

УДК 621.791.75 : 669.14.018.41

РАЗРАБОТКА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ПРОВОЛОК СПЛОШНОГО СЕЧЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

DEVELOPMENT OF LOW-ALLOY SOLID SECTION WIRES AND EFFECTIVE
WELDING PRACTICES OF HIGH-RESISTANCE STEELS FOR OPERATIONS IN THE
EXTREME NORTH CONDITIONS

А. П. Барышников, Д. А. Кашенко, И. Г. Карпов, Р. В. Бишопов

A. P. Baryshnikov, D. A. Kaschenko, I. G. Karpov, R. V. Bishokov

Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей»,
г. Санкт-Петербург

*Ключевые слова: аргонодуговая сварка; редкоземельные металлы;
хладостойкие стали; высокопрочные стали*

Key words: argon-arc welding; rare-earth metals; cold-resistant steels; high-strength steels

В сентябре 2014 года ОАО «НК «Роснефть» успешно завершило бурение самой северной в мире арктической скважины «Университетская-1», была обнаружена нефть на лицензионном участке Восточно-Приновоземельский-1 в Карском море. Карская морская нефтеносная провинция, по оценкам экспертов, по объему ресурсов превышает такие нефтегазоносные провинции, как Мексиканский залив, бразильский шельф, арктический шельф Аляски и Канады, и сравнима со всей текущей ресурсной базой Саудовской Аравии [1]. Карское море принадлежит к группе морей Сибирской Арктики. Это одно из самых холодных морей России, температура воздуха, которая может быть на море, составляет от -40 до -50 °С. Другой проблемой являются частые шторма, а большую часть года море покрыто льдами [2].

Для реализации проектов по освоению месторождений углеводородов в условиях Крайнего Севера необходимо создать новое поколение высокотехнологичных сварочных материалов и разработать инновационные технологии сварки объектов инженерной инфраструктуры из высокопрочных сталей типа АБ с повышенными характеристиками прочности и хладостойкости металла шва. Особо тяжело нагруженные конструкции могут выполняться из высокопрочных сталей с пределом текучести свыше 1 000 МПа таких марок, как АБ5А, АБ6А, АБ7А [3].

Традиционно для сварки высокопрочных сталей применяются различные способы, такие как ручная дуговая сварка покрытыми электродами, автоматическая и полуавтоматическая сварка в среде защитных газов. Особо ответственные сварные соединения из высокопрочных сталей выполняются аргонодуговым методом сварки — ручным, механизированным и автоматическим (в зависимости от условий сварки). Такая технология сварки имеет ряд значительных преимуществ: ультранизкое содержание диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле, высокий уровень прочностных и вязкопластических характеристик металла шва, высокий уровень хладостойкости и сопротивления хрупкому разрушению металла шва по сравнению с другими способами сварки.

В настоящее время для аргонодуговой сварки высокопрочных сталей указанных марок используется сплошная сварочная проволока типа 07ХНЗМД, разработанная в 70–80-х гг. прошлого столетия. Металл шва, выполненный этой проволокой, обеспечивает предел текучести не менее 800 МПа. По аналогии с правилами РМРС для обеспечения хладостойкости металла шва сварного соединения необходимо, чтобы работа удара при эксплуатируемой температуре была численно равна 0,1 от предела текучести испытываемого материала. Металл шва, выполненный проволокой Св-07ХНЗМД, обеспечивает работу удара не менее 80 Дж только при -20 °С. Для обеспечения нормальной эксплуатации сварных металлоконструкций в климатических условиях Карского моря требуется гарантированная хладостойкость металла шва при температурах до -60 °С. Кроме того, применяемые технологии сварки обеспечивают равнопрочность

только при использовании значительного усиления металла шва (до 30–35 % толщины основного металла), что увеличивает общую стоимость и трудоемкость производимых сварочных работ.

Основной задачей при разработке сварочных материалов для сварки высокопрочных сталей является обеспечение одновременно высокой прочности и хладостойкости металла шва при температуре эксплуатации до -60°C . Требуемые свойства высокопрочного металла сварных соединений низколегированных сталей достигаются в основном за счет оптимального сочетания комплекса феррито-цементитных структур.

Микроструктура металла высокопрочных сварных швов различна, в основном она определяется степенью его легирования, которая возрастает с увеличением прочности свариваемой стали. Например, металл шва типа 08ГСМТ имеет в основном феррито-перлитную структуру. Более легированный металл шва типа 04НЗГМТА имеет и более сложную структуру, при исследовании оптической и электронной металлографией в нем обнаруживается ферритная фаза с преобладанием полигонального и игольчатого феррита, бейнита и «микрофазы», представляющей собою мартенситно-аустенитно-карбидные комплексы [4, 5, 6]. Однако металл шва типа 04НЗГМТА не обеспечивает необходимого уровня механических свойств.

Металл шва, содержащий в своем составе хром (типа 10ХГСН2МТ), состоит в основном из бейнита с выделением по границам дендритов в виде тонких прослоек структурно-свободного полигонального феррита и «микрофазы», состоящей из бейнита, мартенсита, остаточного аустенита и карбидов [7]. Увеличение доли структурно-свободного феррита приводит к снижению не только ударной вязкости, но и прочности.

При повышении содержания углерода в металле типа 10ХГСН2МТ, а также других легирующих элементов увеличивается бейнитная составляющая в структуре, а в «микрофазе» резко увеличивается количество мартенсита и уменьшается количество бейнита. Эти структурные изменения приводят к образованию холодных трещин [8], что недопустимо при изготовлении конструкций ответственного назначения. Микроструктура более прочных швов типа 07ХНЗМД и 03ХНЗМД при исследовании оптической металлографией представляет собой мелкозернистый сорбит. В ней присутствует бейнитная и ферритная составляющая, а также определенное количество мартенситной доли в составе «микрофазы». Для сварки высокопрочной стали с пределом текучести, аналогичным сталям марок АБ5А – АБ7А, была выбрана система легирования С-Si-Mn-Cr-Ni-Mo-Cu с соотношением основных элементов аналогично 07ХНЗМД. Такая система легирования обеспечивает предел текучести наплавленного металла не менее 800 МПа. Таким образом, чтобы обеспечить требуемую хладостойкость металла шва, работа удара при температуре испытаний -60°C должна составлять не менее 80 Дж.

Повышение прочностных свойств разрабатываемого металла шва достигалось за счет увеличения содержания молибдена в сварочной проволоке до 0,8 %. Увеличение содержания молибдена повышает количество игольчатого феррита и почти полностью устраняет верхний бейнит, однако может способствовать образованию тонких полосок пограничного феррита в матрице металла шва [9]. Учитывая высокую температуру плавления ($\approx 2600^{\circ}\text{C}$) и высокие карбидообразующие свойства, молибден способствует повышению дисперсности структуры и изменяет кинетику кристаллизации расплавленного металла, что в свою очередь может повлиять не только на прочностные, но и на вязко-пластические свойства шва.

Направленное формирование благоприятного комплекса микроструктур металла шва, выполненного аргонодуговой сваркой, достигалось введением микродобавок РЗМ. Эти элементы способны существенно изменять процессы кристаллизации, изменять форму и характер распределения неметаллических включений, улучшать состояние границ зерен [10–14]. В общем виде эти изменения положительно влияют на весь комплекс механических характеристик металла, особенно это касается ударной вязкости и сопротивления хрупкому разрушению, в том числе при отрицательных температурах испытаний. Дополнительно с целью повышения работы удара при отрицательных температурах строго ограничивалось содержание примесных элементов в сварочной проволоке: серы, фосфора, сурьмы, мышьяка и т. п.

Разработка технологии сварки. Высокопрочные стали в своей основе имеют хромоникельмолибденовую систему легирования с добавками меди и микролегирующих элементов. По своим механическим свойствам они отличаются высокой прочностью с удовлетворительной пластичностью и вязкостью, стойкостью против хрупкого разру-

шения и слоистых разрушений, обладают удовлетворительной стойкостью против коррозии в морской воде [15]. Эти стали, в связи с высоким легированием, склонны к подкалке в околошовной зоне, и для получения благоприятных структур, как в металле шва, так и околошовной зоне, требуется достаточно сложный технологический процесс сварки. С этой целью время нахождения кристаллизующегося металла шва в температурном интервале 800–500 °С необходимо ограничить в пределах 10–15 с. При большей скорости охлаждения образуются структуры с высокой твердостью, а при меньшей наблюдается рост зерна и снижение ударной вязкости. Выполнение этого условия достигается выбором погонной энергии сварки, температуры предварительного и сопутствующего подогрева, а также ограничением межпроходной температуры, замедленным охлаждением. Учитывая, что предел текучести металла шва ниже предела текучести основного металла, равнопрочность со свариваемой сталью не достигается. В данном случае обеспечить равнопрочность удастся за счет использования эффекта контактного упрочнения. Контактное упрочнение реализуется на узких щелевых разделах путем сдерживания пластической деформации мягкой прослойки (металла шва) более прочными частями основного металла [16]. Повышение сопротивления деформированию металла шва как мягкой прослойки позволяет повысить фактические значения прочности сварного соединения до уровня, близкого к характеристикам основного металла.

В процессе разработки технологий сварки высокопрочных сталей была отработана сварка в узкую щелевую разделку в толщинах до 50 мм (при больших толщинах используются Х-образные разделки либо сварочные горелки с плоским соплом, вводимым в щелевой зазор). Данная технология сварки позволяет не только реализовать эффект контактного упрочнения, но и снизить термомодеформационное воздействие на основной металл и сократить расход сварочных материалов.

Для повышения технологичности процесса аргонодуговой сварки был отработан способ сварки с механизированной подачей присадочной проволоки на оборудовании фирмы «Fronius» (отработаны оптимальные режимы сварки, определены рабочие диапазоны скорости подачи присадочной проволоки). Данная технология позволяет повысить производительность, следовательно, снизить трудозатраты на производство сварных конструкций. Также в тандеме с роботом-манипулятором фирмы Kawasaki был реализован автоматический процесс аргонодуговой сварки.

Методики изготовления сварных проб, образцов и испытаний. Сварка проб из высокопрочной стали, аналогичной АБ5А, толщиной 30 и 50 мм выполнялась аргонодуговым способом неплавящимся вольфрамовым электродом в узкую щелевую разделку при температуре окружающего воздуха плюс 20 °С и относительной влажности воздуха не более 80 %. Требуемый температурный режим кристаллизации металла шва сварного соединения обеспечивался за счет комплекса технологических операций, таких как контролирование межпроходной температуры, ограничение погонной энергии, создание условий для замедленного охлаждения сварного соединения. Измерение температуры металла шва выполнялось контактной термопарой.

Параметры режимов сварки для ручного исполнения составляли: сила тока — 230 А, напряжение на дуге — 17–18 В, скорость сварки ≈ 3 мм/сек, диаметр присадочной проволоки составлял 3 и 4 мм. Автоматическая и механизированная аргонодуговая сварка производилась на режимах: сила тока 220 А, напряжение на дуге составляло 13–15 В, скорость подачи электродной проволоки диаметра 1,2 мм составляла 1,08 м/мин, скорость сварки ≈ 3 мм/сек. Коэффициент наплавки, при максимальном для данного аппарата сварочном токе 220 А, при автоматизированном способе сварки составил не более 3 гр*А/час. Заполнение щелевой разделки выполнялось слоями, причем каждый последующий слой выполнялся в направлении, противоположном предыдущему.

Образцы для определения механических свойств металла шва в «свободном состоянии» изготавливались в соответствии с требованиями ГОСТ 6996: тип II — для определения механических характеристик металла шва при статическом растяжении и типы VI и IX с боковым надрезом — для определения работы удара. Натурные образцы для испытания сварного соединения на статическое растяжение изготавливались в соответствии с требованиями ГОСТ 6996: тип XIII. Испытания на вязкость разрушения (определение параметра трещиностойкости) выполнялись на образцах типа CTOD. Определение твердости HV (по Виккерсу) осуществлялось в соответствии с ГОСТ 2999 на макрошлифе, вырезанном из металла сварного соединения. Исследова-

ние структуры шва выполняли методами оптической металлографии на микроскопе Неофот-21. Травление микрошлифов для выявления структуры осуществлялось в нитале (4%-ном растворе азотной кислоты).

Результаты испытаний и их анализ. Результаты испытаний механических свойств металла шва, выполненного модифицированной проволокой, представлены в таблице.

***Механические свойства высокопрочного металла сварных швов,
выполненных различными сварочными материалами***

Сварочный материал		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KV, Дж			
					Не менее при °C			
				Не менее	+20	-20	-40	-60
Св-07ХНЗМД		860–910	810–850	15	140	83	70	–
Св-07ХНЗМДА (мод)		900–940	850–890	18	150	136	113	90
Union X90	Thyssen	880	770	16–19	80–110	–	45–65	–
Carbofil Ni Mo 1	Oerlikon	710–780	≥ 640	18	100	80	–	–
Carbofil 2,5 Ni		550–700	≥ 460	22	–	–	47	–
OK Tigrod 13.38	ESAB	790	700	19	200	150	–	–

Для сравнения в таблице представлены механические характеристики базовой проволоки Св-07ХНЗМД и «каталожных» иностранных аналогов, применяемых для сварки хладостойких высокопрочных низколегированных сталей. Результаты испытаний на ударный изгиб при различных температурах испытаний показаны на диаграмме (рис. 1).



Рис. 1. Значения работы удара, измеренной при различных температурах испытаний

Повышение содержания молибдена в проволоке до 0,8 %, совместно с использованием микродобавок РЗМ, обеспечило предел текучести металла шва на уровне 870 МПа и работу удара на уровне не ниже 90 Дж при температурах испытаний металла шва до -60°C .

Испытания натурных образцов на растяжение показали увеличение статической прочности сварного соединения более чем на 12 % (относительно предела прочности) за счет использования целевой разделки с соотношением ширины к высоте 1:2. С уменьшением этого отношения эффективность контактного упрочнения может увеличиваться вплоть до достижения металла шва равнопрочности с основным металлом.

Изучение параметров вязкости разрушения выполнялось на образцах типа CTOD при 0°C . Исследование трещиностойкости металла шва показало высокое сопротивление металла шва хрупкому разрушению, о чем свидетельствуют диаграммы «нагрузка — раскрытие берегов надреза», построенные по результатам испытаний. На диаграммах (рис. 2) видны остановленные хрупкие проскоки трещины с последующим возрастанием нагрузки после срыва. Среднее измеренное значение параметра трещиностойкости металла шва составило 0,20 мм, что указывает на удовлетворительную деформационную способность.

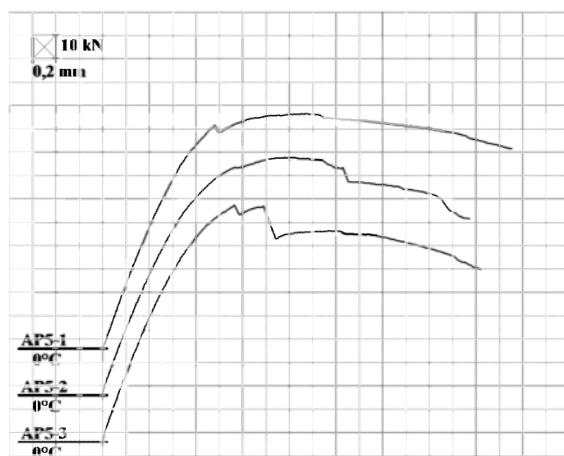


Рис. 2. Диаграммы «нагрузка — раскрытие берегов надреза», построенные по результатам определения вязкости разрушения металла шва

Анализ результатов параметра трещиностойкости линии сплавления показал значительную деформационную способность (параметр CTOD = 0,32 мм) и высокое сопротивление хрупкому разрушению, о чем также свидетельствовали остановленные хрупкие трещины и дальнейшее возрастание нагрузки на образец. Типичная диаграмма «нагрузка — раскрытие берегов надреза» для линии сплавления представлена на рис. 3.

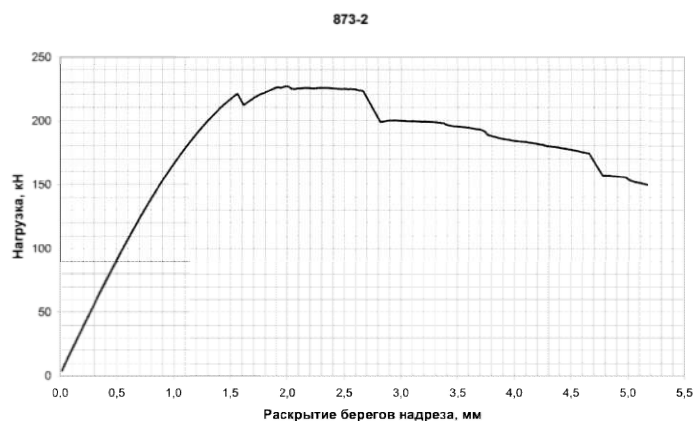


Рис. 3. Типичная диаграмма «нагрузка — раскрытие берегов надреза» построенная по результатам определения вязкости разрушения линии сплавления

Значения твердости HV на макрошлифе, вырезанном поперек сварного соединения, представлены на диаграмме на рис. 4. Вследствие высокой склонности к подкалке в околошовной зоне наблюдается повышение твердости до 4 мм от линии сплавления, что даже в случае минимального технологического усиления перекрывается наплавкой и подвергается отпуску.

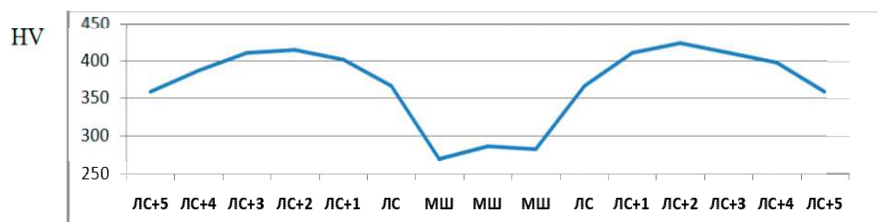


Рис. 4. Диаграмма замеров твердости в сварном соединении

Исследования влияния термического цикла сварки на основной металл производились путем испытаний на ударный изгиб образцов с надрезами по линии сплавления и на расстоянии 2 и 5 мм от линии сплавления в сторону основного металла. Ударная вязкость линии сплавления, как и в зоне термического влияния, находилась не ниже уровня основного металла.

Микроструктура металла шва (рис. 5) в рекристаллизованной зоне состоит из равномерной разориентированной мелкодисперсной мартенситно-бейнитной смеси. В нерекристаллизованной зоне наблюдается четко выраженная литая дендритная структура.

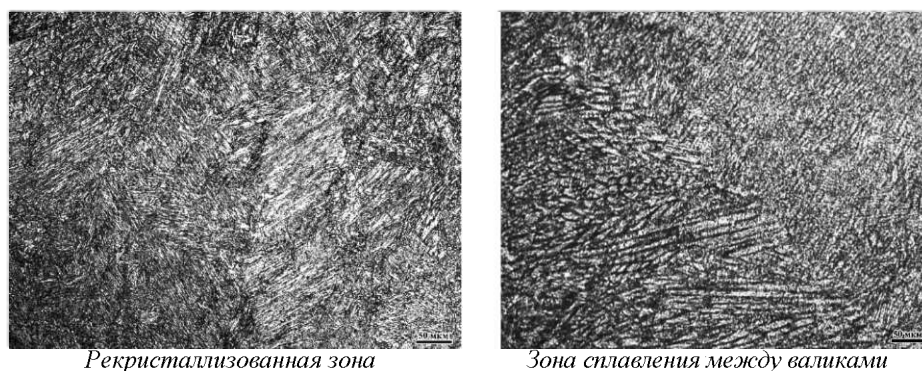


Рис. 5. Микроструктура металла шва

Равномерно распределенные взаимно разориентированные мелкодисперсные иглообразные структурные составляющие представляют эффективный барьер на пути распространения трещин, так как смена направления их движения требует дополнительных энергетических затрат, что подтверждается высокими значениями работы удара и значительным сопротивлением хрупкому разрушению.

Выводы

1. Разработана новая высокотехнологичная проволока сплошного сечения на базе Св-07ХНЗМД, обеспечивающая металл шва, обладающий:

- повышенными прочностными характеристиками;
- хладостойкостью металла шва вплоть до температуры испытаний -60°C ;
- высоким сопротивлением хрупкому разрушению за счет образования благоприятного фазового состава и эффективного измельчения зерна;
- высокой чистотой границ зерен;
- благоприятной морфологией неметаллических включений и низкого содержания вредных примесей;
- низким содержанием газов в металле шва сварных соединений высокопрочных сталей.

2. Отработана инновационная технология сварки с применением новой сварочной проволоки, которая позволяет снизить усилие металла шва на 10–15 % по сравнению с существующей технологией и выполнять качественные сварные соединения из высокопрочных низколегированных сталей типа АБ5А, АБ6А, АБ7А.

3. Выявлена связь между структурой и механическими свойствами металла шва. Показано, что равномерно распределенные взаимно разориентированные мелкодисперсные иглообразные структурные составляющие «микрофаза» представляют эффективный барьер на пути распространения трещин, так как смена направления их движения требует дополнительных энергетических затрат, что подтверждается высокими значениями работы удара и значительным сопротивлением хрупкому разрушению.

Таким образом, изменяя технологический процесс сварки и химический состав наплавленного металла с целью контроля кинетики кристаллизации металла шва, можно получать различные соотношения структурных составляющих для повышения эксплуатационных свойств сварных соединений, что в дальнейшем может быть использовано при разработке сварочных материалов для хладостойких высокопрочных сталей.

Список литературы

1. Управление информационной политики ОАО «НК «Роснефть», 27 сентября 2014 г. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.rosneft.ru/news/>
2. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР, 1982.
3. Горынин И. В., Малышевский В. А., Легостаев Ю. Л., Грищенко Л. В. Высокопрочные свариваемые стали // Вопросы материаловедения. — 1999 — № 3.
4. Грабин В. Ф., Головкин Е. Ф., Костин В. А., Алексеенко И. И. Морфологические особенности микроструктуры металла шва низколегированных сталей с ультранизким содержанием углерода // Автоматическая сварка. — 2004. — № 7.
5. Григоренко Г. М., Головкин Г. Г., Костин В. А., Грабин В. Ф. Влияние микроструктурных факторов на склонность к хрупкому разрушению сварных швов с ультранизким содержанием углерода // Автоматическая сварка. — 2005. № 2. — С. 3-11.
6. Григоренко Г. М., Костин В. А., Головкин В. В. Влияние химической неоднородности на образование игольчатого феррита в высокопрочном металле шва // Автоматическая сварка. — 2004. — № 2. — С. 3-8.
7. Макара А. М., Грабин В. Г. и др. О структуре высокопрочных низколегированных швов // Автоматическая сварка. — 1969. — № 6. — С. 11-15.
8. Макара А. М., Грабин В. Ф., Дениченко А. В., Петров Ю. Н. и др. Взаимосвязь холодных трещин со структурой высокопрочных швов // Автоматическая сварка. — 1972. — № 7. — С. 1-5.
9. Макара А. М., Грабин В. Ф., Денисенко А. В. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства низколегированных швов // Автоматическая сварка. — 1968. — № 6.
10. Гудремон Э. Специальные стали. Том 2. ГНТИ по черной и цветной металлургии, 1960.
11. Редкоземельные элементы в сталях и сплавах // Металлургия: сборник, 1989.
12. Крецановский Н. С. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1963. — № 8. — С. 23
13. Крецановский Н. С. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1963. — № 5. — С. 11
14. Кащенко Д. А. Создание высокотехнологичных электродов для сварки хладостойких низколегированных сталей для морской техники и магистральных трубопроводов: автореф. дис. ... канд. тех. наук, 2013.
15. Горынин И. В., Малышевский В. А., Легостаев Ю. Л., Грищенко Л. В. Высокопрочные стали для корпусов судов, морских сооружений и глубоководной техники // Прогрессивные материалы и технологии. — 1996. — № 2.
16. ГОСТ 2601-84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий.

Сведения об авторах

Барышников Александр Павлович, к. т. н., ведущий научный сотрудник НПК-3, Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», г. Санкт-Петербург, тел. 8(812)2741122

Кащенко Денис Анатольевич, к. т. н., начальник сектора НПК-3 Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», г. Санкт-Петербург, тел. 8(812)2741122

Карпов Илья Георгиевич, инженер 1 категории, НПК-3, Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», г. Санкт-Петербург, тел. 8(812)2741122, e-mail: ilyagkarpov@gmail.com

Бишоков Руслан Валерьевич, начальник лаборатории НПК-3, Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», г. Санкт-Петербург, тел. 8(812)2741228

Information about the authors

Baryshnikov A. P., Candidate of Science in Engineering, specialist of SPC-3, Central Research Institute for Structural Materials «Prometheus», St. Petersburg, phone: 8(812)2741122

Kaschenko D. A., Candidate of Science in Engineering, head of the sector of SPC-3, Central Research Institute for Structural Materials «Prometheus», St. Petersburg, phone: 8(812)2741122

Karpov I. G., engineer of SPC-3, Central Research Institute for Structural Materials «Prometheus», St. Petersburg, phone: 8(812)2741122, e-mail: ilyagkarpov@gmail.com

Bishokov R. V., head of laboratory of SPC-3, Central Research Institute for Structural Materials «Prometheus», St. Petersburg, phone: 8(812)2741228