

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.77.04  
DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-109-114



### АНАЛИЗ АКТУАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Полецков П.П., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Кухта Ю.Б.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Материалы, применяемые в экстремальных условиях Крайнего Севера и Арктики, должны обладать комбинацией трудно сочетаемых характеристик: высокой прочностью, пластичностью, вязкостью при низких температурах и свариваемостью, а также характеризоваться низкой чувствительностью к концентраторам напряжений и отсутствием склонности к хрупкому разрушению. Однако традиционные подходы к достижению комплекса свойств материалов, отвечающего условиям эксплуатации, обеспечивают повышение значений одного из свойств с одновременной потерей уровня остальных или некоторых из них. Проблема усугубляется тем, что понижение температуры эксплуатации сопровождается ухудшением пластичности и ударной вязкости материала. Поэтому представленная на мировом рынке продукция удовлетворяет повышенным требованиям только по одному из ключевых параметров, определяющих узконаправленность их применения (либо износостойкость, либо хладостойкость, либо высокая прочность и т. д.). Это ограничивает возможность ее применения в условиях одновременного воздействия низких температур, агрессивных сред, статических, динамических, импульсных или циклических нагрузок, а также интенсивного износа. В статье показана необходимость производства новых многофункциональных импортозамещающих материалов, обладающих уникальной комбинацией вышеперечисленных свойств и хладостойкости при температуре до минус 70 °С. Освоение инновационной технологии производства указанных материалов планируется в промышленных условиях ПАО «ММК» совместно с учеными ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при поддержке Минобрнауки России. Комбинация основных характеристик разрабатываемых материалов превосходит существующие на мировом рынке материалы аналогичного назначения. Это определяет возможность его одновременного многоцелевого применения в объектах и конструкциях ответственного назначения.

**Ключевые слова:** импортозамещение, многофункциональные материалы, инновационная технология, прочность, износостойкость, хладостойкость, Крайний Север, Арктика.

*Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием высшего учебного заведения (Соглашение № 075-11-2021-063 от 25.06.2021 г.).*

© Полецков П.П., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Кухта Ю.Б., 2021

#### Для цитирования

Анализ актуальных направлений исследований в области производства многофункциональных материалов для экстремальных условий эксплуатации / Полецков П.П., Гулин А.Е., Емалеева Д.Г., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю., Кухта Ю.Б. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 109–114. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-109-114>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ANALYSIS OF CURRENT AREAS OF RESEARCH IN PRODUCTION OF MULTIFUNCTIONAL MATERIALS FOR EXTREME OPERATING CONDITIONS

Poletskov P.P., Gulin A.E., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Kukhta Yu.B.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The materials used in the extreme conditions of the Far North and the Arctic should have a set of characteristics that are hard to combine: high strength, ductility, toughness at low temperatures and weldability, as well as low sensitivity to stress concentrators and no tendency to brittle fracture. However, conventional approaches to achieving a complex of materials properties that meet the operating conditions provide an increase in the values of one of the properties with a simultaneous loss of the level of the rest or some of them. The problem is aggravated by the fact that a decrease in the operating temperature is accompanied by lower ductility and impact toughness of the material. Therefore, the products presented on the world market satisfy increased requirements only for one of the key parameters that determine a narrow focus of their application (either wear resistance, or cold resistance, or high strength, etc.). This limits the possibility of their application under the simultaneous influence of low temperatures, corrosive environments, static, dynamic, cyclic or pulse loads and intensive wear. The paper demonstrates a need for producing new multifunctional import-substituting materials with a unique combination of the above mentioned properties and cold resistance at down to minus 70 °C. The innovative technology for these products is planned to be developed on the industrial site of PJSC MMK with scientists from Nosov Magnitogorsk State Technical University and supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia. The combination of the basic characteristics of materials under development is superior to the materials of a similar application existing on the world market. This determines an opportunity of their simultaneous multipurpose use in critical facilities and structures.

**Keywords:** import substitution, multifunctional materials, innovative technology, strength, wear resistance, cold resistance, the Far North, the Arctic.

*The research was funded by the Ministry of Education and Science of Russia as part of an integrated project aimed at developing high-technology production and carried out with the participation of a higher education institution (Agreement No. 075-11-2021-063 dated June 25, 2021).*

### For Citation

Poletskov P.P., Gulin A.E., Emaleeva D.G., Kuznetsova A.S., Alekseev D.Yu., Kukhta Yu.B. Analysis of Current Areas of Research in Production of Multifunctional Materials for Extreme Operating Conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 109–114. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-109-114>

### Введение

В последние годы одной из приоритетных задач мирового значения является обеспечение условий для освоения и устойчивого развития Северных территорий и Арктической зоны – объекта территориальных, ресурсных и стратегических интересов ряда государств, влияющего на развитие экономики и энергетики ближайших десятилетий. В условиях борьбы с последствиями экономического кризиса и санкций, а также проведения политики импортозамещения вопрос объединения усилий науки, государства и бизнеса для решения комплекса проблем по освоению Арктики становится крайне актуальным. Это подтверждается ключевыми положениями «Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года» (Указ Президента РФ от 5.03.2020 г. № 164).

При этом материалы, применяемые в экстремальных условиях Крайнего Севера и Арктики, должны обладать комбинацией трудносочетаемых характеристик: высокой прочностью, пластичностью, вязкостью при низких температурах и свариваемостью, а также характеризоваться низкой чувствительностью к концентраторам напряжений и отсутствием склонности к хрупкому разрушению. Проблема усугубляется тем, что понижение температуры эксплуатации сопровождается ухудшением пластичности и ударной вязкости материала.

### Основная часть

Следует отметить, что создание материалов для применения в экстремальных условиях эксплуатации, в том числе в условиях Арктики и Крайнего Севера, сопряжено с решением ряда

проблем, связанных с воздействием сверхнизких критических температур, статических, циклических и динамических нагрузок, интенсивного износа и т.д. Однако большинство существующих разработок обеспечивают производство материалов узкоспециализированного назначения.

К числу мировых производителей – лидеров в рассматриваемом направлении относят:

1. Японская сталелитейная компания Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation Group ([www.nipponsteel.com](http://www.nipponsteel.com)). Компания производит хладостойкие стали различного назначения, в том числе низкотемпературная износостойкая листовая сталь ABREX 400LT, 450LT, 500LT [1]. Широко используется при изготовлении оборудования, работающего в металлургическом производстве и горнодобывающей промышленности, где требуется высокая стойкость к интенсивному износу в течение длительного ударного и абразивного воздействия.

2. Компания JFE Steel Corporation (Япония, [www.jfe-steel.co.jp](http://www.jfe-steel.co.jp)). Компания производит высокопрочную хладостойкую сталь (JFE-HITEN590U2L, JFE-HITEN590L, JFE-HITEN610U2L, JFE-HITEN610L, JFE-HITEN690L, JFE-HITEN710L, JFE-HITEN780L, JFE-HITEN780FL, JFE-HITEN780ML) для изготовления механизмов, машин и конструкций, работающих при низких температурах (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) [2].

3. Компания DILLINGER (Германия, [www.dillinger.de](http://www.dillinger.de)). Компания производит конструкционные стали, в том числе ультравысокопрочные стали DILLIMAX Grade E (DILLIMAX 690 E - 965 E, DILLIMAX 1100) с повышенной хладостойкостью до  $-60^{\circ}\text{C}$  [3].

4. Компания SSAB (Швеция, [www.ssab.com](http://www.ssab.com)). Компания производит высокопрочные стали, в том числе низкотемпературные, которые отвечают требованиям большинства международных стандартов, в том числе высокопрочная конструкционная сталь Strenx для мостостроения, производства подъемных механизмов и средств транспортировки грузов [4].

5. Компания NLMK Clabecq (Бельгия, [nlmk.com](http://nlmk.com)). Компания производит конструкционные стали. Сталь марки QUARD – легированная листовая сталь, которая относится к классу мартенситных сталей средней твердости. Выпускается листовая сталь QUARD в нескольких модификациях, которые различают по степени твердости [5].

Примером материалов, используемых в рассматриваемых условиях, может служить прокат из высокопрочных хладостойких сталей. Высокопрочные конструкционные стали Dillimax 965 Extratough производства компании Dillinger и Strenx 960 производства компании SSAB обладают высоким уровнем прочностных свойств (вре-

менное сопротивление разрыву 980-1150 МПа, предел текучести более 960 МПа), однако имеют ограничения по температурным условиям эксплуатации (Dillimax 965 Extratough: работа удара KV= 27-30 Дж при минус  $60^{\circ}\text{C}$ ; Strenx 960: работа удара KV более 40 Дж при минус  $40^{\circ}\text{C}$ ).

Износостойкая сталь DILLIDUR 400 (производство компании Dillinger) разработана для применения в условиях интенсивного износа и имеет высокие показатели твердости HBW = 370–430, но при этом более низкие прочностные характеристики (временное сопротивление разрыву 1200 МПа, условный предел текучести 800 МПа). Износостойкие стали ABREX 400 LT [6] (производство компании Nippon Steel) и Hardox®400 (производство компании SSAB) имеют аналогичный уровень свойств.

В то же время сталь Dillimax 690 Extra tough (производство компании Dillinger) и Strenx 700 E/F (производство компании SSAB) имеют диапазон работы удара KV= 27–70 Дж при критических температурах до минус  $60^{\circ}\text{C}$ , что делает возможным их применение в условиях Крайнего Севера, однако при этом данные материалы отличаются относительно невысокими показателями механических свойств (временное сопротивление разрыву 780–930 МПа, условный предел текучести 700 МПа). Аналогичные закономерности наблюдаются при анализе комплекса свойств сталей ABREX 450LT, Hardox®450, DILLIDUR 450, ABREX 500 LT, Hardox®500, Hardox®500 Tuf, DILLIDUR 500 и др.

В результате аналитического обзора хладостойкие стали зарубежных производителей в зависимости от достигаемого уровня свойств были сгруппированы по четырем направлениям (видам) (табл. 1).

Таким образом, на основе сравнительного анализа установлено, что высокопрочные хладостойкие марки стали удовлетворят повышенным требованиям только по одному из ключевых параметров (либо износостойкость, либо хладостойкость, либо высокая прочность и т.д.), определяющих узконаправленность их применения. Это ограничивает возможность их применения в условиях одновременного воздействия низких температур, агрессивных сред, статических, динамических, импульсных или циклических нагрузок, а также интенсивного износа.

В связи с этим на базе проведенного анализа были разработаны уникальные комбинации требований для производства новых сталей, характеризующихся обеспечением одновременно и высокой прочности, и пластичности, а также износо-, атмосферо- и хладостойкости при температуре до минус  $70^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 1. Основные характеристики сталей импортного производства  
Table 1. Main characteristics of imported steels

Марка стали	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\Delta_5$ , %	Работа удара при температуре испытания	
				KV, Дж	t, °C
Вид 1					
Dillimax 690 Extra tough, (Dillinger)	770-930	≥ 690	≥ 14	≥ 30	-60
Strenx 700 E/F (SSAB)	780-930	≥ 700	≥ 14	≥ 27	-60
JFE-LT415TM (JFE Steel Corporation)	550-690	≥ 415	≥ 20	≥ 41	-60
Quend 700 (NLMK Clabecq)	780-930	700	≥ 14	27	-40
Вид 2					
Dillimax 965 Extra tough (Dillinger)	980-1150	≥ 960	≥ 12	≥ 30	-60
Strenx 960 (SSAB)	980-1150	≥ 960	≥ 12	≥ 40	-40
Quend 940-960 (NLMK Clabecq)	780-1150	940-960	≥ 12	27	-40
JFE-HITEN 780ML (JFE Steel Corp.)	760-930	450-685	≥ 24	≥ 34	-60
Вид 3					
Dillimax 1100 Extra tough (Dillinger)	1200-1500	≥ 1100	≥ 10	≥ 30	-40
Strenx 1100 (SSAB)	1250-1550	≥ 1100	≥ 10	≥ 27	-60
Quard 400 (NLMK Clabecq)	1300	1160	≥ 10	≥ 40	-40
EVERHARD-C400LE (JFE Steel Corp.)	1096	971	21	≥ 27	-40
Вид 4					
ABREX 500 LT (Nippon Steel)	1700	1200	-	≥ 21	-40
DILLIDUR 500 V (Dillinger)	1650	1300	-	25	-20
EVERHARD-C500LE (JFE Steel Corp.)	1680	1200	≥ 17	≥ 21	-40
ABREX 400 LT -450 LT (Nippon Steel)	1200-1470	1090-1160	-	≥ 27	-40

Вместе с тем процесс изготовления таких материалов, как правило, строго регламентирован и очень «чувствителен» к изменениям технологических режимов [7–9]. Это может приводить к существенным изменениям свойств в сплавах с близким химическим составом. С другой стороны, это обуславливает возможность управления свойствами таких материалов в широком диапазоне [10], что в совокупности с применением современных методов термометаллургической обработки позволяет обеспечить уникальный комплекс свойств конечной продукции.

### Характеристика объекта разработки

Учеными ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» совместно с ПАО «ММК» при поддержке Минобрнауки России начата реализация комплексного проекта по разработке и освоению инновационной технологии производства 4-х видов металлопроката из многофункциональных импортозамещающих материалов, обладающих уникальной комбинацией высокой прочности, пластичности, а также износо- и хладостойкости при температуре до минус 70°C. Данный проект реализуется в рамках постановления Правительства № 218 и соответствует приоритетному направлению, установленному Стратегией научно-технологического развития РФ: «переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки боль-

ших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

Каждая из комбинаций основных характеристик разрабатываемых материалов представляет собой уникальное сочетание высокой прочности, пластичности, а также износо- и хладостойкости (табл. 2).

Таблица 2. Основные характеристики разрабатываемых видов продукции  
Table 2. Main characteristics of the types of products under development

Основные характеристики	Создаваемая продукция			
	Вид 1	Вид 2	Вид 3	Вид 4
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	580-950	950-1200	1200-1500	≥ 1500
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	≥ 500	≥ 800	≥ 950	≥ 1100
Относительное удлинение $\Delta_5$ , %	≥ 20	≥ 14	≥ 13	≥ 10
Относительное удлинение $\Delta_{50}$ , %	≥ 22	≥ 15	≥ 14	≥ 12
Твёрдость, HBW	160-280	280-350	350-450	450-570
Работа удара KV, Дж	≥ 80	≥ 40	≥ 30	≥ 20
Температура t, °C	-70	-70	-70	-70

Это определяет возможность их одновременного многоцелевого применения в конструкциях и объектах нефтегазового комплекса России, а также мостостроения, строительства, транспортного и тяжелого машиностроения и других отраслей промышленности. Примером могут служить следующие изделия ответственного назна-

чения, в том числе эксплуатируемые в условиях Крайнего Севера и Арктики:

– объекты инфраструктуры (эстакады, мачты, резервуары, переходные мостики, площадки обслуживания) и трубы для перспективных проектов добычи и транспортировки ПАО «Газпром» и других предприятий нефтегазового комплекса;

– конструкции транспортного машиностроения, в том числе вагоностроения;

– элементы подъемно-транспортного оборудования и средств транспортировки грузов;

– детали узлов и элементы горнодобывающей, карьерной, сельскохозяйственной, а также лесозаготовительной и деревообрабатывающей техники;

– конструкции мостов;

– элементы палуб и платформ судов;

– несущие сварные каркасные конструкции;

– детали узлов, рамных и корпусных элементов техники широкого применения и т.д.

Технико-экономическая эффективность применения разрабатываемых материалов в экстремальных условиях обусловлена возможностью эксплуатации конструкций в условиях сверхнизких критических температур (до минус 70°C), а также существенным снижением массы и повышением несущей способности и долговечности создаваемых объектов за счет высокого уровня прочностных свойств.

### Заключение

Проведенный анализ позволил определить основные позиции аналогов импортных материалов для экстремальных условий эксплуатации и основные требования к механическим характеристикам разрабатываемых материалов, что позволило установить:

1. Представленная на мировом рынке продукция удовлетворяет повышенным требованиям только по одному из ключевых параметров, определяющих узконаправленность их применения (либо износостойкость, либо хладостойкость, либо высокая прочность и т.д.). Это ограничивает возможность ее применения в условиях одновременного воздействия низких температур, агрессивных сред, статических, динамических, импульсных или циклических нагрузок, а также интенсивного износа.

2. Комбинация основных характеристик разрабатываемого материала превосходит существующие на мировом рынке материалы аналогичного назначения и представляет собой уникальное сочетание высокой прочности, пластичности, а также износо- и хладостойкости. Это определяет возможность его одновременного многоцелевого применения в объектах и конструкциях ответственного назначения.

3. Разрабатываемый материал – принципиально новый результат, не представленный ранее на мировом рынке.

### Список литературы

1. ABREX. Abrasion resistant steel plate. URL: [https://www.nipponsteel.com/product/catalog\\_download/pdf/A010e\\_s.pdf](https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/A010e_s.pdf) (дата обращения: 18.08.2021)
2. JFE Steel Corporation catalog. URL: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/catalog/c1e-001.pdf> (дата обращения: 18.08.2021)
3. Dillinger proprietary steels. URL: <https://www.dillinger.de/d/en/products/proprietary-steels/index.shtml> (дата обращения: 18.08.2021)
4. Strenx. Performance Steel. URL: <https://www.ssab.com/products/brands/strenx> (дата обращения: 18.08.2021)
5. NLMK Clabecq page. <https://eu.nlmk.com/en/plate/clabecq/> (дата обращения: 18.08.2021)
6. ABREX 400LT: Alloy Digest (2016) 65 (5): SA-752. 2016. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.ad.sa0752>
7. Chernyshov E., Baev I., Romanov A., Romanova E. Cold resistance and mechanical properties of high-strength medium alloy steel depending on the technology of cast billets production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 62. 2019. 79-84. DOI:10.17073/0368-0797-2019-1-79-85.
8. Khlusova E.I., Sych O.V., Orlov V.V. Cold-Resistant Steels: Structure, Properties, and Technologies. *Physics of Metals and Metallography*, June 2021, Volume 122, Issue 6, pp. 579-613.
9. Poleckov Pavel P. et al. Effects of Heat Treatment on Microstructure Parameters, Mechanical Properties and Cold Resistance of Sparingly Alloyed High-Strength Steel. *Defect and Diffusion Forum*, vol. 410, Trans Tech Publications, Ltd., Aug. 2021, pp. 197–202. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/ddf.410.197.
10. Borisova L.G. and Gorshkova T.P. Studying Resistance to Cold in Low-Alloy Steels. *Key Engineering Materials*, vol. 836, Trans Tech Publications, Ltd., Mar. 2020, pp. 46–51. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/kem.836.46.
11. Назначение и область применения ультрахладостойкого наноструктурированного листового проката / П.П. Полецков, К. Хакимуллин, Д.Г. Набатчиков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 85–88. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-88.

### References

1. ABREX. Abrasion resistant steel plate. Available at: [https://www.nipponsteel.com/product/catalog\\_download/pdf/A010e\\_s.pdf](https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/A010e_s.pdf) (Accessed on August 18, 2021)
2. JFE Steel Corporation catalog. Available at: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/catalog/c1e-001.pdf> (Accessed on August 18, 2021)

3. Dillinger proprietary steels. Available at: <https://www.dillinger.de/d/en/products/proprietary-steels/index.shtml> (Accessed on August 18, 2021)
4. Strenx. Performance Steel. Available at: <https://www.ssab.com/products/brands/strenx> (Accessed on August 18, 2021)
5. NLMK Clabecq page. Available at: <https://eu.nlmk.com/en/plate/clabecq/> (Accessed on August 18, 2021)
6. ABREX 400LT: Alloy Digest (2016) 65 (5): SA-752. 2016. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.ad.sa0752>
7. Chernyshov E., Baev I., Romanov A., Romanova E. Cold resistance and mechanical properties of high-strength medium alloy steel depending on the technology of cast billets production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, 62, pp. 79-84. DOI:10.17073/0368-0797-2019-1-79-85
8. Khlusova E.I., Sych O.V., Orlov V.V. Cold-resistant steels: structure, properties, and technologies. *Physics of Metals and Metallography*, June 2021, volume 122, issue 6, pp. 579-613.
9. Poleckov P.P. et al. Effects of heat treatment on microstructure parameters, mechanical properties and cold resistance of sparingly alloyed high-strength steel. *Defect and Diffusion Forum*, vol. 410, Trans Tech Publications Ltd., Aug. 2021, pp. 197–202. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/ddf.410.197
10. Borisova L.G., Gorshkova T.P. Studying resistance to cold in low-alloy steels. *Key Engineering Materials*, vol. 836, Trans Tech Publications Ltd., Mar. 2020, pp. 46–51. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/kem.836.46
11. Poletskov P.P., Khakimullin K., Nabatchikov D.G. et al. The purpose and the application of ultra-low temperature resistant nanostructured rolled steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 85-88. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-2-85-8

Поступила 19.08.2021; принята к публикации 25.08.2021; опубликована 27.09.2021  
Submitted 19/08/2021; revised 25/08/2021; published 27/09/2021

**Полецков Павел Петрович** – доктор технических наук, директор инжинирингового центра, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru). ORCID 0000-0001-9209-7759

**Гулин Александр Евгеньевич** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [a.gulin@magtu.ru](mailto:a.gulin@magtu.ru). ORCID 0000-0002-7722-4112

**Емалеева Динара Гумаровна** – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [emaleevadg@mail.ru](mailto:emaleevadg@mail.ru)

**Кузнецова Алла Сергеевна** – младший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [allakuznetsova.mgtu@mail.ru](mailto:allakuznetsova.mgtu@mail.ru)

**Алексеев Даниил Юрьевич** – инженер-исследователь, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [d.u.alekseev@mail.ru](mailto:d.u.alekseev@mail.ru)

**Кухта Юлия Борисовна** – доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: [perfectumyuka@mail.ru](mailto:perfectumyuka@mail.ru)

**Pavel P. Poletskov** – DrSc (Eng.), Director of the Engineering Center, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [pavel\\_poletskov@mail.ru](mailto:pavel_poletskov@mail.ru). ORCID 0000-0001-9209-7759

**Aleksandr E. Gulin** – PhD (Eng.), Junior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [a.gulin@magtu.ru](mailto:a.gulin@magtu.ru). ORCID 0000-0002-7722-4112

**Dinara G. Emaleeva** – PhD (Eng.), Junior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [emaleevadg@mail.ru](mailto:emaleevadg@mail.ru)

**Alla S. Kuznetsova** – Junior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [allakuznetsova.mgtu@mail.ru](mailto:allakuznetsova.mgtu@mail.ru)

**Daniil Yu. Alekseev** – Research Engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [d.u.alekseev@mail.ru](mailto:d.u.alekseev@mail.ru)

**Yuliya B. Kukhta** – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Computer Science and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: [perfectumyuka@mail.ru](mailto:perfectumyuka@mail.ru)