаване и подобрява водоплътността и мразоустойчивостта.

3. Заздравяване на строителни почви с органични свързващи вещества

Заздравяването с органични свързващи вещества се използва в пътното строителство от 30^{-те} години. Най-много е прилагано в СССР, където са изградени няколко хиляди километра пътища, които имат основа от местна почва, заздравена с течен битум, битумна емулсия и смеси на тези вещества с различни добавки (Безрук, 1965). Други страни, които са прибягвали до него са САЩ, Англия, Франция, Германия, Полша, Унгария и Румъния. За разлика от СССР в тези страни заздравяването с органични свързващи вещества е намерило по-малко приложение, отколкото с неорганични. В България то не е използвано, поради високата цена на органичните свързващи вещества. По тази причина ще бъде разгледано накратко..

Заздравяването на повърхността с органични свързващи вещества се изпълнява по същите технологични схеми, както при циментопочвата. Приготвянето на сместа става стационарно или на място, а уплътняването се прави с пневмоколесни с валяци.

Първоначално за заздравяване е бил използван горещ битум, но този начин е изоставен поради по-големите енергийни разходи и необходимостта да се изсушава строителната почва. Последвало е приложение на течни битуми и катрани, които накрая са заменени с битумни емулсии т.е. битум, разтворен във вода с емулгатори – повърхностно активни вещества – ПАВ.

Важна особеност на заздравяването с органични свързващи вещества е, че трябва стриктно да се спазват рецептурите - незначително увеличение или намаление на свързващото вещество от оптималното предизвиква чувствително понижение на якостта.

През последните десетилетия са използвани комплексни методи за заздравяване, при които се извършва предварителна обработка на строителната почва с няколко процента портландцимент или вар и след това са смесвани органичните свързващи вещества.

Заздравяване с битуми

Заздравяването се дължи главно на хемосорбционно взаимодействие между битумните вещества и повърхността на почвените частици. Ефектът от това взаимодействие е по-голям ако почвата е наситена на Ca^{++} . Най-добри резултати от заздравяването с битуми се постигат при карбонатни глинести пясъци и леки пясъчливи глини, не съдържащи голямо количество водоразтворими соли и имащи неутрална реакция. Оптималното количество на битума е от 4-5% при пясъчливите почви до 12-14% при глинестите, w_{opt} е от 4-8%, а R_c се движи между 4 и $14 \times 10^5 \text{Pa}$.

През последните десетилетия заздравяването се извършва главно с битумни емулсии поради лесното им смесване с почвата и поради това, че позволяват да се работи с почви с по-високо водно съдържание от w_{opt} . При заздравяване с течни битуми ако водното съдържание превишава само с 1-2% w_{opt} и ако температурата намалее до +10% не може да се осигури равномерно разпределение на свързващото вещество по повърхността на частиците.

При заздравяване с битумна емулсия при използване на добавки от гасена вар се постига неколkokратно по-голяма якост.

Например при заздравяване на пясъчлива глина по данни от Безрук (1965) с количество свързващо вещество 4-6% и вар 3,0-3,5% е постигнато $R_c = 2,5 - 3,0 \text{ MPa}$.

Заздравяване на строителни почви на повърхността със синтетични полимери

Изследванията са започнали през 40-те години в САЩ, а след това са продължени в СССР, Франция, Полша и много други страни.

Използвани са фурфурол-анилинови и акрилови съединения, карбамидни, резорцинови и епоксидни смоли, различни силициево-органични съединения, лигнинсулфонови и лигнинпротеинови комплекси и др. Главното преимущество на този вид заздравяване е, че се използват

неколкократно по-малки количества свързващо вещество, отколкото при заздравяване с портландцимент, битум или вар.

От изброените съединения сравнително по-широко приложение е получило заздравяването с фурфурол-анилинова смола, която е продукт на поликондензация на фурфурол и анилин, в съотношение 30:70%. Добавя се към почвата в количество 2%.

Фурфуролът е алфа-алдехид от реда на фурана - $C_4H_3O.CHO$.

Анилинът е ароматичен амин - $C_6H_5NH_2$. Анилинът е силно отровен.

Най-пригодни за заздравяване с фурфурол - анилинова смола са глинестите пясъци и пясъчливи глинени с $pH < 6,5$, а най-непригодни са почвите с алкална реакция. Достига се висока якост – повече от $20-30 \times 10^5 Pa$.

Карбамидната смола също е приложима при почви с кисела реакция или трябва да се добавя втвърдител – солна, фосфорна и други киселини.

Полиакриламидната смола, която е сравнително скъпо свързващо вещество, дава добър ефект при добавка към почвата в части от процента. По тази причина тази смола и други подобни на нея представляват интерес за прокарване на военни пътища. Американците са използвали фурфурол- анилинова смола при десанта на френския бряг по време на Втората световна война.