

## Металлургия и материаловедение

УДК 621.745.55:669.131

DOI: 10.12737/article\_59353e29ab6133.65284944

Д.А. Илюшкин, С.В. Давыдов, Д.А. Болдырев

### НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЕ ЧУГУНА ДЛЯ ОТЛИВОК СТЕКЛОФОРМ

Рассмотрены основные требования, предъявляемые к материалам для деталей стеклоформующей оснастки, особенности структуры и свойств чугунов в отливках стеклоформ. Показано влияние ПАЭ на процессы структурообразования чугунов с различной формой графита в специфич-

ных для этих отливок условиях затвердевания и охлаждения, а также в ходе последующей термической обработки.

**Ключевые слова:** чугун, стеклоформа, микроструктура, твердость, ПАЭ, наномодифицирование, встречное модифицирование.

D.A. Ilyushkin, S.V. Davydov, D.A. Boldyrev

### CAST IRON NANO-MODIFICATION FOR GLASS-FORM CASTINGS

Under production conditions there was prepared and carried out a ladle modification of cast iron melt by spheroidizing and inoculating modifiers jointly with a complex modifier based on PAE. To study the peculiarities of cast iron structure formation in castings of glass-forming fixture under PAE influence there was investigated a structure and measured hardness on the cross section of castings before and after their thermal treatment at the distance up to 25 mm from a working (glass forming) surface.

PAE additives to standard modifiers cause different structural effects depending on the kind of cast iron melt treatment.

The PAE melt treatment in the course of spheroidizing and inoculating modification strengthens cast iron chilling, but at that stabilizes graphite of a vermicular form the thermal conductivity of which is

higher in comparison with a globe-shaped one. The structure of a metal base of such cast iron (in spite of the carbide increase in the structure) after a high-temperature annealing does not differ from the common one.

The treatment of PAE melt jointly with an inoculating modifier causes an effect of counter modification and instead of chilling intensifies a process of grey iron graphitization that result in the disintegration of an operating layer structure in castings and its hardness increase, graphite inclusion increase in the matrix of a glass-form, decrease of its hardness, but product thermal conductivity increase.

**Key words:** cast iron, glass-form, microstructure, PAE, hardness, nano-modification, counter-modification.

#### Введение

Стекольная отрасль и обслуживающие ее предприятия относятся к высокотехнологичным перспективным направлениям развития российской экономики. Важную роль в стекольном производстве играет формооснастка. Детали формовых комплектов стеклоформирующих машин работают в тяжелых условиях под влиянием знакопеременных термоциклических нагрузок и физико-химического воздействия расплавленного стекла. В связи с этим одной из проблем, которые решают отечественные производители, является повышение эксплуатационной стойкости формокомплектов для изготовления стеклянных изделий различными способами.

Материал для деталей стеклоформ должен обладать достаточной прочностью

и термостойкостью для предотвращения их деформации и образования термических трещин при циклическом нагреве и охлаждении, высокой теплопроводностью для обеспечения ускоренного теплоотвода и снижения термических напряжений и высокой плотностью в области стеклоформирующей полости в связи с необходимостью получения гладкой зеркальной поверхности стеклянных изделий. В условиях, когда проблемой является теплоотвод, как это имеет место в случае с высокоскоростными стеклоформирующими машинами, стеклоформы изготавливают из чугунов с пластинчатым графитом. Прочность чугуна обеспечивается за счет силикоферритной структуры металлической основы, в которой количество перлита, как правило,

не превышает 5 %. Содержание кремния при этом ограничивается значением углеродного эквивалента 4,3 %, выше которого начинается образование грубых включений первичного графита, снижающих плотность чугуна в области стеклоформирующей поверхности. Сопротивление растрескиванию повышают легированием чугуна молибденом и ванадием, поскольку эти элементы снижают возникающие под действием градиентов температур напряжения. Формы, испытывающие наиболее высокие термические напряжения (типа форм для изделий большого объема), изготавливают из высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом. Но в любом случае важными показателями стойкости деталей стеклоформ являются плотность их рабочего слоя и теплопроводность основной части (матрицы), поскольку эти факторы определяют качество поверхности стеклянных изделий и уровень напряжений в стеклоформирующей оснастке при термоциклировании [1].

Известно, что плотность чугуна тем выше, чем меньше графита в структуре. Теплопроводность, наоборот, повышается с увеличением количества и размеров графитной фазы [2]. Поэтому рабочий слой изделия должен содержать как можно более компактные включения графита, а основная его часть (матрица) – достаточно крупные включения пластинчатого графита или, по крайней мере, графита вермикулярной формы, обеспечивающие достаточную теплопроводность стеклоформе. Для получения такой градиентной структуры отливки стеклоформ изготавливают литьем на металлический холодильник. При этом в рабочем слое изделий из серых чугунов образуются колонии междендритного (точечного) графита, в структуре рабочего слоя стеклоформ из высокопрочных чугунов графит имеет шаровидную и/или компактную форму.

Требуемых параметров структуры чугуна в отливках стеклоформ (размер и количество графитных включений, количество перлитной составляющей, цемента и других карбидов в структуре металлической основы) можно добиться путем варьирования химического состава и регулирования скоростного режима их ох-

лаждения, подбирая, например, холодильник определенной массы, теплоизоляционное покрытие определенного состава и толщины и т. п. [3]. Однако интервалы варьирования химического состава чугуна ограничены, как было отмечено выше, значением углеродного эквивалента или из экономических соображений. Управление параметрами холодильника в зависимости от массы и размеров отливок в условиях реального производства может быть затруднительно (в связи с широкой номенклатурой изделий или ограничениями в сроках поставки готовых изделий). Таким образом, в сложившихся условиях наиболее простым, стабильным и одновременно достаточно эффективным способом управления структурой чугуна является модифицирование.

В настоящее время перспективными направлениями модифицирующей обработки расплавов являются технологии так называемого нанофазного и наногетерофазного модифицирования [4-6]. Первое направление предполагает обработку расплава поверхностно-активными элементами (ПАЭ), во втором подходе используются нанопорошки с размером частиц менее 100 нм.

Технология наномодифицирования – это ковшевая технология ввода модификатора, которая практически не изменяет существующую организационно-производственную структуру литейного цеха и не требует серьезных капитальных затрат на ее внедрение. Она не несет в себе функции легирования, раскисления, дегазации, десульфурации, которые характерны для многих типов применяемых комплексных присадок на основе магния и многокомпонентных лигатур, но может быть использована совместно с применяемыми на производстве сфероидизирующими и инокулирующими модификаторами для управления процессами зарождения, роста и развития центров графитизации.

Цель работы – изучение особенностей структурообразования чугуна в отливках стеклоформирующей оснастки под влиянием ПАЭ в составе сфероидизирующих и инокулирующих модификаторов.

### Методика проведения исследований

В производственных условиях завода «Флакс» (г. Орел) на шихте, состоящей из стали, литейного чугуна, возврата и ферросплавов (ферросилиция, ферромolibдена, ферротитана, феррованадия и феррохрома), подготовили и провели ковшевое модифицирование расплава чугуна ферросиликомагнием марки ФСМг7 и ферросиликобарием марки INOBAR совместно с комплексным модификатором, представляющим собой химическое соединение ПАЭ Va и VIa подгрупп таблицы Менделеева, а также Al, Sb, Sn, Cu и других элементов и их твердых растворов [5]. Сфероидизирующий и графитизирующий модификаторы вводились на дно ковша, модификатор с ПАЭ – под струю при заполнении 1/2 ковша. Расход сфероидизирующего и инокулирующего модификаторов составил соответственно 1,2 и 0,3 %, модификатора с ПАЭ – 0,005...0,01 % объема металла в ковше. Из чугуна, прошедшего модифицирующую обработку, изготовили отливки чистовых полуформ стеклоформующих комплектов.

Исследования структуры и твердости чугунов проводили на образцах, вырезан-

### Результаты исследований

Высокие значения твердости поверхности контакта отливок с холодильником обусловлены структурой белого или половинчатого чугуна, образующегося в результате переохлаждения расплава.

В структуре рабочего слоя отливок из высокопрочных чугунов графит имеет шаровидную и компактную форму, матрица стеклоформ дополнительно содержит включения вермикулярного графита, в связи с чем твердость чугуна при удалении от холодильника уменьшается (рис. 3, кривая 1). Модифицирование с ПАЭ стабилизирует вермикулярную форму графита по всему сечению отливок, в результате твердость рабочей поверхности стеклоформы после термической обработки оказывается ниже (кривые 2 и 3 на рис. 3).

Металлическая основа чугунов перед термической обработкой состоит из феррита и перлита, имеющего пластинчатое строение. На перлитных колониях наблюдаются включения карбидов. При модифицировании с ПАЭ число карбидов, а

ных непосредственно из этих отливок согласно схеме, представленной на рис. 1, до и после их термической обработки. Измерения твердости по длине образцов проводили на твердомере Роквелла ТК-2 шариком диаметром 1 мм. Результаты измерений представлены на рис. 2-4. Точки, расположенные вдоль оси ординат на рис. 2, соответствуют измерениям, выполненным непосредственно после выбивки отливок на их внутренней поверхности, контактирующей с металлическим холодильником.

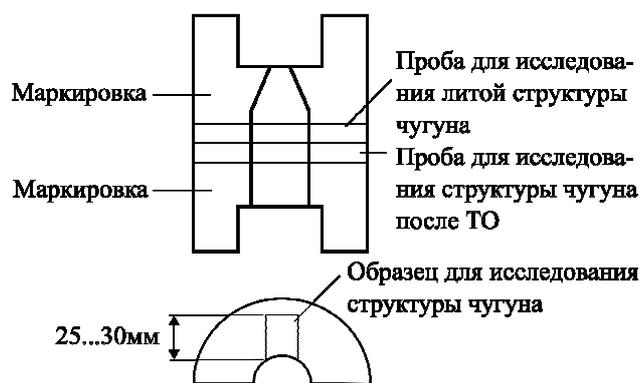


Рис. 1. Схема отбора проб для исследования структуры опытных чугунов

также площадь, занимаемая перлитом на шлифе, увеличиваются, количество включений графита, наоборот, сокращается, что приводит к общему по сечению отливок повышению твердости (кривые 2 и 3 на рис. 2).

Неустойчивый в условиях термоциклирования цементит, как избыточный, так и в составе перлита, устраняется последующим высокотемпературным графитизирующим отжигом отливок. Однако феррито-перлитная структура металлической основы чугунов сохраняется. Перлит в рабочем слое имеет зернистое строение. В матрице стеклоформ, из-за незавершенности процесса сфероидизации эвтектоидного цементита, наряду с зернистым наблюдается пластинчатый перлит. При этом общая площадь, которую он занимает, при удалении от холодильника растет, что в совокупности с его пластинчатым строением, а также сокращением числа графитных включений от модифицирующей обработки с ПАЭ приводит к повышению

твердости (кривые 2 и 3 на рис. 3).

Таким образом, структура металлической основы стеклоформ после отжига, независимо от вида модифицирующей обработки, не отличается, несмотря на по-

вышенный отбел отливок при модифицировании с ПАЭ, обусловленный влиянием последних на процессы структурообразования чугуна.

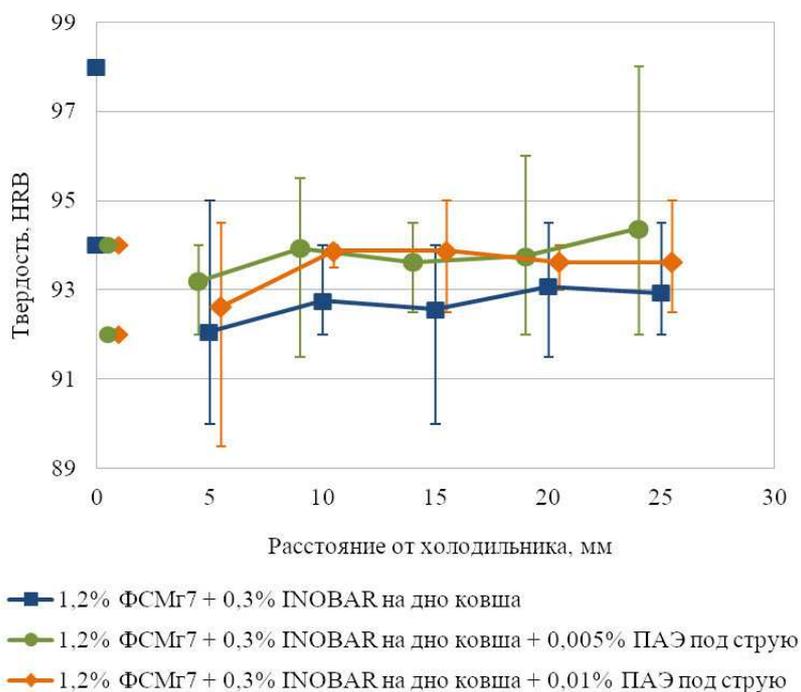


Рис. 2. Распределение твердости по сечению отливок стеклоформ из высокопрочных чугунов до термической обработки

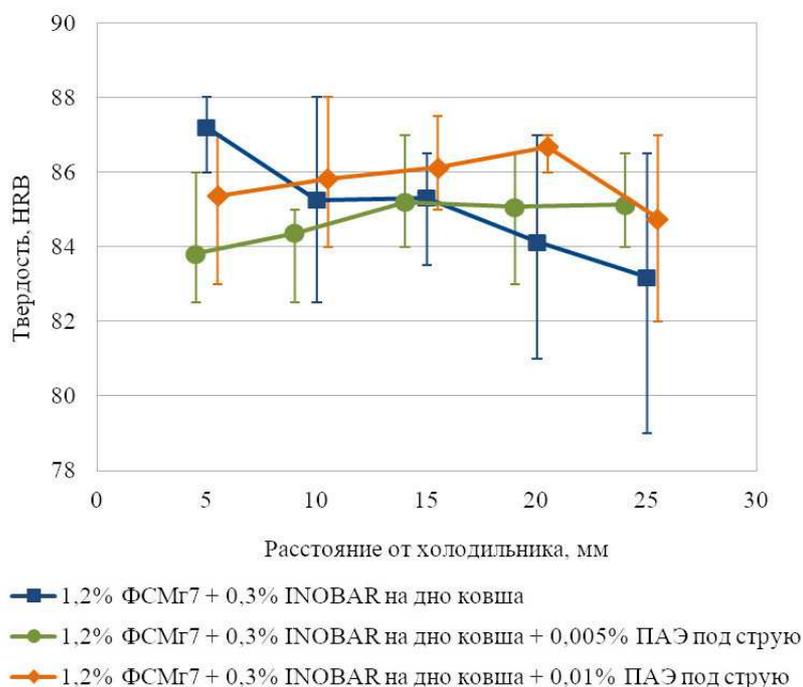


Рис. 3. Распределение твердости по сечению отливок стеклоформ из высокопрочных чугунов после термической обработки

Одновременная обработка расплава чугуна графитизирующим (ферросиликобарием) и отбеливающим (ПАЭ) модификаторами вызывает эффект встречного мо-

дифицирования и вместо отбела серого чугуна интенсифицирует процесс его графитизации (рис. 4).

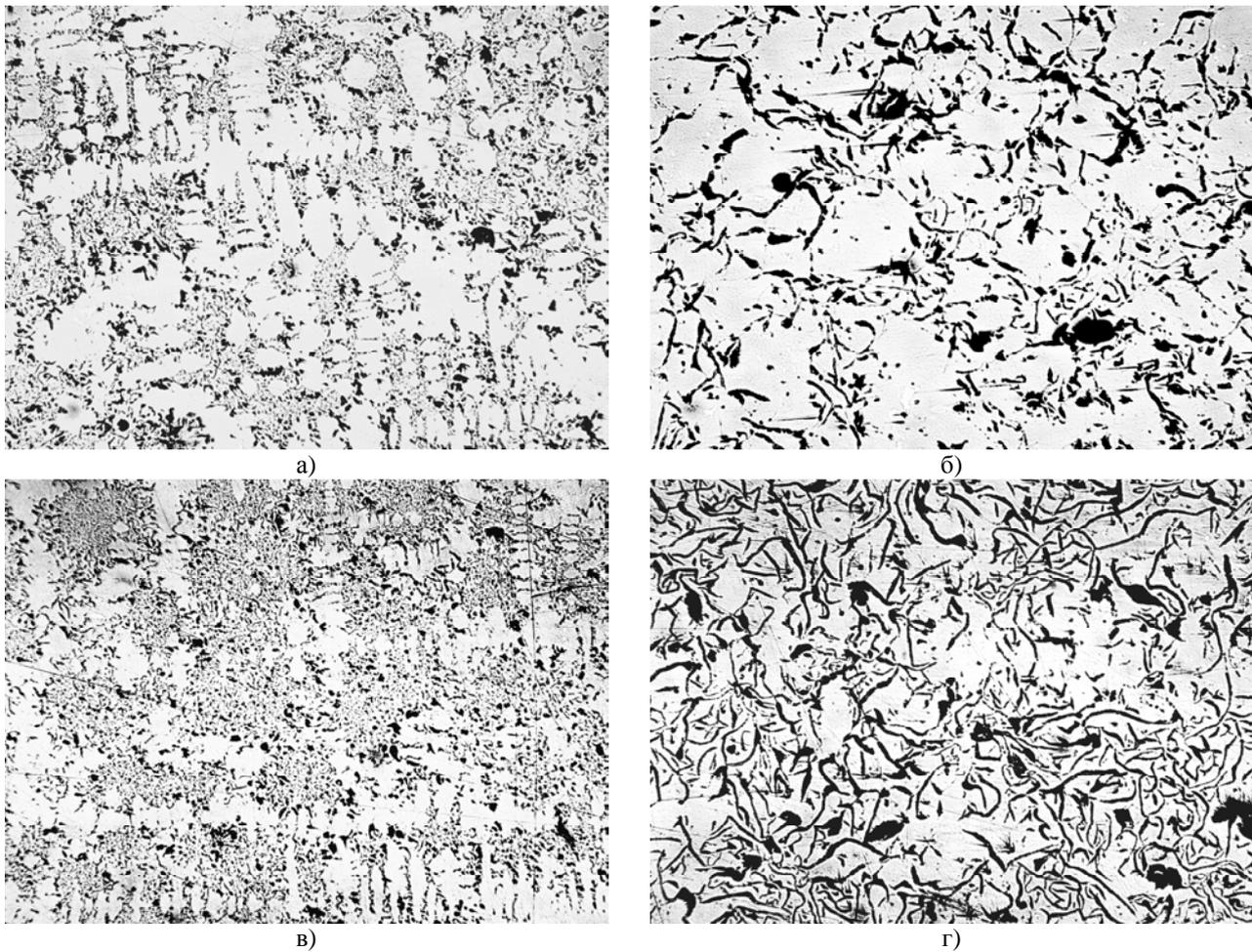


Рис. 4. Микроструктура чугуна в отливках стеклоформ на глубине 5 мм (а, в) и 25 мм (б, г) от стеклоформирующей поверхности: а, б – графитизирующее модифицирование; в, г – модифицирование с ПАЭ (образцы не травлены,  $\times 100$ )

В результате происходит измельчение структуры графита в рабочем слое отливок и, соответственно, повышение его твердости; увеличение количества графитных

включений в матрице стеклоформы и, соответственно, снижение ее твердости (рис. 5).

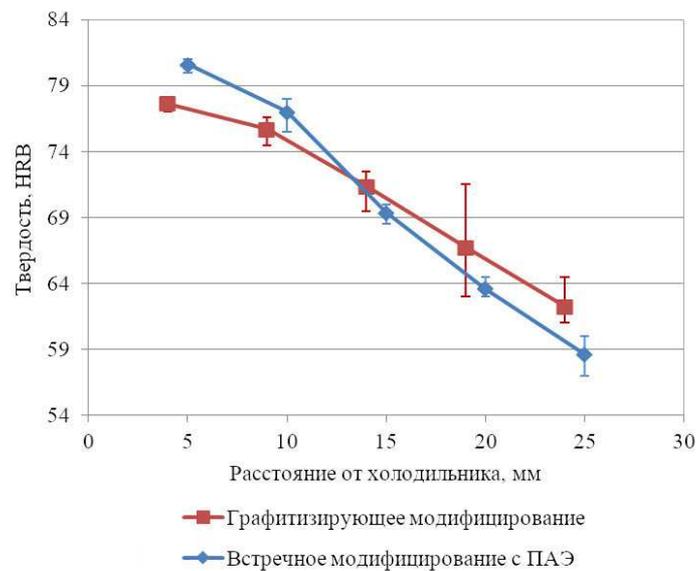


Рис. 5. Распределение твердости по сечению отливок стеклоформ из чугунов с пластинчатым графитом после термической обработки

## Заключение

Присадки ПАЭ к стандартным модификаторам вызывают различные структурные эффекты в зависимости от вида обработки расплава чугуна.

Обработка расплава ПАЭ совместно с инокулирующим модификатором способствует графитизации серого чугуна, что приводит к измельчению структуры на внутренней поверхности стеклоформы и увеличению количества графитных включений в ее матрице. Таким образом, можно

ожидать повышение плотности рабочего слоя и теплопроводности изделия, определяющих наряду с другими параметрами эксплуатационную стойкость стеклоформирующей оснастки.

Обработка расплава ПАЭ в процессе сфероидизирующего и инокулирующего модифицирования приводит к усилению отбела, а также стабилизирует вермикулярную форму графита в структуре чугуна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леушин, И.О. Влияние структуры чугуна на образование эксплуатационных дефектов стеклоформирующей оснастки / И.О. Леушин, Д.Г. Чистяков, В.А. Володин // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 11. – С. 111-123.
2. Чугун: справочник / А.Д. Шерман, А.А. Жуков, Э.В. Абдуллаев, И.О. Пахнючий; под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. – М.: Metallurgy, 1991. – 574 с.
3. Леушин, И.О. О способах управления высокоуглеродистой фазой чугуна для отливок стеклоформ, изготавливаемых на основе сплава ЧС5Ш / И.О. Леушин, Д.Г. Чистяков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 58-64.

1. Leushin, I.O. Cast iron structure impact upon formation of operation defects in glass forming fixture / I.O. Leushin, D.G. Chistyakov, V.A. Volodin // *Science and Education: scientific edition of Bauman STU of Moscow*. – 2015. – № 11. – pp. 111-123.
2. *Cast Iron: reference book* / A.D. Sherman, A.A. Zhukov, E.V. Abdullaiev, I.O. Pakhnyushchy; under the editorship of A.D. Sherman, A.A. Zhukov. – M.: Metallurgy, 1991. – pp. 574.
3. Leushin, I.O. On methods of cast iron high-carbon phase control for castings of glass-forms manufactured on basis of ChS5Sh alloy / I.O. Leushin, D.G. Chistyakov // *Bulletin of SUrSU. Series "Metallurgy"*. – 2013. – Vol. 13. – № 2. – pp. 58-64.

4. Давыдов, С.В. Новые технологии модифицирования чугунов / С.В. Давыдов // *Металлургия машиностроения*. – 2010. – № 3. – С. 8-13.
5. Давыдов, С.В. Технология наномодифицирования доменных и ваграночных чугунов / С.В. Давыдов // *Заготовительное производство*. – 2005. – № 2. – С. 3-9.
6. Калиниченко, А.С. Использование модифицирующей лигатуры, содержащей нанодисперсные порошки активных элементов, при получении высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А.С. Калиниченко, А.Г. Слущкий, В.А. Шейнерт // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 3 (80). – С. 101-106.

4. Davydov, S.V. New technologies in cast iron modification / S.V. Davydov // *Mechanical Engineering Metallurgy*. – 2010. – № 3. – pp. 8-13.
5. Davydov, S.V. Nano-modification technology of blast-furnace- and cupola cast iron / S.V. Davydov // *Blank Production*. – 2005. – № 2. – pp. 3-9.
6. Kalinnichenko, A.S. Use of modifying alloy containing nano-dispersed powders of active elements at manufacturing high-strength cast iron with globe-shape graphite / A.S. Kalinnichenko, A.G. Slutsky, V.A. Scheinert // *Casting and Metallurgy*. – 2015. – № 3 (80). – pp. 101-106.

Статья поступила в редколлегию 8.12.16.  
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Макаренко К.В.

## Сведения об авторах:

**Илюшкин Дмитрий Алексеевич**, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, e-mail: [shirke@mail.ru](mailto:shirke@mail.ru).

**Давыдов Сергей Васильевич**, д.т.н., профессор кафедры «Машиностроение и материаловедение»

**Pyushkin Dmitry Alexeevich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science”, Bryansk State Technical University, e-mail: [shirke@mail.ru](mailto:shirke@mail.ru).

**Davydov Sergey Vasilievich**, D. Eng., Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science”,

Брянского государственного технического университета, e-mail: [davidov69@tu-bryansk.ru](mailto:davidov69@tu-bryansk.ru).

**Болдырев Денис Алексеевич**, д.т.н., профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика» Тольяттинского государственного университета, e-mail: [DA.Boldyrev@vaz.ru](mailto:DA.Boldyrev@vaz.ru).

Bryansk State Technical University, e-mail: [davidov69@tu-bryansk.ru](mailto:davidov69@tu-bryansk.ru).

**Boldyrev Denis Alexeevich, D. Eng.**, Prof. of the Dep. “Nano-Technologies, Material Science and Mechanics”, Toliyatty State University, e-mail: [DA.Boldyrev@vaz.ru](mailto:DA.Boldyrev@vaz.ru).