

Машиностроение. Металлургия



DOI 10.52209/1609-1825_2021_1_15

УДК 621.074

Мировые тенденции в области улучшения свойств легированных чугунов

¹КОСНИКОВ Геннадий Александрович, д.т.н., профессор, Kosnikov@mail.spbstu.ru,

¹МАТВЕЕВ Игорь Александрович, к.т.н., доцент, mia@mail.spbstu.ru,

¹КОВАЛЕВ Павел Валерьевич, к.т.н., доцент, kovalev_pv@spbstu.ru,

²*КУЛИКОВ Виталий Юрьевич, к.т.н., профессор, mlpikm@mail.ru,

²КВОН Светлана Сергеевна, к.т.н., профессор, Svetlana.1311@mail.ru,

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29,

²Карагандинский технический университет, Казахстан, 100027, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Цель работы – исследование мировых тенденций в области улучшения свойств легированных чугунов. Методы исследования – металлографический анализ, экспериментальная фактография. Представлены результаты исследований, проводимых в области разработки чугунов со специальными свойствами. Рассмотрены условия эксплуатации чугунов и причины образования дефектов. Проанализированы фрактографические особенности разрушения чугунов. Приведены результаты исследований чугунов с повышенной конструкционной прочностью и износостойкостью на их свойства. Приведены результаты исследований аустенитно-бейнитных чугунов. Предложен метод аустемперизации чугунов, позволяющий повысить коммерческую привлекательность процесса.

Ключевые слова: конструкционная прочность, износостойкость, графитизация, металлическая матрица, алюминиевые и аустенитно-бейнитные чугуны, аустемперизация.

Введение

Чугунами со специальными свойствами называют легированные чугуны, т.к. введение леги-

рующих добавок обеспечивает ряд специальных свойств, таких как жаростойкость, коррозионно-стойкость, износостойкость и другие. Присутствие

тех или иных специальных свойств обуславливается химическим составом, структурой металлической основы, формой графита, наличием и природой карбидной фазы. Кроме того, на механические свойства оказывает влияние скорость первичной кристаллизации, наличие литейных дефектов, металлургическое качество металла.

Специфичность литейных процессов обуславливает образование литейных дефектов различного рода, таких как горячие и холодные трещины, раковины и поры газоусадочного характера, неметаллические включения и пр. Процесс первичной кристаллизации также оказывает влияние на формирование структурных составляющих, границ зерен и фаз, которые оказывают существенное влияние на свойства сплавов в отливках и последующую работоспособность литых деталей и изделий.

Наличие исходных, полученных в литом состоянии, дефектов, гетерогенность структуры характерны для литейных сплавов. Происхождение, расположение, форма и размеры дефектов определяются как составом сплава, технологичностью конструкции отливки, так и технологией ее получения.

Чрезвычайно важно не только находить и использовать эффективные меры по предотвращению образования дефектов, но и уметь количественно оценивать влияние различного рода дефектов на свойства сплавов в изделиях в условиях их эксплуатации. При этом необходимо учитывать, что конструкционная прочность материалов в значительной степени определяется конкретным видом напряженно-деформированного состояния (плоско-деформированное, плоско-напряженное), реализуемым у наиболее опасных концентраторов напряжений в вершине трещины.

Основное требование к сплавам – сохранять заданный уровень свойств на весь гарантированный срок эксплуатации полученных из них изделий, а к самим изделиям – не разрушаться в течение этого срока, обеспечивая необходимый уровень безопасности и надежности.

Методология исследования

Особенностью всех видов разрушения является наличие различного рода концентраторов напряжений, являющихся причиной появления и дальнейшего распространения трещин. Особенно опасно хрупкое разрушение, характеризующееся отсутствием пластической зоны в вершине трещины и высокой скоростью ее распространения. Очагами разрушения высокопрочных материалов служат трещины эксплуатационного или технологического происхождения, а также трещиноподобные дефекты (неметаллические включения, скопления дислокаций и т.п.). Трещины являются острыми концентраторами напряжений, причем местные (локальные) напряжения в вершине трещины могут во много раз превышать средние

расчетные напряжения.

Разница в значениях теоретической и технической прочности вызвана, главным образом, наличием в реальных телах различного рода дефектов, влияющих на процессы разрушения. Это обстоятельство привело к пониманию недостаточности представлений о прочности как о постоянном параметре материала и появлению нового направления, в основе которого лежит детальное изучение самого процесса разрушения и выявление роли трещин. С этих позиций более репрезентативным понятием для оценки прочности материала является не предел прочности или текучести, а более комплексный параметр.

При оценке свойств чугунов в качестве основного критерия конструкционной прочности использовался критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} (вязкость разрушения, трещиностойкость).

Результаты исследования

На рисунках 1 и 2 приведены фрактографические особенности разрушения чугунов с различной структурой графита и матрицы. Анализ полученных изображений лишней раз подтверждает факт, что шаровидная форма графита предпочтительнее пластинчатой, т.к. является меньшим концентратором напряжений, что обуславливает более низкую склонность к разрушению. Как показывает анализ, при одинаковой матрице вероятность хрупкого разрушения в сплавах с пластинчатой формой графита значительно выше.

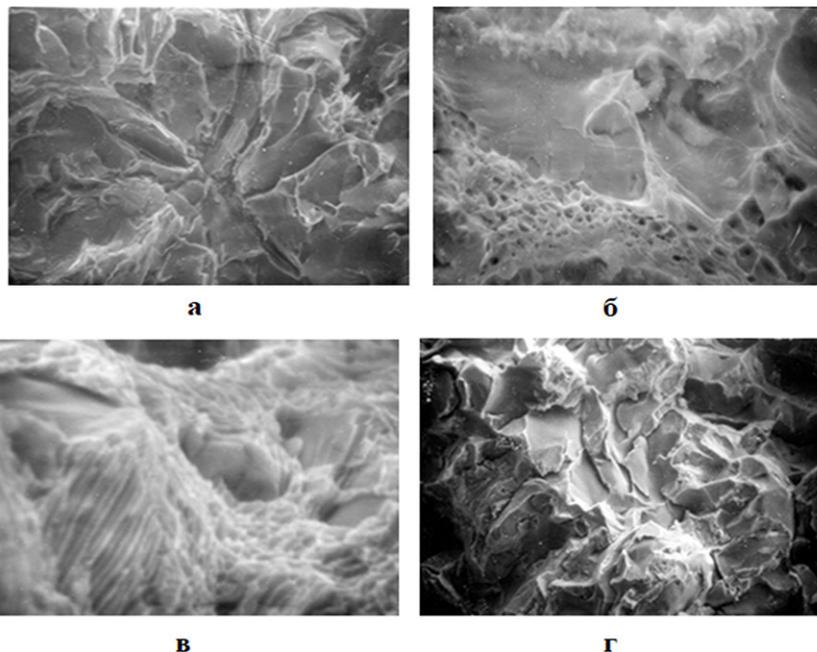
Большую группу чугунов со специальными свойствами составляют алюминиевые чугуны. В зависимости от количества углерода, выделившегося в виде графита при первичной кристаллизации, алюминиевые чугуны подразделяются на три основные группы [3].

Согласно классификации, приведенной в [3], в низкоалюминиевых чугунах и чугунах с содержанием алюминия в пределах 19,7-26% в структуре присутствует графит.

В чугунах с содержанием алюминия более 26% и чугунах с содержанием алюминия 9,8...19,7% графит в структуре не присутствует, основные структурные составляющие – феррит и ферроалюмосиликат переменного состава. В чугунах с содержанием алюминия до 9,8% присутствует шаровидный графит или вермикулярный графит.

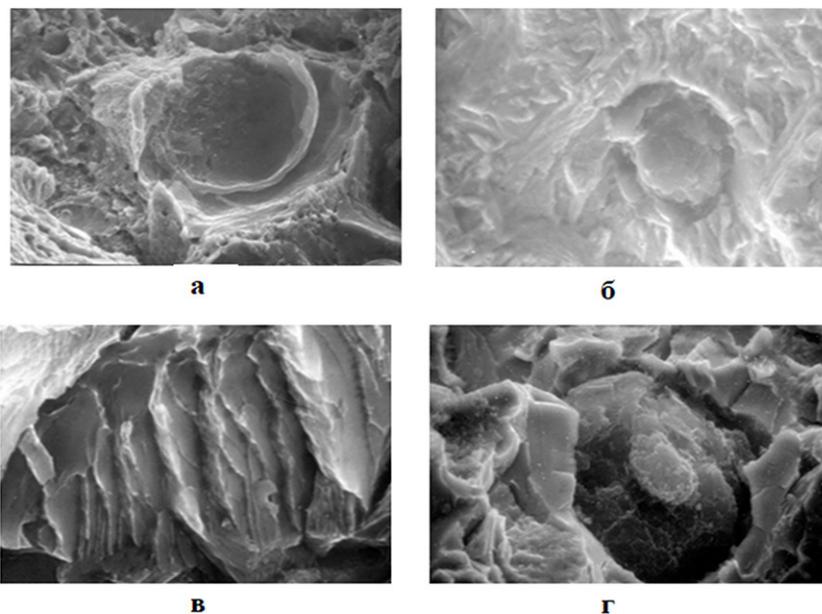
На рисунке 3 приведена структура низкоалюминиевого чугуна с вермикулярным графитом.

В работах [1,2,3] исследовали влияние химического состава (3,2...3,8% С, 0,5...2,5% Si, 2,5...5,5% Al, 0,4...1,0% Mn, 0,1...0,4% P), метода введения алюминия (в твердую шихту, под зеркало расплава), температуры перегрева в индукционной печи, состава и количества покровных флюсов, состава и количества сфероидизирующих (NiMg15P3M, NiMg10 – в ковш, ФСМг5 – в печь, в ковш, внутри формы) и графитизирующих (ФС75, СК30) модификаторов, фильтрационного рафинирования на



а – по включениям графита (РЭМ, х640); б – вязкое разрушение феррита (РЭМ, х5000); в – вязкое разрушение перлита (РЭМ, х5000); г – усталостное разрушение перлита (РЭМ, х640)

Рисунок 1 – Разрушение чугуна с пластинчатым графитом



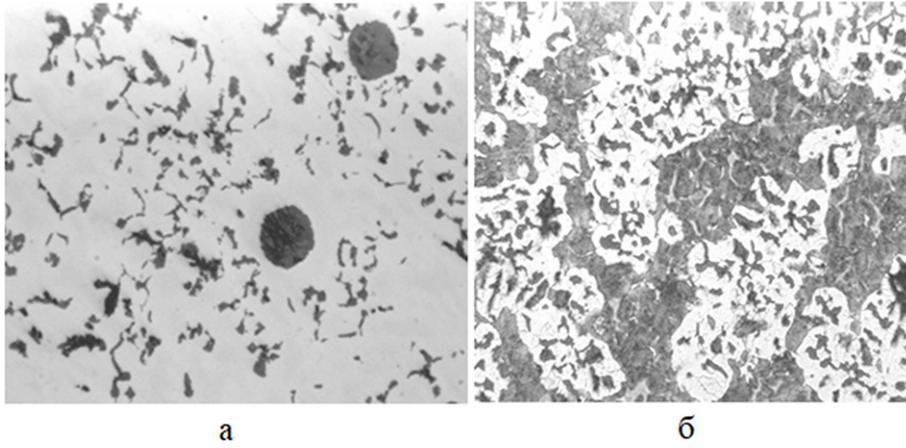
а – по границе первичный – вторичный графит (РЭМ, х640); б – вязкое разрушение перлита (РЭМ, х320); в – хрупкое разрушение перлита (-1000С, РЭМ, х2500); г – хрупкое разрушение ферритной оторочки вокруг включения шаровидного графита (РЭМ, х640)

Рисунок 2 – Разрушение чугуна с шаровидным графитом

структуру и свойства низкоалюминиевых чугунов при различных скоростях охлаждения образцов в литейной форме. При этом в стандартном клине реализовалось (шаровидный графит/вермикулярный графит): $\sigma_6 = 515 \dots 600 / 320 \dots 350$ МПа,

$\sigma_{0,2} = 415 \dots 570 / 265 \dots 280$ МПа, $\lambda = 0,5 \dots 3,0 / 0,5 \dots 1,5\%$, $270 \dots 360 / 170 \dots 220$ НВ.

При содержании алюминия 4,0...4,5% жидкотекучесть по спиральной пробе составила $\lambda = 850 \dots 880$ мм, стойкость в морской воде выше,



а – не травлено; б – травлено 4% HNO₃, x100

Рисунок 3 – Структура низкоалюминиевого чугуна с вермикулярным графитом

чем у высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Алюминиевые чугуны с содержанием алюминия 9,8...19,7% не получили пока широкого распространения из-за повышенной твердости и хрупкости. Очевидно, что это связано с отсутствием графита в структуре. В работах [4,5] рассмотрено влияние графитизирующего модифицирования (меди и ферросилиция) на структуру и свойства среднелегированного алюминиевого чугуна. В чугуне базового состава было принято содержание алюминия 16%, что обеспечило получение смешанной структуры. Надо отметить, что при введении только меди или только ФС75 присутствие графита в структуре обнаружено не было. Только совместное влияние меди и ФС75 приводит к появлению графита в структуре чугуна. Введение 0,015% цериевого мишметалла обеспечило в чугуне с компактным графитом

$\sigma_6 = 280 \dots 300$ МПа, $\sigma_{0,2} = 460 \dots 480$ МПа, 260...280 НВ и удовлетворительную обрабатываемость резанием. Среднелегированный алюминиевый чугун после модификации показал хорошую жидкотекучесть – порядка $\lambda_x = 1050 \dots 1100$ мм.

В высокоалюминиевых чугунах в структуре присутствует феррит, Fe₃Al₃C₃ или Al₄C₃. Присутствие в структуре указанных фаз (карбидная фаза) приводит к повышению твердости, хрупкости, и, соответственно, к ухудшению обрабатываемости.

В работе [4] проводились исследования по способам обработки чугунов данной группы для исключения карбидов в структуре и переводе части углерода в графит. Исследовали влияние алюминия (19...25%) и легирующих элементов (Cu, Ti, Zr, V, Nb), скорости охлаждения ($V_{900} = 0,25 \dots 1,5$ град/с), типа и количества сфероидизирующих модификаторов при ковшевом (цериевый мишметалл, NiMg15P3M, NiMg10, ФСМг5, СК30) и внутриформенном (ФСМг5) модифицировании; состава, метода введения и количества флюсов и

шлаков; фильтрационного рафинирования (плоские сетчатые из покрытой сажистым углеродом стеклоткани, объемные керамические и графитовые проходные фильтры) на структуру и свойства сплава. На рисунке 4 приведена структура высокоалюминиевого чугуна с шаровидным графитом, полученным после обработки модификаторов при ковшевом модифицировании.

Как видно из рисунка 4, в структуре после обработки комплексным модификатором присутствует шаровидный графит. Сравнительная оценка сопротивления гидроабразивному износу и коррозии в различных средах (в частности, в различных сортах нефти) показала, что высокоалюминиевые чугуны с шаровидным графитом по свойствам сопоставимы с нирезистом.

Работы [5-9] посвящены аустемпированным чугунам с шаровидным графитом (ADI – Austempered Ductile Iron), в отечественных публикациях называемым также аустенитно-бейнитными чугунами. Структура получается на базе чугунов с шаровидным графитом, дополнительно легированного никелем, медью и молибденом с последующей термической обработкой.

Термообработка состоит из двухстадийного процесса – аустенизация при температурах 900-950°C и изотермическая выдержка в области бейнитного превращения 250-450°C. Чугуны с такой структурой характеризуются высокой твердостью и износостойкостью при хороших литейных свойствах, сопоставимых со свойствами серых чугунов. Причиной относительно низкого распространения аустемпированного чугуна является сложность технологического процесса (двухстадийность, особенности охлаждения и пр.).

Выводы

Проведенный информационный анализ работ, посвященных исследованию свойств специальных чугунов с повышенной износостойкостью,

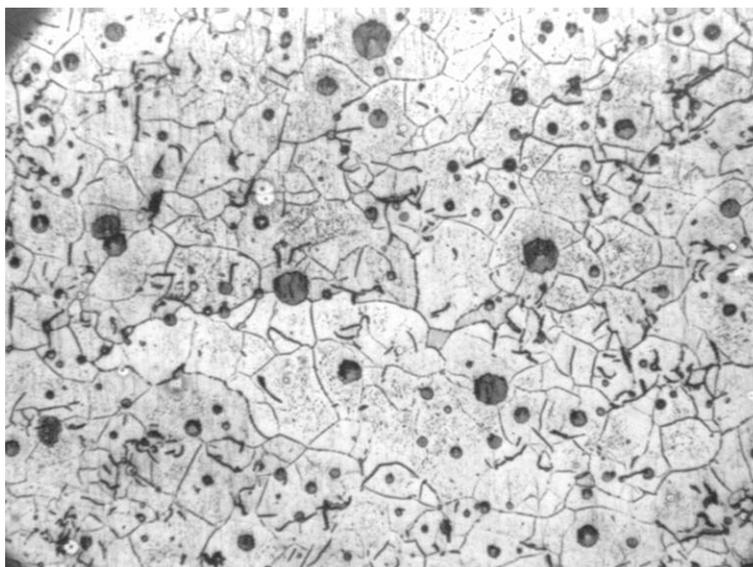


Рисунок 4 – Структура высокоалюминиевого чугуна после обработки модификаторов при ковшевом модифицировании (комплексный реактив, x100)

позволяет сделать следующее заключение. Одним из перспективных направлений совершенствования свойств (в частности, износостойкости) специальных чугунов является перевод части углерода в графитизированное состояние. Несмотря на высокую твердость карбидной фазы, присутствие некоторой части углерода в виде графита шаровидной формы предпочтительнее, чем присутствие углерода только в карбидной фазе.

Второй тенденцией совершенствования свойств является получение миксованной металлической структуры по типу бейнит-феррит.

Получение подобной металлической матрицы и присутствие углерода как в виде карбидной фазы, так и в виде шаровидного графита обеспечивает высокую твердость и сопротивление износу структуры, а также хорошие механические свойства. Получение подобной структуры на базе отливок из чугуна с шаровидным графитом также обеспечивает достаточно хорошие литейные свойства (жидкотекучесть и низкую склонность к усадке) по сравнению с белыми чугунами с аустенитно-мартенситной матрицей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тен Э.Б., Дрокин А.С. Литейные свойства и параметры структуры высоколегированных алюминиевых чугунов // Прогрессивные литейные технологии. Труды 4-й международной научно-практической конференции. М.: МИСиС, 2007. – С. 143-144.
2. Iulian Riposan, Mihai Chisamera, Stelian Stan, Pavel Toboc, Geir Grasmø, Douglas White, Chris Ecob & Cathrine Hartung. Benefits of Residual Aluminum in Ductile Iron // Journal of Materials Engineering and Performance volume 20, pages 57-64 (2011).
3. Косников Г.А., Морозова Л.М. Алюминиевые чугуны // Литейщик России. – 2011. – № 2. – С. 15-17.
4. H. Nasr El-din, A. Nofal, M. Ibrahim, Ausforming of Austempered Ductile Iron Alloyed with Nckel, Intern. J. of Cast Metals Research, 19, 3, 2006, 137-150.
5. J. Yang, S.K. Putatunda, Improvement in Shrength and Toughness of Austempered Ductile Cast Iron by a Novel Two-Step Austempering Process, Materials and Design, 25, 2004, 219-230.
6. Жуков А.А. Аустемпированный чугун – несомненный успех литейного металловедения // Литейное производство. – 1999. – № 11. – С. 39-40.
7. Косников Г.А., Морозова Л.М. Аустемпированные чугуны с шаровидным графитом // Литейщик России. – 2013. – № 12. – С. 8-12.

Қоспаланған шойынның қасиеттерін жақсарту саласындағы әлемдік тенденциялар

¹**КОСНИКОВ Геннадий Александрович**, т.ғ.д., профессор, Kosnikov@mail.spbstu.ru,

¹**МАТВЕЕВ Игорь Александрович**, т.ғ.к., доцент, mia@mail.spbstu.ru,

¹**КОВАЛЕВ Павел Валерьевич**, т.ғ.к., доцент, kovalev_pv@spbstu.ru,

²***КУЛИКОВ Виталий Юрьевич**, т.ғ.к., профессор, mlpikm@mail.ru,

²**КВОН Светлана Сергеевна**, т.ғ.к., профессор, Svetlana.1311@mail.ru,

¹Ұлы Петр Санкт-Петербург политехникалық университеті, Ресей, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая көш., 29,

²Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан, 100027, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыстың мақсаты – қоспаланған шойынның қасиеттерін жақсарту саласындағы әлемдік тенденцияларды зерттеу. Зерттеу әдістері – металлографиялық талдау, эксперименттік фактография. Арнайы қасиеттері бар шойындарды әзірлеу саласында жүргізілген зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Шойынды пайдалану шарттары және ақаулардың пайда болу себептері қарастырылады. Шойынның бұзылуының фрактографиялық ерекшеліктері талданды. Конструкциялық беріктігі жоғары және олардың қасиеттеріне тозуға төзімділігі бар шойындарды зерттеу нәтижелері келтірілген. Аустенит-бейнит шойынын зерттеу нәтижелері келтірілген. Процестің коммерциялық тартымдылығын арттыруға мүмкіндік беретін шойындарды аустемперизациялау әдісі ұсынылады.

Кілт сөздер: конструкциялық беріктік, тозуға төзімділік, графитизация, металл матрицасы, алюминий және аустенит-бейнит шойыны, аустемперизация.

Global Trends in Improving the Properties of Alloyed Cast Irons

¹**KOSNIKOV Gennady**, Dr. Tech. Sci., Professor, Kosnikov@mail.spbstu.ru,

¹**MATVEEV Igor**, Cand. Tech. Sci., Associate Professor, mia@mail.spbstu.ru,

¹**KOVALEV Pavel**, Cand. Tech. Sci., Associate Professor, kovalev_pv@spbstu.ru,

²***KULIKOV Vitaly**, Cand. Tech. Sci., Professor, mlpikm@mail.ru,

²**KVON Svetlana**, Cand. Tech. Sci., Professor, Svetlana.1311@mail.ru,

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29,

²Karaganda Technical University, Kazakhstan, 100027, Karaganda, N. Nazarbayev ave., 56,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of this work is to study global trends in improving the properties of alloyed cast irons. Research methods – metallographic analysis, experimental factography. The results of the studies carried out in the field of development of cast irons with special properties are presented. The operating conditions of cast irons and the reasons for the formation of defects are considered. Fractographic features of the destruction of cast irons are analyzed. The results of studying cast irons with increased structural strength and wear resistance for their properties are presented. The results of studying austenitic-bainitic cast irons are presented. A method of austempering of cast irons is proposed, which makes it possible to increase the commercial attractiveness of the process.

Keywords: structural strength, wear resistance, graphitization, metal matrix, aluminum and austenitic-bainitic cast irons, austempering.

REFERENCES

1. Ten E.B., Drokin A.S. Liteinye svoystva i parametry struktury vysokolegirovannykh alyuminievykh chugunov // Progressivnye liteinye tekhnologii. Trudy 4-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. M.: MISIS, 2007. – S. 143-144.
2. Iulian Riposan, Mihai Chisamera, Stelian Stan, Pavel Toboc, Geir Grasmø, Douglas White, Chris Ecob & Cathrine Hartung. Benefits of Residual Aluminum in Ductile Iron // Journal of Materials Engineering and Performance volume 20, pages 57-64 (2011).
3. Kosnikov G.A., Morozova L.M. Alyuminievye chuguny // Liteishchik Rossii. – 2011. – № 2. – S. 15-17.
4. H. Nasr El-din, A. Nofal, M. Ibrahim, Ausforming of Austempered Ductile Iron Alloyed with Nckel, Intern. J. of Cast Metals Research, 19, 3, 2006, 137-150.
5. J. Yang, S.K. Putatunda, Improvement in Shrength and Toughness of Austempered Ductile Cast Iron by a Novel Two-Step Austempering Process, Materials and Design, 25, 2004, 219-230.
6. Zhukov A.A. Austempirovannyi chugun – nesomnennyi uspekh liteinogo metallovedeniya // Liteinoe proizvodstvo. – 1999. – № 11. – S. 39-40.
7. Kosnikov G.A., Morozova L.M. Austempirovannyye chuguny s sharovidnym grafitom // Liteishchik Rossii. – 2013. – № 12. – S. 8-12.