



УДК 624.014.7

В. В. МЫЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, доц. кафедры технологии строительства;
О. Б. КОНДРАШКИН, канд. тех. наук, зав. кафедрой технологии строительства;
И. А. ГУЛИН, ст. преп. кафедры технологии строительства

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ВНУТРЕННЕГО ОКИСЛЕНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-17-74;
эл. почта: Lis2086@yandex.ru

Ключевые слова: дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДУКМ), свойства материалов, требования к изготовлению дисперсно-упрочненных материалов.

Рассматривается вопрос о применении дисперсно-упрочненных композиционных материалов в строительных конструкциях и приводится обзор свойств материалов, которые делают их конкурентными по сравнению со строительной сталью в некоторых видах строительных конструкций. Эти преимущества обеспечиваются физическими свойствами алюминиевых сплавов, а также процессом их производства.

К главным достоинствам алюминия можно отнести малый вес, коррозионную стойкость и функциональность. В области строительства нишами для применения алюминия являются:

- большепролетные здания, имеющие сложную геометрию покрытия, в которых динамические нагрузки меньше статических. К таким конструкциям относятся сетчатые пространства, перекрывающие большие площади (например, над стадионами и общественными пространствами);
- здания, имеющие помещения с коррозионными и влажными средами (например, плавательные бассейны);
- конструкции нефтяных платформ и специальные конструкции, для которых техническое обслуживание должно сводиться к минимуму (мачты, антенны, конструкции для крепления дорожных знаков) [1].

С целью удовлетворения запросов проектировщиков ведется разработка принципиально новых материалов, к которым, безусловно, можно отнести композиционные материалы с металлической матрицей, а к их основным преимуществам – более высокие прочностные показатели – увеличение жесткости и модуля упругости [2, 3].

В качестве упрочняющей фазы дисперсно-упрочненных композиционных материалов применяют частицы оксидов, карбидов, нитридов [4]. Из всех существующих твердофазных и жидкофазных методов получения наиболее широко в настоящее время применяются жидкофазные, которые, в свою очередь, можно разделить на три вида:

- 1) экзогенное армирование;
- 2) эндогенное армирование;
- 3) комбинированные способы.

Сейчас большой интерес прикован к литым алюмоматричным композиционным сплавам при введении в них мелких тугоплавких добавок; при заливке это



приводит к тому что число центров кристаллизации существенно увеличивается при охлаждении расплава [5]. К одному из способов получения композита Al-TiC при синтезе карбида титана в расплаве добавляется углеводородосодержащий газ, как правило, аргон и метан в расплав Al-Ti [6]. Процесс происходит при 1200 °C – 1300 °C по времени от 20 до 60 минут. Это зависит от состава матрицы, количества расплава и доли, которая требуется TiC [7].

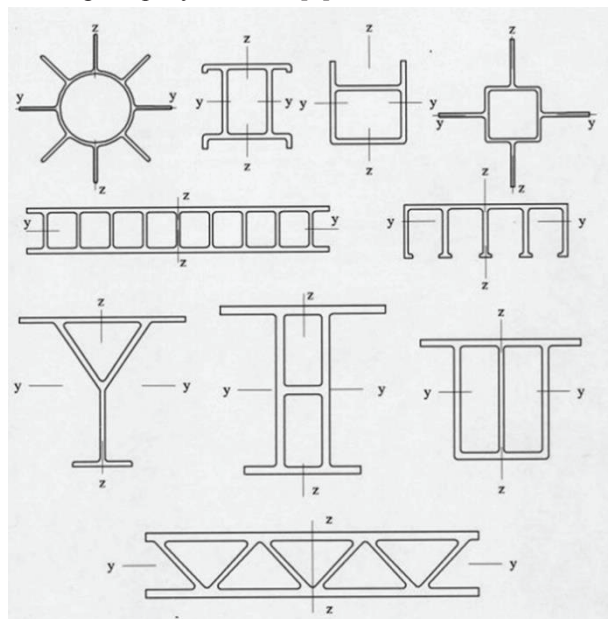


Рис. 1. Классические алюминиевые профили, изготовленные методом прессования



Рис. 2. Дорожная алюминиевая конструкция

К наиболее перспективным технологиям можно отнести и метод внутреннего окисления [8, 9]. У этого метода перед существующими есть большое количество преимуществ, к ним можно отнести такие, как равномерное получение устойчи-



вой дисперсной фазы в готовых изделиях. Необходимо отметить недостатки этого метода, так как он пригоден для изделий и заготовок небольшой толщины по причине того, что с увеличением глубины проникновения кислорода происходит в том же направлении укрупнение образующихся окислов.

При изготовлении дисперсно-упрочненных композиционных материалов обязательно нужно соблюдать следующие требования. К ним можно отнести равномерное распределение армирующего наполнителя, необходимый уровень прочности связи на границе матрица-наполнитель, требования к технологичности процесса и его экономики [10].

Целью научной работы является разработка и опробования технологии получения дисперсно-композиционных материалов на основе алюминия и изучение его структурно-фазового состояния для применения в строительстве. С этой целью сконструирована установка для получения материала на основе алюминия, ее принцип действия основан на процессе взаимодействия расплава алюминия кислородом. В этом случае в расплаве синтезируются упрочненные частицы. Преимущества этого метода состоят в том, что композиты можно получать в одну стадию и обеспечивать при этом термодинамическую устойчивость материала, прочный контакт и хорошее сцепление между матрицей и упрочняющей фазой [11].

Описанная технология является частным случаем горения металлизированного топлива в тепловыделяющем элементе воздухонезависимой энергетической установки.

В ходе проведенной работы в качестве исходного материала применялся сплав алюминия А6 составом (99,6 % Al и примесью Si и Fe) [12].

Исследование структурно-фазового материала проводили с применением микроскопов *HITACHI S-3400N* и дифрактомера Дрон-2. Твердость материала измерялась на следующих моделях приборов: твердомер ТКС-1М, ПМТ-3. Испытания на ударную вязкость были выполнены на маятниковом копре МК-30а. Часть работ была выполнена на машине, принцип которой описан в [13].

Экспериментальная часть работы

Для проведения экспериментальной части по созданию нового материала была разработана и изготовлена установка для получения и разлива сплава заданного состава. Время синтеза упрочняющих частиц составляло от 10 минут до часа, при пропуске газа через расплав до 0,45 г кислородной-азотной смеси на 1 г алюминия. Основное количество экспериментов проводилось на образцах следующих размеров: диаметр 45–50 мм, высота 80–100 мм (рис. 1 цв. вклейки).

В результате металлографических и рентгеноструктурных исследований установлено, что матрицей полученного металлокерамического материала является алюминий, основные фазы ввода которого – оксид алюминия и нитрид алюминия [14]. В некоторых случаях было замечено отсутствие дифракционных отражений оксида алюминия, такой процесс можно объяснить образованием рентгеноаморфной разновидности, либо нахождение частиц высоко дисперсного оксида алюминия в составе пластичной матрицы. Размеры твердой фазы находятся в интервале от 0,5 до 2 мм (рис. 2 цв. вклейки). Степень насыщения матрицы материала дисперсными частицами составляет от 5 до 40 %.

Твердость полученного материала в литом состоянии составляет порядка около 50-75 HRF (измерение твердости материала были произведены на твердомере ТКС-1М), а микротвердость фазы внедрения превышает 480 НВ (рис. 4 цв. вклейки).

На микроструктуре получаемого материала, показанной на рис. 3 цв. вклейки, зафиксированы размеры отпечатков пирамидки микротвердомера ПМТ-3,

**К СТАТЬЕ В. В. МЫЛЬНИКОВА, О. Б. КОНДРАШКИНА,
И. А. ГУЛИНА «ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ВНУТРЕННЕГО ОКИСЛЕНИЯ ДЛЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ»**



Рис. 1. Отливки ДУКМ системы Al₂O₃ – Al с ростом процентного содержания керамической фазы (слева направо)

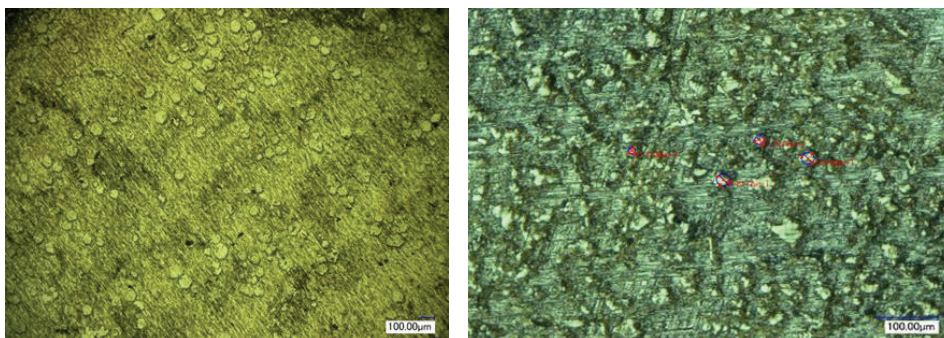


Рис. 2. Микроструктура получаемого материала

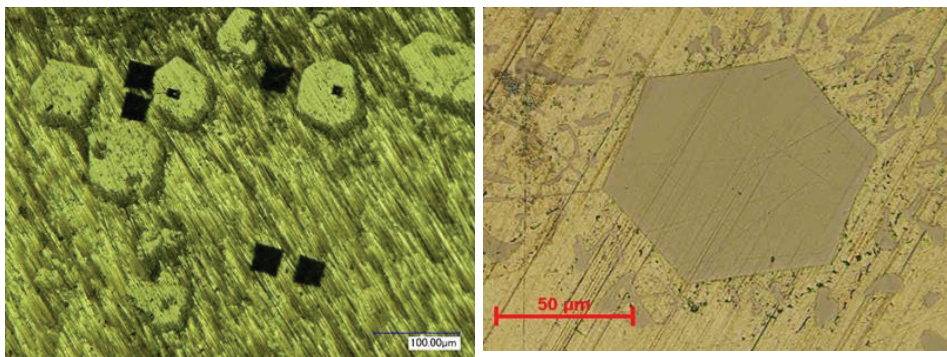


Рис. 3. Микроструктура получаемого материала, измерение твердости с использованием ПМТ-3

Рис. 4. Микроструктура с шестигранной призматической формой упрочняющей фазы

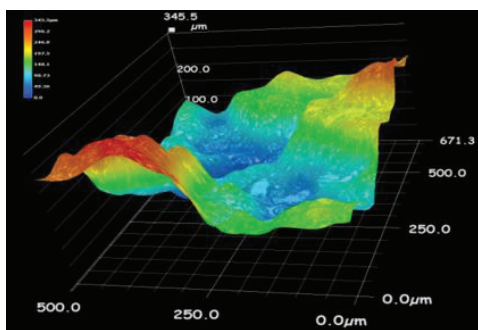


Рис. 5. 3D-структура излома полученного материала



Рис. 6. Износ пилы при резке ТВЭЛ

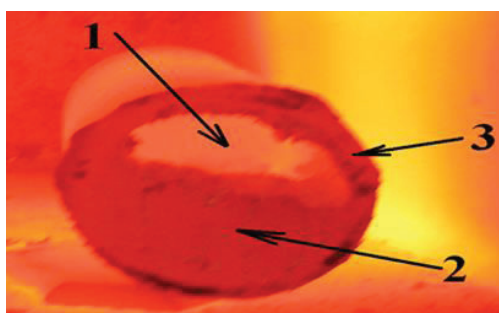


Рис. 7. Нагрев до $t = 95\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$

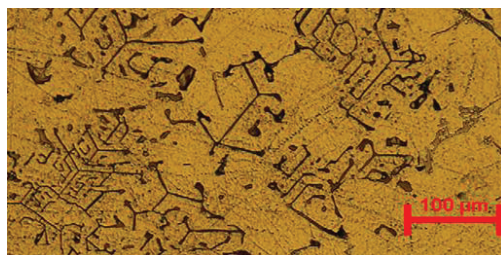


Рис. 8. Образец материала со скелетной структурой

что наглядно показывает различие в твердости между матричной основой и фазами включения. Необходимо отметить что упрочняющая фаза имеет четко выраженную структуру в виде шестигранной призматической формы кристалла (рис. 4 цв. вклейки) по признаку предполагаемой гексагональной плотноупакованной формы элементарной ячейки.

Были проведены сравнительные испытания на вязкость разрушения. На рис. 5 цв. вклейки приведена 3D-структура излома материала, на которой почти во всех экспериментальных случаях не наблюдается резких фасеток сколов. Переходы по различным плоскостям разрушения (которые выделены различными цветами) довольно плавные, что говорит о том, что процесс разрушения упорядоченный. Перепады в высотах фрактографии излома наиболее вероятно связаны с зонами распределения упрочняющей фазы. Разрушение материала в этом случае можно характеризовать свойствами вязкого разрушения, при этом необходимо учитывать то, что перевод энергии в матрицу происходит на границе ее раздела с упрочняющей фазой.

Упрочняющие частицы материала значительно увеличивают энергоемкость разрушения образца, так как ударная вязкость полученного материала за счет изменения содержания фазы внедрения лежит в интервале 23–85 Дж/см². Кроме того, необходимо отметить что при подготовке образцов с целью микроструктурного анализа отмечено повышение их стойкости к истиранию. В частности, на рис. 6 цв. вклейки приведен пример пилы, при помощи которой была сделана попытка перерезать аварийный ТВЭЛ, который был защищен стальной гильзой диаметром 50 мм при толщине стенки 3 мм, который выгорел приблизительно на 70 %. В результате этого были израсходованы 2 пилы, и ни в одном случае рез не прошел более чем на 30 мм.

Была выявлена устойчивая стойкость при работе с повышенными температурами. На рис. 7 приведен пример нагрева ТВЭЛ до температуры 9 500 °С при расплавлении слива остатков алюминия. Очевидно, что при нагреве не произошло расплавление ДУКМ в штатный слив, поэтому было просверлено вспомогательное отверстие: на рис. 7 обозначено цифрами: 1 – отверстие, 2 – ДУКМ со степенью насыщения порядка 70 % Al₂O₃, 3 – защитная гильза.

Кроме этого, в ряде экспериментов была получена скелетная структура материала, которая показана на рис. 8.

Заключение

В ходе научно-исследовательской работы была практически осуществлена возможность создания ДУКМ на основе алюминия, который получили продувкой кислорода, содержащей газовую смесь. Проведенные исследования микроструктуры показали нам возможность существенного варьирования диапазона механических свойств материала. Проведенные исследования показывают принципиальную возможность применения ДУКМ в производстве строительных материалов и изготовления из них как отдельных элементов строительных конструкций (тавры, двутавры, швеллеры), так и несущих каркасов зданий.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>». Полное наименование Фонда на английском языке – Russian Science Foundation, сокращенное наименование – RSF. Ссылка на информацию о проекте: <https://rscf.ru/en/project/22-13-20009/>.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каблов, Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е. Н. Каблов. – Текст : электронный // *Авиационные материалы и технологии*. – Москва, 2012. – С. 7–17. – URL: www.viam.ru/public.
2. *Алюминиевые композиционные сплавы – сплавы будущего : учебное пособие / составители А. Р. Луц, И. А. Галочкина*. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 82 с. : ил. – Текст : непосредственный.
3. Курганова, Ю. А. Перспективы развития металломатричных композиционных материалов промышленного назначения / Ю. А. Курганова. – Текст : непосредственный // *Сервис в России и за рубежом*. – 2012. – № 3 (30). – С. 235–240.
4. *Композиционные материалы с матрицей из алюминиевых сплавов, упрочненных частицами, для пар трения скольжения / Т. А. Чернышова, Ю. А. Курганова, Л. И. Кобелева [и др.]* – Текст : непосредственный // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2007. – № 3. С. 39–48.
5. *Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов / А. А. Панфилов, Е. С. Прусов, В. А. Кечин*. – Текст : непосредственный // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева*. – 2013. – № 2 (99). – С. 210–218.
6. Адебиси, А. А. Композитный тормозной ротор с металлической матрицей: историческое развитие и анализ жизненного цикла продукта / А. А. Адебиси, М. А. Малек, М. М. Рахман. – Текст : непосредственный // *Международный журнал автомобильной и машиностроительной техники*. – 2011. – Том. 4. – С. 471–480.
7. *Технология получения композита Al-TiC из порошковых экзотермических смесей непосредственно в расплаве алюминия / Е. Г. Кандалова, А. Р. Луц, А. Г. Макаренко, А. В. Орлов* // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2005. – № 11. – С. 47–51.
8. Кем, А. Ю. *Технологические основы производства порошковых и композиционных наноструктурных материалов и изделий : учебное пособие / А. Ю. Кем ; Федеральное агентство по образованию, Донской гос. технический ун-т*. - Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2008. – 113 с. : ил., табл. – ISBN 978-5-7890-0444-99. – Текст : непосредственный.
9. Минаев, А. М. О внутреннем окислении высокочистого алюминия / А. М. Минаев, В. А. Пручкин // *Вопросы современной науки и практики*. Университет им. В. И. Вернадского. – 2011. – № С (36). – С. 48–53.
10. Курганова, Ю. А. Повышение механических свойств дискретно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей / Ю. А. Курганова. – Текст : непосредственный // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2007. – № 5. – С. 46–52.
11. Калай, Юнус Эрен. Характеристика низкоскоростного удара монолитных и многослойных плит AA2024 методом испытания на падение веса / Ю. Э. Калай. – 2003. – 149 с.
12. Романова, Е. А. Разработка технологии получения алюмоматричного литого композиционного материала с помощью синтеза упрочняющей фазы оксида алюминия в расплаве алюминия / Е. А. Романова, В. В. Мыльников. – Текст : непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2017. – № 4. – С. 29–36. – DOI 10.17073/1997-308X-2017-4-29-36.
13. Романов, А. Д. Исследование особенностей жидкофазного окисления алюминиевого расплава с получением алюмоматричного композиционного материала / А. Д. Романов, Е. А. Романова, Е. А. Чернышов. – Текст : непосредственный // *Металлург*. – 2021. – № 7. – С. 75–80. – DOI 10.52351/00260827_2021_07_75.



MYLNIKOV Vladimir Viktorovich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of construction technology; KONDRASHKIN Oleg Borisovich, candidate of technical sciences, holder of the chair of construction technology; GULIN Ivan Anatolevich, senior teacher of the chair of construction technology

FEATURES OF APPLICATION OF DISPERSED-HARDENED COMPOSITE MATERIALS OBTAINED BY INTERNAL OXIDATION TECHNOLOGY FOR BUILDING STRUCTURES

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 430-17-74;

e-mail: nir@nngasu.ru

Key words: dispersed-hardened composite materials, properties of materials, requirements for manufacture of dispersed-hardened materials.

The article considers the use of dispersed-hardened composite materials in building structures and provides an overview of the properties of materials that make them competitive compared to building steel in some types of building structures. These advantages are provided by the physical properties of aluminum alloys, as well as their production process.

REFERENCES

1. Kablov E. N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period up to 2030] // Aviatсионnye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. Moscow, 2012. P. 7–17. – URL: www.viam.ru/public.
2. Alyuminiyevye kompozitsionnye splavy – splavy buduschego [Aluminum composite alloys are the alloys of the future]: uchebnoe posobie / sostaviteli A. R. Lutz, I. A. Galochkina. – Samara : Samar. gos. tekhn. un-t, 2013. – 82 p. : il.
3. Kurganova Yu. A. Perspektivy razvitiya metallomatrichnykh kompozitsionnykh materialov promyshlennogo naznacheniya [Prospects for the development of metal matrix composite materials for industrial use] // Servis v Rossii i za rubezhom [Service in Russia and abroad]. 2012. № 3 (30). – P. 235–240.
4. Chernyshova T. A., Kurganova Yu. A., Kobeleva L. I., et al. Kompozitsionnye materialy s matritsey iz alyuminiyevykh splavov, uprochnyonnykh chastitsami, dlya par treniya skolzheniya [Composite materials with a matrix of aluminum alloys hardened by particles for sliding friction pairs] // Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov [Constructions of composite materials]. 2007, № 3. – P. 39–48.
5. Panfilov A. A., Prusov E. S., Kechin V. A. Problemy i perspektivy razvitiya proizvodstva i primeneniya alyumomatrichnykh kompozitsionnykh splavov [Problems and prospects of development of production and application of aluminum-matrix composite alloys] // Trudy Nizhegorod. gos. tekhn. un-ta im. R. E. Alekseeva [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev]. № 2 (99). – P. 210–218.
6. Adebisi A. A., Maleque M. A., Rahman M. M. Kompozitny tormoznoy rotor s metallicheskoy matritsey: istoricheskoe razvitie i analiz zhiznennogo tsikla produkta [Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis]. Mezhdunarodny zhurnal avtomobilnoy i mashinostroitelnoy tekhniki [International Journal of Automotive and Mechanical Engineering]. 2011. Vol. 4. – P. 471–480.
7. Kandalova E. G., Luts A. R., Makarenko A. G., Orlov A. V. Tekhnologiya polucheniya kompozita Al-TiC iz poroshkovykh ekzotermicheskikh smesey neposredstvenno v rasplave alyuminiya [Technology of obtaining Al-TiC composite from powder exothermic mixtures directly



in aluminum melt] // *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement production in mechanical engineering]. 2005. № 11. – P. 47–51.

8. Kem A. Yu. *Tekhnologicheskie osnovy proizvodstva poroshkovykh i kompozitsionnykh nanostrukturnykh materialov i izdeliy* [Technological fundamentals of production of powder and composite nanostructured materials and products] : *uchebnoe posobie*; Federalnoe agentstvo po obrazovaniyu, Donskoy gos. tekhn. un-t. – Rostov on Don : Izd. tsentr DGTU, 2008. – 113 p. : il., tabl. – ISBN 978-5-7890-0444-99.

9. Minaev A. M., Pruchkin V. A. *O vnutrennem okislenii vysokochistogo alyuminiya* [On the internal oxidation of high-purity aluminum] // *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki* [Issues of modern science and practice]. Universitet im. V.I. Vernadskogo. 2011. № С (36). – P. 48–53.

10. Kurganova Yu. A. *Povyshenie mekhanicheskikh svoystv diskretno-armirovannykh kompozitsionnykh materialov s alyuminiyevoy matritsey* [Improving the mechanical properties of discretely reinforced composite materials with an aluminum matrix] // *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement production in mechanical engineering]. 2007, № 5. P. 46 – 52.

11. Kalay Yu. E. *Kharakteristika nizkoskorostnogo udara monolitnykh i mnogosloynnykh plit AA2024 metodom ispytaniya na padenie vesa* [Low velocity impact characteristic of monolithic and laminated AA2024 plates by drop weight test]. 2003. 149 p.

12. Romanova E. A., Mylnikov V. V. *Razrabotka tekhnologii polucheniya alyumomatrichnogo litogo kompozitsionnogo materiala s pomoschy sinteza uprochnyayushey fazy oksida alyuminiya v rasplave alyuminiya* [Development of technology for obtaining aluminum matrix cast composite material by synthesis of the hardening phase of aluminum oxide in aluminum melt] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [News of higher educational institutions. Powder metallurgy and functional coatings]. – 2017. № 4. – P. 29–36. – DOI 10.17073/1997-308X-2017-4-29-36.

13. Romanov A. D., Romanova E. A., Chernyshov E. A. *Issledovanie osobennostey zhidkofaznogo okisleniya alyuminiyevogo rasplava s polucheniem alyumomatrichnogo kompozitsionnogo materiala* [Investigation of the features of liquid-phase oxidation of aluminum melt with the production of aluminum matrix composite material] // *Metallurg* [Metallurgist]. – 2021. № 7 – P. 75-80. – DOI 10.52351/00260827_2021_07_77.

© **В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин, И. А. Гулин, 2023**

Получено: 02.12.2022 г.

УДК 624.014.2

О. В. КОЛОТОВ, канд. техн. наук, доц., и. о. зав. кафедрой строительных конструкций

МОДУЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ ПО ТИПУ «КИСЛОВОДСК»

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-88;
эл. почта: k_mk@nngasu.ru

Ключевые слова: модульные покрытия, стропильные фермы, стропильные балки, подстропильные фермы, подстропильные балки, горизонтальные связи.

Рассмотрены 4 варианта конструктивного решения модульного покрытия, состоящего из взаимно перпендикулярных стропильных и подстропильных конструкций. Разработана система связей, обеспечивающая пространственную жесткость. Выполнен анализ по расходу стали.