УДК 691.175:625.7
DOI 10.47367/0021-3497_2025_2_365

# ВЫБОР ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ГЕОРЕШЕТКИ ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

# THE CHOICE OF A POLYMER MATERIAL FOR THE MANUFACTURE OF AN INNOVATIVE GEOGRID FOR THE REINFORCEMENT OF ROAD PAVEMENTS

*К.А. КУЛИКОВА, В.В. ВЛАСОВ, И.А. ЦАРЕВ, Т.Г. КОТОВА*

*K.A. KULIKOVA, V.V. VLASOV, I.A. TSAREV, T.G. KOTOVA*

**(Ярославский государственный технический университет)**

**(Yaroslavl State Technical University)**

E-mail: vlasovvv@ystu.ru

***В работе проводится анализ требований к геосинтетическим материалам – плоским георешеткам и геотекстилю, предназначенным для армирования дорожных одежд. Сформулированы и обозначены требования к материалам с учетом действующих стандартов и условий эксплуатации. В качестве тестовых материалов для изготовления опытных георешеток выбраны пластики, используемые в 3D-печати. Для этого методом 3D-печати изготовлены опытные партии стандартных образцов из серийных пластиков разных производителей с учетом анизотропии конечных изделий. Результаты физико-механических испытаний показали, что наиболее перспективными к применению в качестве основного материала пространственной георешетки являются полиэтилентерефталат-гликоль (PETG), полиамид (PA) и полилактид (PLA).***

***Проделанная работа позволила подобрать полимерную основу для дальнейшей работы в области рецептурно-технологической оптимизации параметров разрабатываемых геосинтетических материалов для армирования дорожных покрытий.***

***The paper analyzes the requirements for geosynthetic materials – flat geogrids and geotextiles designed to reinforce road clothes. The requirements for materials are formulated and outlined, taking into account current standards and operating conditions. The properties of plastics used in 3D printing as test materials for the manufacture of experimental geogrids were studied. For this purpose, experimental batches of standard samples from serial plastics from different manufacturers were made using 3D printing, taking into account the anisotropy of the final products. The results of physical and mechanical tests have shown that polyethylene terephthalate glycol (PETG), polyamide (PA) and polylactide (PLA) are the most promising for use as the main material of a spatial geogrid. The work done made it possible to select a polymer base for further work in the field of formulation and technological optimization of the parameters of the developed geosynthetic materials for reinforcing road surfaces.***

**Ключевые слова: георешетка, дорожная одежда, армирование, геосинтетический материал, дорожное покрытие.**

**Keywords: geogrid, road pavement, reinforcement, geosynthetic material, road surface.**

*Введение*

Согласно исследованиям [1…6] существующие георешетки для армирования конструктивных слоев дорожных одежд из асфальтобетона и минеральных материалов имеют высокую механическую повреждаемость. В связи с этим экономический и усиливающий эффекты от армирования становятся неоправданными, так как образовавшиеся мелкие локальные повреждения перерастают в серьезные дефекты дорожных конструкций (рис. 1), нарушающие ровность и сплошность покрытия, комфортность и безопасность движения транспортного потока и неизбежно влекущие очередные капиталовложения.

Рис. 1

Многолетний опыт армирования [7] подтверждает актуальность применения георешеток в слоях покрытия дорожных одежд, однако требует актуализации и модернизации под современные динамично изменяющиеся условия транспортного движения, а также климатические особенности.

За время межремонтных сроков, регламентированных Постановлением Правительства РФ от 30 мая 2017 года № 658 (в части ремонта – 12 лет, в части капитального ремонта – 24 года), георешетки в дорожных покрытиях претерпевают изменения под воздействием различных факторов. Способность геосинтетиков на протяжении срока их службы выдерживать и сопротивляться данным воздействиям называется долговечностью и на основании накопленного опыта регламентируется международным стандартом ISO/TS 13434:2020 «Geosynthetics – Guidelines for the assessment of durability» и национальным стандартом РФ ГОСТ Р 70060-2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Методы испытаний на долговечность».

Согласно требованиям отраслевого документа ОДМ 218.2.046-2014 «Рекомендации по выбору и контролю качества геосинтетических материалов, применяемых в дорожном строительстве» во II – V дорожно-климатических зонах в слоях покрытия рекомендуется укладывать тканые и вязаные георешетки из исходного сырья, обладающего различными физико-механическими показателями [8]: стекловолокна, базальтового волокна, полиэтилентерефталата и поливинилалкоголя.

Для оценки эффективности и долговечности дорожного армирования были испытаны георешетки из различного сырья [1] по ПНСТ 318-2018 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Методы испытаний на долговечность». Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что наибольшие значения коэффициентов снижения прочности присущи георешеткам из стекловолокна, наименьшие – из базальтового волокна (рис. 2), а наибольшее влияние оказывают механические повреждения при испытаниях георешеток из любого материала в щебне фракции 4…8 мм (табл. 1 – средние значения коэффициентов снижения прочности георешеток по ПНСТ 318-2018).

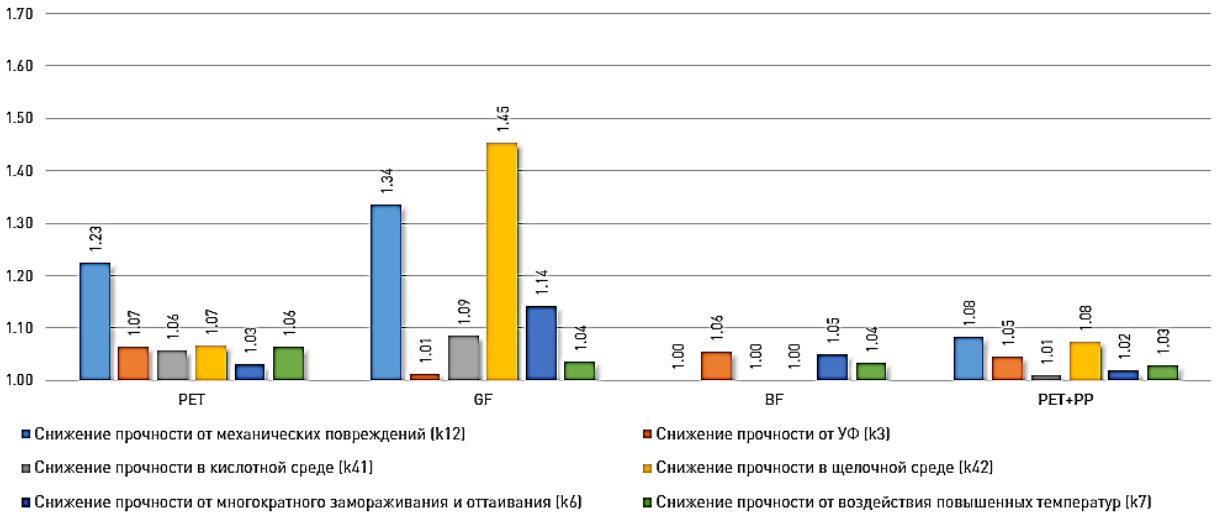


Рис. 2

Таблица 1

| | k12 | k3 | k41 | k42 | k6 | k7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Среднее значение коэффициента | 1,22 | 1,05 | 1,05 | 1,14 | 1,05 | 1,05 |

Для решения проблемы высокой механической повреждаемости на базе Ярославского государственного технического университета разработано инновационное армирование с низкой повреждаемостью [2, 9].

Анализ действующих нормативных документов и исследований [10] показывает, что основным критерием при определении долговечности геосинтетических материалов является растяжение.

Таблица 2

| d, мм | h, мм | Соотношение сторон ребра георешетки | | Расстояние между осями ячейки l, мм | Количество ячеек | Количество ребер | Площадь сечения ребра | Минимальная требуемая прочность георешетки на разрыв | Максимальная нагрузка при разрыве | Требуемая прочность материала |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | h | b | | $n_0$ | $n_1$ | S, мм$^2$ | P, кН/м | $F_{max}$, кН | P, МПа |
| 55 | 15 | 1 к | 1 | 70 | 14 | 15 | 112,50 | 40 | 5,333 | 47,4 |
| 60 | | 1 к | | 75 | 13 | 14 | | | 5,714 | 50,8 |
| 65 | | 1 к | | 80 | 12 | 13 | | | 6,154 | 54,7 |
| 70 | | 1 к | | 85 | 11 | 12 | | | 6,667 | 59,3 |
| 75 | | 1 к | | 90 | 11 | 12 | | | 6,667 | 59,3 |
| 80 | | 1 к | | 95 | 10 | 11 | | | 7,273 | 64,6 |
| 85 | | 1 к | | 100 | 10 | 11 | | | 7,273 | 64,6 |
| 90 | | 1 к | | 105 | 9 | 10 | | | 8,000 | 71,1 |
| 95 | | 1 к | | 110 | 9 | 10 | | | 8,000 | 71,1 |
| 100 | | 1 к | | 115 | 8 | 9 | | | 8,889 | 79,0 |

Ориентируясь на требования ГОСТ Р 55029-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Технические требования» (прочность при растяжении в продольном, поперечном направлении не менее 40 кН/м) и ГОСТ Р 55030 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения прочности при растяжении», определили минимальную требуемую прочность исходного сырья для георешеток, которая составила в зависимости от размера ячейки от 47,4 МПа до 79,0 МПа при высоте поперечного сечения ребра 15 мм и соотношении его сторон 1:1 (табл. 2 – зависимость прочностных характеристик георешетки от ее геометрических параметров).

На прочность связи георешетка – асфальтобетонный слой дорожной одежды значительное влияние оказывает нанесение пропиточного состава. Потому для уменьшения поперечного сечения ребра инновационного армирования без снижения его прочностных характеристик необходимо предусматривать пропитку георешетки либо модификацию исходного сырья добавками.

В рамках стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021-2025 гг., утвержденной Распоряжением Росавтодора № 771-р от 03.03.2021, одним из приоритетных направлений является расширение перечня современных дорожно-строительных материалов, а также поиск новых и модернизация традиционных изделий, в том числе геосинтетических.

С учетом вышесказанного актуальным для инновационного армирования становится подбор исходного сырья как среди традиционных, так и ранее не применяемых для геосинтетиков материалов, удовлетворяющих ряду требований.

Так как объемность ребер инновационного армирования оказывает значительное влияние на способ изготовления изделия, первым и основным требованием к исходному сырью будет являться способность материала подвергаться экструзии, литью и возможность изготовления с помощью аддитивных технологий. Учитывая данное требование, к рассмотрению необходимо принимать в основном полимерные материалы.

Одними из основных факторов, значительно влияющих на снижение прочностных характеристик георешеток, также являются температурные режимы укладки асфальтобетонной смеси и температура промерзания дорожного покрытия в холодный период года. Так, вторым требованием является необходимость подбора полимерных композиционных материалов с температурой плавления более 160 °С и температурой хрупкости не менее –35 °С.

*Методы*

В исследовании рассматривалась возможность применения полимерных композиционных материалов для 3D-печати (PETG BF, PA BF, PA CF, ABS REC, ABS BF, PLA BF) для изготовления тестовых образцов георешеток.

Экспериментальные образцы изготавливались из филамента диаметром 1,75 мм на высокоскоростном 3D-принтере BambuLab P1S. Характеристики печати:

– толщина слоя – 0,2 мм;

– плотность заполнения – 100 %;

– температура печати – 220, 230 или 265 °С (в зависимости от типа материала);

– температура рабочего стола – 70…105 °С (в зависимости от типа материала);

– скорость печати – 150 мм/с.

Так как основным критерием для оценки долговечности геосинтетических материалов является растяжение, для определения возможности применения выбранных полимерных материалов были проведены испытания на растяжение при продольном и поперечном способе печати на разрывной машине ИТС 8000 при скорости движения захвата 10 мм/мин в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) по аналогии с работами [11, 12]. Результаты испытаний на одноосное растяжение были подвергнуты статистической обработке. Отклонения значения прочности более чем на 10 % от среднего значения не учитывались (рис. 3).

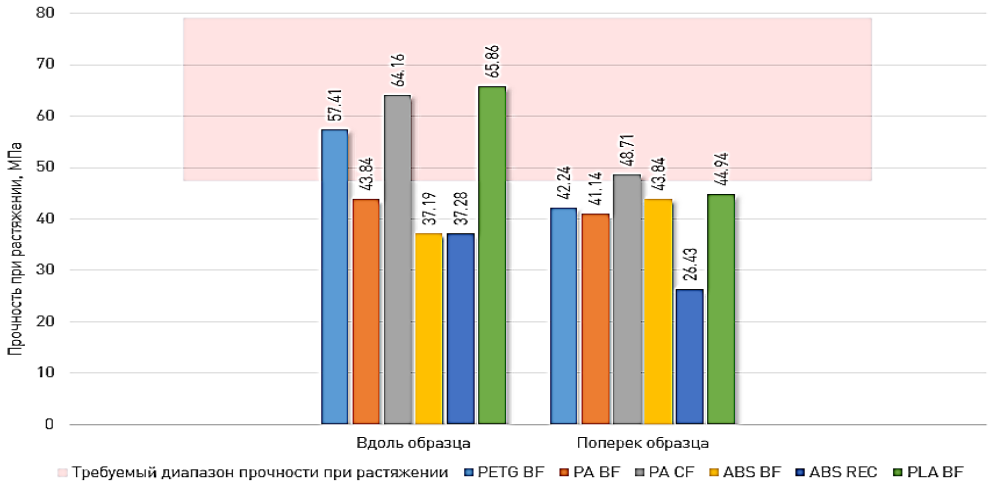


Рис. 3

*Результаты и обсуждения*

Показатели, удовлетворяющие требованиям табл. 2, достигнуты тремя партиями образцов PETG BF, PA CF, PLA BF, изготовленных в продольном направлении печати. Сниженные прочностные характеристики при поперечном способе печати обусловлены анизотропией свойств материала при 3D-печати, что при неблагоприятных условиях эксплуатации автомобильной дороги может вызвать расслоение и нарушение единства изделия и дорожной конструкции в целом.

На основании полученных результатов к дальнейшему детальному анализу принимались диаграммы деформаций полиэтилентерефталат-гликоля (PETG), полиамида (PA) и полилактида (PLA).

Так как под воздействием регулярных транспортных нагрузок в слоях асфальтобетона непрерывно развиваются усталостные явления, особенно на границе слоев покрытия и основания, важным параметром является деформационное упрочнение полимера в результате процесса течения.

У образцов полиэтилентерефталат-гликоля и полилактида под воздействием растягивающей нагрузки наблюдалось хрупкое разрушение. Так, при достижении максимального напряжения в георешетке произойдет ее разрушение, впоследствии приводящее к преждевременным локальным повреждениям дорожного полотна в виде просадок и трещин.

Поведение полиамида отличалось длительным сохранением прочностных показателей, следовательно, в процессе эксплуатации автомобильной дороги армирование на основе полиамида сможет долгосрочно равномерно воспринимать, частично поглощать и перераспределять нагрузки на нижележащие слои.

## ВЫВОДЫ

Анализ шести партий образцов позволил определить, что наиболее подходящим для инновационного армирования является полиамид, так как материал обладает высокими показателями прочности при растяжении, вследствие чего деформационное упрочнение позволяет варьировать геометрические параметры ячейки, подстраиваясь под различные условия эксплуатации автомобильной дороги (нагрузки от транспортных средств), фракционный состав инертного заполнителя смеси и толщины конструктивных слоев дорожного покрытия, достигая рациональное соотношение экономического и усиливающего эффектов. Однако стоит также рассмотреть варианты применения полиэтилентерефталат-гликоля как материала с более высокими технологическими свойствами по сравнению с полиамидом и высокой теплостойкостью.

Учитывая характеристики исходного сырья и геометрические параметры инновационной георешетки, необходимо также

предусматривать технологию укладки изделия непосредственно в продольном направлении и рассмотреть возможность применения высокотемпературных термопластов [13].

ЛИТЕРАТУРА


1. *Медведев Д.В., Калгин Ю.И., Симчук Е.Н., Митрофанова С.А.* Определение долговременной прочности геосинтетических материалов на основании комплексного показателя долговечности // Строительные материалы. 2023. № 9. С. 38…47. – DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-38-47

2. *Куликова К.А., Игнатьев А.А.* Оценка повреждаемости плоских и пространственных георешеток при армировании материалов конструктивных слоев дорожной одежды // Дороги и мосты. 2023. № 49 (1). С. 33…53.

3. *Куликова К.А., Игнатьев А.А.* Оценка влияния поперечного сечения ребра 3D-георешетки на заклинку каменного материала // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 3(104). С. 88-94. – DOI 10.23968/1999-5571-2023-21-3-88-94.

4. *Almeida F., Carlos D.M., Carneiro J.R., Lopes M.D.L.* Resistance of Geosynthetics against the Isolated and Combined Effect of Mechanical Damage under Repeated Loading and Abrasion // Materials. 2019. № 12, 3558. – https://doi.org/10.3390/ma12213558

5. *Carlos D.M., Almeida F., Carneiro J.R., Lopes M.D.L.* Influence of Mechanical Damage under Repeated Loading on the Resistance of Geogrids against Abrasion // Materials. 2021. № 14, 3544. – https://doi.org/10.3390/ma14133544

6. *Трещалин М.Ю., Трещалин Ю.М.* Анализ деформации волокон при образовании льда в порах геотекстильных нетканых материалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 3 (405). С. 101…104.

7. *Almeida M.S.S. et al.* Brazillian contributions to geosynthetics engineering // Proceedings of the GeoAmericas 2020 – 4th Pan-American Regional Conference on Geosynthetics. 26-29 April 2020. Rio de Janeiro, Brazil. 122 p.

8. *Игнатьев А.А., Куликова К.А., Дудин В.М.* К вопросу об эффективности армирования покрытий нежестких дорожных одежд автомобильных дорог георешетками, изготовленными из различных геосинтетических материалов // Дороги и мосты. 2018. № 39. С. 62…78.

9. Пат. RU 2652411 C1, МПК E01C 5/20. Георешетка для армирования дорожной одежды.

10. *Медведев Д.В., Калгин Ю.И.* Гармонизация норм и методов испытаний геосинтетических материалов в дорожных конструкциях // Строительная механика и конструкции. 2023. № 2 (37). С. 108…120.

11. *Vlasov V.V., Trutnev P.A.* Strength Characteristics of 3D-Printed PETG-Based Products Optimization // Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2021. Т. 899. С. 512…517.

12. *Власов В.В., Исаев А.Н., Шалыгина Т.А., Воронина С.Ю.* Технология получения филамента для 3D печати из вторичного полиэтилентерефталата // Пластические массы. 2022. № 7-8. С. 48…50. – DOI 10.35164/0554-2901-2022-7-8-48-50.

13. *Мирошниченко Д.А., Корнилова Н.Л., Мусов И.В. и др.* Исследование упругодеформационных характеристик мононитей из суперконструкционных полимеров // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 5 (401). С. 65…71.


REFERENCES


1. *Medvedev D.V., Kalgin Yu.I., Simchuk E.N., Mitrofanova S.A.* Determination of the long-term strength of geosynthetic materials based on a complex indicator of durability // Building materials. 2023, No. 9. pp. 38…47. – DOI: https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-38-47

2. *Kulikova K.A., Ignatiev A.A.* Assessment of the damage of flat and spatial geor-currents when reinforcing materials of structural layers of pavement // Roads and bridges. 2023. No. 49 (1). Pp. 33…53.

3. *Kulikova K.A., Ignatiev A.A.* Evaluation of the cross section of a 3D geogrid rib for a stone wedge // Bulletin of Civil Engineers. 2024. No. 3(104). pp. 88…94. – DOI 10.23968/1999-5571-2023-21-3-88-94.

4. *Almeida F., Carlos D.M., Carneiro J.R., Lopes M.D.L.* Resistance of Geosynthetics against the Isolated and Combined Effect of Mechanical Damage under Repeated Loading and Abrasion // Materials. 2019. № 12, 3558. – https://doi.org/10.3390/ma12213558

5. *Carlos D.M., Almeida F., Carneiro J.R., Lopes M.D.L.* Influence of Mechanical Damage under Repeated Loading on the Resistance of Geogrids against Abrasion // Materials. 2021. № 14, 3544. – https://doi.org/10.3390/ma14133544

6. *Treshchalin M.Yu., Treshchalin Yu.M.* Analysis of fiber deformation during ice formation in the pores of geotextile nonwoven materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023. No. 3 (405). Pp. 101…104.

7. *Almeida M.S.S. et al.* Brazillian contributions to geosynthetics engineering // Proceedings of the GeoAmericas 2020 – 4th Pan-American Regional Conference on Geosynthetics. 26-29 April 2020. Rio de Janeiro, Brazil. 122 p.

8. *Ignatiev A.A., Kulikova K.A., Dudin V.M.* On the issue of the effectiveness of reinforcement of coatings of non-rigid road surfaces of highways with geogrids made of various geo-synthetic materials // Roads and bridges. 2018. No. 39. pp. 62…78.

9. Pat. RU 2652411 C1, IPC E01C 5/20. Geogrid for reinforcement of pavement.

10. *Medvedev D.V., Kalgin Yu.I.* Harmonization of standards and test methods of geosynthetic materials in road structures // Construction mechanics and structures. 2023. № 2 (37). Pp. 108…120.

11. *Vlasov V. V., Trutnev P. A.* Strength Characteristics of 3D-Printed PETG-Based Products Optimization //Key Engineering Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2021. Т. 899. С. 512…517.

12. *Vlasov V.V., Isaev A.N., Shalygina T.A., Voronina S.Yu.* Technology for producing filament for 3D printing from recycled polyethylene terephthalate // Plastics. 2022. No. 7-8. P. 48…50. – DOI 10.35164/0554-2901-2022-7-8-48-50.

13. *Miroshnichenko D.A., Kornilova N.L., Musov I.V. etc.* Investigation of elastic-deformation characteristics of monothreads from superstructural polymers // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 5 (401). Pp. 65…71.



Рекомендована кафедрой химической технологии биологически активных веществ и полимерных композитов ЯрГТУ. Поступила 07.11.24.