

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.714.122

DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.10

Д. В. ЛЕЩЕНКО
Н. М. МАКСИМОВ
К. П. ЯКУНИН
А. Г. ФЕДЯКИН

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ АНАЛОГА ДАМАССКОЙ СТАЛИ С ГЕОМЕТРИЧЕСКИ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕВОЛОКНИСТОГО КАТАЛИЗАТОРА

METHOD FOR OBTAINING AN ANALOG OF DAMASCUS STEEL
WITH GEOMETRICALLY DISTRIBUTED INCLUSIONS THROUGH
THE USE OF A CARBON FIBER CATALYST

Исследование посвящено разработке технологии изготовления многослойных образцов стали, которая по структуре напоминает дамасскую сталь, но с одним отличием: углерод в структуре стали представлен не только графитом, но и геометрически распределенными включениями фрагментов углеволокна. Внесение в структуру углеволокна осуществляется с помощью никелевого углеволокнистого катализатора, включаемого в стальные многослойные пакеты дляковки. Примечательно, что в полученных образцах многослойной стали углерод присутствует не только в виде графита, но и в виде углеродных нанотрубок, присутствующих в составе исходного углеволокна, из которого был изготовлен никелевый углеволокнистый катализатор. Основной перспективой развития данного метода изготовления дамасской стали является получение нового материала для применения в строительстве серийного металлопроката.

Ключевые слова: дамасская сталь, механические свойства, ковка, стальной многослойный пакет, углеволокнистый катализатор, углеродные нанотрубки, углеволокно

Введение

Дамасская сталь благодаря своим механическим свойствам и уникальному декора-

The work is dedicated to the development of a technology for manufacturing multi-layer steel samples, which in structure resembles Damascus steel but with one key difference: the carbon in the steel structure is represented not only by graphite but also by geometrically distributed inclusions of carbon fiber fragments. The incorporation of carbon fiber into the structure is achieved using a nickel-carbon fiber catalyst, which is embedded into multi-layer steel packets for forging. Notably, in the obtained multi-layer steel samples, carbon is present not only in the form of graphite but also in the form of carbon nanotubes, which are part of the original carbon fiber used to produce the nickel-carbon fiber catalyst. The primary prospect for the development of this method of producing Damascus steel lies in creating a new material suitable for use in construction-grade serial metal rolling.

Keywords: Damascus steel, mechanical properties, forging, multi-layer steel packet, carbon fiber catalyst, carbon nanotubes, carbon fiber

тивному виду традиционно ассоциируется с изготовлением холодного оружия. Она часто демонстрируется в музеях, посвященных оружию и декоративно-прикладному искусству.

Исторические образцы оружия из дамасской стали широко представлены в экспозициях музеев Российской Федерации, например в Государственном историко-культурном музее-заповеднике «Московский кремль» или в Государственном Эрмитаже. Масса сохранившихся образцов демонстрируется в музеях по всему миру, например на рис. 1 представлен образец из Нью-Йоркского Метрополитен-музея.

В наше время восстановлена историческая технология изготовления дамасской стали, и она дополнена такими современными методами, как электродуговая или аргоновая сварка [1]. Полученные стали находят применение в основном благодаря декоративным свойствам их структуры (рис. 2).

По поводу эксплуатационных свойств дамасской стали в источниках встречаются противоположные мнения [1–5]. Однако современные исследования и разработки позволяют рассматривать дамасскую сталь как перспективный материал для использования

в конструктивных узлах, где требуются высокие прочность, гибкость и устойчивость к динамическим нагрузкам. В рамках данного исследования была поставлена задача получения многослойных структур стали с геометрически распределенными включениями фуллеренов, углеродных нанотрубок и графитообразного углеволокна вместо графита. Рассматриваются потенциальные области применения такой дамасской стали в качестве конструкционного материала для металлопроката, а также преимущества, которыми она обладает в сравнении с традиционными сталями.

В серии экспериментов использовались стальные многослойные пакеты, состоящие из оболочки, выполненной из профилированной стальной трубы $25 \times 25 \times 1,5$ мм, внутрь которой помещались многослойные стальные пакеты, состоящие из стальных полос $0,5 \times 20 \times 200$ мм или полос из стальных сеток с различно подготовленной вуалью из углеволокна и флюсом (рис. 3). В качестве промежуточного слоя меж-



Рис. 1. Узор дамасской стали на лезвии сабли
Fig. 1. Damascus steel pattern on a saber blade

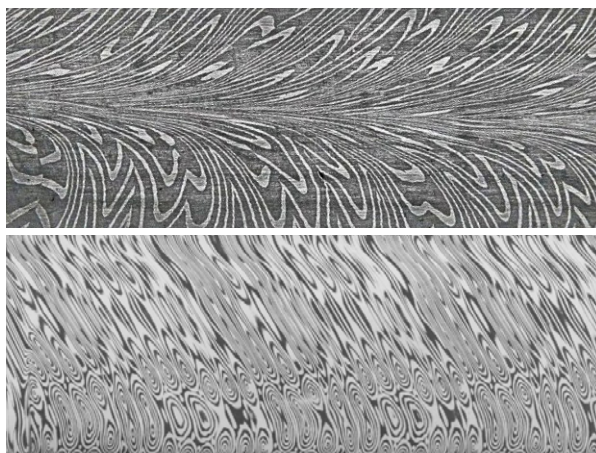


Рис. 2. Узоры дамасской стали
Fig. 2. Damascus steel patterns

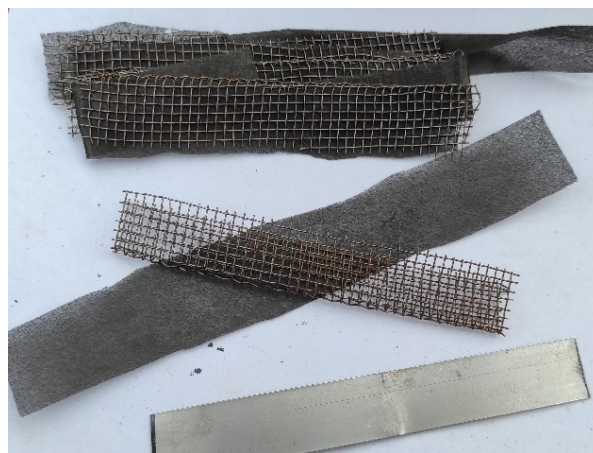


Рис. 3. Стальная полоса, полоса из сетки и вуаль из углеволокна
Fig. 3. Steel strip, mesh strip and carbon fiber veil

ду стальными полосами использовалась вуаль из углеволокна и изготовленный из той же вуали углеволокнистый катализатор с нанесенным металлическим слоем железа и никеля (рис. 4).

После размещения пакета внутри трубы она герметично заваривалась с помощью электродуговой сварки. Далее стальные многослойные пакеты нагревались в кузнечном горне до температуры выше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 5) и расковывались пневматическим молотом (рис. 6).

После остывания раскованные образцы разрезались и из них извлекались полосы ста-



Рис. 4. Углеволокнистый катализатор
Fig. 4. Carbon fiber catalyst



Рис. 5. Стальные многослойные пакеты, помещенные в кузнечный горн
Fig. 5. Steel multilayer packages placed in a forging crucible



Рис. 6. Стальные многослойные пакеты послековки
Fig. 6. Steel multilayer packages after forging

ли, полученные из стальных пакетов. Из исследованных образцов наибольший интерес представляют образцы, изготовленные из стальной сетки и углеволокнистого катализатора. На рис. 7 представлен геометрический узор, который можно описать как иероглифический, причем контрастирование поверхности в данном случае выполнено не с помощью травления, а за счет эффекта побежалости.

В структуре стали обнаружены включения остатков углеволокнистого катализатора в виде цилиндров углеволокна, вплавленных в металл (рис. 8). В отличие от углерода, обычно присутствующего в стали в виде аморфных бесформенных включений, в данном случае наблюдаются одинаковые по диаметру включения с примерно одним диапазоном длины.

На рис. 9 представлен шлиф поперечного разреза образца стали, протравленный лимонной кислотой для повышения контрастности изображения. На микроскопическом срезе выявлены углеволокнистые включения, расположенные преимущественно параллельно относительно плоскости проката и сохранившие фрагменты волокна по всей его длине. Данная ориентация

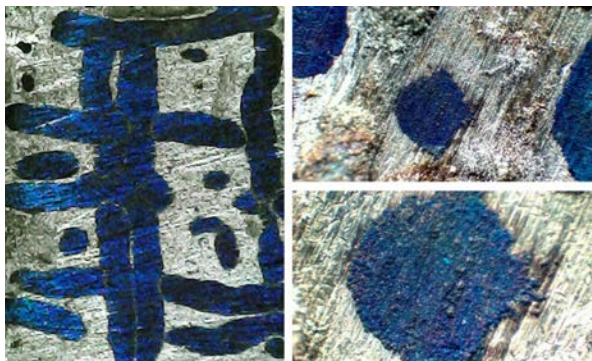


Рис. 7. Иероглифический узор
Fig. 7. Hieroglyphic pattern

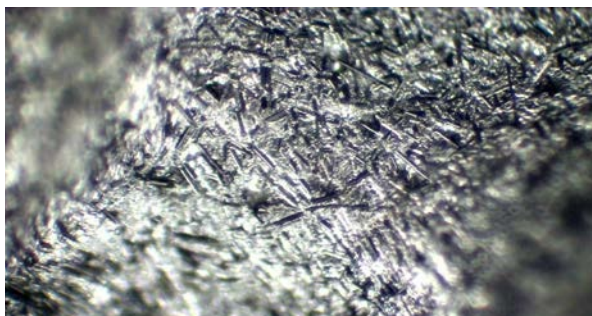


Рис. 8. Углеволокно, вплавленное в металл. Микроскопия места разрыва
Fig. 8. Carbon fiber fused into metal. Microscopy of the fracture site

волокон может эффективно противодействовать деформациям в направлении, перпендикулярном плоскости проката, повышая сопротивление изгибу и ударным нагрузкам.

Граница зон сплавления углеродистой стали с углеволокнистым никелевым катализатором представлена на рис. 10. Катализатор под воздействием проковки иковки преобразовывается в никелевый сплав с включением фрагментов углеволокна.

При рентгенофлуоресцентном анализе (РФА) вплавленного в металл фрагмента углеволокна на графике были обнаружены пики [6], соответствующие углеродным нанотрубкам (см. рис. 10). Таким образом, в данном образце многослойной стали углерод присутствует не только в виде графита, но и в виде углеродных нанотрубок, находящихся в составе углеволокна, из которого был изготовлен углеволокнистый катализатор.

В результате исследования было установлено, что добавление металлического никеля и железа на поверхность вуали из углеволокна (углеволокнистый катализатор) в совокупности с добавлением стальных частей в многослойные пакеты после сварки ковкой позволяет получить образцы многослойной стали, визуально сходной с дамасской сталью. Хотя данный метод является более технологически сложным, он требует мень-

ших трудозатрат по сравнению с традиционной технологией производства дамасской стали, что открывает перспективы для его более широкого применения в строительстве.

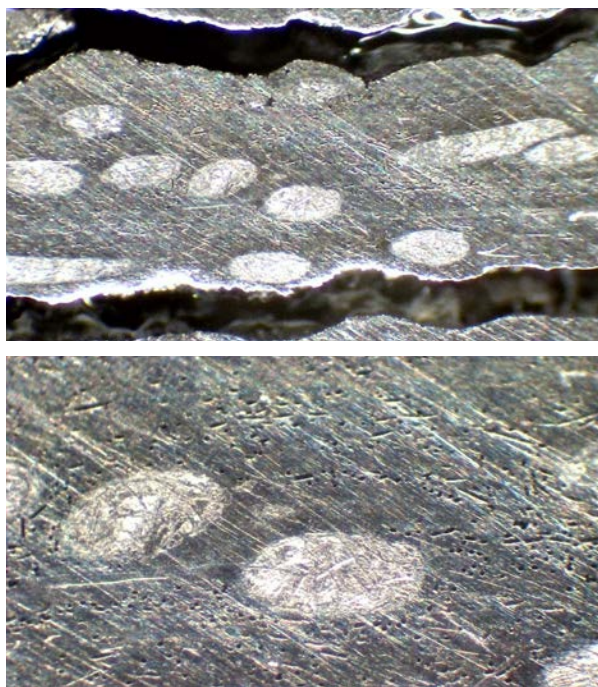


Рис. 9. Поперечный разрез стального образца при увеличении 10 и 40 крат

Fig. 9. Cross section of a steel specimen at 10× and 40× magnification

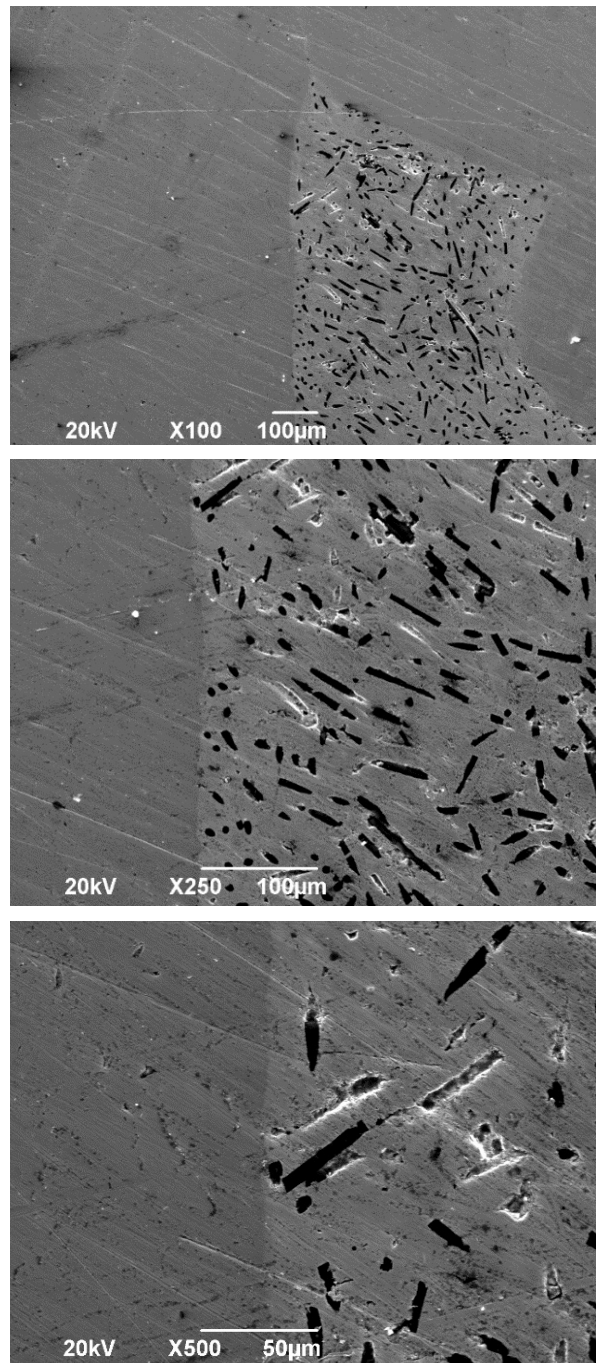


Рис. 10. Граница зон углеродистой стали и никелевого сплава с фрагментами углеволокна при увеличении 100, 250 и 500 крат

Fig. 10. Zone boundary of carbon steel and nickel alloy with carbon fiber fragments at magnifications of 100, 250 and 500×

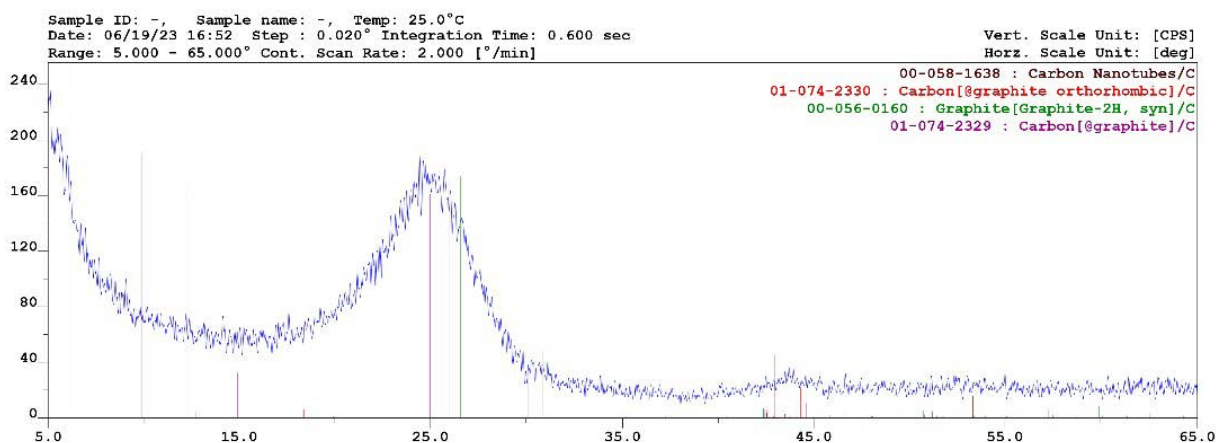


Рис. 11. РФА вплавленного в металл фрагмента углеволокна

Fig. 11. XRF of a carbon fiber fragment fused into metal

Сочетание методов изготовления углеволокнистого катализатора с нанесенными металлами и металлообработки может привести к созданию новых видов многослойных сталей с уникальными механическими и декоративными свойствами. Такие инновации способны значительно расширить области применения многослойной стали в производстве высокотехнологичных материалов, например серийного металлопроката для возведения несущих металлоконструкций с уникальными гибкостью, прочностью и с повышенной сейсмостойкостью.

Для более глубокого и комплексного понимания эксплуатационного потенциала разрабатываемой многослойной стали представляется необходимым проведение дополнительных исследований. В первую очередь, особое значение имеет исследование режимов термической обработки, включающее варьирование температуры нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения. Это позволит определить параметры, обеспечивающие оптимальные сочетания твердости и пластичности. Наряду с этим целесообразно изучение влияния различных охлаждающих сред, применяющихся при закалке (вода, масло, воздух, полимерные растворы), на микроструктуру и фазовый состав многослойной стали. Такие данные станут основой для разработки практических рекомендаций по термической обработке в промышленных условиях.

Следующим приоритетным направлением выступает оценка коррозионной стойкости металлопроката, полученного с применением рассматриваемой стали. Коррозия углеволокнистого железно-никелевого материала представляет собой важный аспект, требующий особого внимания в рамках его экспериментального и практического применения. Этот перспективный материал, обладая потенци-

ально уникальными свойствами, благодаря комбинации свойств железа, никеля и углеволокна, предполагает множество преимуществ во многих направлениях практического применения, однако его коррозионная стойкость может сильно повлиять на долговечность и эксплуатационный потенциал.

Важнейший шаг в оценке коррозионной стойкости заключается в проведении испытаний, которые позволят выявить – как различные параметры, такие как термическая обработка, микроструктура и компоненты, входящие в состав материала, скажутся на его способности противостоять коррозии. Оценка коррозионной стойкости требует обязательного применения современных методов анализа, позволяющих оценить степень повреждения поверхности и объем потерь металла. Проведение электрохимических испытаний, направленных на оценку анодных и катодных реакций в образцах разрабатываемой многослойной стали, позволит более точно оценить поведение нового материала в коррозионной среде. Особое внимание следует уделить выбору агрессивных сред, таких как кислоты или щелочи, поскольку их воздействие способно выявить слабые места материала. Возможные варианты коррозионных реагентов – растворы соляной, серной кислот, сероводорода, гидроксида натрия, аммиака, хлорида натрия. Сравнительный анализ методов испытаний также будет способствовать более детальному пониманию того, как различные режимы охлаждения и обработки повлияют на коррозионные свойства конечного продукта.

Высокая температура во время обработки многослойных сталей, полученных с применением углеволокнистого катализатора, может привести к образованию разнообразных фаз и микроструктур, которые будут по-разному реагировать

на агрессивные среды. Поэтому исследование различных режимов термической обработки, как упоминалось выше, должно включать и их влияние на коррозионную стойкость.

В конечном итоге полученные результаты помогут создать стратегию для увеличения коррозионной стойкости углеволокнистого железо-никелевого материала, что значительно расширит его область применения, включая аэрокосмическое машиностроение, автомобилестроение и строительство. Это, в свою очередь, будет способствовать более рациональному использованию производственных ресурсов, повышению безопасности эксплуатации.

Кроме того, в целях обеспечения успешной интеграции материала в производственные процессы необходимо исследовать его технологические свойства, в частности свариваемость. Оценка свариваемости должна как минимум включать в себя:

- анализ применимости различных технологий сварки (дуговая, TIG, MIG, лазерная и др.);
- исследование склонности к образованию дефектов в сварном шве;
- изучение микроструктурных изменений в зоне термического влияния;
- механические испытания сварных соединений на прочность, ударную вязкость, твердость и усталостную прочность.

Выводы. Проведение вышеперечисленных исследований позволит лучше понять, как ведет себя многослойная сталь и изделия из нее в разных условиях эксплуатации, что, возможно, станет основой для разработки новых рекомендаций в области материаловедения. Полученные результаты позволят существенно расширить возможности применения исследуемой многослойной стали в критически важных отраслях промышленного строительства, предъявляющих повышенные требования к механической прочности, устойчивости к коррозии и надежности сварных соединений.

Еще одна перспектива развития исследования – это совмещение данной технологии с технологией детонационного напыления металлических порошков [7], суть которого заключается в ускорении порошковых частиц до сверхзвуковых скоростей, что вызывает их интенсивную диффузию в приповерхностном слое металлической матрицы, в данном случае стальной сетки с углеволокнистым катализатором. Сверхзвуковые скорости обеспечивают высокое диффузионное проникновение частиц в металл матрицы, что позволит нанести покрытия, которые не подходят или неудобны для нанесения электрохимическим способом легирующих элементов, например титана, молибдена, алюминия, тантала и бериллия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Урсулов А.А., Ларина Т.В. Технологии производства дамасской стали // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2024. Т. 8, № 2. С. 241–251. DOI: 10.33764/2618-981X-2024-8-2-241-251.
2. Справочник металлста. Т. 2 / под общ. ред. Н.С. Ачеркана. М.: Машиностроение, 1965. 975 с.
3. Антейн А.К. Дамасская сталь в странах бассейна Балтийского моря. Рига, 1973. 139 с.
4. Технология изготовления дамасской стали ковкой многослойных пакетов / С.А. Колчин, Ю.В. Горохов, А.А. Ковалева [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20, № 1. С. 42–49. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-42-49.
5. Волот Н.В. Современные материалы в производстве дамасской стали // Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий: мат-лы науч.-практ. конф. Кострома: Костромской государственного университета, 2018. С. 55–57.
6. International centre for diffraction data. USA. Pennsylvania. 2008.
7. Опыт исследования и применения технологии нанесения детонационных покрытий / В.Ю. Ульяницкий, М.В. Ненашев, В.В. Калашников [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12, № 1-2. С. 569–575.

REFERENCES

1. Ursulov A.A., Larina T.V. Technologies of damask steel production. *Interjekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia]. 2024, vol. 8, no. 2, pp. 241–251. (in Russian) DOI: 10.33764/2618-981X-2024-8-2-241-251
2. Acherkan N.S. *Spravochnik metallista*. T. 2 [Metalworker's Handbook. V. 2]. Moscow, Mechanical Engineering, 1965. 975 p.
3. Antein A.K. *Damasskaja stal' v stranah bassejna Baltijskogo morja* [Damascus Steel in the Baltic Sea Basin]. Riga, 1973. 139 p.
4. Kolchin S.A., Gorokhov Yu.V., Kovaleva A.A. [et al.]. Technology for making Damascus steel by forging multilayer bags. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov], 2022, vol. 20, no. 1, pp. 42–49. (in Russian) DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-42-49
5. Volot N.V. Modern materials in the production of Damascus steel. *Nauchnye issledovaniya i razrabotki v oblasti dizajna i tehnologij: mat-ly nauch.-prakt. konf.* [Research and development in the field of design and technology: scientific and practical materials. conf.]. Kostroma, Kostroma State University, 2018, pp. 55–57. (In Russian).
6. International centre for diffraction data. USA. Pennsylvania. 2008.
7. Ulyanitsky V.Yu., Nenashev M.V., Kalashnikov V.V. [et al.]. Experience in research and application of detonation coating technology. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2010, vol. 12, no. 1-2, pp. 569–575. (in Russian)

Об авторах:

ЛЕЩЕНКО Дмитрий Владимирович

технический директор института по проектированию и изыскательским работам, старший преподаватель кафедры газопереработки, водородных и специальных технологий Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: Ld@samgtu.ru

МАКСИМОВ Николай Михайлович

доктор химических наук, доцент, профессор кафедры химической технологии переработки нефти и газа Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: maximovnm@mail.ru

ЯКУНИН Константин Петрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник института оборонных исследований и разработок, доцент кафедры химии и технологии полимерных и композиционных материалов, старший научный сотрудник лаборатории цифровых двойников материалов и технологических процессов их обработки Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: konst1982@gmail.com

ФЕДЯКИН Алексей Геннадьевич

главный инженер проектов института по проектированию и изыскательским работам Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: defxela@yandex.ru

LESHCHENKO Dmitry V.

Technical Director of the Institute for Design and Survey, Senior Lecturer of the Gas Processing, Hydrogen and Special Technologies Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244 E-mail: Ld@samgtu.ru

MAXIMOV Nikolay M.

Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Chemical Technology of Oil and Gas Processing Chair Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244 E-mail: maximovnm@mail.ru

YAKUNIN Konstantin P.

PhD in Engineering Sciences, Senior Researcher of the Institute for Defense Research and Development, Associate Professor of the Chemistry and Technology of Polymer and Composite Materials Chair, Senior Researcher of the Digital Material Twins Laboratory and Technological Processes of Heir Processing Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244 E-mail: konst1982@gmail.com

FEDYAKIN Alexey G.

Chief Project Engineer of the Institute for Design and Survey Samara State Technical University 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244 E-mail: defxela@yandex.ru

Для цитирования: Лещенко Д.В., Максимов Н.М., Якунин К.П., Федякин А.Г. Метод получения аналога дамасской стали с геометрически распределенными включениями за счет применения углеволокнистого катализатора // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 4. С. 66–72. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.10.

For citation: Leshchenko D.V., Maksimov N.M., Yakunin K.P., Fedyakin A.G. Method for obtaining an analog of damascus steel with geometrically distributed inclusions through the use of a carbon fiber catalys. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 4, pp. 66–72. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.10.

Принята: 21.05.2025 г.