

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7443

УДК 624.138.232

Статья

Исследование набора прочности фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозной автомобильной дороги

Чудинов Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей Уральского государственного лесотехнического университета (Российская Федерация), chudinovsa@m.usfeu.ru

Получена: 8 октября 2023 / Принята: 4 апреля 2024 / Опубликовано: 12 апреля 2024

Аннотация: Одним из ключевых факторов развития лесопромышленного комплекса России является увеличение доступных лесосырьевых ресурсов, которое должно обеспечиваться постоянным расширением сети и повышением качества лесовозных автомобильных дорог. Многолесные районы, как правило, значительно удалены от мест добычи и производства традиционно используемых дорожно-строительных материалов: песка, щебня, гравия, щебёночно-песчаных смесей, что приводит к росту затрат на их транспортировку и стоимости строительства лесовозных автомобильных дорог в целом. В данных условиях является эффективным использование технологии укрепленных местных грунтов для строительства лесовозных автомобильных дорог, обеспечивающей высокое качество и долговечность дорожной одежды при снижении стоимости строительно-монтажных работ. Учитывая высокие транспортные нагрузки и распространённые в лесной зоне слабые глинистые грунты в основании земляного полотна, целесообразно применение фиброцементогрунта для устройства слоёв дорожных одежд. Благодаря дисперсному армированию цементогрунтовой матрицы материала, распределённой по всему его объёму фибры, фиброцементогрунт имеет более высокие прочностные показатели, морозостойкость и трещиностойкость конструкции дорожной одежды по сравнению с цементогрунтом. Процесс структурообразования фиброцементогрунта проходит при взаимодействии цементного камня и фибры, поэтому исследование динамики набора прочности данного материала является актуальным. Проведены лабораторные исследования физико-механических показателей при 7, 28 и 56 сутках набора прочности фиброцементогрунта. Также проведены опытно-производственные исследования динамики увеличения модуля упругости фиброцементогрунтового

покрытия дорожной одежды на опытном участке лесовозной автомобильной дороги. На основе полученных результатов исследований прочности на сжатие, прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов установлено влияние добавки фибры на процесс структурообразования и динамику набора прочности материала. При строительстве опытного участка лесовозной автомобильной дороги доказана техническая и технологическая возможность устройства фиброцементогрунтовых слоёв конструкций лесовозных автомобильных дорог. Установлена зависимость фактических показателей модуля упругости фиброцементогрунтового покрытия от времени набора прочности материала, а также минимальный временной период, необходимый для достижения расчётного модуля упругости конструкции дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги. Устройство фиброцементогрунтовых слоёв дорожных одежд требует использования минимального набора дорожно-строительной техники и количества привозных дорожно-строительных материалов, что существенно снижает стоимость строительно-монтажных работ, а также, благодаря длительному сроку службы дорожных одежд, — затраты на эксплуатацию лесовозных автомобильных дорог.

Ключевые слова: фиброцементогрунт; лесовозная дорога; дорожная одежда; модуль упругости; структурообразование; дисперсное армирование

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7443

Article

Study of the Strength Gain of Fiber Cement-modified Soil in the Logging Road Pavement

Sergey Chudinov

Ph. D. in engineering, associate professor, Head of Department of Highways, Bridges and Tunnels, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), chudinovsa@m.usfeu.ru

Received: 8 October 2023 / Accepted: 4 April 2024 / Published: 12 April 2024

Abstract: One of the key factors in the development of the Russian timber industry is the increase in available timber resources, which should be ensured by the constant expansion of the network and improvement of the quality of timber roads. Well forested areas, as a rule, are significantly removed from the places of extraction and production of traditionally used road-building materials: sand, crushed stone, gravel, crushed stone-sand mixtures, which leads to an increase in the cost of their transportation and the cost of constructing logging roads in general. In these conditions, it is effective to use the technology of strengthened local soils for the construction of logging roads, which ensures high quality and durability of road pavement while reducing the cost of construction and installation work. Considering the high transport loads and weak clay soils at the base of the roadbed that are common in the forest zone, it is advisable to use fiber cement-modified soil for constructing layers of road pavements. On account to the dispersed reinforcement of the cement-soil matrix of the material with fiber distributed throughout its volume, the fiber-cement soil has higher strength indicators, frost resistance and crack resistance of the road pavement structure compared to cement-modified soil. The process of structure formation of fiber cement soil occurs through the interaction of cement stone and fiber, so the study of the dynamics of this material strength gain is relevant. Laboratory studies of physical and mechanical parameters were conducted at 7, 28 and 56 days of strengthening of fiber cement soil. Also, pilot production studies were conducted on the dynamics of increasing the elasticity modulus of fiber cement soil pavement on a trial pavement section of a logging highway. Based on the results obtained from studies of compressive strength and tensile strength during splitting of fiber-cement soil samples, the influence of fiber admixture on the process of structure formation and on the dynamics of the material strength gain was established. During the construction of a trial pavement section of a logging highway, the technical and technological feasibility of fiber cement-soil layers establishment in logging

highway pavement structures was proven. The dependence of the actual elastic modulus of the fiber cement-soil pavement on the time of material strength gain, as well as the minimum time period required to achieve the calculated elastic modulus of the road pavement structure of a timber highway, has been traced. The construction of fiber cement-soil layers of road pavements requires a minimum set of road construction equipment and the amount of imported road construction materials, thus significantly reducing the cost of construction and installation work, and also, due to the long service life of road pavements, the cost of logging roads maintenance.

Keywords: fiber cement soil; logging road; road pavement; elastic modulus; structure formation; dispersed reinforcement

1. Введение

Развитие отечественного лесопромышленного комплекса неразрывно связано с совершенствованием транспортной инфраструктуры, в т. ч. с повышением качества и протяжённости сети лесовозных автомобильных дорог. Сложные условия лесной зоны: преобладание слабых грунтов, значительное удаление от мест производства и поставки дорожно-строительных инертных материалов (песка, щебня, гравия, щебёночно-песчаных смесей), а также высокие транспортные нагрузки от грузовой техники по перевозке лесоматериалов требуют поиска эффективных технологий, которые позволят осуществлять строительство лесовозных автомобильных дорог с высоким качеством и низкой стоимостью строительно-монтажных работ. Одной из таких технологий является устройство конструктивных слоёв дорожных одежд из укреплённых грунтов [1—3].

Традиционно используемым вяжущим материалом для укрепления грунтов является портландцемент [4]. Цементогрунты обладают высокими прочностными показателями и морозостойкостью, однако в условиях слабых грунтов в основании земляного полотна и при высоких нагрузках от грузовой техники данный материал имеет недостаточную трещиностойкость [5], [6]. Для повышения прочностных, транспортно-эксплуатационных показателей и срока службы цементогрунтовых слоёв конструкций лесовозных автомобильных дорог в практике дорожного строительства применяются различные активные добавки, вводимые в состав цементогрунтовых смесей [7—11]. Современным эффективным решением задачи повышения качества цементогрунтовых слоёв конструкций лесовозных автомобильных дорог является введение в состав цементогрунтовой смеси добавки фибры. Распределённая в объёме цементогрунтовой матрицы фибра дисперсно армирует материал, воспринимая за счёт осевого растяжения внешние нагрузки, и существенно повышает трещиностойкость и прочностные показатели фиброцементогрунтов [12].

В фиброцементогрунтах может использоваться фибра на основе базальтового, стеклянного, полипропиленового или углеродного волокна. Волокна фибры, закреплённые внутри кристаллической цементогрунтовой структуры, создают единый композиционный каркас, эффективно воспринимающий внешние нагрузки. Для приготовления фиброцементогрунтов с заданными физико-механическими характеристиками требуется соблюдение оптимальных дозировок компонентов смеси: грунта, портландцемента, фибры и воды. Подобранный оптимальный состав фиброцементогрунтовой смеси обеспечивает требуемые прочностные показатели и морозостойкость, а также трещиностойкость материала.

Высокие физико-механические показатели фиброцементогрунтов обусловлены прочной композиционной кристаллической фиброцементогрунтовой структурой. Процесс формирования такой структуры происходит во времени в условиях гидратации и гидролиза портландцемента при взаимодействии с частицами грунта и фибры. Поэтому исследование

процессов структурообразования по динамике набора прочности фиброцементогрунтов в лабораторных условиях и на экспериментальном участке лесовозной автомобильной дороги является актуальным.

Целью работы является исследование в лабораторных условиях прочностных показателей при разных сроках твердения фиброцементогрунтовых образцов, а также модуля упругости фиброцементогрунтового покрытия лесовозной автомобильной дороги на разных сроках набора прочности в реальных условиях.

2. Материалы и методы

Для проведения лабораторных исследований динамики изменения прочности на сжатие и прочности на растяжение при раскалывании образцов при 7, 28 и 56 сутках твердения были приготовлены различные составы фиброцементогрунтовых смесей с различным содержанием фибры. В качестве фибры использовались базальтовые волокна на основе отходов производства теплоизоляционных плит «Тизол» в г. Нижняя Тура (Свердловская область).

Производство базальтовых теплоизоляционных плит ведётся на основе сырья из горных пород базальтовой группы, которые подвергаются расплавлению и получению базальтовых волокон, из которых проводят формование минераловатных изделий. В процессе производства образуются отходы в виде базальтовых волокон, которые можно применять для приготовления фиброцементогрунтовых смесей, поскольку они имеют высокую прочность на растяжение, химическую стойкость и устойчивость к высоким температурам.

Фиброцементогрунтовая смесь была приготовлена на основе природного грунта — суглинка тяжёлого песчанистого (таблица 1), отобранного на лесовозной автомобильной дороге на территории ГКУ Свердловской области «Карпинское лесничество», обслуживаемой ООО «ОУС Леском». Также в состав фиброцементогрунтовой смеси входили портландцемент ЦЕМ II/B-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 и вода по ГОСТ 51232-98.

Таблица 1. Характеристика природного грунта

Table 1. Characteristics of natural soil

Наименование грунта	Удельный вес грунта, т/м ³	Влажность на границе текучести, % по массе	Влажность на границе раскатывания, % по массе	Число пластичности	Оптимальная влажность, % по массе	рН грунта	Содержание гумусовых веществ
Суглинок тяжёлый песчанистый	1,48	26	13	13	15	6,5	1,8

Для проведения исследований были подготовлены следующие составы укрепленного грунта, отличающиеся количественным содержанием фибры (таблица 2). Изготовление фиброцементогрунтовых образцов и лабораторные исследования прочностных показателей проведены в соответствии с ГОСТ Р 70452-2022 в условиях полного водонасыщения.

Таблица 2. Составы укрепленного грунта

Table 2. Strengthened soil compositions

Компоненты состава, % от массы сухого грунта	Составы укрепленного грунта		
	№ 1	№ 2	№ 3
Портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б	8,0	8,0	8,0
Фиброволокно: базальтовое (отход производства базальтовых теплоизоляционных плит)	0	3,5	7,0
Вода	15,0	15,0	15,0

В целях проведения натуральных опытно-экспериментальных исследований по определению показателя модуля упругости фиброцементогрунтового покрытия дорожной одежды переходного типа в августе 2023 г. был построен опытный участок на лесовозной автомобильной дороге на территории ГКУ Свердловской области «Карпинское лесничество», обслуживаемой ООО «ОУС Леском».

Дорожная одежда на опытном участке представляла собой однослойную конструкцию из фиброцементогрунтового слоя толщиной 0,25 м, уложенного на естественный грунт земляного полотна из суглинка тяжёлого песчанистого, характеристики которого представлены в таблице 1. Марка по прочности цементогрунта и фиброцементогрунта подобранных оптимальных составов № 1 и № 2 (см. таблицу 2) соответствовала марке М40 А. Фиброцементогрунтовая смесь была изготовлена на основе местного грунта — суглинка тяжёлого песчанистого (см. таблицу 1) и компонентов: фибры на основе базальтового волокна из отходов производства теплоизоляционных плит «Тизол», портландцемента ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108-2020 и воды по ГОСТ 51232-98. Работы по устройству фиброцементогрунтового покрытия проводились в порядке, представленном в таблице 3.

Модуль упругости при динамическом нагружении фиброцементогрунтового покрытия дорожной одежды определялся через 7, 28 и 56 суток набора прочности при помощи прибора ПДУ-МГ4. Для установления теоретических значений модуля упругости конструкции дорожной одежды на построенном участке лесовозной автомобильной дороги был произведён расчёт прочности в программном комплексе «Кредо Радон 4.2» в соответствии с ПНСТ 542-2021. На основе проведённого расчёта теоретическое значение модуля упругости конструкции дорожной одежды на опытном участке лесовозной автомобильной дороги со слоем покрытия из укрепленного грунта составило 92 МПа.

Таблица 3. Технологическая последовательность устройства фиброцементогрунтового покрытия дорожной одежды

Table 3. Technological sequence of installation of fiber cement soil pavement pavement

№ операции	Операции технологического процесса
1	Размельчение грунта прицепным ресайклером за 2 прохода по одному следу
2	Распределение портландцемента на поверхность грунта
3	Смешение портландцемента с грунтом прицепным ресайклером за 1 проход по одному следу
4	Распределение базальтового фиброволокна на поверхность цементогрунтовой смеси
5	Смешение базальтового фиброволокна с грунтом прицепным ресайклером с внесением воды до оптимальной влажности фиброцементогрунтовой смеси за 1 проход по одному следу
6	Предварительная подкатка основания катком на пневматических шинах за 2 прохода
7	Профилирование проезжей части автогрейдером
8	Окончательное уплотнение проезжей части катком на пневматических шинах за 13 проходов по одному следу
9	Уход за укрепленным грунтом путём нанесения на его поверхность слоя битумной эмульсии и ограничения движения транспорта в течение 7 суток

3. Результаты

На основании результатов проведённых исследований динамики изменения прочности при сжатии в зависимости от времени твердения фиброцементогрунтовых образцов, при оптимальном содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта через 7 суток прочность при сжатии составила 3,6 МПа, что на 11,1 % выше прочности при сжатии цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 28 суток прочность при сжатии фиброцементогрунтовых образцов составила 5,27 МПа, что на 15,6 % выше прочности при сжатии цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 56 суток прочность при сжатии фиброцементогрунтовых образцов составила 5,56 МПа, что на 16,1 % выше прочности при сжатии цементогрунтовых образцов без добавки фибры (рисунок 1).

Сравнительный анализ результатов динамики изменения прочности при сжатии в зависимости от времени набора прочности фиброцементогрунтовых образцов при содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 7,0 % от массы сухого грунта показал более низкую прочность — от 4,2 до 5,9 % по сравнению с фиброцементогрунтом с добавкой базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 56 суток (рисунок 2).

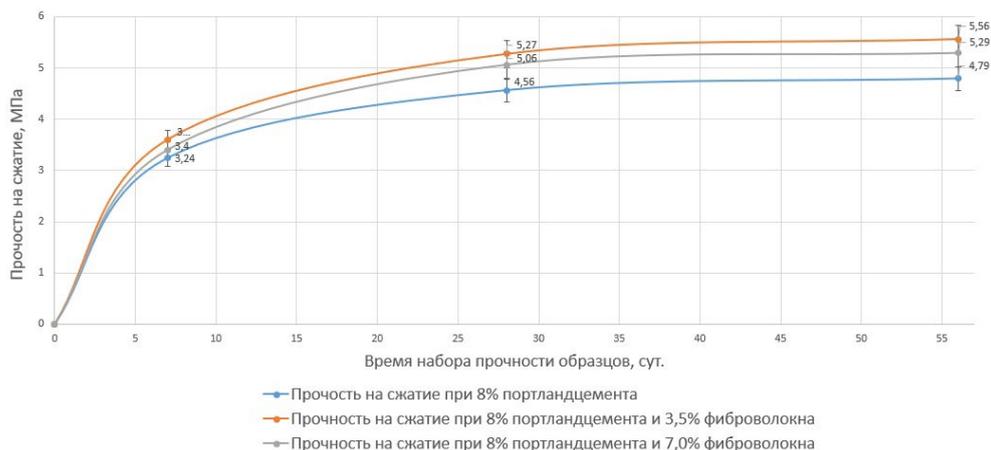


Рисунок 1. Изменение прочности на сжатие в зависимости от времени твердения образцов

Figure 1. Change in compressive strength depending on the hardening time of samples

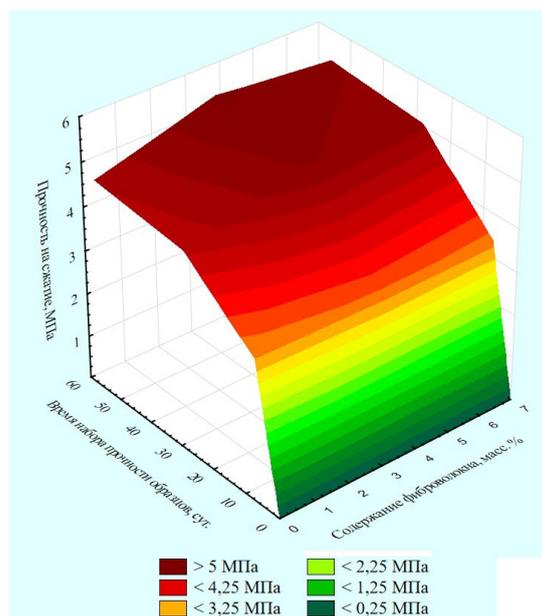


Рисунок 2. Поверхность отклика прочности на сжатие в зависимости от содержания фиброволокна и времени набора прочности фиброцементогрунта

Figure 2. Surface response of compressive strength depending on the fiber content and time of strengthening of fiber cement soil

Исследование динамики изменения прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от времени набора прочности фиброцементогрунтовых образцов также показало, что при оптимальном содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта через 7 суток прочность на растяжение

при раскалывании составила 0,78 МПа, что на 16,4 % выше прочности на растяжение при раскалывании цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 28 суток прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов составила 1,13 МПа, что на 18,9 % выше прочности на растяжение при раскалывании цементогрунтовых образцов без добавки фибры. Через 56 суток прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов составила 1,20 МПа, что на 20,0 % выше прочности на растяжение при раскалывании цементогрунтовых образцов без добавки фибры (рисунок 3).

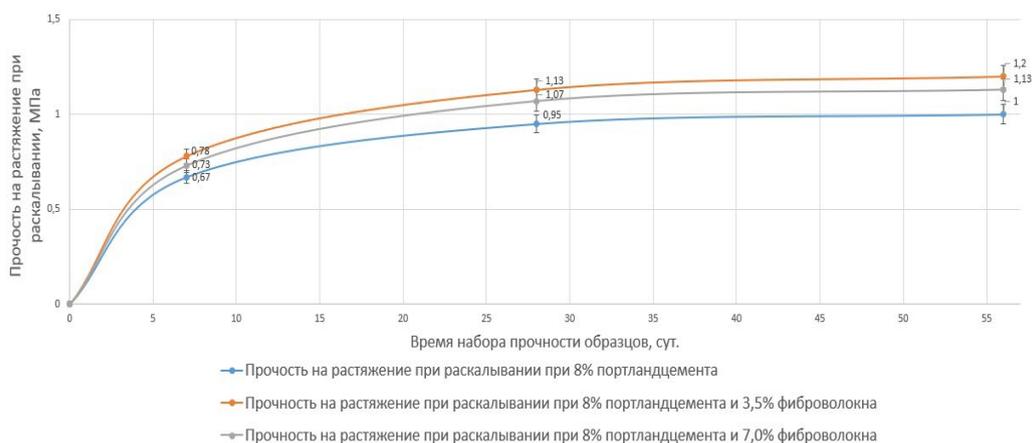


Рисунок 3. Изменение прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от времени твердения образцов

Figure 3. Change in tensile strength during splitting depending on the hardening time of samples

Показатель прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от времени набора прочности фиброцементогрунтовых образцов при содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 7,0 % от массы сухого грунта показал более низкую прочность — от 5,6 до 6,8 % по сравнению с фиброцементогрунтом с добавкой базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 56 суток (рисунок 4).

На основе результатов проведённых исследований изменения модуля упругости дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги с фиброцементогрунтовым покрытием при содержании добавки базальтового фиброволокна в количестве 3,5 % от массы сухого грунта через 7 суток твердения модуль упругости составил 98 МПа, что на 6,5 % выше расчётного значения модуля упругости. Через 28 суток твердения модуль упругости фиброцементогрунтового покрытия составил 107 МПа, что на 16,3 % выше расчётного значения модуля упругости. Через 56 суток твердения модуль упругости фиброцементогрунтового покрытия составил 115 МПа, что на 25,0 % выше расчётного значения модуля упругости (рисунок 5).

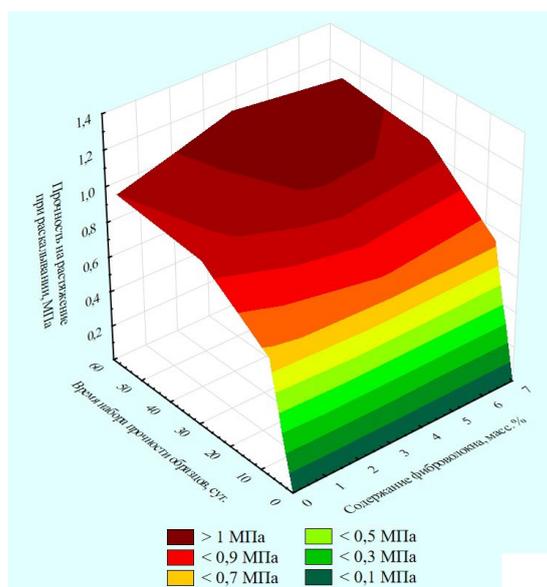


Рисунок 4. Поверхность отклика прочности на растяжение при раскалывании в зависимости от содержания фиброволокна и времени набора прочности фиброцементогрунта

Figure 4. Surface response of tensile strength during splitting depending on the fiber content and the time of strengthening of the fiber cement soil

Модуль упругости дорожной одежды с фиброцементогрунтовым покрытием в пределах всего рассматриваемого периода набора прочности до 56 суток также имеет большее значение — от 5,4 до 10,8 % по сравнению с показателями модуля упругости цементогрунтового покрытия (рисунок 6).

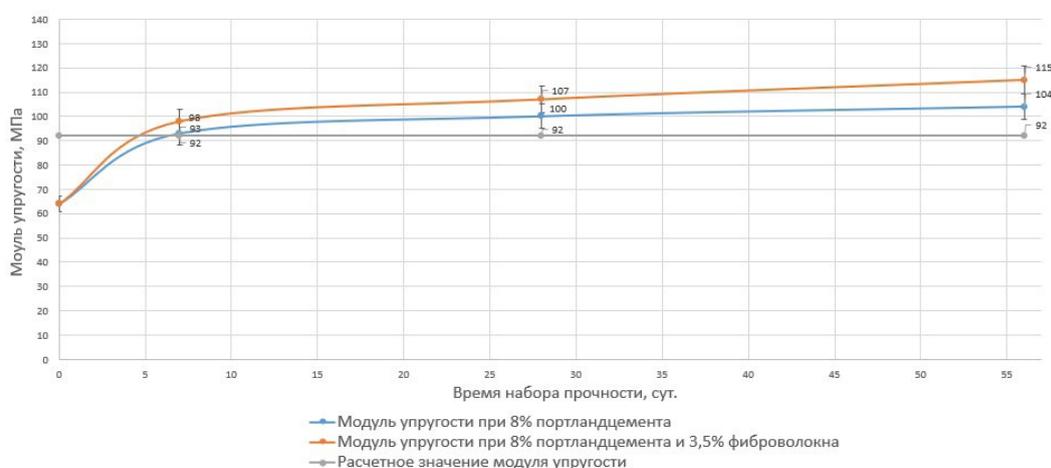


Рисунок 5. Изменение модуля упругости в зависимости от времени набора прочности покрытия

Figure 5. Change in elastic modulus depending on the time of coating hardening

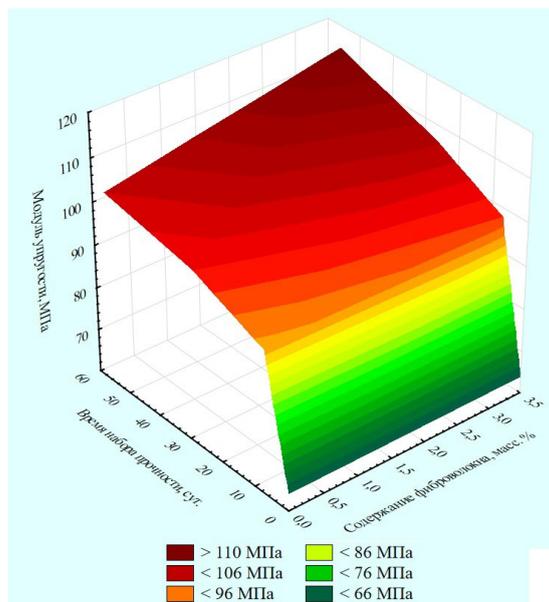


Рисунок 6. Поверхность отклика модуля упругости в зависимости от содержания фиброволокна и времени набора прочности покрытия

Figure 6. Surface response of the elastic modulus depending on the fiber content and the time of coating hardening

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, результаты исследований показали высокую эффективность применения добавки базальтового фиброволокна в составе фиброцементогрунтов для применения в конструктивных слоях дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. Добавка фибры позволяет увеличивать прочностные показатели, в особенности прочность на растяжение при раскалывании до 20 %, что способствует высокой трещиностойкости фиброцементогрунтовых покрытий дорожных одежд. При этом для получения максимальных прочностных показателей требуется оптимальное содержание добавки базальтового фиброволокна в составе фиброцементогрунтовой смеси в количестве 3,5 % от массы сухого грунта, что способствует формированию однородной кристаллической дисперсно-армированной структуры материала.

Прочностные показатели фиброцементогрунта значительно превышают показатели цементогрунтов без добавки фибры. При этом в период с 28 до 56 суток твердения рост прочности фиброцементогрунтов происходит более интенсивно по сравнению с цементогрунтом, что свидетельствует об эффективном формировании кристаллической дисперсно-армированной структуры материала в процессе гидратации и гидролиза портландцемента при взаимодействии с частицами грунта и фибры.

Дорожная одежда лесовозной автомобильной дороги с фиброцементогрунтовым покрытием через 56 суток твердения имеет фактический показатель модуля упругости,

превышающий расчётный на 25,0 %, что свидетельствует о высоком гарантийном запасе, надёжности и длительном сроке её службы в условиях высоких транспортных нагрузок. При этом благодаря высоким прочностным показателям, минимальный период достижения фактического модуля упругости до расчётного показателя 92 МПа у фиброцементогрунтового покрытия составил 5 суток, а у цементогрунтового покрытия — 7 суток.

Лабораторные исследования и строительство опытного участка лесовозной автомобильной дороги доказали техническую и технологическую возможность, а также высокую эффективность устройства фиброцементогрунтовых слоёв в конструктивных слоях дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

Список литературы

1. Чудинов С. А. Укреплённые грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 174 с.
2. Roger L. B., Brockenbrough P. E. Highway Engineering Handbook. New York: McGraw-Hill, 2009. 885 p.
3. Бавбель Е. И., Игнатенко В. В., Науменко А. И. Конструирование и методика расчёта дорожных одежд из укреплённых грунтов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 58—60.
4. Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 817. P. 1—9. DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012007.
5. Чудинов С. А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 164 с.
6. Лыщик П. А., Плышевский С. В., Науменко А. И. Использование комплексного вяжущего для укрепления грунтов земляного полотна лесных автомобильных дорог // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2013. № 2 (158). С. 39—42.
7. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil — A review // Environmental Technology & Innovation. 2020. No. 20. P. 54—61.
8. Jones C. Soil consolidation and strengthening using electrokinetic geosynthetics — concepts and analysis // Geosynthetics. 2006. P. 411—414.
9. Голубева Е. А., Плахотный А. Б. Практика применения дорожного полимерцементогрунта на федеральной трассе «Амур» // Техника и технологии строительства. 2017. № 3 (11). С. 45—49.
10. Beeghly J., Schröck M. Dredge material stabilization using the pozzolanic or sulfo-pozzolanic reaction of lime by-products to make an engineered structural fill // International Journal of Soil, Sediment and Water. 2010. No. 3 (11). P. 1—21.
11. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes / L. Mavliev, P. Bulanov, E. Vdovin [et al.] // ZKG: zement-kalk-gips international. 2016. No. 9 (69). P. 49—54. EDN: XFPMSL.
12. Патент 2785742 С1 РФ, МПК E02D 3/12, E01C 3/04, E01C 7/36, C04B 28/04, C04B 111/20. Фиброцементогрунтовая смесь: № 2022105876: заявл. 05.03.2022: опубл. 12.12.2022 / С. А. Чудинов.

References

1. Chudinov S. A. *Reinforced soils in the construction of logging roads*. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 174 p. (In Russ.)
2. Roger L. B., Brockenbrough P. E. *Highway Engineering Handbook*. New York, McGraw-Hill, 2009. 885 p.
3. Bavbel E. I., Ignatenko V. V., Naumenko A. I. Design and calculation methods for pavements from reinforced soils. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2016, no. 2 (184), pp. 58—60. (In Russ.)
4. Chudinov S. Improving the physical and mechanical properties of fortified soil for road construction in the forest zone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 817, pp. 1—9. doi: 10.1088/1757-899X/817/1/012007.
5. Chudinov S. A. *Improving the technology of soil stabilization in the construction of roads of the forestry complex*. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2022. 164 p. (In Russ.)
6. Lyshchik P. A., Plyshevsky S. V., Naumenko A. I. The use of a complex binder to strengthen the subgrade soils of forest roads. *Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2013, no. 2 (158), pp. 39—42. (In Russ.)
7. Vijayan D. S. Effect of Solid waste based stabilizing material for strengthening of Expansive soil — A review. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, no. 20, pp. 54—61.
8. Jones C. Soil consolidation and strengthening using electrokinetic geosynthetics — concepts and analysis. *Geosynthetics*, 2006, pp. 411—414.
9. Golubeva E. A., Plahotniy A. B. The practice of using road polymer cement soil on the federal highway «Amur». *Technique and technology of construction*, 2017, no. 3 (11), pp. 45—49 (In Russ.)
10. Beeghly J., Schröck M. Dredge material stabilization using the pozzolanic or sulfo-pozzolanic reaction of lime by-products to make an engineered structural fill. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 2010, no. 3 (11), pp. 1—21.
11. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zaharov V., Gimazov A. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes. *ZKG: zement-kalk-gips international*, 2016, no. 9 (69), pp. 49—54. EDN: XFPMSL.
12. Chudinov S. A. Fiber cement soil mixture. Patent RF, no. RU 2785742 C1, 2022. (In Russ.)