



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКИ ЗАКАЛЕННОГО ЧУГУНА С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Панов А.Г.¹, Гуртовой Д.А.², Шаехова И.Ф.³

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

²ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия

³Набережно-Челнинский филиал Казанского федерального университета, Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В современном двигателестроении преобладают легкие сплавы. В этой связи благодаря прогрессу в металлургии и новейшим технологиям обращает на себя внимание чугун, несмотря на традиционные представления о чугуне как о «тяжелом» материале с низкой удельной прочностью. Современные высокопрочные чугуны, включая чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), демонстрируют уникальное сочетание механических и эксплуатационных свойств, делая их весьма перспективными для применения в ответственных деталях двигателей. Вопрос сохранения ценных свойств чугуна (низкая усадка, высокие демпфирующая способность, теплопроводность и др.) при одновременном достижении высоких удельных прочностных характеристик, сопоставимых с легкими сплавами, остается актуальной задачей. **Цель работы.** Продемонстрировать потенциал изотермически закаленного чугуна с вермикулярным графитом (ИЗЧВГ) для создания двигателей нового поколения, отвечающих требованиям по эффективности, надежности и экологичности, и рассмотреть перспективы применения ИЗЧВГ в двигателестроении на основе результатов исследования влияния современных технологий термической обработки на структуру и свойства ИЗЧВГ, а также оценку их влияния на эксплуатационные характеристики деталей двигателей, работающих в условиях высоких температур и циклических нагрузок. **Используемые методы.** В статье анализируются результаты исследований, полученные с использованием современных методов модифицирования чугунных расплавов с целью формирования вермикулярной формы графита в отливках. Рассматриваются технологические аспекты производства ЧВГ, включая состав шихты, режимы модифицирования расплава и термовременные условия его затвердевания и охлаждения. Исследуются теплофизические и механические характеристики, а также процессы структурообразования при изотермической закалке, включая влияние легирования. Для определения оптимальных режимов термической обработки изучаются теплофизические свойства и прокаливаемость ЧВГ. **Новизна.** Исследование фокусируется на перспективном, но недостаточно изученном в отечественном информационном пространстве материале – изотермически закаленном чугуне с вермикулярным графитом. Впервые комплексно анализируются его структурные особенности во взаимосвязи с эксплуатационными свойствами применительно к двигателестроению. Особый акцент делается на оценке термической стойкости структур, полученных после изотермической закалки, что является ключевым аспектом для высокотемпературных применений. **Результат.** Успешное освоение промышленных технологий производства ЧВГ со стабильной вермикулярной структурой, а также исследования его уникального сочетания высоких прочностных характеристик, термоусталостной стойкости, размерной стабильности и демпфирующей способности подтверждают потенциал материала. Определение оптимальных режимов изотермической закалки и легирования позволяет получить ИЗЧВГ с удельными прочностными показателями, не уступающими литым алюминиевым сплавам, и более высокой термостойкостью. **Практическая значимость.** Внедрение ИЗЧВГ в автомобильной и авиационной промышленности позволяет расширить возможности конструирования двигателей, повысить их мощность, срок службы, снизить массу и улучшить экологические показатели. Успешное применение в отечественном автопроме (КАМАЗ, ГАЗ, ЯМЗ) и первые разработки для авиадвигателестроения (ООО «Феникс») подтверждают практическую ценность материала. Дальнейшие исследования, включая оценку термической стойкости, обогатят научные знания и расширят области применения ИЗЧВГ, способствуя развитию отечественного машиностроения.

Ключевые слова: чугун с вермикулярным графитом, иерархия свойств, изотермическая закалка, структурные превращения, термическая стойкость

© Панов А.Г., Гуртовой Д.А., Шаехова И.Ф., 2026

Для цитирования

Панов А.Г., Гуртовой Д.А., Шаехова И.Ф. Перспективы развития изотермически закаленного чугуна с вермикулярным графитом для двигателестроения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 156-164. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-156-164>



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

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AUSTEMPERED COMPACTED GRAPHITE IRON FOR ENGINE MANUFACTURING

Panov A.G.¹, Gurtovoy D.A.², Shaekhova I.F.³

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

²PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia

³Naberezhnye Chelny Branch of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Modern engine manufacturing is increasingly dominated by lightweight alloys. In this context, due to advances in metallurgy and modern processing technologies, cast iron has regained considerable attention despite its traditional perception as a “heavy” material with low specific strength. Modern high-strength cast irons, including compacted graphite iron (CGI), demonstrate a unique combination of mechanical and service properties, making them highly promising materials for critical engine components. Preserving the valuable properties of cast iron, such as low shrinkage, high damping capacity, thermal conductivity, and others, while simultaneously achieving high specific strength characteristics comparable to those of lightweight alloys remains an important challenge. **Objectives.** The aim of this work is to demonstrate the potential of austempered compacted graphite iron (ACGI) for the development of next-generation engines meeting the requirements of efficiency, reliability, and environmental sustainability, as well as to assess the prospects for its application in engine manufacturing based on investigations of their influence of modern heat-treatment technologies on the structure and properties of ACGI and their effect on the performance characteristics of engine components operating under elevated temperatures and cyclic loading conditions. **Methods Applied.** The paper analyzes research results obtained using modern methods of cast iron melt treatment aimed at forming compacted graphite morphology in castings. Technological aspects of CGI production are considered, including charge composition, melt treatment regimes, and thermal conditions of solidification and cooling. Thermophysical and mechanical characteristics, as well as microstructural evolution during austempering, including the effects of alloying, are investigated. The thermophysical properties and hardenability of CGI are studied to determine optimal heat-treatment conditions. **Originality.** The study focuses on austempered compacted graphite iron, a promising but still insufficiently investigated material in the domestic scientific literature. For the first time, its structural features are comprehensively analyzed in relation to its service properties in engine applications. Particular attention is paid to the thermal stability of structures formed during austempering, which is a key factor for high-temperature applications. **Result.** The successful development of industrial technologies for producing CGI with a stable compacted graphite structure, together with investigations of its unique combination of high strength, thermal fatigue resistance, dimensional stability, and damping capacity, confirms the material’s potential. The determination of optimal austempering and alloying conditions makes it possible to obtain ACGI with specific strength characteristics comparable to those of cast aluminum alloys and superior thermal resistance. **Practical Relevance.** The application of ACGI in the automotive and aerospace industries expands engine design possibilities, increases power output and service life, reduces weight, and improves environmental performance. Successful implementation in the Russian automotive industry (KAMAZ, GAZ, and YaMZ) and the first developments for aircraft engines by Phoenix LLC confirm the practical value of this material. Further investigations, including assessments of thermal stability, will enrich scientific knowledge and broaden the application areas of ACGI, contributing to the development of domestic mechanical engineering.

Keywords: compacted graphite iron, property hierarchy, austempering, structural transformations, thermal stability

For citation

Panov A.G., Gurtovoy D.A., Shaekhova I.F. Prospects for the Development of Austempered Compacted Graphite Iron for Engine Manufacturing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 156-164. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-156-164>

Постановка задачи работы

В современном двигателестроении доминируют металлические материалы, в частности алюминиевые, магниевые и титановые сплавы, а также специальные стали. Этот выбор обусловлен в первую очередь стремлением к достижению высоких удельных механических характеристик, что критически важно для обеспечения эффективности и надежности силовых установок.

В данном контексте упоминание чугуна может вызвать некоторую настороженность и скепсис, поскольку традиционно этот материал ассоциируется с «тяжестью» и низкой удельной прочностью, обусловленной присутствием в его структуре пластинчатого графита, ослабляющего металлическую матрицу. Однако подобное восприятие чугуна все больше устаревает в свете впечатляющего прогресса в области металлургии и материаловедения за последние сто лет.

Развитие легирования и методов управления структурой, в частности модифицирования расплавов и термической обработки, позволило существенно улучшить механические свойства чугунов. Современные высокопрочные чугуны с различными формами графита демонстрируют уникальный комплекс свойств, делающий их перспективными для применения в двигателестроении. На сегодняшний день удельная прочность некоторых марок чугуна достигает $230 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{кг}$, что превосходит аналогичные показатели многих литейных сплавов, деформируемых магниевых сплавов и приближается к характеристикам деформируемых алюминиевых сплавов. При этом чугуны, благодаря наличию графитных включений, обладают рядом выдающихся эксплуатационных и технологических преимуществ. К ним относятся высокая демпфирующая способность, теплопроводность, стойкость к деформациям при высоких температурах и нагрузках, сопротивление усталости, а также минимальная литейная усадка и высокая жидкотекучесть. Все эти факторы имеют первостепенное значение для деталей двигателей внутреннего сгорания, работающих в условиях циклических температурных и механических воздействий.

Революционный прогресс в области повышения механических свойств чугуна был ознаменован открытием в середине XX века, продемонстрировавшим способность углерода формировать структуру графита не только в виде пластинчатых включений, свойственных классическим чугунам, но и в виде компактных, сфероидизированных частиц, дискретно распределенных в металлической матрице. Изначально наиболее интенсивное развитие получила технология производства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ), позволяющая посредством легирования и применения традиционных методов термической обработки, таких как нормализация, существенно увеличить предел прочности материала – от 100-300 до 350-800 МПа.

Последующим этапом оптимизации прочностных характеристик стала разработка технологии изотермической закалки (ИЗ), позволяющей формировать бейнитную структуру и к настоящему времени достигать пределов прочности при растяжении до 1600 МПа для изотермически закаленного чугуна с шаровидным графитом (ИЗЧШГ) [1]. Вместе с тем трансформация графитной структуры от пластинчатой к шаровидной, сопровождающаяся повышением прочности, приводит к закономерному снижению ряда уникальных эксплуатационных свойств, присущих серым чугунам. В первую очередь речь идет о таких характеристиках, как низкая литейная усадка, высокая демпфирующая способность, жесткость и теплопроводность. Данные свойства обусловлены наличием взаимосвязанного разветвленного графитного каркаса, отсутствующего в структуре ВЧШГ. В этой связи перспективным направлением представляется разработка материалов, сочетающих в себе высокую прочность и сохранение

ряда специальных свойств, характерных для чугунов с пластинчатым графитом. Таким материалом является чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), в структуре которого графит имеет форму, промежуточную между пластинчатой и шаровидной.

Концепция ЧВГ возникла практически одновременно с открытием возможности сфероидизации графита, однако его промышленное применение, в отличие от ЧШГ, происходит лишь в последние десятилетия. Несмотря на очевидный потенциал, длительное время создание промышленной технологии получения вермикулярной формы графита в чугунных отливках, обеспечивающей стабильность и воспроизводимость результатов в условиях массового производства, представляло значительную технологическую сложность. Решение данной проблемы было найдено относительно недавно [2, 3], благодаря совершенствованию методов диагностики, компьютеризации и автоматизации процесса модифицирования чугуна.

В настоящей статье рассматриваются перспективы управления структурой и применения изотермически закаленного чугуна с вермикулярным графитом (ИЗЧВГ) в двигателестроении. Особое внимание уделяется анализу структуры и свойств ИЗЧВГ, полученных с использованием современных технологий термической обработки, а также исследованию их влияния на эксплуатационные характеристики деталей двигателей, работающих в условиях высоких температур и циклических нагрузок. Цель исследования – оценить потенциал этого материала для работы в условиях растущих эксплуатационных температур двигателей внутреннего сгорания новых поколений.

Материалы и методы исследования

Работа является продолжением комплексных исследований, представленных в работах [4, 5].

В работе использованы аналитические и экспериментальные методы исследования. Произведён анализ отечественных литературных данных по свойствам и перспективе применения чугунов с вермикулярным графитом для двигателестроения.

Для оценки термической стойкости ИЗЧВГ в работе использовались образцы опытной детали «Гильза авиационного двигателя» из нелегированного ЧВГ рабочим диаметром 86 мм и толщинами стенок 4 и 9 мм, предоставленной компанией ООО «Феникс», г. Ярославль, и закалённой на нижний бейнит при температуре 290°C с изотермической выдержкой в течение 3 ч. Внешний вид гильзы до вырезки лабораторных образцов для оценки термической стойкости, а также исходная микроструктура ИЗЧВГ представлены на рис. 1.

Термическую стойкость ИЗЧВГ оценивали по влиянию теплового воздействия в области пиковых температур головок блоков цилиндров во время форсированного рабочего цикла газовых двигателей внутреннего сгорания на микроструктуру и твёрдость образцов с габаритными размерами $20\times 20\times 9$ мм, вырезанными из опытной детали «Гильза авиационного двигателя».



Рис. 1. Опытная деталь «Гильза авиационного двигателя» после изотермической закалки: а – внешний вид; б – микроструктура, $\times 190$, травлено 4% HNO_3
 Fig. 1. Experimental component “Aircraft engine cylinder liner” after austempering: a is general view; б is microstructure, $\times 190$, etched with 4% HNO_3

Микроструктуру после теплового воздействия исследовали с помощью светового микроскопа НЕОРНОТ 32, оснащённого цифровой системой получения и анализа изображений SIAMS 800. Твёрдость определяли методами Бринелля и Роквелла с помощью твердомеров ТШ-2М и ТР 5006 соответственно.

Полученные результаты и их обсуждение

В настоящее время отмечается устойчивая тенденция к расширению областей применения ЧВГ, в частности в автомобильной промышленности для изготовления блоков и головок блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания. В работе [3] детально освещены технологические аспекты производства ЧВГ, включая состав шихты, режимы модифицирования и литья, а также представлен анализ влияния данных параметров на структуру и свойства материала. В том числе показано, что оптимальный подбор химического состава базового расплава, состава и количества сфероидизирующих и графитизирующих модификаторов, использование экспресс-диагностики потенциала сфероидизации и графитизации базового расплава, а также контроль температурно-временных режимов литья позволяют получать микроструктуру с преобладанием вермикулярного графита и минимальным содержанием шаровидного и пластинчатого.

Именно благодаря успешному освоению промышленных технологий производства, обеспечивающих стабильное формирование вермикулярной структуры графита, а также благодаря уникальному сочетанию высоких прочностных характеристик, термоусталостной стойкости, размерной стабильности в условиях тепловых циклов, демпфирующей

способности и других эксплуатационных свойств, чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ; международные обозначения: CGI – Compacted Graphite Iron, GJV – Graphit spheroidal vermicular, VG – Vermicular Graphite, JV – Juwel Graphite, GGV – Graphit Gusseisen Vermicular, Vermicular Cast Iron) за рубежом начал активно внедряться даже в авиадвигателестроение [4, б]. Эта отрасль, известная своей консервативностью и строгим подходом к любым инновационным материалам, постепенно признает преимущества ЧВГ за счет его способности решать задачи, связанные с надежностью и долговечностью в экстремальных условиях эксплуатации [2, 4, 6-9]. Это дает основание говорить о том, что внедрение ЧВГ не только расширяет технологические возможности двигателестроения, но и способствует созданию более экономичных и экологических систем, соответствующих современным требованиям по снижению выбросов и повышению эффективности.

Тем не менее до настоящего времени объем и воспроизводимость данных о потребительских и вспомогательных свойствах ЧВГ, особенно в отечественном информационном пространстве, остаются крайне недостаточными. Эта ситуация является частным случаем фундаментальной проблемы материаловедения: субъективности прогнозирования потребительских свойств (как в эксплуатации, так и в технологических процессах) посредством регламентированных вспомогательных свойств (рис. 2). Исторически до конца XX века, научное сообщество придерживалось мнения, что потребительские качества продукции определяются составом и структурой материала, а также его базовыми физическими и химическими свойствами, вне зависимости от влияния внешних факторов.



Рис. 2. Иерархия потребительских и вспомогательных свойств материалов
 Fig. 2. Hierarchy of consumer and auxiliary material properties

Сегодня же становится очевидным, что подобный подход, основанный лишь на трех низших уровнях иерархии вспомогательных свойств, не обеспечивает необходимой точности при прогнозировании потребительских характеристик. Актуализация требований к материалам диктует разработку новых, так называемых «специальных» свойств. Их формирование должно основываться на моделировании реальных условий эксплуатации и технологических процессов, что позволит перейти к более предсказательной и управляемой инженерии материалов.

Кроме того, в последние годы в России заметно возросло количество проектов по серийному освоению ЧВГ в автомобильной промышленности, прежде всего в производстве двигателей (с участием ПАО «КАМАЗ», ПАО «ГАЗ» и «ЯМЗ»). Это, в свою очередь, способствует росту интереса и компетенций отечественных специалистов в области материаловедения ЧВГ, а также стимулирует первые разработки для нужд авиадвигателестроения. Так, предприятие ООО «Феникс» (г. Тутаев) начало выпуск критически важных узлов для четырехцилиндрового оппозитного двигателя малой авиации (160 л.с.), разрабатываемого ООО «ДДА» (г. Уфа). В их число входят: головка блока цилиндра, коленчатый и распределительный валы, а также поршни и гильзы цилиндров [6]. Уже изготовленные из ЧВГ45, эти детали обладают удельной прочностью, сопоставимой с литыми алюминиевыми сплавами, что обусловлено отличными литейными

свойствами ЧВГ, позволяющими достигать минимальной толщины стенок отливок до 2 мм [6].

Для дальнейшего совершенствования характеристик двигателей, включая увеличение мощности, срока службы и снижение массы, проводятся комплексные исследования. Основным источником механических потерь в двигателе внутреннего сгорания является цилиндропоршневая группа [10]. В связи с этим к гильзам цилиндров предъявляются повышенные требования к сопротивлению абразивному и усталостному износу в условиях температур эксплуатации до 400°C и более [10, 11]. Ученые ЯГТУ в сотрудничестве с КФУ и ООО «Феникс» изучают влияние изотермической закалки на ЧВГ [5]. В рамках этих работ исследуются теплофизические свойства литых ЧВГ, структуры и процессы их структурообразования при нагреве и охлаждении с различными скоростями, а также механические и специальные характеристики ИЗЧВГ и влияние на них легирования, чтобы определить оптимальные режимы аустенитизации, закалки и изотермической выдержки.

Одной из ключевых и в настоящее время недостаточно освещенных областей в рамках изучения свойств изотермически закаленных чугунов в целом является оценка термической стойкости сформированных при закалке структур. Данный аспект изучен лишь фрагментарно применительно к чугунам с шаровидным графитом, и практически полностью отсутствует в исследовательской литературе, касающейся чугунов с вермикулярным графитом.

Ввиду существующего пробела в знаниях авторами были инициированы пионерские исследования, направленные на определение термической устойчивости образцов, изготовленных из ИЗЧВГ80. Этот материал, характеризующийся удельной прочностью на уровне 0,13 МПа/(кг/м³), был выбран не случайно. Из него были сформированы опытные образцы гильз цилиндров (иллюстрация на **рис. 1**), которые в дальнейшем подвергались воздействию условий, приближенных к критическим параметрам эксплуатации. Для проведения этих испытаний образцы подвергались продолжительному (24 ч) тепловому воздействию в лабораторных печах сопротивления. Температурный режим был установлен в диапазоне 400–500°C, что намеренно превышало пиковые значения эксплуатационных температур, характерных для гильз цилиндров в реальных условиях работы. Режимы фактического теплового воздействия представлены в **табл. 1**.

Микроструктуры после теплового воздействия представлены на **рис. 3**, результаты измерения твёрдости: все результаты измерений – в **табл. 2**, средние значения с интервалами погрешностей измерения – на **рис. 4**.

Таблица 1. Режимы теплового воздействия
Table 1. Heat treatment conditions

Температура выдержки под термическим воздействием, °С	
Уровень	Фактическая температура в печи (показания термометра)
400	390–405
450	444–458
500	492–508

Полученные результаты, несмотря на видимую деградацию упрочнённой закалкой структуры под воздействием высоких температур (что подтверждается данными на **рис. 3**), свидетельствуют о сохранении твёрдости чугуна на высоком уровне, достаточном для обеспечения требуемых рабочих характеристик (см. **табл. 2**, **рис. 4**), по крайней мере до температур эксплуатации порядка 400°C. Особенно это проявляется при оценке твёрдости, измеряемой методом Роквелла, которая характеризует непосредственно матрицу чугуна, её износостойкие качества. Это подчеркивает потенциал ЧВГ для применений, связанных с повышенными тепловыми нагрузками.

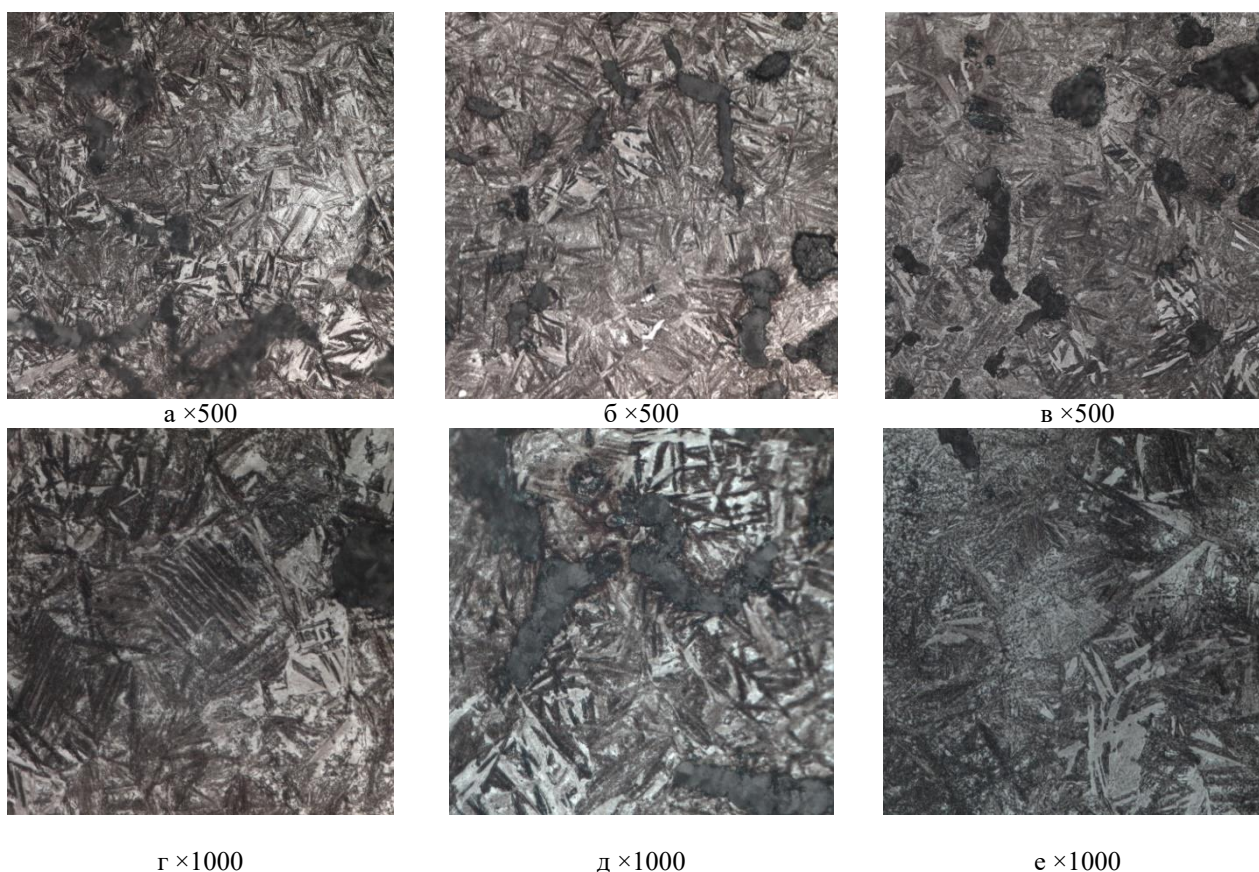


Рис. 3. Изменение микроструктуры ИЗЧВГ80 при термообработке: а, г – ТО 400°C; б, д – ТО 450°C; в, е – ТО 500°C

Fig. 3. Evolution of the microstructure of ACGI80 during heat treatment: а, г is HT at 400°C; б, д is HT at 450°C; в, е is HT at 500°C

Таблица 2. Ранжированные результаты измерения твёрдости
Table 2. Ranked results of hardness measurements

Номер результата измерения	Твёрдость, HB				Твёрдость, HRC			
	Исходный	400°C	450°C	500°C	Исходный	400°C	450°C	500°C
1	324	318	251	204	36,0	35,1	29,9	24,1
2	324	291	251	191	35,0	34,9	29,9	24,0
3	321	291	251	191	34,5	34,8	29,8	23,9
4	321	291	251	191	34,5	34,6	29,8	23,8
5	321	291	251	191	34,5	34,2	29,4	23,6
6	321	280	251	191	34,5	34,2	29,2	23,2
7	321	280	233	191	34,5	34,2	28,4	23,1
8	321	270	233	191	34,0	34,2	28,2	22,9
9	321	270	233	179	34,0	33,9	28,2	22,6
10	321	270	233	179	33,5	33,8	28,1	22,4
11	321	270	233	179	33,0	33,8	28,1	22,2
12	318	270	233	179	32,5	33,8	27,9	22,0
13	318	270	218	179	30,5	33,6	27,6	21,2
14	318	270	218	179	30,0	33,0	27,5	20,8
15	318	270	218	179	29,0	32,0	27,2	19,2
Среднее значение	320,6	280,1	237,2	186,3	33,3	34,0	28,6	22,6
Стандартное отклонение	1,9	14,0	13,0	7,8	2,0	0,8	1,0	1,4
Доверительный интервал	1,0	7,1	6,6	3,9	1,0	0,4	0,5	0,7
Погрешность	3,8	27,9	25,9	15,5	4,0	1,6	1,9	2,7

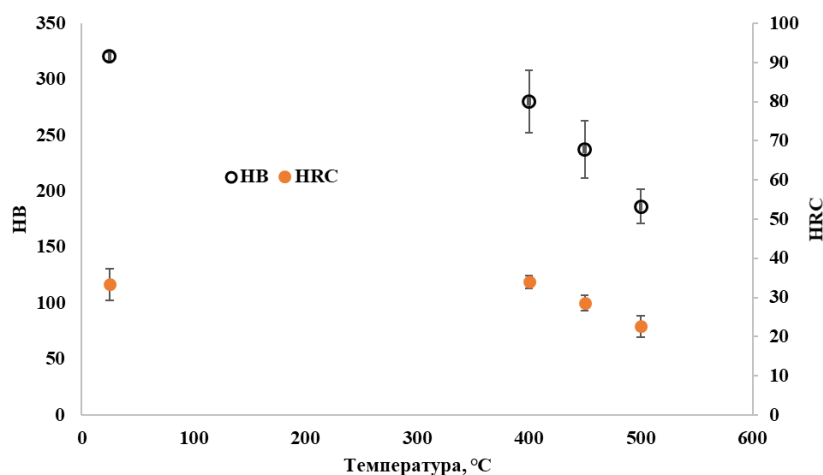


Рис. 4. Термическая устойчивость к сохранению твёрдости, определяемой методом Роквелла
Fig. 4. Thermal stability of hardness retention determined by the Rockwell method

Заключение

Таким образом, динамичное развитие эксплуатационных и технологических потребительских свойств чугуна, обусловленное уникальной природой углерода и многообразием его связей с легирующими и вспомогательными элементами, делает этот материал, в частности изотермически закаленный чугун с вермикулярным графитом, высокоперспективным для деталей двигателестроения. С одной стороны, он наследует высокие механические свойства, характерные для ЧШГ, с другой – обладает выдающимися литейными характеристиками, включая низкую склонность к усадке, высокую жидкотекучесть, от-

личную теплопроводность, превосходную демпфирующую способность и минимальную склонность к образованию деформаций (короблению), в том числе в условиях повышенных циклических термомеханических нагрузений, по крайней мере в области температур до порядка 400°C.

Тем не менее для дальнейшего расширения сфер применения ЧВГ в авиадвигателестроении требуется систематическое проведение статистически значимых исследований. Необходимо углубленное изучение взаимосвязи между потребительскими свойствами и вспомогательными характеристиками, что включает формализацию новых потребительских свойств и разработку передовых критериев и методов модели-

рования (математического и физического). Параллельно с этим критически важно накопление репрезентативной статистики по различным свойствам для образцов ЧВГ, полученных с использованием разнообразных составов и технологий. Особое внимание следует уделить исследованию циклической стойкости, в том числе в зависимости от температурного фактора, что позволит точнее прогнозировать долговечность и надежность деталей в условиях эксплуатации.

Список источников

1. Nofal A. A., Jekova L. Novel processing techniques and applications of austempered ductile iron // J. Univ. Chem. Technol. Metall., 2009, vol. 44, no. 3, pp. 213–228.
2. Dawson S. Compacted graphite iron – a material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads / 68th World Foundry Congress, 2008, pp. 93–99.
3. Технология стабильного получения вермикулярного графита в отливках массового производства / Доусон С., Панов А.Г., Гуртовой Д.А., Аникин С.А. // Литейное производство. 2018. №4. С. 7–12.
4. Разработка технологии получения аустенитно-бейнитных чугунов с вермикулярным графитом для деталей авиадвигателестроения / Панов А.Г., Шаехова И.Ф., Гимазетдинова Ч.А., Макарова М.А., Гладыш Е.Д. // Литейное производство. 2023. №12. С. 2–6.
5. Панов А.Г., Шаехова И.Ф., Гуртовой Д.А. Влияние изотермической выдержки на структуру и микротвердость закаленного на верхний бейнит чугуна с вермикулярным графитом // Литейное производство. 2021. №10. С. 2–8.
6. Галимов Р.М. Опыт разработки конструкций, технологий и производства ответственных отливок из чугуна с вермикулярным графитом // Наука и технологии модифицирования чугуна: тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции; Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт; под ред. А.Г. Панова. Набережные Челны, 2022. С. 22.
7. Изосимов В.А., Суркин В.И., Изосимов А.В. Высокопрочный чугун с вермикулярным графитом - перспективный материал для изготовления поршней двигателя Д-180 // Литейный консилдум online: ресурс о литейном производстве. URL: <https://litkons.com/info/cast-iron/vysokoprochnyy-chugun-s-vermikulyarnym-grafitom/?ysclid=mlev5wp5i2332723526> (дата обращения 08.02.2026)
8. Закиров Э.С. Повышение стабильности структуры и свойств ответственных деталей машиностроения из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.17 - Материаловедение. Казань, 2023. 126 с.
9. Доусон С. Особенности структуры ЧВГ и свойства, определяющие перспективы его применения в машиностроении // Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом. Свойства. Технология. Контроль: тезисы докладов международной научно-технической конференции. Набережные Челны, 2017. С. 12–13.
10. Прохоров В.Ю., Шамарин Ю.А., Краснов Н.Д. Исследование процесса изнашивания гильз блоков цилиндров дизельных двигателей // Надежность и качество: труды Международного симпозиума. Пенза, 2017. Т. 2. С. 238–240.
11. Крутилин А.Н., Курбатов М.И., Курбатова М.И. Условия работы и основные требования, предъявляемые к материалу гильз блока цилиндров // Литьё и металлургия. 2005. №2-1 (34). С. 107–109.

References

1. Nofal A.A., Jekova L. Novel processing techniques and applications of austempered ductile iron. J. Univ. Chem. Technol. Metall. 2009;44(3):213-228.
2. Dawson S. Compacted graphite iron – a material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads. Proceedings of the 68th World Foundry Congress. 2008, pp. 93-99.
3. Dawson S., Panov A.G., Gurtovoy D.A., Anikin S.A. Technology of stable production of vermicular graphite in castings of mass production. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry production], 2018;(4):7-12. (In Russ.)
4. Panov A.G., Shaekhova I.F., Gimazetdinova Ch.A., Makarova M.A., Gladyshev E.D. Development of technology for producing austempered vermicular graphite cast irons for aircraft engine components. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry production]. 2023;(12):2-6. (In Russ.)
5. Panov A.G., Shaekhova I.F., Gurtovoy D.A. Effect of isothermal holding on the structure and microhardness of upper bainitic vermicular graphite cast iron. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry production]. 2021;(10):2-8. (In Russ.)
6. Galimov R.M. Experience in developing designs, technologies and production of critical castings made of vermicular graphite iron. *Nauka i tekhnologii modifitsirovaniya chuguna: tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Science and technologies of cast iron modification. Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference]. Naberezhnye Chelny, 2022, pp. 22. (In Russ.)
7. Izosimov V.A., Surkin V.I., Izosimov A.V. High-strength vermicular graphite cast iron as a promising material for manufacturing D-180 engine pistons. *Liteyny konsilium online: resurs o liteynom proizvodstve* [Foundry Council online: a resource about foundry production]. Available at: <https://litkons.com/info/cast-iron/vysokoprochnyy-chugun-s-vermikulyarnym-grafitom/> (Accessed on February 8, 2026).
8. Zakirov E.S. *Povyshenie stabilnosti struktury i svoystv otvetstvennykh detaley mashinostroeniya iz chuguna s sharovidnym i vermikulyarnym grafitom: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the stability of structure and properties of critical engineering components made of spheroidal and vermicular graphite cast iron. Ph.D. dissertation]. Kazan, 2023, 126 p.
9. Dawson S. features of vermicular graphite cast iron and properties determining its prospects in mechanical engineering. *Detali mashinostroeniya iz chuguna s vermikulyarnym grafitom. Svoystva. Tekhnologiya. Kontrol: tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Mechanical engineering components made of vermicular graphite cast iron. Properties. Technology. Control. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Naberezhnye Chelny, 2017, pp. 12-13. (In Russ.)

10. Prokhorov V.Yu., Shamarin Yu.A., Krasnov N.D. Investigation of the wear process of diesel engine cylinder liners. *Nadezhnost i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality. Proceedings of the International Symposium]. Penza, 2017, vol. 2, pp. 238-240. (In Russ.)
11. Krutilin A.N., Kurbatov M.I., Kurbatova M.I. Operating conditions and basic requirements for cylinder liner materials. *Lityo i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. 2005;(2-1(34)):107-109. (In Russ.)

Поступила 21.02.2026; принята к публикации 04.05.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 21/02/2026; revised 04/05/2026; published 30/06/2026

Панов Алексей Геннадьевич – доктор технических наук, профессор,
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия.
Email: panov.ag@mail.ru. ORCID 0000-0002-3357-8824

Гуртовой Дмитрий Андреевич – кандидат технических наук, главный металлург,
ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия.
Email: gurtovoyda@mail.ru. ORCID 0000-0003-0450-6802

Шасхова Ирина Фаридовна – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский филиал Казанского федерального университета, Набережные Челны, Россия.
Email: irra1603@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3275-3037

Alexey G. Panov – DrSc (Eng.), Professor,
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia.
Email: panov.ag@mail.ru. ORCID 0000-0002-3357-8824

Dmitry A. Gurtovoy – PhD (Eng.), Chief Metallurgist,
PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: gurtovoyda@mail.ru. ORCID 0000-0003-0450-6802

Irina F. Shaekhova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Branch of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: irra1603@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3275-3037