

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 234–246.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 234–246.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.54

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-234-246

EDN: SLYJRM

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК, СНИЖАЮЩИХ СОДЕРЖАНИЕ ВОДОРАСТВОРИМОГО ХРОМА (Cr^{6+}) В ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЕ ДЛЯ ХРИЗОТИЛЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Александр Александрович Крутилин¹,
Татьяна Владимировна Крапчетьева²,
Надежда Александровна Инькова¹, Олеся Константиновна Пахомова¹

¹Себряковский филиал Волгоградского государственного
технического университета, г. Михайловка, Россия

²АО «Себряковцемент», г. Михайловка, Россия

Аннотация. Актуальность. В мировой практике последних десятилетий отмечается ужесточение требований к качеству строительных материалов, особенно к их экологической безопасности. Для цемента и цементных композиций эта проблема связана со снижением в них содержания хрома, который относится ко второму классу опасности – высоко опасные соединения. С экологической точки зрения наибольшую опасность представляет шестивалентный хром $\text{Cr}(\text{VI})$, особенно водорастворимый, являющийся по своей химической природе канцерогенным продуктом, вызывающим нарушение работы иммунной системы.

Цель. Подобрать дозировку дехроматора в весовом количестве (г/т цемента), снижающую содержание водорастворимого хрома (Cr^{6+}) в портландцементе, применяемом для хризотилцементных изделий, до нормируемого значения не более 0,0002 %. Провести сравнительный анализ добавок двух разных компаний.

Испытания. На первом этапе лабораторных испытаний был произведен совместный помол портландцементного клинкера и добавок в лабораторной мельнице-ступке RetschRM200. Вторым этапом лабораторных испытаний был произведен совместный помол портландцементного клинкера, гипса и добавок в лабораторной барабанной мельнице МБЛ.

Выводы. В результате испытаний добавок дехроматоров, предложенных компаниями ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» и MC-Bauchemie, положительное действие, направленное на снижение концентрации водорастворимого хрома (Cr^{6+}) в портландцементе, применяемом при производстве хризотилцементных изделий, показали образцы обеих компаний.

Ключевые слова: клинкер, портландцемент, водорастворимый хром, дехромат, помол, добавки, дозировка, исходный материал, лабораторные испытания

Для цитирования: Крутилин А.А., Крапчетьева Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Исследование влияния добавок, снижающих содержание водорастворимого хрома (Cr^{6+}) в портландцементе для хризотилцементных изделий // Вестник Том-

ского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 234–246. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-234-246. EDN: SLYJRM

ORIGINAL ARTICLE

EFFECT OF ADDITIVES REDUCING WATER-SOLUBLE CHROMIUM (Cr⁶⁺) CONTENT IN PORTLAND CEMENT FOR CHRYSOTILE CEMENT PRODUCTS

Aleksandr A. Krutilin¹, Tatiana V. Krapchetova²,
Nadezhda A. Inkova¹, Olesya K. Pakhomova¹

¹Sebryakovsk Branch of Volgograd State Technical University,
Mikhailovka, Russia

²AO "Sebryakovtsement", Mikhailovka, Russia

Abstract. In recent decades, global practice has tightened requirements for the quality of building materials, and especially for their environmental safety. For cement and cement compositions, this problem is associated with a decrease in the chromium content, which belongs to highly hazardous compounds. From the environmental point of view, the greatest danger is hexavalent chromium Cr(VI), especially water-soluble, which is a carcinogenic product by its chemical nature, causing disruption of the immune system.

Purpose: The aim is to select a dechromator dosage in the weight, reducing the content of water-soluble chromium (Cr⁶⁺) in Portland cement used for chrysotile cement products to a standardized value not over 0.0002% and compare additives from two different companies.

Methodology: At the first stage of laboratory tests, Portland cement clinker and additives are ground together in a Retsch RM200 laboratory mortar mill. The second stage involves joint grinding of Portland cement clinker, gypsum and additives in a laboratory drum mill MBL.

Research findings: Additives of dechromators are proposed by companies ООО "Sintez OKA-Stroitel'naya Khimiya" and MC-Bauchemie. The samples of both companies show a positive effect on the concentration decrease of water-soluble chromium (Cr⁶⁺) in Portland cement used in the production of chrysotile cement products.

Keywords: clinker, Portland cement, water-soluble chromium, dechromate, grinding, additive, dosage, source material, laboratory tests

For citation: Krutilin A.A., Krapchetova T.V., In'kova N.A., Pakhomova O.K. Effect of Additives Reducing Water-Soluble Chromium (Cr⁶⁺) Content in Portland Cement for Chrysotile Cement Products. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 234–246. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-234-246. EDN: SLYJRM

Характерной чертой мировой практики последних десятилетий становится ужесточение требований к качеству строительных материалов и особенно к их экологической безопасности. Для цемента и цементных композиций эта проблема связана со снижением в нем содержания хрома, который относится ко второму классу опасности – высоко опасные соединения [1, 2, 3]. С экологической точки зрения наибольшую опасность представляет шестивалентный хром Cr (VI), особенно водорастворимый, являющийся по своей химической природе канцерогенным продуктом, вызывающим нарушение работы иммунной системы [4, 5, 6]. Согласно директиве Европейского союза (ЕС) 2003/53/ЕС запрещено поставлять на рынок стран ЕС и использовать цементы

и цементные композиции, в которых концентрация водорастворимого Cr (VI) более 0,0002 % (2 мг на 1 кг цемента).

Цель настоящего исследования – снижение содержания водорастворимого шестивалентного хрома в цементах и цементных композициях, производимых на предприятиях по выпуску портландцемента [7, 8, 9].

Исходные материалы: клинкер портландцементный, полученный в печи сухого способа производства Ø 4,34×54 м [10].

Клинкер, производимый для выпуска портландцемента для хризотилцементных изделий, должен соответствовать требованиям ГОСТ 34902–2022 [11]. Согласно требованиям для испытаний был взят клинкер с химическими и физико-механическими показателями, не превышающими указанных норм. Химический состав клинкера определялся на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 TIGER. Массовая доля закисного железа FeO определялась согласно ГОСТ 5382–2019 перманганатным методом окислительно-восстановительного титрования. Данные анализов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химические показатели клинкера для хризотилцементных изделий

Table 1

Chemical properties of clinker for chrysotile cement products

п.п.п. ¹	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	FeO
0,95	21,87	4,33	4,65	66,36	1,46	0,54	0,04

Минералогический состав клинкера определялся рентгенофазовым анализом на дифрактометре D8 ENDEAVOR [12, 13, 14]. Результат съемки представлен на дифрактограмме (рис. 1).

Для определения пригодности данного клинкера для выпуска портландцемента для хризотилцементных изделий был произведен анализ определения содержания массовой доли водорастворимого хрома (Cr⁶⁺) по ГОСТ 5382–2019 фотокolorиметрическим методом [15]. Колебания по содержанию массовой доли водорастворимого хрома (Cr⁶⁺) по партиям составили от 0,0007 до 0,0014 %, что превышает допустимое значение не более 0,0002 %.

1. Дехроматор компании MC-Bauchemie: образец LP 2911-21.

2. Дехроматор компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия»: образец SintelX 100, образец SintelX 200.

Цель испытаний:

1. Подобрать дозировку дехроматора в весовом количестве (г/т цемента), снижающую содержание водорастворимого хрома (Cr⁶⁺) в портландцементе, применяемом для хризотилцементных изделий, до нормируемого значения не более 0,0002 % [16, 17].

2. Провести сравнительный анализ добавок двух разных компаний.

¹ Потери при прокаливании.

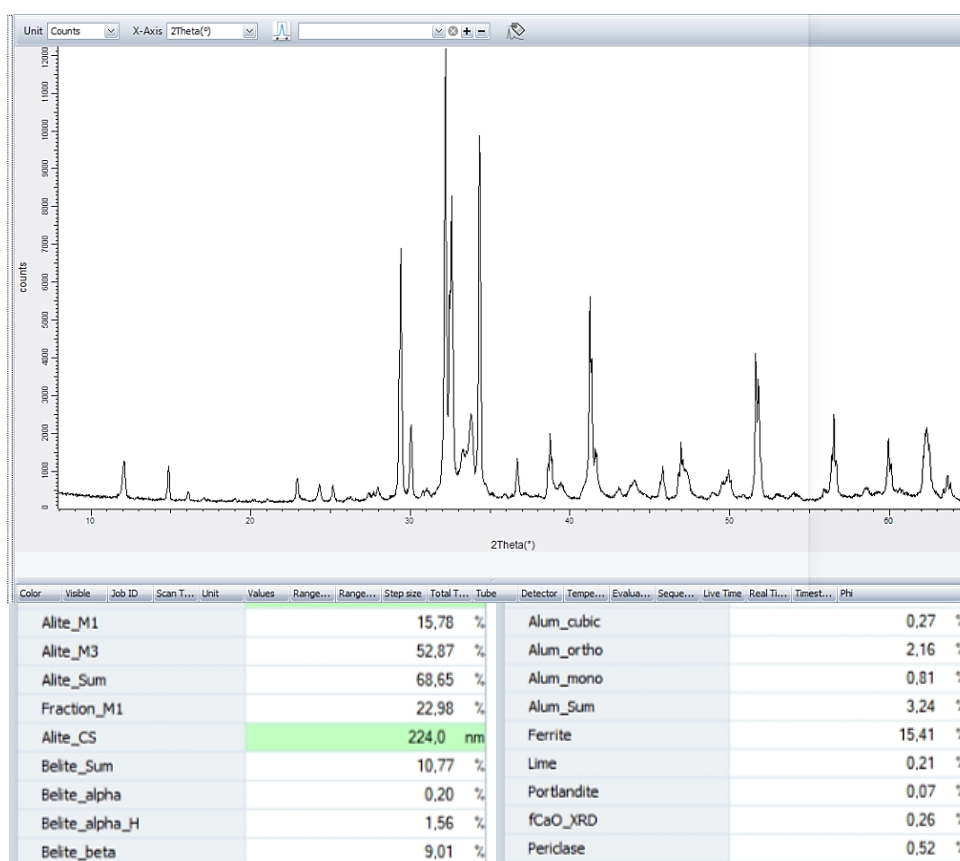


Рис. 1. Минералогический состав клинкера
Fig. 1. Mineralogical composition of clinker

Проведение испытаний

Этап 1. На первом этапе испытывался образец LP 2911-21 добавки дехроматора компании MC-Bauchemie.

Совместный помол портландцементного клинкера и добавок был произведен в лабораторной мельнице-ступке RetschRM200 [18]. Общая загрузка анализируемых проб составляла 100 г. Результаты испытаний отдельно по каждой подбираемой дозировке приведены в табл. 2.

Дехроматор компании MC-Bauchemie (образец LP 2911-21) представляет собой жидкую композицию белого цвета. Для испытаний, представленных в табл. 1, использовался концентрат без дополнительного разведения. Из полученных данных следует, что снижение концентрации водорастворимого хрома (Cr^{6+}) с 0,0007 до 0,0002 % наблюдается при вводе дехроматора из расчета 240 г/т цемента. Стойкое действие добавки сохранялось в течение 17 сут. На 25–50-е сут заметно небольшое увеличение концентрации ионов хрома (Cr^{6+}) до 0,0003 %.

Дозировка дехроматора в меньшем количестве (120 г/т цемента) планируемого снижения концентрации до нормируемого значения не более 0,0002 % не показала.

Таблица 2

**Результаты испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie
в количестве 120 и 240 г/т цемента**

Table 2

**Results of testing MC-Bauchemie dechromator (concentrate) containing
120 and 240 g/t of cement**

Сроки проведения анализа	Значение Cr^{6+} , %		
	Клинкер без добавки	120 г/т цемента	240 г/т цемента
Сразу после ввода добавки	0,0007	0,0004	0,0001
Через 1 сут	—	0,0005	0,0002
Через 4 сут	—	0,0005	0,0002
Через 17 сут	—	0,0004	0,0002
Через 25 сут	—	0,0005	0,0003
Через 50 сут	—	0,0005	0,0003

Динамика поведения добавки с течением времени представлена на рис. 2.

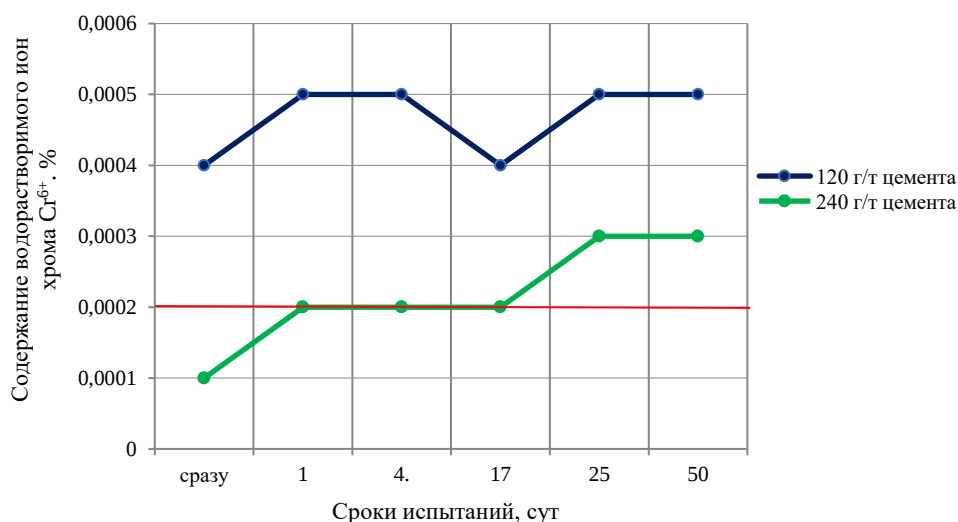


Рис. 2. Динамика поведения добавки дехроматора компании MC-Bauchemie в количестве 120 и 240 г/т цемента с течением времени

Fig. 2. Behavior dynamics of dechromator containing 120 and 240 g/t cement

Основываясь на положительной динамике добавки из расчета 240 г/т, в дальнейших испытаниях, по рекомендации компании MC-Bauchemie, дехроматор разбавили водой в соотношении 1:1 и провели испытания с новыми дозировками. В качестве исходного материала был взят клинкер с содержанием водорастворимого хрома (Cr^{6+}) 0,0014 %. Количество вводимой добавки и результат испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie
в количестве 820 и 1160 г/т цемента

Table 3

Results of testing MC-Bauchemie dechromator containing
820 and 1160 g/t of cement

Сроки проведения анализа	Значение Cr^{6+} , %		
	Клинкер без добавки	820 г/т цемента	1160 г/т цемента
Сразу после ввода добавки	0,0014	0,0000	0,0000
Через 1 сут	–	0,0000	0,0000
Через 7 сут	–	0,0001	0,0000
Через 15 сут	–	0,0002	0,0000
Через 21 сут	–	0,0002	0,0001
Через 28 сут	–	0,0002	0,0001
Через 34 сут	–	0,0003	0,0001
Через 41 сут	–	0,0003	0,0000

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что при дозировке дехроматора из расчета 820 г/т снижение концентрации водорастворимого хрома (Cr^{6+}) с 0,0014 % до нулевого значения было заметно уже в первые сутки и сохранялось до недельного срока. В дальнейшем наблюдается незначительный рост концентрации ионов хрома (Cr^{6+}) до 0,0002 % на 15–28-е сут и до 0,0003 % на 34–41-е сут.

Дозировка дехроматора в большем количестве (1160 г/т) дает положительный эффект, снижая концентрацию до нуля и сохраняя значение не более 0,0001 % до 41-х сут. Однако такое поведение добавки может говорить о ее нерациональном расходе, т. к. положительная динамика замечена уже на более низких концентрациях.

Динамика поведения добавки с течением времени показана на рис. 3.

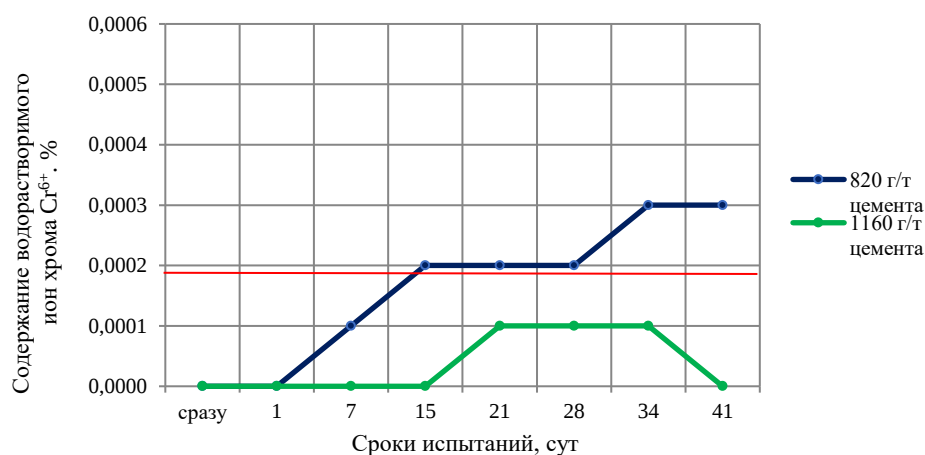


Рис. 3. Динамика поведения добавки дехроматора компании MC-Bauchemie в количестве 820 и 1160 г/т цемента с течением времени

Fig. 3. Behavior dynamics of MC-Bauchemie dechromator consisting of 820 and 1160 g/t of cement

На основе положительных результатов действия образца LP 2911-21 из расчета 820 г/т было принято решение испытать ее в новых условиях помола в этой же дозировке и более низкой – 480 г/т, а также в дозировке 660 г/т, как у аналога компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия», с целью их сравнения.

Совместный помол портландцементного клинкера, гипса и добавки был произведен в лабораторной барабанной мельнице МБЛ [19]. Общая загрузка анализируемых проб составила 2660 г. В табл. 4, 5 приведены результаты испытаний дехроматора.

Таблица 4

**Результаты испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie
в количестве 820 г/т цемента**

Table 4

MC-Bauchemie Dechromator consisting of 820 g/t cement

Сроки проведения анализа	Значение Cr^{6+} , %	
	Клинкер без добавки	820 г/т цемента
Через 1 сут	0,0014	0,0000
Через 7 сут	–	0,0000
Через 14 сут	–	0,0000
Через 21 сут	–	0,0000
Через 28 сут	–	0,0000
Через 35 сут	–	0,0000

Таблица 5

**Результаты испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie
в количестве 480 и 660 г/т цемента**

Table 5

MC-Bauchemie Dechromator consisting of 480 and 660 g/t cement

Сроки проведения анализа	Значение Cr^{6+} , %		
	Клинкер без добавки	480 г/т цемента	660 г/т цемента
Через 1 сут	0,0012	0,0003	0,0001
Через 7 сут	–	0,0003	0,0001
Через 19 сут	–	0,0003	0,0000
Через 29 сут	–	0,0003	0,0000

Во всех случаях добавка показала положительную динамику. При вводе ее в количестве 820 и 660 г/т концентрация водорастворимого хрома (Cr^{6+}) снижается до нормируемого значения не более 0,0002 % и проявляет устойчивое действие в течение всего наблюдаемого периода (29–35 сут). Дозировка 480 г/т дает незначительное превышение контролируемого показателя и также вызывает устойчивое действие в течение всего наблюдаемого периода.

Динамика поведения добавки с течением времени показана на рис. 4.

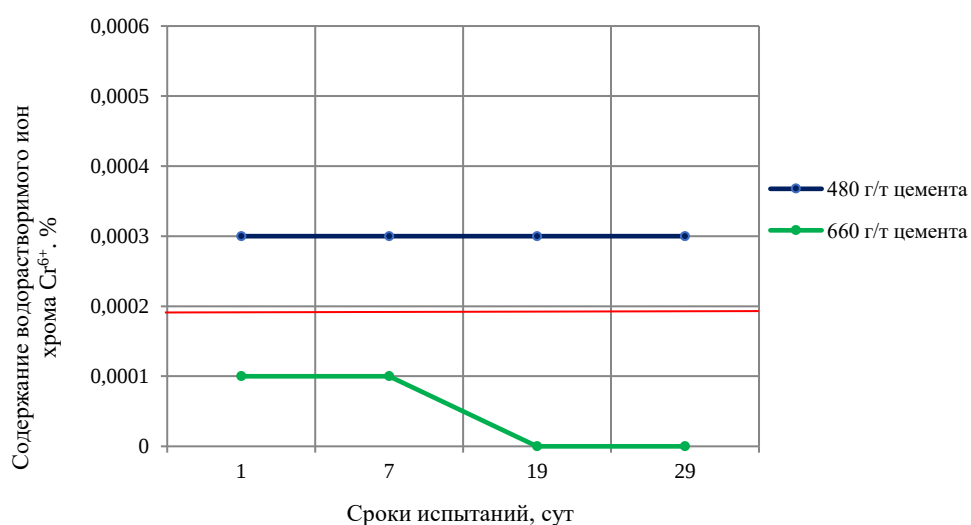


Рис. 4. Динамика поведения добавки дехроматора компании MC-Bauchemie в количестве 480 и 660 г/т цемента с течением времени

Fig. 4. Behavior dynamics of MC-Bauchemie dechromator consisting of 480 and 660 g/t cement

Этап 2. Наряду с добавкой дехроматора компании MC-Bauchemie рассматривался ввод аналогичных добавок компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия». В качестве исходного материала был взят клинкер с теми же характеристиками с содержанием водорастворимого хрома (Cr^{6+}) 0,0014 %.

Совместный помол портландцементного клинкера, гипса и добавок производился в лабораторной барабанной мельнице МБЛ [20]. Общая загрузка анализируемых проб составила 2660 г. Количество вводимой добавки и результат испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Результаты испытаний дехроматора
компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия»**

Table 6

Test results of dechromator from ООО "Sintez OKA-Construction Chemistry"

Сроки проведения анализа	Значение Cr^{6+} , %		
	Клинкер без добавки	SintelX 100 (55 г на 1 ppm) 660 г/ т цемента	SintelX 200 (375 г на 1 ppm) 4500 г/т цемента
Через 1 сут	0,0014	0,0001	0,0008
Через 7 сут	—	0,0001	0,0007
Через 14 сут	—	0,0001	0,0008
Через 21 сут	—	0,0001	0,0007
Через 28 сут	—	0,0002	0,0006
Через 35 сут	—	0,0001	0,0007

Образец добавки SintelX 100 представляет собой жидкую композицию белого цвета. Количество вводимой добавки производилось исходя из расчета, рекомендуемого компанией, 55 г на снижение 1 ppm (0,0001 %) водорастворимого хрома (Cr^{6+}). Таким образом, чтобы снизить содержание ионов хрома (Cr^{6+}) с 0,0014 до 0,0002 %, необходимо ввести 660 г добавки.

Стойкое действие добавки проявлялось на протяжении всего наблюдаемого периода (35 сут).

Образец добавки SintelX 200 представляет собой жидкую композицию коричнево-зеленого цвета. Количество вводимой добавки производилось исходя из расчета, рекомендуемого компанией, 375 г на снижение 1 ppm водорастворимого хрома (Cr^{6+}). Таким образом, чтобы снизить содержание ион хрома (Cr^{6+}) с 0,0014 до 0,0002 %, необходимо ввести 4500 г добавки. В рассчитанной дозировке, как видно из данных табл. 6, нужного эффекта испытуемый образец не показал.

Динамика поведения добавок с течением времени показана на рис. 5.

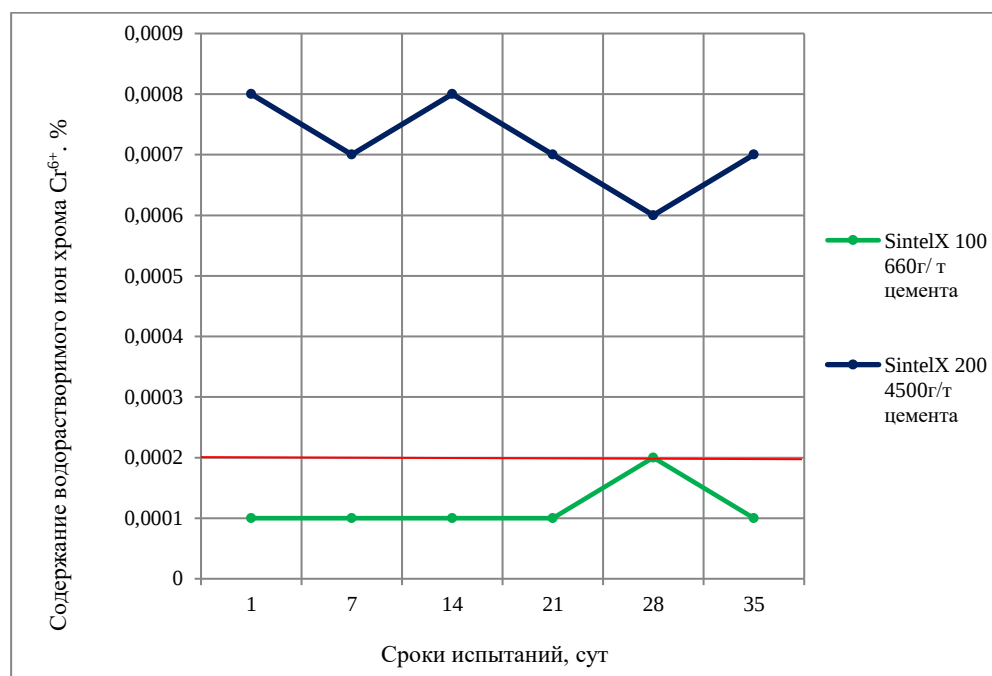


Рис. 5. Динамика поведения добавок дехроматоров компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» с течением времени

Fig. 5. Behavior dynamics of "Sintez OKA-Construction Chemistry" dechromator

Выводы

В результате испытаний добавок дехроматоров компаний ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» и МС-Vauchemie положительное действие, направленное на снижение концентрации водорастворимого хрома (Cr^{6+}) в портландцементе, применяемом при производстве хризотилцементных изделий, показали образцы обеих компаний.

Образец LP 2911-21 компании MC-Bauchemie и образец SintelX 100 компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» проявили одинаковый устойчивый эффект при дозировке 660 г/т цемента. К обеим добавкам оказался актуален расчет исходя из 55 г на снижение 1 ppm (0,0001 %) водорастворимого хрома (Cr^{6+}). Однако дозировка образца LP 2911-21 компании из расчета 480 г/т дала также положительную динамику и незначительное превышение нормируемого значения (табл. 6). Таким образом, можно предположить, что для снижения концентрации ионов хрома (Cr^{6+}) в цементе может быть выбран более низкий расход добавки в промежутке значений 480–660 г/т.

Стоит отметить, что в ходе проводимых испытаний был замечен факт расслоения композиции добавок обеих фирм.

Для проведения испытаний дехроматора компании MC-Bauchemie разбавление образца водой производилось непосредственно в лаборатории путем механического перемешивания. Расслоение наступало достаточно быстро, в течение первых суток.

На протяжении периода испытаний (двух месяцев) дехроматора компании ООО «Синтез ОКА-Строительная химия» расслоения композиции не наблюдалось, но в дальнейшем при хранении более двух месяцев был обнаружен тот же факт. Поэтому стоит учесть, что в случае использования этих добавок необходимо рассмотреть вопрос их дополнительного перемешивания при хранении для предотвращения процесса расслоения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 05.15-19М.226П. Портландцемент с ограниченным содержанием водорастворимых соединений хрома // РЖ 19М. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов. 2005. № 15. EDN: HOZDPP
2. Пуненков С.Е. Проблемы и перспективы производства хризотилцементных материалов // Новости науки и технологий. 2024. № 1 (68). С. 8–14. EDN: TMHNMX
3. Патент № 94021646/04 Российская Федерация, МПК C04B 28/04, C04B 14/28, C04B 22/04, C04B 24/18, C04B 18/14, A61K 33/00. Способ предотвращения аллергических реакций, вызываемых воздействием водорастворимого шестивалентного хрома Cr^{6+} , содержащегося в цементе и/или цементосодержащих составах : № 94021646/04 : заявл. 22.06.1994 : опубл. 10.05.1999 / Фолькхарт Р., Михаэль Ю., Габриэлла А. 9 с.
4. Панова А.В. Технологии производства цемента и негативное воздействие на окружающую среду // Молодой ученый. 2022. № 1. С. 21–23.
5. Зима А.Г. Экологичность конструкционных строительных материалов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 2. С. 40–49.
6. *Современные проблемы экологии* : доклады XIX Международной научно-технической конференции, Тула, 20 октября 2017 г. / под общ. ред. В.М. Панарина. Тула : Инновационные технологии, 2017. 124 с. ISBN: 978-5-9909-4915-7. EDN: ZWQWQD
7. Алешко О.С. Промышленность строительных материалов в ресурсном обеспечении экономического развития России // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2008. Т. 6. С. 439–461. EDN: KWBWDV
8. Курбангалеева М.Х., Пергушова Л.Р., Минниханова Э.А. Минимизация содержания соединений шестивалентного хрома в сточных водах производства асбестоцементных изделий // Башкирский химический журнал. 2014. Т. 21. № 2. С. 113–116.
9. Патент № 2003109255/03 Российская Федерация, МПК C04B 7/02. Портландцемент с ограниченным содержанием водорастворимых соединений хрома : № 2003109255/03 : заявл. 03.04.2003 : опубл. 20.05.2005 / Юдович Б.Э., Зубехин С.А., Губарев В.Г. 21 с.
10. Алишев Ш.А. Технологии производства цемента // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017) : труды Международной научно-технической конференции, Самара,

- 14–16 марта 2017 г. Самара : Самарский научный центр РАН, 2017. С. 843–846. EDN: YOWSRT
11. Горьянова А.О. Состояние и перспективы развития асбестоцементной отрасли // Образование. Наука. Производство : материалы XI Международного молодежного форума, Белгород, 01–20 октября 2019 г. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 1908–1911. EDN: OWLNTU
 12. Сычев М.М., Корнеев В.И., Федоров Н.Ф. Алит и белит в портландцементном клинкере и процессы легирования. Москва : Стройиздат, 1965. 152 с.
 13. Шеин А.Л. Применение рентгенофазового анализа для контроля качества вяжущих в технологии сухих строительных смесей // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2009. № 1 (8). С. 85–88. EDN: OONGUH
 14. Кузнецова Т.В., Кривобородов Ю.Р., Бурлов И.Ю. Основные направления в химии и технологии специальных цементов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 61–63. EDN: JXKGLP
 15. Каверина Н.В., Назаренко Н.Н., Ашихмина Т.В. Нормирование нагрузки хрома шестивалентного при оценке накопленного вреда окружающей среде // Проблемы загрязнения объектов окружающей среды тяжелыми металлами : труды Международной конференции, Тула, 28–30 сентября 2022 г. Тула : Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2022. С. 269–272. EDN: KELGEU
 16. Ассакунова Б.Т., Абдыкалыков Т.А. Влияние комплексных модификаторов на свойства портландцемента // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2012. № 3. С. 21–25.
 17. Курбангалеева М.Х., Пергушова Л.Р., Минниханова Э.А. Разработка мероприятий по минимизации соединений хрома (VI) в сточных водах производства асбестоцементных изделий // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 1. С. 38–41.
 18. Коробова О.С., Ткачева А.С. Перспективы внедрения наилучших доступных технологий при производстве цемента // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 90–95.
 19. Дурдыханов Г.Г., Алыев М.Х., Сапаров Б.Б. Основные свойства и особенности производства портландцемента // Вестник науки. 2024. Т. 2. № 4 (73). С. 634–638.
 20. Лоик Т.А. Исследование влияния условий помола клинкера на свойства портландцемента // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2019 г. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 2528–2536. EDN: KLTMCР

REFERENCES

1. 05.15-19M.226P. Portland Cement with Limited Content of Water-Soluble Chromium Compounds. *Tekhnologiya silikatnykh i tugoplavkikh nemetallicheskich materialov*. 2005; (15). EDN: HOZDPP (In Russian)
2. Punenkov S.E. Problems and Prospects of Chrysotile Cement Material Production. *Novosti nauki i tekhnologii*. 2024;1 (68): 8–14. EDN: TMHNMX (In Russian)
3. Volkhart R., Michael J., Gabriella A. “Method for preventing allergic reactions caused by exposure to water-soluble hexavalent chromium Cr⁶⁺ in cement and/or cement-containing compositions”. Russ. Fed. Patent No. 2129868 C1, 1999. 9 p. (In Russian)
4. Panova A.V. Cement Production and Negative Impact on the Environment. *Molodoi uchenyi*. 2022; 1 (396): 21–23. (In Russian)
5. Zima A.G. Environmental Friendliness of Building Materials. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya*. 2020; 2 (32): 40–49. (In Russian)
6. Panarin V.M. Innovation Technologies. In: *Proc. 19th Int. Sci. Conf. 'Modern Problems of Ecology'*. 2017. 124 p. ISBN: 978-5-9909-4915-7. EDN: ZWQWQD (In Russian)
7. Aleshko O.S. Building Materials Industry in Resource Provision of Economic Development in Russia. *Nauchnye trudy: Institut narodnokhozyaistvennogo prognozirovaniya RAN*. 2008; 6: 439–461. (In Russian)

8. Kurbangaleeva M.Kh., Pergushova L.R., Minnikhanova E.A. Minimization of Hexavalent Chromium Compounds in Wastewater from Asbestos-Cement Product Production. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal*. 2014; 21 (2): 113–116. (In Russian)
9. Yudovich B.E., Zubekhin S.A., Gubarev V.G. "Portland cement with limited content of water-soluble chromium compounds". Russ. Fed. Patent No. 2252201 C2, 2005. 21 p. (In Russian)
10. Alishev Sh.A. Cement Production Technologies. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Advanced Information Technologies'*. Samara, 2017. Pp. 843–846. (In Russian)
11. Goryanova A.O. Status and Development Prospects of Asbestos-Cement Industry. In: *Proc. 21st Int. Youth Forum 'Education. Science. Production'*. Belgorod, 2019. Pp. 1908–1911. (In Russian)
12. Sychev M.M., Korneev V.I., Fedorov N.F. Alite and Belite in Portland Cement Clinker and alloying Processes. Moscow: Stroyizdat, 1965. Pp. 23–25. (In Russian)
13. Shein A.L. X-ray Phase Analysis in Binder Quality Control in Dry Building Mixture Technology. *ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie smesi*. 2009; 1 (8): 85–88. (In Russian)
14. Kuznetsova T.V., Krivoborodov Yu.R., Burlov I.Yu. Main directions in the chemistry and technology of special cements. *Stroitel'nye materialy*. 2008; (10): 61–63. EDN: JXKGLP (In Russian)
15. Kaverina N.V., Nazarenko N.N., Ashikhmina T.V. Standardization of Hexavalent Chromium Load in assessing the Accumulated Harm to the Environment. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Problems of Environmental Pollution with Heavy Metals'*. Tula, 2022. Pp. 269–272. (In Russian)
16. Assakunova B.T., Abdykalykov T.A. Influence of Complex Modifiers on Portland Cement Properties. *Vestnik Kyrgyzskogo gosudarstvennogo universiteta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova*. 2012; (3): 21–25. (In Russian)
17. Kurbangaleeva M.Kh., Pergushova L.R., Minnikhanova E.A. Development of Measures to Minimize Chromium(VI) Compound Content in Wastewater from Asbestos-Cement Production. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2015; 19 (1): 38–41. (In Russian)
18. Korobova O.S., Tkacheva A.S. Prospects of Implementing the Best Available Technologies in Cement Production. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2016; (11): 90–95. (In Russian)
19. Durdykhanov G.G., Allyev M.Kh., Saparov B.B. Main Properties and Production of Portland Cement. *Vestnik nauki*. 2024; 2 (4 (73)): 634–638. (In Russian)
20. Loik T.A. Influence of Clinker Grinding Conditions on Portland Cement Properties. In: *Proc. Int. Sci. Conf. Young Scientists*. Belgorod, 2019. Pp. 2528–2536. EDN: KLTMC (In Russian)

Сведения об авторах

Крутилин Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, kotyra84@bk.ru

Крапчетова Татьяна Владимировна, инженер-аналитик, АО «Себряковцемент», 403342, г. Михайловка, ул. Индустриальная, 2, iwankra@mail.ru

Инькова Надежда Александровна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, soyote@bk.ru

Пахомова Олеся Константиновна, ст. преподаватель, Себряковский филиал Волгоградского государственного технического университета, 403343, г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, pahomovaolesia@yandex.ru

Authors Details

Aleksandr A. Krutinin, PhD, A/Professor, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Mikhailovka, Russia, kotyra84@bk.ru

Tatyana V. Krapchetova, Analytical Engineer, AO "Sebyakovtsement", 2, Industrialnaya Str., 2403342, Mikhailovka, Russia, iwankra@mail.ru

Nadezhda A. Inkova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Mikhailovka, Russia, coyote@bk.ru

Olesya K. Pakhomova, Senior Lecturer, Sebyakovsk Branch of Volgograd State Technical University, 21, Michurin Str., 403343, Mikhailovka, Russia, pahomovaolesia@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.04.2025
Одобрена после рецензирования 30.06.2025
Принята к публикации 30.06.2025

Submitted for publication 15.04.2025
Approved after review 30.06.2025
Accepted for publication 30.06.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 247–255.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 247–255.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.2955`24`26

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-247-255

EDN: SVYNEO

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАМАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

**Евгений Олегович Винокуров, Анатолий Анатольевич Клопотов,
Юрий Афанасьевич Абзаев**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования метаматериалов обусловлена потребностью в создании материалов с принципиально новыми свойствами, не встречающимися в природе. Способность проявлять аномальные механические характеристики открывает широкие возможности применения таких материалов в различных отраслях. Разработка метаматериалов на основе интеллектуальных сплавов, в частности никелида титана с эффектом памяти формы, позволяет создавать конструкции, сочетающие уникальную геометрию с функциональностью, что особенно востребовано при создании имплантатов нового поколения, энергопоглощающих систем и адаптивных механических элементов.

Цель. Исследование механических свойств конструкций, изготовленных из сплава на основе никелида титана с эффектом памяти формы, проявляющих положительные и отрицательные значения коэффициента Пуассона, как элементов конструкции метаматериала.

Материалы и методы. Эксперимент включал испытания на сжатие двух видов проволочных конструкций из сплава Ti-51 ат.% Ni.

Результаты. Установлено, что в зависимости от конструкции образцы демонстрировали как положительный, так и отрицательный коэффициент Пуассона. Деформационные кривые показали практически полное восстановление формы обеих конструкций после снятия нагрузки, что подтверждено экспериментально.

Ключевые слова: коэффициент Пуассона, сплавы с эффектом памяти формы, конструкция из сплава на основе никелида титана, метаматериалы, ауксетики, сверхэластичность

Для цитирования: Винокуров Е.О., Клопотов А.А., Абзаев Ю.А. Механические свойства метаматериалов и конструкций на основе сплавов с эффектом памяти формы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 247–255. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-247-255. EDN: SVYNEO

ORIGINAL ARTICLE

**MECHANICAL PROPERTIES OF METAMATERIALS
AND STRUCTURES BASED ON SHAPE MEMORY ALLOYS**

Eugeny O. Vinokurov, Anatoly A. Klopotov, Yury A. Abzaev
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The relevance of research on metamaterials is driven by the need to create materials with fundamentally new properties not found in nature. The ability to exhibit anomalous mechanical characteristics opens up opportunities for breakthrough applications in various industries. The development of metamaterials based on intelligent alloys, particularly titanium nickelide with a shape memory effect, enables the creation of structures that combine unique geometry with functionality, which is especially in demand for next-generation implants, energy-absorbing systems, and adaptive mechanical components.

Purpose: To investigate the mechanical properties of structures made of titanium nickelide-based alloy with a shape memory effect, exhibiting both positive and negative Poisson's ratio values, as elements of metamaterial structures.

Methodology: The experiment involved compression tests of two types of wire structures made of Ti-51 at. % Ni alloy.

Research findings: It was found that, depending on the structure, the samples exhibited both positive and negative Poisson's ratios. The deformation curves showed almost complete shape recovery of both structures after load removal, which was confirmed experimentally.

Keywords: Poisson's ratio, shape memory alloys, titanium nickelide-based alloy structure, metamaterials, auxetics, superelasticity

For citation: Vinokurov E.O., Klopotov A.A., Abzaev Yu.A. Mechanical Properties of Metamaterials and Structures Based on Shape Memory Alloys. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 247–255. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-247-255. EDN: SVYNEO

Введение

Использование мартенситных превращений берет начало в древнем ремесленном опыте, когда кузнецы эмпирически открыли операцию закалки стали, придающую изделиям высокую твердость и режущую способность. Как объект научного исследования закалка стали стала изучаться в XIX в., главным образом в трудах русских и немецких металлургов. В честь одного из них – А. Мартенса – особое структурное состояние закаленной стали, определяющее ее свойства, было названо мартенситом, а соответствующий фазовый переход – мартенситным превращением [1].

Долгое время мартенситное превращение рассматривалось как специфический процесс, характерный лишь для системы «железо – углерод». Однако начиная с 1930-х гг. круг материалов, в которых обнаруживались мартенситные превращения, существенно расширился. К сталям добавились безуглеродистые сплавы железа, сплавы на основе меди, титана, циркония, щелочных и благородных металлов [2]. В настоящее время установлено, что мартенситные и мартенситоподобные превращения присущи не только металлам, но и другим классам кристаллических материалов, включая сегнетоэлектрики, оксиды, молекулярные кристаллы и даже биологические объекты (например, белки у микроорганизмов) [3, 4].

Особый практический интерес представляют превращения, протекающие по бездиффузионному механизму с кооперативной перестройкой кристаллической решетки, которые лежат в основе эффекта памяти формы (ЭПФ). Открытие ЭПФ относится к 1932 г., когда А. Оландер впервые наблюдал это явление в сплаве Au-Cd [5]. В 1950-х гг. эффект был обнаружен в медно-цинковых сплавах, а его механизм – обратимое термоупругое мартенситное превращение – был описан Г.В. Курдюмовым [6]. Наиболее широкое практическое применение нашел сплав на основе никелида титана (TiNi), сочетающий высокую обратимость деформации, коррозионную стойкость, прочность и биосовместимость [7, 20].

В последние десятилетия активно развивается направление, связанное с созданием метаматериалов – искусственных структур, свойства которых определяются не столько химическим составом, сколько их архитектурой [8, 9]. Комбинирование метаматериалов со сплавами, обладающими ЭПФ, открывает перспективы для проектирования конструкций с программируемыми механическими характеристиками, такими как отрицательный коэффициент Пуассона, регулируемая жесткость и адаптивность [10].

Метаматериалы представляют собой искусственно созданные материалы, обладающие уникальными, не встречающимися в природе свойствами. В основе работы этих материалов лежит использование физических явлений, которые проявляются за счет созданной специфической структуры со сложной архитектурой, а не за счет их химического состава [11–13]. Метаматериалы известны своими необычными механическими свойствами, такими как низкая плотность [14], отрицательный коэффициент Пуассона [15], отрицательная жесткость [15] и отрицательное тепловое расширение [16].

Коэффициент Пуассона ν относится к тем основным механическим параметрам материала, манипулирование которыми открывает широкие перспективы для создания современных материалов с улучшенными механическими характеристиками и многофункциональными возможностями. Основная масса материалов обладает положительными значениями коэффициента Пуассона. Например, при одноосном сжатии материал в продольном направлении уменьшается и расширяется в поперечном направлении. Все материалы с отрицательными значениями коэффициента Пуассона ν называют ауксетичными. Для таких материалов характерно расширение в поперечном направлении при растяжении в осевом направлении [17].

Рассмотрим условия, при которых возможны значения $\nu < 0$. Согласно классическим соотношениям из теории упругости для изотропных тел [18], коэффициент Пуассона ν можно записать в виде

$$\nu = (3K - 2\mu)/(6K + 2\mu),$$

где μ , K – модули сдвига и объемной деформации соответственно, положительные для стабильных структур. Из этого уравнения следует, что отрицательные значения коэффициента Пуассона ν соответствуют условию, когда $\mu > 3/2K$. То есть когда модуль сдвига μ превышает модуль объемной деформации K более чем на 50 %. Эти значения коэффициента Пуассона ν в основном достигаются за счет архитектуры конструкции, а не за счет состава материала [19].

В исследовании [8] приведен обзор широко используемых механических метаматериалов и обсуждение их применения в области биомедицинской инженерии, в частности в инженерии костной ткани и сосудистых стентов. На рис. 1 наглядно показано, что сочетание реконфигурируемого и ауксетического поведения создает новую трубчатую структуру стента. Длина стента увеличивается при радиальном расширении, что позволяет охватить большее количество сосудов по сравнению с обычными стентами [8]. Данные рис. 1 наглядно демонстрируют, как материалы с отрицательными значениями коэффициента Пуассона находят практическое применение.

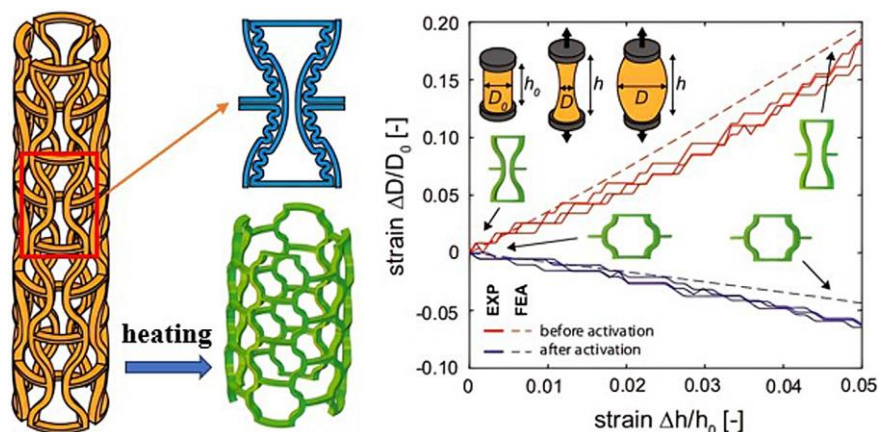


Рис. 1. Пример реконфигурируемого ауксетического сосудистого стента [8]

Fig. 1. An example of a reconfigurable auxetic vascular stent [8]

Для выполнения цели работы были изготовлены две проволочные конструкции из сплава Ti+51 ат.%Ni с диаметром проволоки 1 мм. Конструкция № 1 (рис. 2, а) содержит вогнутые проволочные элементы. При сжатии образца № 1 происходит продольное и поперечное сжатие конструкции. Эта конструкция обладает отрицательным значением коэффициента Пуассона ($\nu = -3,03$).

Конструкция № 2 (рис. 2, б) содержит проволочные элементы, выгнутые наружу относительно оси сжатия. При одноосной деформации сжатием наблюдается продольное сжатие конструкции с поперечным расширением элементов конструкции, и для этой конструкции $\nu = 0,71$.

Механические испытания по сжатию проволочных конструкций проведены на испытательной машине Instron № 3382.

Определение значений коэффициента Пуассона ν получено на основе измерений геометрических размеров конструкций до эксперимента, во время и после эксперимента.

В результате механических испытаний образцов № 1 и № 2 были получены деформационные кривые (рис. 3).

Из анализа деформационной кривой образца № 1 видно, что внешняя механическая сила (P) растет и достигает максимального значения при деформации $\varepsilon = 0,065$ (рис. 3, кривая 1, т. а), после которой деформация конструкции продолжается, но уже при меньших значениях приложенной механической

силы (рис. 3, кривая 1). Подобная зависимость в координатах « P от ϵ » наблюдается на деформационной кривой конструкции № 2 (рис. 3, кривая 2). На этой деформационной кривой максимум выражен менее остро, чем для образца № 1, и максимум на этой кривой приходится уже на значение деформации, равное 0,115 (рис. 3, кривая 2, т. б).

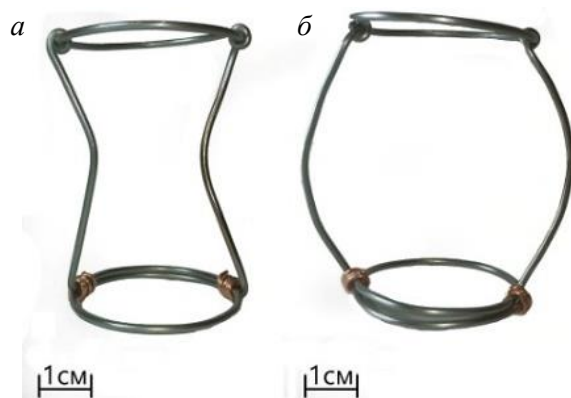


Рис. 2. Фотографии конструкций из сплава на основе никелида титана перед деформацией на сжатие:

a – конструкция № 1; b – конструкция № 2

Fig. 2. Photographs of titanium nickelide alloy structures before compressive strain:

a – structure 1; b – structure 2

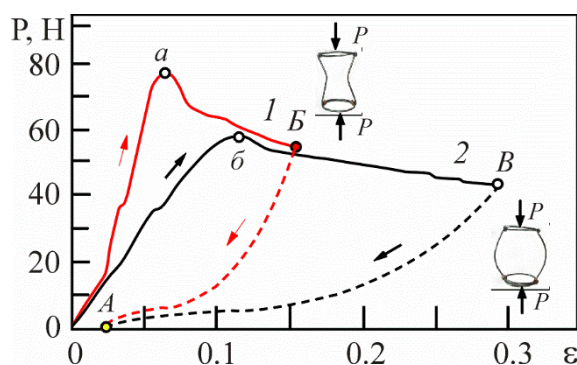


Рис. 3. Деформационные кривые на сжатие конструкций с отрицательным значением коэффициента Пуассона (конструкция № 1, кривая 1) и положительным (конструкция № 2, кривая 2), изготовленных из сплава Ti + 51 ат. % Ni

Fig. 3. Compressive strain curves for Ti + 51 at. % Ni alloy structures with negative Poisson's ratio (structure 1, curve 1) and positive (structure 2, curve 2)

Такой характер деформационных зависимостей исследуемых конструкций в координатах « P от ϵ » можно объяснить, основываясь на полученных деформационных кривых одноосного растяжения образцов сплава Ti + 51 ат. % Ni в координатах « σ от ϵ » (рис. 4) [7]. На начальной стадии, в зависимости $\sigma = f(\epsilon)$, происходит упругопластическая деформация до значений порядка 0,01 (рис. 4, участок $A-I$). По достижении значений напряжения около 400 МПа в процессе деформа-

ции под напряжением начинается мартенситный переход (МП), который проявляется в виде площадки в координатах « σ от ϵ » (рис. 4, участок 1–2) [7].

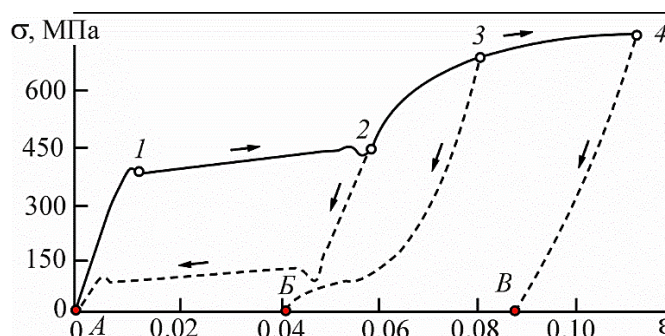


Рис. 4. Влияние степени деформации на сверхэластичное поведение сплава Ti + 51 ат. % Ni. В т. 2 и 3 нагрузка снималась. Штриховая кривая 2 – А соответствует полному возврату деформации после снятия нагрузки; штриховые кривые 3 – В, 4 – В соответствуют неполному возврату деформации после снятия нагрузки [7]

Fig. 4. Stress-strain curves for superelastic behavior of Ti + 51 at. % Ni alloy. The load is removed at points 2 and 3. Dashed curve 2 – A and curves 3 – B, 4 – C indicate to respectively complete and incomplete strain recovery after load removal [7]

На стадии МП после снятия внешней нагрузки происходит полный возврат деформации (рис. 4, кривая 2 – А). При дальнейшей деформации в образце в локальных местах материала достигается предел текучести (рис. 4, участок 2 – 3 – 4), и в деформацию вносит вклад пластическая составляющая. После снятия нагрузки на этой стадии возврат деформации происходит не полностью (рис. 4, кривые 3 – В, 4 – В). Для исследуемых конструкций после снятия нагрузки происходит почти полный возврат деформации (рис. 4, кривые В – А, В – А). Это явление мы наблюдали экспериментально. Конструкции после снятия нагрузки почти полностью восстанавливали форму.

Таким образом, в исследуемых конструкциях первая стадия деформации от 0 до максимума на кривых в координатах « P от ϵ » связана с упругопластическими деформациями в материале. На следующей стадии уменьшение нагрузки P после максимума на кривых « P от ϵ » связано с мартенситными переходами под напряжением.

Вывод

Установлено, что ключевым фактором, обеспечивающим функциональность конструкций, является сверхэластичный отклик материала основы, обусловленный обратимыми мартенситными превращениями. Полученные результаты открывают перспективы для разработки нового поколения функциональных материалов и конструкций, которые можно использовать в качестве биомедицинских имплантатов с адаптивными механическими характеристиками [8, 20].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мартенситные превращения / под ред. В.Д. Садовского. Свердловск : УФ АН СССР, 1980. 215 с.

2. Горячев О.А., Утевский Л.М. Мартенситные превращения в сплавах железа. Москва : Металлургия. 1986. 184 с.
3. Bhattacharya K. Microstructure of Martensite: Why It Forms and How It Gives Rise to the Shape-Memory Effect. Oxford : Oxford University Press, 2003. 196 p. DOI: 10.1093/oso/9780198509349.001.0001
4. Otsuka K., Wayman C.M. Shape Memory Materials. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 284 p.
5. Olander A. An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys // Journal of the American Chemical Society. 1932. V. 54. P. 3819–3833. DOI: 10.1021/ja01349a004
6. Курдюмов Г.В. Явления закалки и отпуска стали. Москва : Металлургиздат, 1960. 255 с.
7. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Клопотов А.А. Никелид титана: медицинский материал нового поколения. Томск : МИЦ, 2006. 296 с.
8. Wang H., Lyu Y., Bosiakov S., Zhu H., Ren Y. A review on the mechanical metamaterials and their applications in the field of biomedical engineering // Frontiers in Materials. 2023. V. 10. P. 1–17. DOI: 10.3389/fmats.2023.1146942. EDN: NDLKSF
9. Kolken H.M.A., Zadpoor A.A. Auxetic mechanical metamaterials // RSC Advances. 2017. V. 7. P. 5111–5129. DOI: 10.1039/C6RA27333E. EDN: YEALQG
10. Tang Y., Yin J. Design of cut unit geometry in hierarchical kirigami-based auxetic metamaterials for high stretchability and compressibility // Extreme Mechanics Letters. 2017. V. 12. P. 77–85. DOI: 10.1016/j.eml.2016.07.005
11. Шилько С.В. Аномально упругие материалы как компоненты адаптивных систем // Перспективные материалы. Витебск : УО ВГТУ, 2009. С. 419–448.
12. Daniel A., Bakhtiari H., Nouri A., Das B.K., Aamir M., Tolouei-Rad M. Fatigue properties of 3D-printed polymeric metamaterials: A review // Smart Materials in Manufacturing. 2025. V. 3. P. 20. DOI: 10.1016/j.smmf.2025.100076. EDN: AIVPTT
13. Lee J.H., Singer J.P., Thomas E.L. Micro-nanostructured mechanical metamaterials // Advanced materials. 2012. V. 24. I. 36. P. 4782–4810. DOI: 10.1002/adma.201201644. EDN: RMGSZB
14. Zheng X., et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials // Science. 2014. V. 344. № 6190. P. 1373–1377. DOI: 10.1126/science.1252291
15. Hewage T.A., et al. Double-negative mechanical metamaterials displaying simultaneous negative stiffness and negative Poisson's ratio properties // Advanced materials. 2016. V. 28 (46). P. 10323–10332. DOI: 10.1002/adma.201603959
16. Wang Q., et al. Light weight mechanical metamaterials with tunable negative thermal expansion // Physical Review Letters. 2016. V. 117. P. 175901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.175901
17. Barnett E., et al. Auxetic fixation devices can achieve superior pullout performances compared to standard fixation concepts // Smart materials and Structures. 2024. V. 33. № 6. P. 065020. DOI: 10.1088/1361-665X/ad3d94. EDN: WLLMUY
18. Love A.E.H. A treatise on the mathematical theory of elasticity. New York: Dover Publications, 1944. 674 p.
19. Kolken H.M.A., et al. Rationally designed meta-implants: a combination of auxetic and conventional meta-biomaterials // Materials Horizons. 2018. V. 5. № 1. P. 28–35. DOI: 10.1039/C7MH00699A
20. Сысолятин П.Г., Темерханов Ф.Т., Пушкарев В.П., Клопотов А.А. и др. Сверхэластичные имплантаты с памятью формы в челюстно-лицевой хирургии, ортопедии и нейрохирургии. Томск : ТГУ, 1995. 224 с.

REFERENCES

1. Sadovsky V.D. (Ed.) Martensitic Transformations. Sverdlovsk: UF AN SSSR, 1980. 215 p. (In Russian)
2. Goryachev O.A., Utevsky L.M. Martensitic Transformations in Iron Alloys. Moscow: Metallurgiya, 1986. 184 p. (In Russian)
3. Bhattacharya K. Microstructure of Martensite: Why it Forms and How it Gives Rise to the Shape-Memory Effect. Oxford: Oxford University Press, 2003. 196 p.
4. Otsuka K., Wayman C.M. Shape Memory Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 284 p.
5. Olander A. An Electrochemical Investigation of Solid Cadmium-Gold Alloys. *Journal of the American Chemical Society*. 1932; 54: 3819–3833.

6. Kurdjumov G.V. Phenomena of Steel Hardening and Tempering. Moscow: Metallurgizdat, 1960. 255 p. (In Russian)
7. Gunther V.E., Khodorenko V.N., Klopotov A.A. Titanium Nickelide: Medical Material of New Generation. Tomsk: MIC, 2006. 296 p. (In Russian)
8. Wang H., Lyu Y., Bosiakov S., Zhu H., Ren Y. A Review on the Mechanical Metamaterials and their Applications in the Field of Biomedical Engineering. *Frontiers in Materials*. 2023; 10: 1–17. DOI: 10.3389/fmats.2023.1146942
9. Kolken H.M.A., Zadpoor A.A. Auxetic Mechanical Metamaterials. *RSC Advances*. 2017; 7: 5111–5129. DOI: 10.1039/C6RA27333E
10. Tang Y., Yin J. Design Of Cut Unit Geometry in Hierarchical Kirigami-Based Auxetic Metamaterials for High Stretchability and Compressibility. *Extreme Mechanics Letters*. 2017; 12: 77–85. DOI: 10.1016/j.eml.2016.07.005
11. Shilko S.V. Anomalous Elastic Materials as Components of Adaptive Systems. In: *Advanced Materials*. Vitebsk, 2009. Pp. 419–448. (In Russian)
12. Daniel A., Bakhtiari H., Nouri A., Das B.K., Aamir M., Tolouei-Rad M. Fatigue Properties of 3D-printed Polymeric Metamaterials: A Review. *Smart Materials in Manufacturing*. 2025; 3: 20. DOI: 10.1016/j.smmf.2025.100076. EDN: AIVPTT
13. Lee J.H., Singer J.P., Thomas E.L. Micro-Nanostructured Mechanical Metamaterials. *Advanced Materials*. 2012; 24 (36): 4782–4810. DOI: 10.1002/adma.201201644
14. Zheng X., Lee H., Weisgraber T.H., Shusteff M., DeOtte J., Duoss E.B., et al. Ultralight, Ultrastiff Mechanical Metamaterials. *Science*. 2014; 344 (6190): 1373–1377. DOI: 10.1126/science.1252291
15. Hewage T.A.M., Alderson K.L., Alderson A., Scarpa F. Double-Negative Mechanical Metamaterials Displaying Simultaneous Negative Stiffness and Negative Poisson's Ratio Properties. *Advanced Materials*. 2016; 28 (46): 10323–10332. DOI: 10.1002/adma.201603959
16. Wang Q., Jackson J.A., Ge Q., Hopkins J.B., Spadaccini C.M., Fang N.X. Lightweight Mechanical Metamaterials with Tunable Negative Thermal Expansion. *Physical Review Letters*. 2016; 117: 175901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.175901
17. Barnett E., Gleadall A., Al Obaidi H., Wang K., Abo Saleh K., Kormakov S., et al. Auxetic Fixation Devices can Achieve Superior Pullout Performances Compared to Standard Fixation Concepts. *Smart Materials and Structures*. 2024; 33 (6): 065020. DOI: 10.1088/1361-665X/ad3d94
18. Love A.E.H. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. New York: Dover Publications, 1944. 674 p.
19. Kolken H.M.A., Lietaert K., Pouran B., Meynen A., Van Grunsven W., Weinans H., et al. Rationally Designed Meta-Implants: A Combination of Auxetic and Conventional Meta-Biomaterials. *Materials Horizons*. 2018; 5 (1) 28–35. DOI: 10.1039/C7MH00699A
20. Sysolyatin P.G., Temerkhanov F.T., Pushkarev V.P., Klopotov A.A., et al. Superelastic Shape Memory Implants in Maxillofacial Surgery, Orthopedics and Neurosurgery. Tomsk: TSU, 1995. 224 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Винокуров Евгений Олегович, студент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, eugenevinockuroff@yandex.ru

Клопотов Анатолий Анатольевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, klopotova@tsuab.ru

Абзаев Юрий Афанасьевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, abzaev@tsuab.ru

Authors Details

Evgeny O. Vinokurov, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, eugenevinockuroff@yandex.ru

Anatoly A. Klopotov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, klopotovaa@tsuab.ru

Yury A. Abzaev, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2,
Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, abzaev@tsuab.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.09.2025
Одобрена после рецензирования 30.09.2025
Принята к публикации 30.09.2025

Submitted for publication 25.09.2025
Approved after review 30.09.2025
Accepted for publication 30.09.2025

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, BRIDGES AND TUNNELS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 256–267.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 256–267.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7:528.024.7

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-256-267

EDN: XKIJU

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ РОВНОСТИ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ПРОФИЛОМЕТРАМИ И УНИВЕРСАЛЬНЫМ ДОРОЖНЫМ КУРВИМЕТРОМ «РОВНОСТЬ»

**Владимир Васильевич Щербаков, Сергей Сергеевич Акимов,
Ольга Владимировна Ковалева**

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия*

Аннотация. В настоящее время применение дорожных профилометров является основным способом для определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог в соответствии с действующими нормативами. Методы определения ровности дорожных покрытий с использованием профилометров принципиально отличаются от методов, в основе которых лежит нивелирование.

Цель работы – сравнительный анализ особенностей определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог профилометрами и методом амплитуд.

Отличия между данными методами заключаются как в самих способах измерений амплитуд и длин неровностей, так и в организации работ, подготовке к измерениям и непосредственном их выполнении, точности и стабильности результатов измерений. Принципиально отличаются и факторы, влияющие на точность измерений.

Для каждого профилометра требуется калибровка. Сущность калибровки заключается в сравнении данных, полученных профилометром, с данными короткошагового геометрического нивелирования, расчете масштабного коэффициента. Масштабный коэффициент позволяет учесть все индивидуальные особенности автомобиля и условия калибровки. При смене условий при измерениях учесть изменения масштабного коэффициента возможно аналитически, а практически это довольно сложный процесс. Основным ограничением короткошагового нивелирования на автомобильных дорогах является высокая трудоемкость при выполнении измерений. Данный метод может применяться в больших объемах при решении задачи автоматизации процесса нивелирования.

Выводы. В Сибирском государственном университете путей сообщения разработано устройство, обеспечивающее короткошаговое нивелирование в автоматическом режиме с шагом 5–15 см и точностью измерения приращений высот 1 мм. Прибор УДК «Ровность» обеспечивает измерение высотных отметок, определение амплитуд неровностей, длин неровностей с преобразованием данных в интегральные показатели в соответствии с требованиями. На точность измерений УДК «Ровность» не оказывают существенного влияния внешние факторы.

Ключевые слова: автомобильные дороги, покрытие автомобильной дороги, продольная ровность, методы измерения ровности, дорожный профилометр

Для цитирования: Щербakov В.В., Акимов С.С., Ковалева О.В. Особенности определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог профилометрами и универсальным дорожным курвиметром «Ровность» // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 256–267. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-256-267. EDN: XKIJU

ORIGINAL ARTICLE

LONGITUDINAL FLATNESS OF ROAD PAVEMENTS MEASURED WITH PROFILOMETER AND UNIVERSAL CURVIMETER “ROVNOST”

Vladimir V. Shcherbakov, Sergei S. Akimov, Ol'ga V. Kovaleva
Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

Abstract. The use of road profilometers is currently the main tool to measure the longitudinal flatness of road pavements in accordance with standards. Measurement methods of road pavement flatness using profilometers fundamentally differ from those based on leveling.

Purpose: The purpose of the work is to compare measurements of road flatness with profilometers and the amplitude method.

Methodology/approach: Comparative analysis, profilometer based measurement, curvimeter based measurement. The curvimeter "Rovnost" is used to measure elevation marks, unevenness amplitude and length, and data conversion into integral indicators in accordance with the requirements.

The difference between these methods lies in measuring the amplitude and length of irregularities, as well as in the work organization, preparation for measurements and their implementation, accuracy and stability of measurement results. Factors affecting the measurement accuracy also fundamentally differ.

Each profilometer requires calibration. Calibration compares the data obtained by the profilometer with the data of short-step geometric leveling, and calculates the scale factor. The scale factor considers all characteristics of vehicles and calibration conditions. When these conditions change during measurements, it is theoretically possible to take into account the changes in the scale factor, but it is difficult in practice.

The main limitation of short-step leveling is its high labor intensity. This method can be used in large volumes when solving the problem of automating the leveling process.

Research findings: The proposed device provides short-step leveling in the automatic mode at a step of 5 to 15 cm and measurement accuracy of height increments of 1 mm. The curvimeter "Rovnost" is used for flatness measurements. External factors do not have a significant effect on the measurement accuracy of the "Rovnost" curvimeter.

Keywords: road pavement, longitudinal flatness, measurement methods, profilometer

For citation: Shcherbakov V.V., Akimov S.S., Kovaleva O.V Longitudinal Flatness of Road Pavements Measured with Profilometer and Universal Curvimeter "Rovnost". Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 256–267. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-256-267. EDN: XKIJU

В настоящее время обеспечению высокого качества покрытий автомобильных дорог при их строительстве и ремонте стало уделяться значительное внимание. Для оценки качества при приемке в эксплуатацию дорог измеряются и оцениваются многие параметры. Показатель «продольная ровность» является одним из наиболее важных диагностических показателей, определяющих качество выполненных работ, безопасность и удобство движения, а также прочностной ресурс дорожного покрытия [1–3].

Продольная ровность дорожных покрытий может определяться различными методами и приборами, позволяющими проводить прямые (метод амплитуд, 3-метровая рейка с клиновидным промерником) или косвенные (дорожный профилометр и др. [4]) измерения и, соответственно, получать объективную или интегральную оценку ровности [5].

Однако в настоящее время в связи с изменениями, внесенными в СП 78.13330.2012¹ в 2021 г. (исключение нормативов по допустимым значениям амплитуд неровностей), требования к продольной ровности покрытия автомобильной дороги в основном сводятся к обеспечению международного показателя ровности *IRI*. Данный показатель характеризуется как отношение величины суммарного перемещения неподрессоренной массы (колеса) относительно поддрессоренной (кузова автомобиля) к длине участка дороги. В этой ситуации дорожные профилометры являются основным методом определения продольной ровности покрытия автомобильных дорог.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ особенностей определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог профилометрами и методом амплитуд, реализованным при помощи универсального дорожного курвиметра «Ровность».

Методы определения продольной ровности дорожных покрытий с применением профилометров принципиально отличаются от методов, в основе которых лежит нивелирование (использование высотных отметок). Отличия между данными методами заключаются как в самих способах измерений амплитуд и длин неровностей, так и в организации работ, подготовке к измерениям и непо-

¹ СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги: утвержден и введен в действие приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 272: дата введения 2013-07-01 / подготовлен Департаментом архитектуры, строительства и градостроительной политики. URL: https://www.admkrsk.ru/citytoday/municipal/Documents/Adresa_pereplanirovok/%D0%A1%D0%9F.78.13330.2012.pdf (дата обращения: 21.02.2025).

средственным их выполнении, точности и стабильности результатов измерений по показателям, характеризующим продольную ровность. Кроме того, принципиально отличаются и факторы, влияющие на точность измерений. Поэтому для анализа рассматриваемых способов измерений, обработки данных, качества оценки результатов определения продольной ровности необходимо рассмотреть детально устройство, принцип работы различных приборов и факторы, влияющие на точность измерений и оценки показателя продольной ровности.

Продольная ровность профилометрами определяется по ГОСТ 33101–2014². В нем данный метод описывается как новый подход к определению продольной ровности. Результатом метода является продольный микропрофиль дорожного покрытия. Полученный микропрофиль позволяет при использовании программных средств, известных алгоритмов и массива данных вычислить просветы под трехметровой рейкой, модуль разности вертикальных отметок (по методу амплитуд) и международный показатель ровности *IRI* [6].

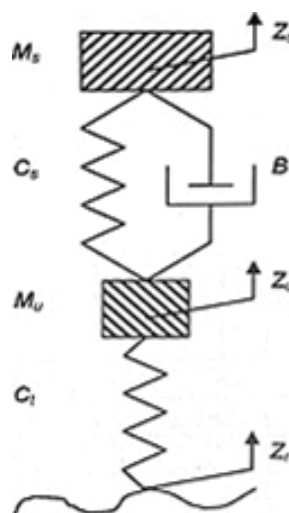
Для того чтобы выполнить полноценный анализ, рассмотрим модель, которая используется для измерений и расчета показателя *IRI*. Устройство для измерения микропрофиля покрытия автомобильной дороги и расчета показателя *IRI* – это блок модели автомобиля, представляющий собой систему, состоящую из колеса, неподрессоренной и поддрессоренной масс, упруго соединенных между собой при помощи пружин или рессор и амортизатора (рис. 1).

Рис. 1. Модель устройства для измерения микропрофиля и расчета *IRI*:

C_t – колесо с заданной жесткостью шины; M_u – неподрессоренная масса; M_s – поддрессоренная масса; C_s – упругий элемент подвески (пружины или рессоры) с заданной жесткостью; B – гасящий элемент (амортизатор) с заданным коэффициентом вязкого трения; Z_r – высотная отметка покрытия автомобильной дороги; Z_s – вертикальная координата поддрессоренной массы; Z_u – вертикальная координата неподрессоренной массы

Fig. 1. Schematic of measuring device for *IRI* microprofile and calculation:

C_t – wheel with a specified tyre stiffness; M_u – unsprung part; M_s – sprung part; C_s – elastic suspension element (springs or leaf springs) with specified stiffness; B – damping element (shock absorber) with a specified coefficient of viscous friction; Z_r – elevation mark of the road surface; Z_s – vertical coordinate of sprung part; Z_u – vertical coordinate of unsprung part



Принципиальная схема измерений неровностей дорожных покрытий прибором для контроля ровности и скользкости дорожных покрытий (ПКРС)

² ГОСТ 33101–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 ноября 2015 г. № 1931-ст: введен впервые: дата введения 2016-08-01 / подготовлен Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ), Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 418 «Дорожное хозяйство». Стандартиформ, 2016. 23 с.

или толчкометром аналогична приведенной на рис. 1. При этом факторы, влияющие на точность измерений продольной ровности ПКРС или толчкометром, не отличаются от факторов, влияющих на точность определения *IRI* при вычислении интегрального значения вертикальных перемещений неподрессоренной массы с метрической размерностью (см/км). Существуют функциональные зависимости показателя продольной ровности *IRI* от результатов, полученных толчкометром и 3-метровой рейкой, приведенные в ОС-617-р³:

$$E(IRI) = 1,65 + 0,08P + 0,0005P^2, \quad (1)$$

где $E(IRI)$ – оценка ровности участка по *IRI*, м/км; P – количество просветов под 3-метровой рейкой, превышающих величину 3 мм. Эта величина выражается в процентах от общего количества просветов, полученных при измерении 3-метровой рейкой на выбранном участке.

Факторы, влияющие на точность измерений толчкометром, ПКРС и *IRI*, в научной литературе представлены в работах [7, 8].

Для сравнительного анализа влияния различных факторов на измерения микропрофиля рассмотрим более детально принцип измерения превышений (вертикальной координаты) профилометрами. В качестве датчиков для измерения разности высотных отметок (превышений) поддрессоренной массы Z_s и высотных отметок покрытия автомобильной дороги Z_r (приращений высоты ΔZ) (рис. 1) используются энкодеры, датчики линейных перемещений, акселерометры, инерциальные системы. Датчики обеспечивают «шаг» измерения приращений (линейная величина) в зависимости от требований и конструкции в диапазоне 0,01–10 мм, поэтому при определении величины неровностей (изменение вертикальной координаты) обеспечивается требуемая точность измерений ΔZ косвенно по данным измерения ускорения или непосредственно приращение вертикальных перемещений, например, энкодером.

В профилометрах применяются акселерометры, которые обеспечивают за счет двойного интегрирования вертикальных ускорений и соответствующей обработки (фильтрация) данных определение линейных вертикальных перемещений, при этом точность зависит (при использовании акселерометров) от времени, что влияет на определение амплитуды при увеличении длин неровностей. Для того чтобы от измеренных величин перейти к метрическим данным микропрофиля, необходимо для каждого профилометра, установленного на автомобиль, выполнять калибровку, а для расширения диапазона измерений калибровку выполнять на нескольких эталонных участках.

Сущность калибровки заключается в следующем: приращения высотных отметок, полученные с помощью профилометра, сравниваются с данными высокоточного короткошагового геометрического нивелирования (с шагом 0,125 и 0,25 м), выполненного в соответствии с нормативными требованиями. На основе этого сравнения производится расчет масштабного коэффициента, а также оцениваются точность, повторяемость и другие метрологические характеристики прибора. Определение масштабного коэффициента выполняется индивидуально

³ Руководство по оценке ровности дорожных покрытий толчкометром: утверждено и введено в действие Росавтодором от 17 июля 2002 г. № ОС-617-р. // МЕГАНОРМ: [сайт]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294846/4294846115.htm> (дата обращения: 27.10.2024).

для каждого автомобиля. На величину масштабного коэффициента m_0 влияют: точность и «шаг» геометрического нивелирования, скорость движения по эталонному участку V_0 , температура T_0 , профиль дороги (продольные уклоны) участка дороги i_0 , распределение масс в автомобиле M_0 . Таким образом, масштабный коэффициент позволяет учесть все индивидуальные особенности автомобиля, условия калибровки, скорость, уклоны, распределение масс в автомобиле, фактор температуры окружающего воздуха и особенности работы фильтра при обработке статистических данных за счет использования нескольких участков.

При натурных измерениях продольной ровности профилометрами с учетом приведенного влияние оказывают изменения параметров, при которых определялся масштабный коэффициент m_0 на эталонном участке. Например, изменение температуры влияет на жесткость пружин и жесткость шины, а изменение жесткости влияет на амплитуду поддрессоренной и неподдрессоренной масс при вертикальных перемещениях и, соответственно, на измерение приращений высотных отметок ΔZ .

Масштабный коэффициент в любой i -й точке будет зависеть от разности текущих значений параметров и значений этих же параметров в момент калибровки. Итоговый масштабный коэффициент m_i в любой i -й точке складывается из составляющих функциональных зависимостей f различных факторов, влияющих на результат измерения вертикальной координаты (приращения высотных отметок):

$$m_i = m_0 [f(\Delta V) + f(\Delta T) + f(\Delta i) + f(\Delta M)]. \quad (2)$$

Ошибка измерений амплитуды неровности δ_i , мм, в любой i -й точке будет составлять величину

$$\delta_i = (m_i - m_0) \Delta Z_i, \quad (3)$$

где m_i – текущий масштабный коэффициент; ΔZ_i – текущее значение приращения высотных отметок, мм.

Учесть изменения масштабного коэффициента m_i возможно аналитически, зная функциональные зависимости, а практически, с учетом влияния нескольких факторов одновременно, сложно. В ГОСТ 33101–2014 существуют ограничения только на отклонение скорости от паспортного значения, другие факторы не учитываются. При этом выдержать скорость движения в заданном диапазоне (например, 50 км/ч) в городских условиях и при интенсивном движении сложно, поэтому даже параметры, регламентированные в нормативных требованиях, оказывают негативное влияние на точность измерений [9].

Корректировать данные, измеренные профилометром, возможно при наличии текущих значений температуры, продольных уклонов, перераспределения массы автомобиля, скорости движения, что значительно усложняет измерительную систему, калибровку профилометров и непосредственно измерения. Результаты исследований [3, 4] подтверждают полученные выводы. Изменения показателя продольной ровности увеличиваются с течением времени при нескольких циклах измерений одного и того же участка автомобильной дороги, а в отдельных циклах точность не соответствует паспортным значениям и существенно их превышает, например, если внешние условия измерений отличаются от эталонных, при которых выполнялась калибровка.

Учитывая, что в качестве эталонного метода для калибровки профилометров используется короткошаговое нивелирование, логично представить, что данный метод является не эталонным средством для калибровки, а основным (вместо профилометров). В этом случае при определении продольной ровности параметры автомобиля, температура, продольный профиль и другие факторы на результат измерений влиять не будут. Кроме того, при короткошаговом нивелировании измеряемые значения (приращения высот, линейная координата) используются непосредственно так же, как и в методе амплитуд, для расчета показателя ровности. При этом исключается фильтрация, процесс, который обеспечивает определение параметров с какими-либо ограничениями в заданном диапазоне и, соответственно, с погрешностями, характерными только для конкретного фильтра.

Короткошаговое нивелирование широко применяется в геодезии при строительстве технологических линий, мониторинге сложного технологического оборудования, контроле подкрановых путей. Основным ограничением для широкого применения короткошагового нивелирования на автомобильных дорогах является высокая трудоемкость при выполнении измерений, исключающая возможность его практического применения в больших объемах на автомобильных дорогах. Кроме того, при измерении и обработке данных также требуется высокая квалификация геодезистов. Поэтому для создания эталонных участков, ограниченных по длине, такой способ, несмотря на высокую трудоемкость, применяется, т. к. нет альтернативы по точности данному методу при создании эталонных участков для калибровки профилометров.

Для возможности применения короткошагового нивелирования при определении показателя ровности дорожного покрытия необходимо исключить большую трудоемкость за счет автоматизации процесса нивелирования. Использование метода амплитуд для расчета показателя продольной ровности по данным короткошагового нивелирования позволит сохранить все преимущества этого метода, высокую точность и достоверность данных, а короткий шаг съемки (0,125; 0,25 м) обеспечит высокий уровень детализации. Так, привязка данных (величина амплитуды, начало и конец неровности) может быть выполнена в любой точке в линейной системе координат, исключается влияние внешних факторов на точность измерений, сложный процесс калибровки и влияние режима измерений. Таким образом, автоматизация короткошагового нивелирования может обеспечить эффективное использование данного метода для определения продольной ровности при выполнении исполнительных съемок и диагностике.

В СГУПС разработано аналогичное устройство [10], программное обеспечение и методика измерений, обеспечивающие короткошаговое нивелирование с шагом 5–15 см (в зависимости от конструкции ходовой тележки) с точностью измерения приращений высот 1 мм. Устройство включает подвижный объект (ходовую тележку), волоконно-оптический или механический гироскоп (в зависимости от конструкции), датчик пути и компьютер (рис. 2). Разработка выполнена на базе известных в геодезии измерительных систем, в основе которых лежит принцип механического (автоматизированного) нивелирования, включающий измерение высотных отметок прибором, установленным на автомобиль или специальные тележки, позволяющий полностью автоматизировать определение высотных отметок и их привязку в линейной системе координат.

В основе современных автоматизированных приборов лежит измерение продольного угла наклона подвижного объекта и приращения пути (расстояния) одометром, расчет приращения высот и их интегрирование. Применяются современные цифровые инклинометры, гироскопические и инерциальные системы, а также компьютеры и микроконтроллеры. Схема реализации таких систем в общем виде приведена на рис. 2 [10].

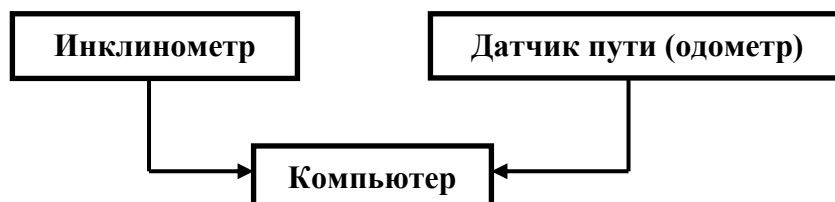


Рис. 2. Блок-схема устройства для определения продольной ровности короткошаговым нивелированием

Fig. 2. Block diagram of a device for measuring longitudinal flatness using short-step levelling

Сущность определения превышений в данных системах заключается в измерении продольного угла γ и единичного приращения пути ΔL , которые являются исходными для расчета текущего превышения h_i :

$$h_i = \sum_{i=1}^n \sin \gamma \Delta L, \quad (4)$$

где n – количество приращений пути; i – номер точки, для которой определяется превышение; ΔL – единичное приращение пути, мм; γ – текущий продольный угол наклона тележки, град.

Таким образом, формируется массив высотных отметок (приращений высот h_i) с шагом 5 или 15 см в зависимости от типа измерительного средства с линейной привязкой к координате пути, который при обработке данных обеспечивает широкий спектр решения инженерных задач, включая определение продольной ровности.

Амплитуды неровности δ_i , мм, для каждого измерительного интервала L рассчитывают по известной формуле

$$\delta_i = \left| \frac{h_{i-k} + h_{i+k}}{2} - h_i \pm \Delta_i \right|, \quad (5)$$

где h_{i-k} , h_{i+k} – условные превышения начальной и конечной точек заданного измерительного интервала L , м; h_i – псевдопревышение точки, для которой определяют амплитуду неровности, м; Δ_i – поправка, учитывающая кривизну дороги, при наличии вертикальной кривой с известным радиусом, мм.

Значение Δ_i определяется по формуле

$$\Delta_i = \frac{L^2}{8R}, \quad (6)$$

где L – длина измерительного интервала пути (10, 20, 40 м) для расчета поправки, мм; R – радиус вертикальной кривой (величина, известная из проекта или измеренная с использованием высотных отметок, например, приемником ГНСС), мм.

Программное обеспечение позволяет выполнить расчет показателя ровности по высотным отметкам (метод амплитуд) для измерительной базы 10, 20 и 40 м в соответствии с ГОСТ Р 56925–2016⁴, а также выполнить расчет по высотным отметкам значений амплитуд неровностей с учетом требований для измерения рейкой дорожной и *IRI* в соответствии с ГОСТ Р 59120–2021⁵ и ГОСТ 33220–2015⁶.

На рис. 3 приведены варианты реализации систем механического (автоматизированного) короткошагового нивелирования для различных условий измерения и особенностей применения на автомобильных дорогах и аэропортах (УДК «Ровность»).

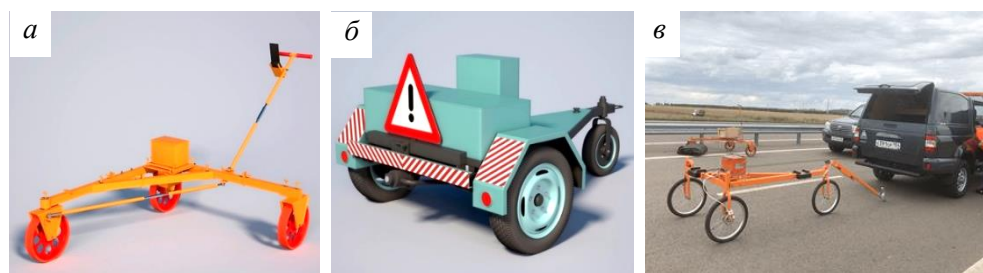


Рис. 3. Модель УДК «Ровность»:

а – ручной привод на закрытых для движения участках дорог с оптоволоконным гироскопом; *б* – прицепной модуль с механическим гироскопом; *в* – прицепной модуль-трансформер с оптоволоконным гироскопом

Fig. 3. 'Rovnost' profilometer:

a – manual drive on road sections closed to traffic with fiber optic gyroscope; *b* – trailer module with mechanical gyroscope; *c* – trailer transformer module with fiber optic gyroscope

На рис. 4 показано главное окно оператора с результатами оценки продольной ровности.

⁴ ГОСТ Р 56925–2016. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 мая 2016 г. № 370-ст: введен впервые: дата введения 2016-10-01 / подготовлен Научно-исследовательским институтом ЗАО «Союздорнии» // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: https://kontrol04.ru/upload/2023/03/5_20221207-gost-r-56925-2016-nacionalnyj-standart-rossijskoj-federaci.pdf (дата обращения: 21.02.2025).

⁵ ГОСТ Р 59120–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 марта 2021 г. № 121-ст: введен впервые: дата введения 2021-05-01 / подготовлен Федеральным автономным учреждением «Российский дорожный научно-исследовательский институт» Министерства транспорта Российской Федерации // КонсультантПлюс : [сайт]. URL: https://www.mos.ru/upload/documents/files/2804/GOSTR59120-2021DorogiautomobilnicobshegopolzovaniyaDorojnayaodej_.pdf (дата обращения: 21.02.2025).

⁶ ГОСТ 33220–2015. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к эксплуатационному состоянию: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 августа 2015 г. № 1122-ст: дата введения 2015-12-01 / подготовлен Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский дорожный научно-исследовательский институт» Министерства транспорта Российской Федерации. URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/6435/GOST33220-2015.pdf> (дата обращения: 21.02.2025).

Результат						
?	Шаг определения ровности	5 м	10 м	20 м	Интервал, м	Рейка, %
Всего измерений		38893	38799	38565	0-100	0.0
Количество измерений меньше (равно) допустимого		38849	38523	38060	100-200	0.0
		99.9%	99.3%	98.7%	200-300	0.0
Количество измерений превышающих допуск		44	276	505	300-400	1.0
		0.1%	0.7%	1.3%	400-500	0.0
					500-600	3.0
					600-700	3.0
Количество измерений не превышающих 1,5 допуск		44	276	490	700-800	1.5
		0.1%	0.7%	1.3%	800-900	0.0
Количество измерений свыше 1,5 допуска		0	0	15	900-1000	0.0
		0.0%	0.0%	0.0%	1000-1100	3.5
Максимальное отклонение в мм.		6мм	10мм	24мм	1100-1200	6.0
		по методу амплитуд		по рейке	по ИРИ	
ВЫВОД:		НЕТ		ДА	ДА	
(Соответствие проверяемого участка дороги требованиям ГОСТ и СНиП)						
		Экспорт		Печать	OK	

Рис. 4. Результаты измерений и оценки показателя «ровность»
Fig. 4. Measurement and assessment results of pavement flatness

В соответствии с ГОСТ Р 56925–2016 расстояние на измерительном интервале $i - (i - 1)$ составляет 5 м, высотные отметки в соответствии с нормативными требованиями определяются через каждые 5 м, а расчет амплитуд выполняется для измерительной базы 10, 20 и 40 м. По данным массива высотных отметок (превышений) определяется количество просветов под 3-метровой рейкой и международный показатель ровности *IRI*.

Выводы

При сравнительном анализе особенностей определения продольной ровности покрытий автомобильных дорог дорожным профилометром и универсальным дорожным курвиметром «Ровность» необходимо отметить следующее:

- прибор УДК «Ровность» обеспечивает измерение высотных отметок, определение амплитуд неровностей, длин неровностей с преобразованием данных в интегральные показатели с единицами измерения (мм/м, см/км), просветы под 3-метровой дорожной рейкой;
- на точность измерения УДК «Ровность» не оказывают существенного влияния внешние факторы (изменение скорости движения, изменение массы автомобиля, температура, продольный профиль и др.);
- работа с УДК «Ровность» не требует трудоемких процессов по созданию эталонных базисов с использованием геометрического нивелирования, калибровки, а также различных по настройкам фильтров;
- применение УДК «Ровность», включающего в себя оптоволоконные или лазерные гироскопы, обеспечивает высокую точность измерения превышений и, соответственно, амплитуд и длин неровностей, сопоставимую с геометрическим короткошаговым нивелированием;
- УДК «Ровность» может применяться для создания эталонных участков при калибровке профилометров дорожных передвижных лабораторий вместо геометрического нивелирования;

– скорость движения при определении показателя продольной ровности профилометром составляет 50 км/ч, при использовании УДК «Ровность» – 25 км/ч при транспортировке прибора автомобилем и 3 км/ч при ручном при-
воде при транспортировке человеком;

– погрешность измерения УДК «Ровность» – менее 1 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Пегин П.А., Капский Д.В., Буртыль Ю.В.* Разработка методики оценки продольной ровности дорожного покрытия при изменении прочности дорожных конструкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 4. С. 37–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-37-47. EDN: UDGHIJ
2. *Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Шамраев Л.Г.* Современный подход к оценке транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог государственной компании «Российские автомобильные дороги» // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2016. № 1 (6). С. 38–51. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.1.7. EDN: XAMXGZ
3. *Маданбеков Н.Ж., Абышев Т.Б.* Совершенствование методов определения ровности дорожных одежд в условиях Кыргызской Республики // Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 10 (30). С. 72–78. EDN: ZRYLQB
4. *Середович В.А., Алтынцев М.А., Егоров А.К.* Определение индекса ровности дорожного покрытия по данным мобильного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22. № 3. С. 33–44. EDN: ZHICHF
5. *Щербаков В.В., Акимов С.С., Ефимов Н.В.* Приборы для определения ровности покрытия на автомобильных дорогах // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2023. Т. 1. № 1. С. 184–190. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-184-190. EDN: GMLCEW
6. *Корневский В.В., Кнышов А.А., Мордик Е.А.* Оптимизация методов диагностики и оценки технического состояния автомобильных дорог // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2019. № 9. С. 198–202. DOI: 10.23672/SAE.2019.9.36819. EDN: UNIIUV
7. *Щербаков В.В., Конкин А.В., Щербаков И.В., Ковалева О.В.* Средства и методы измерения ровности покрытий автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2021. № 1 (45). С. 61–74. EDN: UVQSAA
8. *Щербаков В.В., Акимов С.С.* Совершенствование метода измерения продольной ровности покрытий автомобильных дорог // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 2 (69). С. 106–114. DOI: 10.52170/1815-9265_2024_69_106. EDN: TNDCPN
9. *Уроков А.Х.* Анализ результатов ровности дорожного покрытия, полученных на различных устройствах // Молодой ученый. 2023. № 21 (468). С. 109–111. EDN: SRKDXR
10. *Патент № 2820228 С1* Российская Федерация, МПК G01C 7/04, E01C 23/01. Устройство для определения ровности покрытия автомобильных дорог : № 2023127396 : заявл. 23.10.2023 : опубл. 31.05.2024 / Щербаков В.В., Щербаков И.В., Бунцев И.А., Акимов С.С. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения». 12 с. EDN: WIAJVC

REFERENCES

1. *Pegin P.A., Kapskiy D.V., Burtyl Yu.V.* Development of Assessment Methodology for Pavement Longitudinal Flatness at Different Durability of Road Structures. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy*. 2022; 4: 37–47. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-37-47. EDN: UDGHIJ (In Russian)
2. *Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Shamraev L.G.* A Modern Approach to Assessing Transport and Road Operation of the State Company "Russian Roads". *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog*. 2016; 1 (6): 38–51. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.1.7. EDN: XAMXGZ (In Russian)
3. *Madanbekov N.Zh., Abyshv T.B.* Improvement of Measuring Road Pavements Flatness in the Kyrgyz Republic. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2017; (10 (30)): 72–78. EDN: ZRYLQB (In Russian)

4. Sereдович V.A., Altyntsev M.A., Egorov A.K. Determination of Road Surface Flatness Index Based on Mobile Laser Scanning Data. *Vestnik of Siberian State University of Geosystems and Technologies*. 2017; 22 (3): 33–44. EDN: ZHICHF (In Russian)
5. Shcherbakov V.V., Akimov S.S., Efimov N.V. Devices for Road Surface Flatness Measurement. *Interesko Geo-Sibir'*. 2023; 1(1): 184–190. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-184-190. EDN: GMLCEW (In Russian)
6. Korenevsky V.V., Knyshov A.A., Mordik E.A. Optimization of Diagnostic and Assessment Methods of Road Technical Conditions. *Gumanitarnye, sotsial'no-ekonomicheskie i obshchestvennye nauki*. 2019; 9: 198–202. DOI: 10.23672 / SAE.2019.9.36819. EDN: UNIIUV (In Russian)
7. Shcherbakov V.V., Konkin A.V., Shcherbakov I.V., Kovaleva O.V. Modern Instruments and Methods for Measuring Road Pavement Flatness. *Dorogi i mosty*. 2021; 1(45): 61–74. EDN: UVQSAA (In Russian)
8. Shcherbakov V.V., Akimov S.S. Improving Measuring Method of Longitudinal Flatness of Road Surfaces. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2024; 2 (69): 106–114. DOI: 10.52170/1815-9265_2024_69_106. EDN: TNDCPN (In Russian)
9. Urokov A.Kh. Measurement Results of Road Pavement Flatness Obtained by Various Devices. *Molodoi uchenyi*. 2023; 21 (468): 109–111. EDN: SRKDXR (In Russian)
10. Shcherbakov V.V., Shcherbakov I.V., Buntsev I.A., Akimov S.S. “Device for Road Flatness Measurement”. Patent Russ. Fed. No. 2820228. 2024. 23 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Щербakov Владимир Васильевич, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, vvs@stu.ru

Акимов Сергей Сергеевич, инженер-технолог, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, ak_s_s@mail.ru

Ковалева Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, kov@stu.ru

Authors Details

Vladimir V. Shcherbakov, DSc, Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, vvs@stu.ru

Sergei S. Akimov, Industrial Engineer, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, ak_s_s@mail.ru

Olga V. Kovaleva, PhD, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, kov@stu.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.02.2025
Одобрена после рецензирования 08.04.2025
Принята к публикации 21.04.2025

Submitted for publication 24.02.2025
Approved after review 08.04.2025
Accepted for publication 21.04.2025

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 268–278.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 268–278.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.8+667.621.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-268-278

EDN: YUXNQF

АСФАЛЬТЕНОГЕНЕЗ В БИТУМОМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ИХ СТАРЕНИЯ

Виктор Николаевич Лукашевич, Ольга Дмитриевна Лукашевич
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Все более актуальной становится проблема замедления старения асфальтобетонных дорожных покрытий, поскольку именно их состояние определяет межремонтные сроки и долговечность автомобильных дорог.

Органические вяжущие в битумоминеральных композициях (БМК) начинают подвергаться старению уже на стадии их изготовления. Этот процесс происходит на протяжении всего жизненного цикла асфальтобетона. Сложные физико-химические превращения происходят в первую очередь в адсорбционно-сольватных пленках битума на поверхности зерен минеральных материалов. Идут процессы дальнейшей полимеризации компонентов нефтяного вяжущего, сопровождающиеся увеличением их молекулярных масс в последовательности: масла → смолы → асфальтены. Повышение концентрации асфальтенов предложено называть асфальтеногенезом. Этот термин означает уменьшение содержания низкомолекулярных и увеличение высокомолекулярных фракций; рост вязкости битумных пленок, повышение их хрупкости при отрицательных температурах и, как следствие, усиление трещинообразования, разрушение дорожной одежды еще до наступления установленных нормативами сроков службы.

Целью работы являлось исследование процессов старения БМК во временном континуме под влиянием природно-климатических факторов путем контроля содержания асфальтенов в материале конструктивного слоя. Поскольку асфальтены являются практически стопроцентным концентратом парамагнитных центров, интенсивность асфальтеногенеза можно оценивать по изменениям концентрации парамагнитных центров. Таким образом, концентрация парамагнитных центров в БМК может выступать в качестве косвенного показателя степени старения БМК.

Материалы и методы исследования. В качестве минеральных компонентов использовались гранит и известняк. Вяжущим веществом служил битум марки БНД 90/130, а роль дисперсной арматуры играли полиамидные волокна, адсорбат – сырая нефть Первомайского месторождения (Томская обл.). Изменения концентрации парамагнитных центров в образцах БМК оценивались методом ЭПР на приборе RADIOPAN SE/X-25-44 с рубиновыми стержнями.

Результаты. В работе развита идея оценивания степени асфальтеногенеза по количеству парамагнитных центров в БМК. Обоснована возможность модифицирования поверхности минеральных материалов в процессе приготовления БМК путем введения в их состав полимерной дисперсной арматуры из отрезков обработанных химических волокон, пропитанных нефтепродуктами. Предложенное техническое решение позволяет снизить интенсивность асфальтеногенеза, а следовательно, и старение битумоминеральных композиций.

Ключевые слова: битумоминеральная смесь, асфальтогенез, адсорбция, метод ЭПР, полимерно-дисперсное армирование, битум, старение асфальтобетона, модифицирование

Для цитирования: Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Асфальтогенез в битумоминеральных композициях как показатель их старения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 268–278. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-268-278. EDN: YUXNQF

ORIGINAL ARTICLE

ASPHALTENE GENESIS IN BITUMEN-MINERAL COMPOSITIONS AS AGEING INDICATOR

Viktor N. Lukashevich, Olga D. Lukashevich

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The problem of reducing the aging intensity of asphalt concrete pavements, which determines periods between repairs and road durability, is becoming increasingly urgent. Organic binders in bitumen-mineral compositions (BMC) start ageing already during their manufacture. This process occurs throughout the entire life cycle of asphalt concrete. Complex physicochemical transformations occur first of all, in adsorption-solvation films of bitumen on the grain surface of mineral materials. Further polymerization of oil binder components is accompanied by an increase in their molecular weight in the following order: oils → resins → asphaltenes. It is proposed to call the increase in the asphaltene concentration asphaltene genesis. This term means a decrease in the content of low-molecular fractions and an increase in high-molecular fractions; growth in viscosity of bitumen films, increase in their brittleness at negative temperatures and, as a consequence, increase in the crack formation, destruction of road surface even before the service life established by standards. It is proposed to estimate the degree of asphaltene by the quantity of paramagnetic centers in BMC.

Purpose: The aim of the work is to study the BMC ageing under the influence of natural and climatic factors by control the content of asphaltenes in the structural layer. Since asphaltenes are one hundred percent concentrate of paramagnetic centers, the intensity of the asphaltene formation can be estimated by changes in the concentration of paramagnetic centers. Thus, the concentration of paramagnetic centers in the BMC can act as an indirect indicator of BMC aging.

Methodology/approach: Granite and limestone were used as mineral components. BND 90/130 bitumen served as a binder, while polyamide fibres acted as dispersed reinforcement and crude oil from the Pervomaisky field (Tomsk Region) served as an adsorbate. Changes in the concentration of paramagnetic centres in BMC samples were evaluated using the EPR method on a RADIOPAN SE/X-25-44 device with ruby rods.

Research findings: The surface modification of mineral materials is shown during the BMC preparation by an introduction of polymer dispersed reinforcement in the BMC composition from sections of processed chemical fibers impregnated with oil products. The proposed solution allows decreasing the intensity of asphaltene formation, and, consequently, aging of bitumen-mineral compositions.

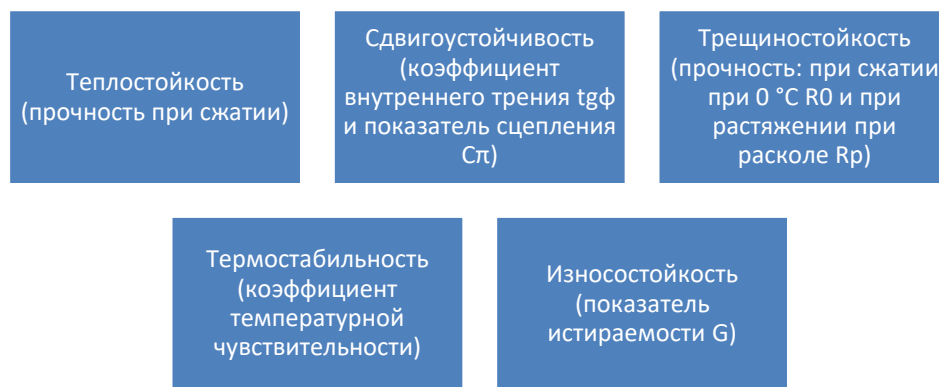
Keywords: bitumen-mineral mixture, asphaltene, adsorption, polymer-dispersed reinforcement, bitumen, asphalt concrete aging, modification

For citation: Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Asphaltene Genesis in Bitumen-Mineral Compositions as Ageing Indicator. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 268–278. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-268-278. EDN: YUXNQF

Широкое использование в дорожном строительстве битумоминеральных композиций (БМК) связано с такими их характеристиками, как технологичность получения, функциональность устройства конструктивных слоев дорожных одежд, в дальнейшем – простота ремонта и содержания. Поскольку в качестве органических вяжущих, используемых для получения БМК, применяются битумы, основные недостатки БМК предопределены свойствами битумов. Их термопластичность обуславливает низкую сдвигоустойчивость дорожного покрытия при высоких температурах. В результате появляются волны, гребенки, колеи, а также иные виды дефектов, вплоть до глубоких разрушений конструктивного слоя.

Указанные деформации связаны с процессами, протекающими в адсорбционно-сольватных оболочках битума. Повышенные температуры делают их эластичными, плохо сопротивляющимися нагрузкам, что приводит к росту сдвиговых деформаций конструктивного слоя из БМК. Низкие зимние температуры вызывают снижение эластичности пленок битума в адсорбционно-сольватных оболочках, что обуславливает формирование трещин.

На рисунке схематично показаны основные свойства БМК, являющиеся ключевыми в обеспечении долговечности дорожных покрытий, непосредственно связанные с процессами, протекающими в адсорбционно-сольватных оболочках битума.



Основные свойства БМК
Main properties of BMS

Старение БМК является результатом целого ряда физико-химических процессов, среди которых первые позиции занимают избирательная фильтрация органических веществ на стадии получения БМК и трансформирование компонентов БМК под влиянием климатических условий, природных явлений, техногенных воздействий при эксплуатации автомобильной дороги. Как показано в работах [1–3], для битумоминеральных композиций одной из основных форм старения нефтяного битума являются изменения соотношения компонентов битума в приповерхностных слоях.

На интенсивность процесса старения оказывают влияние следующие факторы: испарение легкой фракции мальтеновой части нефтяного битума,

кислород воздуха, температура конструктивного слоя. Также очень важным фактором является процесс фракционирования компонентов битума (избирательная фильтрация), который начинается при обработке минеральных материалов битумом и сопровождает весь жизненный цикл конструктивного слоя. При избирательной фильтрации во внутреннее пространство (тонкие поры) минерального материала проникают масла, у поверхности распределены смолы, непосредственно на поверхности – асфальтены. В результате избирательной фильтрации адсорбционно-сольватные оболочки битума обедняются низкомолекулярными фракциями, что ускоряет старение битумоминеральных композиций. Адсорбция в данном случае имеет необратимый характер. Указанные процессы проявляются в структурных изменениях состава битума. Старение масел сопровождается преобразованием их в смолы, которые, в свою очередь, превращаются в асфальтены [4–7]. Эти процессы ускоряются в присутствии содержащихся в минеральных порошках полутвердых оксидов – Fe_2O_3 и Al_2O_3 , играющих роль катализаторов, что показано в работах [8–11].

Процесс увеличения концентрации асфальтенов в нефтяном битуме при его старении предложено назвать термином «асфальтогенез». Под этим термином будем понимать совокупность существенных изменений в качественном и количественном составе компонентов нефтяного битума: снижение концентрации низкомолекулярных фракций (масел и смол) и рост высокомолекулярных фракций (асфальтенов). Ранее подобные физико-химические превращения были описаны исследователями в работах [12–22]. Трансформации, происходящие в составе нефтяного битума, приводят к ухудшению реологических и прочностных свойств битумоминеральных композиций. Увеличивается относительное удлинение при разрыве, растут прочность и модуль упругости. Достигнув максимальных значений в среднем за 10-летний период, эти показатели падают. Авторами [23, 24] установлено, что при старении битумоминеральных композиций при различных температурах концентрация асфальтенов может значительно возрасти (до 40 %), что подтверждает протекание асфальтогенеза в его активной фазе.

Когезионные связи между зернами минерального материала обеспечивают образующиеся на их поверхности адсорбционно-сольватные оболочки битума. Потеря низкомолекулярных фракций влечет утрату эластичности, приводит к хрупкости БМК, особенно при низких температурах, интенсивному трещинообразованию и преждевременному разрушению дорожных одежд.

Приведенные выше аргументы и результаты исследований свидетельствуют о том, что для снижения скорости и интенсивности разрушения дорожных одежд из асфальтобетона с использованием БМК необходимо:

- подавлять избирательную фильтрацию компонентов битума;
- уменьшать интенсивность асфальтогенеза;
- ингибировать реакции старения битума, протекающие при участии оксидов железа и алюминия.

Решить поставленные задачи и одновременно улучшить реологические характеристики, повысить показатели физико-механических свойств конструктивных слоев из битумоминеральных композиций возможно путем их дисперсного армирования, описанного ранее в наших работах.

Для снижения стоимости дисперсно-армированных битумоминеральных композиций перспективно применять в качестве дисперсной арматуры химические волокна, полученные путем резки промышленных отходов – волокнистых сорбентов (матов, заградительных бонов и т. д.), отработавших свой ресурс. Такие отходы содержат регулируемое количество собранного углеводородного сырья, разлитого при авариях [25–31]. При их использовании возникает возможность реализации «двухстадийной технологии обработки минеральных материалов двумя типами органических вяжущих», описанной в работе [32].

На первой стадии в минеральный материал следует вводить органическое вяжущее, характеризующееся высокими показателями адгезии. На второй стадии полученная смесь обрабатывается вяжущим с высокими когезионными свойствами. Поэтому при приготовлении битумоминеральных композиций в минеральный материал следует вводить сначала (первая стадия) волокна дисперсной арматуры, содержащие регулируемое количество собранного углеводородного сырья. Углеводородное сырье (нефть, мазут, смолы сланцевые и каменноугольные, различного происхождения фусы, пасты и т. д.) отличается высокими адгезионными свойствами и химической активностью, поскольку содержат большое количество поверхностно-активных веществ (фенолы, кетоны, карбоновые кислоты и т. д.). Вступая в химическое взаимодействие с поверхностью минеральных материалов, эти вещества создают устойчивые хемосорбционные связи. Этот процесс сопровождается коагуляцией пор и капилляров минеральных материалов с модифицированием всех поверхностей. Коагуляция снижает (либо совсем предотвращает) фракционирование и избирательную фильтрацию компонентов нефтяного битума. Активно взаимодействуя с поверхностью минеральных материалов, поверхностно-активные вещества нейтрализуют полутонкие оксиды, что не позволит им выполнять роль катализаторов старения нефтяных битумов.

На второй стадии приготовления смесь минеральных материалов с волокнами дисперсной арматуры, ранее адсорбировавшей углеводороды, соединяется с дозированным количеством нефтяного битума. При этом не происходит избирательная фильтрация с фракционированием компонентов битума. Это объясняется имевшим место на предыдущей стадии заполнением органических пор и капилляров минерального материала. Содержание асфальтенов в верхнем адсорбционном слое поверхности частиц минеральных материалов, покрытых битумом, не будет повышаться, свидетельствуя о том, что интенсивность асфальтеногенеза (за счет фракционирования) снижается. Снижается также интенсивность асфальтеногенеза за счет уменьшения скорости превращения смол в асфальтены, а масел – в смолы. Поскольку оксиды железа и алюминия при взаимодействии с органическими материалами, содержащимися в дисперсной арматуре, уже нейтрализованы как катализаторы старения, их отрицательное влияние на нефтяной битум будет минимальным. В результате на поверхности каждой частицы минерального материала происходит наложение и совместное влияние на свойства БМК адсорбционно-сольватных оболочек двух типов вяжущих. Первый слой (сформировавшийся в результате контакта минеральных материалов с жидкими углеводородами, поглощенными частицами дисперсной арматуры), обеспечивающий хорошую

адгезионную способность, снижает интенсивность избирательной фильтрации компонентов битума. Второй слой представлен собственно нефтяным битумом. Этот слой более водостойкий. Он дает хорошую когезионную связь между частицами минерального материала.

Протекающие таким образом процессы структурообразования в БМК подавляют асфальтогенез. Происходящее повышение содержания низкомолекулярных фракций в приповерхностных слоях нефтяного битума приводит к лучшей их эластичности в холодное время года и, как следствие, к снижению трещинообразования верхнего слоя дорожной одежды. Повышение трещиностойкости обеспечивает также содержащаяся в конструктивном слое дисперсная арматура. Кроме того, пространственная армирующая решетка из дисперсной арматуры повышает сдвигустойчивость материала в летний период, когда конструктивный слой нагревается до температуры 50–60 °С. В целом комплекс вышеуказанных процессов структурообразования БМК увеличивает долговечность асфальтобетонных покрытий. Контроль над изменением концентрации парамагнитных центров в битумоминеральных композициях позволяет делать выводы об интенсивности асфальтогенеза как индикатора старения БМК.

Это подтверждено экспериментально методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Основанием для применения этого метода являлись результаты исследований, свидетельствующие о том, что в асфальтенах сконцентрирована большая часть парамагнитных центров [34–36].

В ходе экспериментальных работ исследовались минеральные материалы кислых и карбонатных пород. Кислые породы были представлены гранитом, а карбонатные – известняком. Исследовались смеси этих пород с нефтяным битумом как образец традиционной технологии приготовления БМК и смеси, созданные путем обработки указанных пород сначала сырой нефтью, а затем нефтяным битумом, как пример двухстадийной технологии приготовления БМК дисперсно-армированными волокнами, полученными путем резки отработанных сорбентов, содержащих регулируемое количество собранной при разливе сырой нефти [31]. В исследованиях использовался нефтяной дорожный битум марки БНД 90/130 Ачинского НПЗ и сырая нефть Первомайского месторождения Томской области, полученная после центрифугирования дисперсной арматуры из отработанных волокнистых сорбентов. Были приготовлены две группы образцов. Первая группа исследовалась методом ЭПР сразу после смешивания органических и минеральных материалов. Вторая группа исследовалась после того, как материалы были подвергнуты старению в течение шести часов в термостабилизированной камере. Таким образом, смеси подвергались процедуре старения, а затем определялась концентрация в них парамагнитных центров как показателей старения БМК.

Изменения концентрации парамагнитных центров в образцах БМК исследовались по методике, описанной в работе [32].

Результаты исследований интенсивности старения битумоминеральных композиций, оказывающей влияние на изменение концентрации парамагнитных центров в битумоминеральных композициях (асфальтогенез), представлены в таблице.

**Влияние процессов старения битумоминеральных композиций
на изменение в них количества парамагнитных центров
BMC ageing effect on the quantity of paramagnetic centers**

№ п/п	Состав органоминеральной смеси и технология ее производства	Концентрация парамагнитных центров в смеси, г ⁻¹	
		До старения	После старения
1	Гранит + битум (одностадийная технология)	0,22·10 ¹⁷	0,7·10 ¹⁷
2	Гранит + нефть + битум (двухстадийная технология)	0,19·10 ¹⁷ Снижение на 14 %	0,26·10 ¹⁷ Снижение на 63 %
3	Известняк + битум (одностадийная технология)	3,6·10 ¹⁷	6,4·10 ¹⁷
4	Известняк + нефть + битум (двухстадийная технология)	0,4·10 ¹⁷ Снижение на 89 %	4,7·10 ¹⁷ Снижение на 26 %

Как видно из данных таблицы, физико-химические процессы, протекающие при старении БМК, сопровождаются повышением концентрации парамагнитных центров и интенсификации асфальтеногенеза. При этом концентрация парамагнитных центров в смеси битума с гранитом увеличилась в 3,18 раза, а в смеси битума с известняком – только в 1,8 раза. Применение двухстадийной технологии приготовления битумоминеральных композиций позволяет снизить концентрацию парамагнитных центров в смесях с кислыми породами минеральных материалов на 63 %, а в смеси с карбонатными породами – на 26 %. Но при этом изначально, уже на стадии приготовления битумоминеральных композиций, видно, что концентрация парамагнитных центров в смесях с карбонатными породами в 16 раз выше, чем в смесях с кислыми породами. Это можно объяснить тем, что гранит является более плотной породой и процессы избирательной фильтрации компонентов битума в его поры и капилляры происходят менее интенсивно, чем в поры и капилляры известняка, являющегося более пористой породой. Эти результаты соответствуют результатам исследований, выполненных под руководством Н.А. Гловой [22] и профессора Ф.Г. Унгера [35], в которых доказано, что при большем исходном содержании асфальтенов в битуме интенсивность изменения его химического состава при старении меньше.

Таким образом, исследования, выполненные с применением ЭПР, свидетельствуют, что интенсивность асфальтеногенеза, коррелирующая с концентрацией парамагнитных центров, является индикатором старения БМК. Изучение интенсивности избирательной фильтрации компонентов битума в поры и капилляры минеральных материалов и особенностей влияния полуторных оксидов на интенсивность старения БМК комплексом современных физико-химических методов – задача дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гезенцев Л.Б., Горелышев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1985. 350 с.

2. Гезенцев Л.Б., Колбанев И.В., Рвачева Э.М. Механо-химические процессы в битумоминеральных системах // Автомобильные дороги. 1971. № 2. С. 6–9.
3. Бабеев В.И. Старение асфальтобетона в условиях юга России // Автомобильные дороги. 1994. № 3. С. 21.
4. Бахрах Г.С. Оценка термоокислительной стабильности асфальтовых материалов с учетом роли контактных взаимодействий // Труды Союздорнии. 1975. Вып. 79. С. 132–140.
5. Давыдова А.Р., Гладырь С.А., Телкова Т.Н. Исследование изменений, протекающих в битумах при их глубоком окислении // Труды Союздорнии. 1977. Вып. 100. С. 4–12.
6. Давыдова А.Р. Исследование процесса старения битума под влиянием различных факторов // Труды Союздорнии. 1971. Вып. 44. С. 48–54.
7. Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы. Москва : Транспорт, 1983. 383 с.
8. Мелентьев В.А. Состав и свойства золы и шлака ТЭЦ. Москва : Энергоиздат, 1985. 285 с.
9. Методические рекомендации по технологии применения в асфальтобетоне отвалных золошлаковых смесей теплоэлектростанций. Москва : СоюздорНИИ, 1978. 23 с.
10. Чистяков Б.З., Лялинов А.Н. Использование минеральных отходов промышленности. Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1984. 150 с.
11. Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification // Advances in Colloid and Interface Science. 2009. V. 145 (1–2). P. 42–82.
12. Farcas F. Etude d'une methode de simulation du vieillissement sur route des bitumes // Laboratoire Central des Ponts et Chausses. 1996.
13. Petersen J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability: state of the art // Transportation Research Board 999. 1984. P. 13–30. DOI: 10.1016/S0376-7361(09)70285-7
14. Petersen J. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships // Transportation Research E-Circular (Vol. 1). Transportation Research Board. Washington, DC, 2009. 68 p.
15. Siddiqui M.N., Ali M.F. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts Siddiqui // Fuel. 1999. V. 78 (9). P. 1005–1015.
16. Siddiqui M.N., Ali M.F. Investigation of chemical transformations by NMR and GPC during the laboratory aging of Arabian asphalt // Fuel. 1999. V. 78 (12). P. 1407–1416.
17. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. I. Oxygen absorption behaviors and kinetics // Petroleum Science and Technology. 2003. V. 21 (1). P. 283–299.
18. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. II. Chemical group composition and structure changes // Petroleum Science and Technology. 2004. V. 22 (3). P. 263–274.
19. Qi Y., Wang F. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. III. Average molecular structure parameter changes // Petroleum Science and Technology. 2004. V. 22 (3). P. 275–286.
20. Reyes F.A., Daza C.E., Rondón H.A. Determination of SARA fractions of environmentally aged Colombian asphalts using liquid chromatography column // Revista EIA. 2012. V. 17. P. 47–56.
21. Глотова Н.А., Горишков В.С., Кац Б.И. Изменение реологических свойств и химического состава битумов при старении // Химия и технология топлив и масел. 1980. № 4. С. 47–49.
22. Слободчиков Ю.В. Исследование влияния условий эксплуатации на надежность битумоминеральных покрытий автомобильных дорог Северного Казахстана : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1972. 32 с.
23. Mohammed A.A., Morshed K. The effect of ageing on physical and chemical properties of asphalt cement // Iraqi journal of chemical and petroleum engineering. 2008. V. 9. № 2. P. 9–15.
24. Пишеничных О.А., Скорик Д.С. Опыт применения дисперсно-армированных асфальтобетон в дорожном строительстве // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. Вып. 141. С. 121–127.
25. Алиахван А., Калгин Ю.И. Улучшение структурно-механических свойств теплового асфальтобетона методом полимерно-дисперсного армирования // Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. 2021. Вып. 61. С. 53–61.

26. Пиеничных О.А. Деформационно-прочностные характеристики дисперсно-армированных асфальтобетонов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. Вып. 143. С. 41–44.
27. Мерзлякин А.Е., Гамеляк И.П. Испытания конструкций дорожных одежд для оценки эффективности применения дисперсно-армированного асфальтобетона // Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд // Труды Союздорнии. 1990. С. 17–25.
28. Smith R.D. Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: interim report // Transp. Res. Rec. 1983. № 916. P. 6–18.
29. Tessoneau H. Revêtement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisieme Voie Macon nord // Revue generale des Routes et des Aerodromes. 1988. V. 62. № 650. P. 77–78.
30. Pinaud Y., Hintzi J., Poirier J., Chanseaulme M. Le Rugoflex. Une experience de dix ans // Revue generale des Routes et des Aerodromes. 1988. № 649. P. 61–64.
31. Лукашевич В. Увеличения срока службы асфальтобетонных покрытий за счет двухстадийного введения органических вяжущих в процессе производства асфальтобетонных смесей // Строительные материалы. 2003. № 1. С. 24–25.
32. Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д., Мокишин Р.И. Применение электронного парамагнитного резонанса для исследования процессов старения органического вяжущего в дисперсно-армированных основаниях дорожных одежд // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 179–189. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-179-189
33. Флоровская В.Н., Овчинникова Л.И. Люминесцентная микроскопия битуминозных веществ. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 80 с.
34. Верти Дж., Болтон Дж. Теория и практика применения метода ЭПР : пер. с англ. Москва : Мир, 1975. 368 с.
35. Унгер Ф.Г., Андреева Л.Н. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов. Новосибирск : Сибирская издательская фирма РАН «Наука», 1995. 192 с.
36. Железко Е.П., Печеный Б.Г. О кинетике образования и рекомбинации свободных радикалов в битумах // Труды Союздорнии. 1970. Вып. 46. С. 137–142.

REFERENCE

1. Gezentsvei L.B., Gorelyshev N.V., Boguslavskii A.M., Korolev I.V. Asphalt Concrete for Roads. 2nd edn. Moscow: Transport, 1985. 350 p. (In Russian)
2. Gezentsvei L.B., Kolbanev I.V., Rvacheva E.M. Mechanochemical Processes in Bitumen-Mineral Systems. *Avtomobil'nye dorogi*. 1971; (2): 6–9. (In Russian)
3. Babaev V.I. Ageing of Asphalt Concrete in Southern Russia. *Avtomobil'nye dorogi*. 1994; (3): 21. (In Russian)
4. Bakhrakh G.S. Assessment of Thermal-Oxidative Stability of Asphalt Materials with Regard to Contact Interactions. *Trudy Soyuzdornii*. 1975; (79): 132–140. (In Russian)
5. Davydova A.R., Gladys' S.A., Telkova T.N. Changes in Bitumen During Deep Oxidation. *Trudy Soyuzdornii*. 1977; (100): 4–12. (In Russian)
6. Davydova A.R. Ageing Process of Bitumen under the Influence of Various Factors. *Trudy Soyuzdornii*. 1971; (44): 48–54. (In Russian)
7. Grushko I.M., Korolev I.V., Borshch I.M., Mishchenko G.M. Road Construction Materials. Moscow: Transport, 1983. 383 p. (In Russian)
8. Melent'ev V.A. Composition and Properties of Ash and Slag from Thermal Power Plants. Moscow: Energoizdat, 1985. 285 p. (In Russian)
9. Methodological Recommendations on using Ash and Slag Mixtures from Thermal Power Plants in Asphalt Concrete. Moscow: SoyuzdorNII, 1978. 23 p. (In Russian)
10. Chistyakov B.Z., Lyalinov A.N. Use of Industrial Mineral Waste. Leningrad: Stroiizdat, Leningradskoe otdelenie, 1984. 150 p. (In Russian)
11. Lesueur D. The colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009; 145 (1–2): 42–82.
12. Farcas F. Etude d'une methode de simulation du vieillissement sur route des bitumes. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 1996.