

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Мельников А.А., Барская Т.Р., Каляскин А.В. Определение предела огнестойкости стержневого железобетонного элемента с учетом нелинейных свойств материала // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 5–12.

**DETERMINATION OF THE FIRE RESISTANCE LIMIT
OF A REINFORCED CONCRETE BAR ELEMENT
TAKING INTO ACCOUNT MATERIAL NONLINEAR PROPERTIES**

A.A. Melnikov¹, T.R. Barkaya¹, A.V. Kalyaskin²

¹*Tver State Technical University (Tver)*

²*LLC «PKB OSTOV» (Tver)*

Abstract. This article develops a method for calculating a reinforced concrete core element taking into account the physical nonlinearity of the material, and also compares the fire resistance limit when calculating taking into account the nonlinear operation of materials and without it.

Keywords: fire resistance, nonlinearity, fire resistance rating, concrete, reinforced, reinforced concrete.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MELNIKOV Artem Alexandrovich – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. Tver. E-mail: Neryose@yandex.ru

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

KALYASKIN Alexander Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of LLC «PKB OSTOV», 12, Pskovskaya street, Tver, 170043, Russia. E-mail: ostov_tver@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Melnikov A.A., Barkaya T.R., Kalyaskin A.V. Determination of the fire resistance limit of a reinforced concrete bar element taking into account material nonlinear properties // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 5–12.

УДК 691.54

АРМИРОВАНИЕ НА МИКРОУРОВНЕ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

**К.С. Петропавловский, В.Б. Петропавловская, П.А. Каляскин,
С.А. Зимина, В.А. Михайлова, Р.Р. Розметова, П.И. Шабалина**

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Петропавловский К.С., Петропавловская В.Б.,
Каляскин П.А., Зимина С.А., Михайлова В.А.,
Розметова Р.Р., Шабалина П.И., 2025

Аннотация. В настоящее время в строительном материаловедении динамично развивается такой инновационный подход, как самоармирование вяжущих и бетонов. Рассмотрены результаты проведенного сравнительного анализа видов микрокристаллического армирования и обоснована эффективность применения самоармированных композитов. Особое внимание уделено технологии самоармирования как методу формирования иерархической структуры материала на микроуровне.

Ключевые слова: многоуровневое армирование, самоармирование, вискеры, нитевидные кристаллы, микрокристаллическое армирование.

DOI: [10.46573/2658-7459-2025-2-13-21](https://doi.org/10.46573/2658-7459-2025-2-13-21)

В последние годы строительная отрасль России демонстрировала устойчивый рост, сопровождающийся активным внедрением инновационных технологий [1]. Однако темпы его замедлились, что обусловлено завершением ряда национальных проектов и ограничениями в финансировании [2]. Важными направлениями являются анализ и оптимизация работы материалов, повышение прочностных и иных характеристик за счет управления их внутренней структурой наnano- и микроскопическом уровнях при тех же технологических затратах. Это позволяет создавать более прочные и устойчивые конструкции, снижая затраты на материалы и ускоряя процесс строительства [3].

Перспективные свойства и широкая область применения самоармирующихся композитов согласуются с теорией многоуровневого армирования, разработанной Е.М. Чернышовым, которая подчеркивает важность иерархической структуры для обеспечения прочности и устойчивости материала. Согласно данной теории, прочность и устойчивость материала обеспечиваются благодаря иерархической структуре, где армирование происходит на нескольких масштабных уровнях – от атомарного до макроскопического [4]. В контексте самоармирования это означает, что внутренние механизмы могут формировать армирующие структуры на каждом уровне: например, упорядочивать атомы на микроскопическом уровне, создавать волокна или сети на мезоуровне и, наконец, образовывать пространственную структуру на макроуровне [5].

В исследовании будет рассматриваться только армирование на микроуровне, так как этот уровень позволяет воздействовать на структуру материала, контролируя его свойства на самых ранних этапах формирования и создавая композиты с заданными характеристиками и высокой степенью однородности.

Армирование кристаллами – это процесс улучшения механических и физических свойств материала за счет включения в него или формирования в нем кристаллических структур, которые служат армирующими элементами [6]. В материалах, особенно полимерах и композитах, кристаллы могут выступать как жесткие, упорядоченные домены, которые повышают прочность, жесткость и устойчивость к деформациям [7]. Кристаллические включения или кристаллические области внутри аморфной матрицы действуют как армирующие фазы, препятствуя скольжению цепей и улучшая механические характеристики. Такой подход часто используется для создания материалов с улучшенными износостойкостью, термостойкостью и структурной стабильностью [7].

Одним из распространенных методов является армирование микрочастицами (рис. 1), при котором используются мелкодисперсные, керамические или полимерные частицы в целях увеличения твердости и износостойкости [8]. Метод используется в производстве керамики, полимерных материалов и композитов для улучшения механических и термических свойств, а также в металлообработке для повышения износостойкости и устойчивости к химическим воздействиям [8].

Другой способ – армирование микрокристаллами, который предполагает формирование кристаллических доменов или их добавление в аморфную матрицу, что способствует росту жесткости и термостойкости материала [9]. Кристаллы, применяемые для армирования, могут иметь различную морфологию – от сферических до пластинчатых структур.

Особый интерес представляют вискеры – нитевидные кристаллы (рис. 2). Благодаря своей одномерной кристаллической структуре они имеют огромный потенциал применения, охватывающий как упрочнение материалов, так и наноэлектронику. Несмотря на то, что нитевидные кристаллы известны уже довольно давно, их практическое применение пока ограничено в основном ролью армирующих волокон. Однако концепция фибры гораздо шире и распространяется на разнообразные волокнистые материалы, каждый из которых обладает уникальными характеристиками [10].

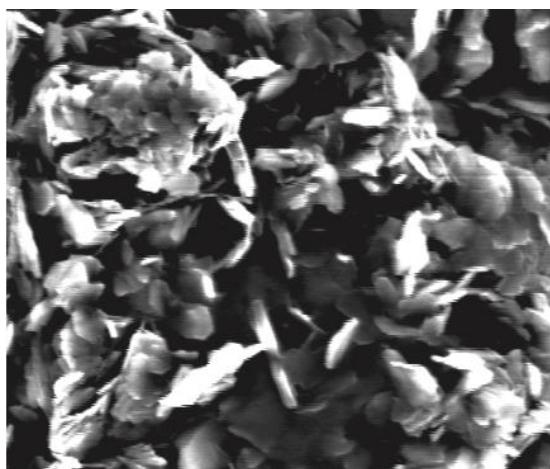


Рис. 1. Микрочастицы [8]

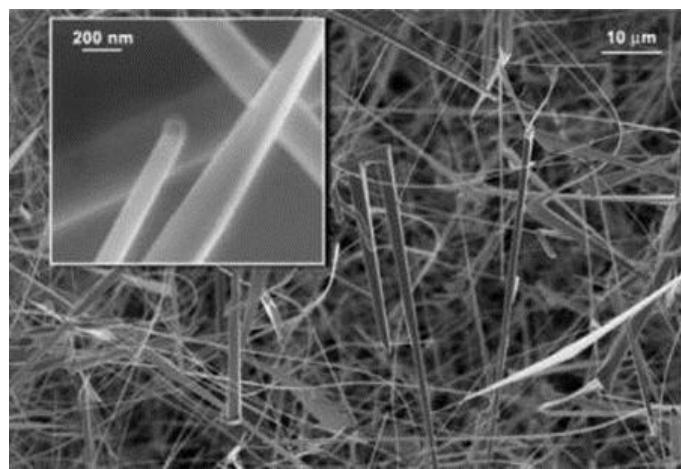


Рис. 2. Вискеры SnO_2 ,
растущие по механизму
«пар – жидкость – кристалл» [10]

Армирование микроволокнами – это добавление в материалы мелких синтетических волокон (рис. 3), которые равномерно распределяются в матрице и препятствуют образованию микротрещин [11].



Рис. 3. Пучки фибрillированных волокон

Указанный метод применяется не только в бетоне, но и в других композитах для улучшения их механических свойств и повышения долговечности [12]. Он используется в строительстве (в отношении бетонных конструкций, дорожных покрытий), производстве композитных материалов (например, пластиков и смол), авиа- и автомобилестроении для увеличения прочности и устойчивости изделий, а также в 3D-печати для улучшения качества и повышения долговечности напечатанных объектов.

Отдельно выделяется самоармирование, которое имеет ряд существенных преимуществ перед традиционным микрокристаллическим армированием [12, 16]. Равномерное распределение армирующего материала по всему объему бетона значительно снижает вероятность образования трещин и повышает прочность при растяжении и изгибе. Это не только упрощает технологический процесс, исключая трудоемкую укладку и связывание арматурных стержней, но и ускоряет темпы строительства, снижая трудозатраты. Благодаря своей природе самоармированный бетон идеально подходит для создания конструкций сложной формы и не ограничивается требованиями к установке традиционной арматуры. Самоармирование способствует снижению веса конструкции и уменьшению объема используемого металла, что сокращает общую стоимость строительства и повышает его экологичность. Самоармирование находит применение в различных отраслях. В медицине его используют для эндопротезов и имплантатов, обеспечивая их долговечность и биосовместимость [13]; в судостроении самоармированные полимеры позволяют создавать легкие и прочные корпуса судов, снижают расход топлива [14]; в авиации самоармирование способствует уменьшению массы и стоимости самолетов, а также экономии топлива [15].

Методы получения самоармированных материалов отличаются от природы вяжущего и армирующей добавки. Так, в полимерных материалах известен метод горячего компактирования (рис. 4), который играет важную роль в производстве самоармированных полимерных композитов [14]. При использовании этого метода за счет воздействия температуры и давления формируются плотные структуры, в которых армирующие элементы (например, волокна, кристаллы или ориентированные цепи) самопроизвольно выстраиваются внутри матрицы. Это способствует формированию внутренней

армирующей системы без необходимости внешнего добавления армирующих компонентов, т.е. реализуется принцип самоармирования [14]. В результате материал приобретает высокую прочность, однородность и устойчивость к механическим нагрузкам.

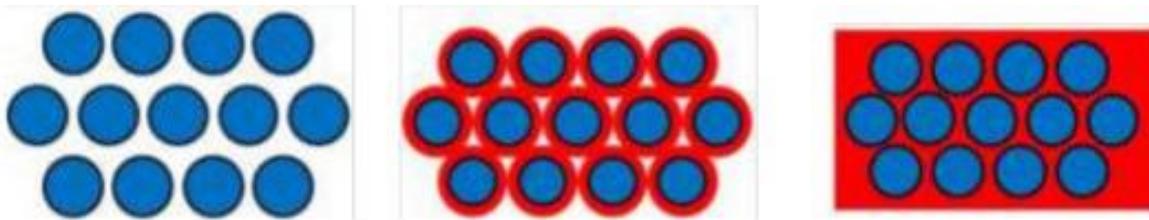


Рис. 4. Механизм горячего компактирования [14]

Аналогичные процессы самоармирования наблюдаются и в неорганических вяжущих, таких как гипс, где армирующая структура формируется за счет химических реакций внутри материала. Самоармирование гипсового камня представляет собой процесс внутреннего упрочнения материала путем образования кристаллических структур этtringита без введения внешних армирующих компонентов [16]. С химической точки зрения это достигается благодаря взаимодействию сернокислого алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) и гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (рис. 5) при определенных условиях: водородном показателе pH 10–10,5 и температуре 20–40 °C. Так формируются игольчатые и нитевидные кристаллы этtringита, которые равномерно распределяются в гипсовой матрице и создают внутренний армирующий каркас [16]. Эти кристаллы сшивают структуру материала, препятствуя распространению микротрещин и повышая его механические характеристики. При оптимальном содержании реагентов предел прочности при сжатии увеличивается до 87 %, прочность при изгибе – до 100 %, а водостойкость достигает значения 0,6. Таким образом, процесс самоармирования за счет направленного химического формирования кристаллической фазы позволяет существенно улучшить прочностные и эксплуатационные свойства гипсовых материалов [16].

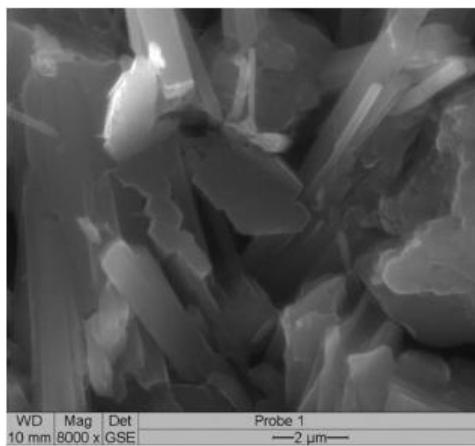


Рис. 5. Микроструктура гипсового модифицированного камня с добавкой гидроксида кальция [16]

Сравнительные характеристики преимуществ и недостатков видов микроармирования приведены в таблице.

Преимущества и недостатки видов микроармирования

Метод микроармирования	Преимущества	Недостатки
Микрочастицы	Улучшение плотности и однородности материала [17]. Увеличение устойчивости к химическим и физическим воздействиям [18]. Улучшение удобоукладываемости [19]	Сложность равномерного распределения [20]. Риск агрегации микрочастиц [20]
Микрокристаллы	Повышение прочности за счет кристаллической структуры [17]. Повышение химической стойкости и долговечности [17].	Сложность равномерного распределения [20]. Возможная несовместимость с матрицей [21]
Микроволокна	Улучшение ударной и динамической прочности [22]. Повышение морозостойкости и износостойкости [23]. Простота внедрения в смесь [23]. Применение в 3D-печати [24]	Ограниченнное повышение прочности на растяжение и сжатие [22]. Необходимость точного дозирования [22]
Самоармирование	Формирование армирующей структуры на микроскопическом, мезо- и макроуровнях [24]. Улучшение прочности и устойчивости за счет внутренних процессов [22]	Сложность управления внутренними процессами [20]. Ограниченнность в применении и необходимость стандартизации [22]

Исходя из природы самоармированных композитов, можно выделить следующие их преимущества перед микрокристаллическим армированием [14]:

адгезия на поверхности раздела «матрица – армирующий наполнитель»;
высокое размерное соотношение (армирование во всех случаях осуществляется с участием волокнистых структур);
низкая плотность;
высокая степень переработки за счет переплавки.

Самоармирование представляет собой перспективное и практически значимое направление в современном строительном материаловедении. Применение методов моделирования в сочетании с контролем условий кристаллизации обеспечивает возможность управляемого формирования внутренней структуры материала [25], что открывает путь к созданию новых поколений эффективных, экологически безопасных и технологичных строительных материалов.

Таким образом, современная наука не стоит на месте, и в стремлении к созданию более прочных, долговечных и функциональных материалов ученые активно развиваются различные подходы к микроармированию. Методы армирования являются эффективными средствами повышения прочностных и эксплуатационных характеристик материалов. Наиболее высокие результаты, как правило, демонстрирует самоармирование, однако данный метод отличается большей технологической сложностью и требует более сложного управления структурой материала. Тем не менее как традиционные методы армирования, так и самоармирование представляют собой перспективные направления для дальнейших научных исследований и разработки высокоэффективных композитов нового поколения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-49-03004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительство в Российских регионах: итоги 2024 года. URL: https://sherpagegroup.ru/analytics/gv6bq48?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 24.05.2025).
2. Киселица Е.П., Шилова Н.Н., Шеломенцев А.Г. Повышение производительности труда строительных организаций в условиях инновационной экономики // *Вопросы инновационной экономики*. 2021. № 11 (1). С. 225–238.
3. De Schepper M., Van den Heede P., Van Driesse I., De Bely N. Life Cycle Assessment of Fully Recyclable Concrete // *Materials*. 2014 Vol. 7. No. 8. P. 6010–6027.
4. Коротких Д.Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры мелкозернистого бетона и повышение его трещиностойкости: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2001. 188 с.
5. Коротких Д.Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании // *Строительные материалы*. 2011. № 3. С. 96–100.
6. Печников А.А., Толешулы А., Мещеряков Е.Г. Влияние армирования на структуру, механические и технологические свойства КМ // *Известия МГТУ МАМИ*. 2014. № 1 (19). С. 44–46.
7. Берлин Ал.Ал., Пахомова Л.К. Полимерные матрицы для высокопрочных армированных композитов (обзор) // *Высокомолекулярные соединения*. 1990. Т. 32. № 7. С. 1347–1381.
8. Тараканов О.В., Тараканова Е.О. Формирование микроструктуры наполненных цементных материалов // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. № 8. С. 13–16.
9. Армирование кристаллами в полимерных композиционных материалах. URL: https://newchemistry.ru/letter.php?n_id=2928&ccat_id=5&page_id=2 (дата обращения: 25.05.2025).
10. Goodilin E.A., Pomerantseva E.A., Krivetsky V.V., Itkis D.M., Hester J., Tretyakov Yu.D. A Simple Method of Growth and Lithiation of Ba₆Mn₂₄O₄₈ Whiskers // *J. Mater. Chem.* 2005. No. 15. P. 1614–1620.
11. Петропавловский К.С., Бурянов А.Ф., Петропавловская В.Б., Новиценкова Т.Б. Облегченные самоармированные гипсовые композиты // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 40–45.
12. Domanskaya I., Petropavlovskaya V., Novichenkova T., Petropavlovskii K., Fediuk R. Potential of Gypsum-based Matrices for Sustainable Composite Materials: a Comprehensive

Review // *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 2025. Vol. 77. No. 4. P. 2367–2382.

13. Demina V.A., Demin A.M., Kuznetsova D.S. Biodegradable Nanostructured Composites for Surgery and Regenerative Medicine // *Russian Nanotechnologies*. 2021. Vol. 16. No. 1. P. 4–22.
14. Севастьянов Д.М., Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю. Самоармированные полимерные композиты – классификация, получение, механические свойства и применение (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2017. № 4 (52). С. 104–118.
15. Production of Wide-body Aircraft: Promising Processes and Technologies // Engineering Systems. URL: <http://engineeringsystems.ru/proizvodstvo-shirokofyuzelyazhnyih-samoletov/perspektivniye-processi.php> (дата обращения: 25.05.2025).
16. Петропавловский К.С. Самоармированные гипсовые материалы с комплексным модификатором: дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 208 с.
17. Kolosov A.V., Yemelyanova A.E. Modification of Building Materials by Microparticles // *Izvestiya vuzov. Construction*. 2019. No. 12. P. 65–70.
18. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н., Никоненко Н.И., Сухаренко В.А. Влияние минеральных микронаполнителей на свойства строительных материалов // *Строительные материалы*. 2012. № 9. С. 79–83.
19. Zeitlin B.M. Additives for Concrete. M.: Stroyizdat, 2016. 327 p.
20. Smirnov D.D., Krylov A.A. Problems of Uniform Distribution of Microparticles in Composites // *Composite materials*. 2022. Vol. 8. No. 1. P. 2–29.
21. Novikov S.S. Compatibility of Microcrystals and Matrices in Composite Materials // *Scientific Research*. 2020. Vol. 10. No. 4. P. 40–47.
22. Kutsenko A.V. Properties of Concrete Reinforced with Microfibers // *Bulletin of Construction Science*. 2021. No. 2. P. 33–38.
23. Karasev A.I. The Use of Synthetic Microfibers in Concrete Mixtures // *Concrete and Reinforced Concrete*. 2018. No. 4. P. 27–30.
24. Selivanov E.V., Zakharova I.V. The Use of Reinforced Composites in 3D Printing of Building Structures // *Architecture and Construction of Russia*. 2021. No. 11. P. 55–59.
25. Каляскин П.А., Петропавловская В.Б., Баркяя Т.Р., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Влияние типа армирования гипсобетона на его свойства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 27–41.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Института нано- и биотехнологий, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

КАЛЯСКИН Петр Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

ЗИМИНА Софья Андреевна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

МИХАЙЛОВА Вероника Андреевна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

РОЗМЕТОВА Руслана Руслановна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

ШАБАЛИНА Полина Игоревна – студентка, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Петропавловский К.С., Петропавловская В.Б., Каляскин П.А., Зимина С.А., Михайлова В.А., Розметова Р.Р., Шабалина П.И. Армирование на микроуровне: современные тенденции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 13–21.

REINFORCEMENT AT THE MICRO LEVEL: MODERN TRENDS

K.S. Petropavlovskii, V.B. Petropavlovskaya, P.A. Kalyaskin,

S.A. Zimina, V.A. Mikhailova, R.R. Rozmetova, P.I. Shabalina

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. At present, such an innovative approach as self-reinforcement of binders and concrete is dynamically developing in construction materials science. The paper presents the results of a comparative analysis of types of microcrystalline reinforcement and substantiates the effectiveness of using self-reinforced composites. Particular attention is paid to the technology of self-reinforcement as a method for forming a hierarchical structure of a material at the micro level.

Keywords: multi-level reinforcement, self-reinforcement, whiskers, filamentary crystals, microcrystalline reinforcement.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Institute of Nano- and Biotechnologies, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

PETROPAVLOVSKAYA Viktoriya Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

KALYASKIN Peter Alexandrovich – Graduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

ZIMINA Sofya Andreevna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

MIKHAILOVA Veronika Andreevna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

ROZMETOVA Rusalina Ruslanovna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

SHABALINA Polina Igorevna – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Petropavlovskii K.S., Petropavlovskaya V.B., Kalyaskin P.A., Zimina S.A., Mikhailova V.A., Rozmetova R.R., Shabalina P.I. Reinforcement at the micro level: modern trends // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 13–21.

УДК 624.078.4

РАСЧЕТ УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ РАСКОСОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФЕРМЫ ИЗ ГНУТО-СВАРНЫХ ПРОФИЛЕЙ В ПВК IDEA STATICА

С.Л. Субботин, Т.Р. Баркая, Р.Р. Корда

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Корда Р.Р., 2025

Аннотация. В статье рассмотрен процесс расчета узла фермы из гнуто-сварных профилей с использованием программного комплекса IDEA StatiCa. Подчеркнута важность точного моделирования и анализа сварных соединений и геометрических особенностей профилей для обеспечения прочности и надежности металлических конструкций. Описан пошаговый порядок работы: от создания 3D-модели узла до анализа результатов и оптимизации конструкции. Представлены практические рекомендации и преимущества применения IDEA StatiCa в условиях современных требований к строительным конструкциям. Результаты исследования подтверждают эффективность данного программного инструмента при проектировании сложных узлов фермы.

Ключевые слова: IDEA StatiCa, расчет узла, ферма, гнуто-сварные профили, сварные соединения, металлические конструкции, моделирование, прочность, строительное проектирование, оптимизация конструкции.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-21-27

Фермы являются важным элементом пространственных каркасов, широко применяемым в строительстве мостов, покрытий и других сооружений. Узлы фермы – ключевые зоны, где происходит передача нагрузок между элементами конструкции, и правильный расчет их несущей способности и жесткости критичен для безопасности всей конструкции. В последние годы гнуто-сварные профили активно используются (благодаря их высокой прочности и оптимальной геометрии) для изготовления элементов ферм. Программный комплекс IDEA StatiCa позволяет детально анализировать и рассчитывать такие узлы с учетом всех особенностей профилей и сварных соединений.