



УДК 669.131.7: 672.1

Поступила 12.03.2015

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕЙНИТНОГО ЧУГУНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

USE OF HIGH-STRENGTH BAINITIC CAST IRON FOR PRODUCING GEAR WHEELS

*А. И. ПОКРОВСКИЙ, Л. Р. ДУДЕЦКАЯ, Физико-технический институт НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь*

*A. I. POKROVSKIY, L. R. DUDETSKAYA, Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences
of Belarus, г. Минск, Беларусь*

Анализируя мировые тенденции и используя результаты собственных исследований по получению зубчатых колес из высокопрочного чугуна с бейнитной структурой, авторы рассматривают его преимущества и недостатки. Обсуждаются возможности замены легированной стали на бейнитный чугун при изготовлении зубчатых колес.

The advantages and drawbacks of high-strength cast irons with bainitic structure are reviewed basing on the authors' own experience in the production of critical parts from this material and on the analysis of world trends. A possibility of the replacement of alloy steels by bainitic cast iron in manufacturing critical machine parts is discussed.

Ключевые слова. Высокопрочный чугун, аустенито-бейнитная структура, зубчатые колеса.

Keywords. cast iron, austenite-bainite structure, gear wheels.

Введение

В настоящее время стальной прокат является безусловным лидером при изготовлении ответственных изделий в различных областях техники. В то же время в последние десятилетия использование высокопрочных чугунов, особенно обладающих аустенито-бейнитной структурой, стремительно расширяется, вытесняя во многих случаях легированные стали. Это объясняется повышенными литейными и технологическими свойствами чугуна по сравнению со сталью, более низкой температурой плавления, хорошей обрабатываемостью резанием. Чугун обладает некоторыми уникальными, присущими только ему особенностями. Наличие в структуре включений графита обеспечивает чугуну хорошие антифрикционные свойства, способность быстро гасить вибрации и резонансные колебания, малую чувствительность к надрезам, меньший, чем у стали, удельный вес, повышенную теплопроводность. Все это обуславливает широкое применение чугуна для изготовления ответственных изделий.

Для ряда деталей чугун является незаменимым материалом. В автомобилестроении – это блоки цилиндров, коленчатые и распределительные валы, тормозные барабаны, диски сцепления, поршневые кольца, коробки дифференциалов, кронштейны, гидравлические муфты, подвески рессор, картеры задних мостов и т. д.

Из чугуна изготавливают прокатные валки, станины прокатных станов, детали кузнечно-прессового и дробильно-размольного оборудования, турбин, тепловозов, тракторов, насосов и др. В станкостроении чугун используется для изготовления зубчатых колес, суппортов, резцедержателей, планшайб, шпинделей, оправок, корпусов токарных патронов и т. п.

Особенность чугуна по сравнению со сталью – гетерогенная структура, включающая такие разнородные структурные составляющие, как прочная и пластичная металлическая матрица, и включения графита, не обладающие прочностью, но обеспечивающие сплаву высокие триботехнические и демпфирующие показатели.

Основными тенденциями совершенствования структуры чугуна являются следующие:

1. В области изменения характера включений графита – переход от разветвленной формы к компактной и сферической, т. е. переход от серых чугунов к высокопрочным.

Считается [1], что впервые высказал намерение совершенствовать форму графита в сером чугуне J. W. Bolton в 1943 г. на съезде Американской ассоциации литейщиков (AFS).

Несколько недель спустя американец Keith Dwight Millis в лаборатории «International Nickel Company» (INCO) обнаружил, что при добавлении магния в расплав чугуна в ковше в структуре образуется графит практически идеальной шаровидной формы. 7 мая 1948 г. на съезде американских литейщиков в Филадельфии фирмой «International Nickel Company» было сделано публичное заявление о получении высокопрочного чугуна с шаровидным графитом [2]. Эту дату многие считают днем рождения высокопрочного чугуна. Если брать за точку отсчета дату первой публикации [3], то патент на «Cast ferrous alloy» автора Keith Dwight Millis и двух его соавторов был опубликован 25 октября 1949 г. [4]. Одна из страниц патента, иллюстрирующая сферическую форму графита, приведена на рис. 1.

Oct. 25, 1949.

K. D. MILLIS ET AL
CAST FERROUS ALLOY

2,485,760

Filed Nov. 21, 1947

4 Sheets-Sheet 1

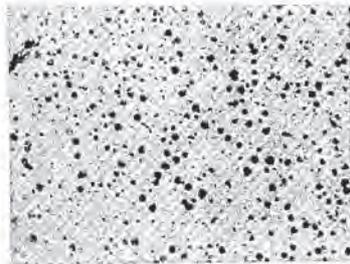


Fig. 1.

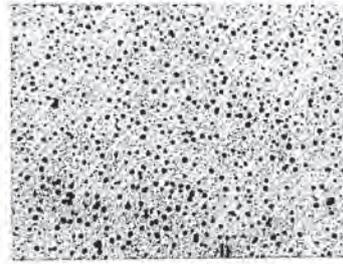


Fig. 2.

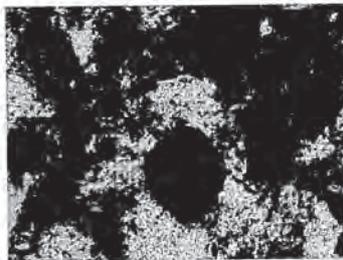


Fig. 3.

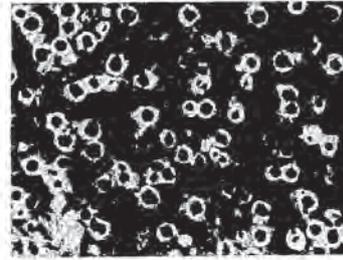


Fig. 4.



Fig. 5.

INVENTORS
KEITH DWIGHT MILLIS
ALBERT PAUL GAGNEBIN
NORMAN BODEN PILLING

BY
A. P. Weller
ATTORNEY

Рис. 1. Одно из первых изображений радиальной структуры сечения сферического включения графита (фиг. 5). Из материалов описания патента US2485760, 1949 г. на высокопрочный чугун

Начиная с 1948–1949 гг. во всем мире активно развиваются способы получения чугуна с шаровидным графитом, опубликованы тысячи статей, созданы научные школы по разработке технологий получения ВЧШГ и изучению их свойств.

Действующий с 1985 г. по настоящее время в странах СНГ межгосударственный стандарт «Чугун с шаровидным графитом для отливок» [5] предусматривает наиболее высокую марку высокопрочных чугунов ВЧ 100 с показателем предела прочности при растяжении 1000 МПа.

2. Второй тенденцией является переход, начиная с 70-х годов прошлого века, на аустенито-бейнитную структуру металлической матрицы (так называемый «бейнитный чугун»). В российской литературе его обозначают аббревиатурой АБЧШГ – аустенито-бейнитный чугун с шаровидным графитом, англоязычное сокращение ADI – Austempering Ductile Iron, в немецкоязычной литературе употребляют термин «Zwischenstufenvergütung von Gusseisen mit Kugelgraphit», который можно перевести как «закалка чугуна с шаровидным графитом в промежуточной области превращений».

Первые публикации по аустенито-бейнитному чугуну относятся к 50-м годам прошлого века [6]. Большой вклад в 70–90-х годах прошлого века в теорию и практику бейнитного чугуна внесли работы J. Dodd, Matti Johanson, S. E. Stenfors, Klaus Rohrig и др. [7–13].

Пример микроструктуры чугуна с аустенито-бейнитной структурой приведен на рис. 2. Такая структура обеспечивается специальным легированием, а также особой термообработкой (изотермической закалкой).

Выбор легирующих компонентов для увеличения прокаливаемости и стабилизации аустенита, как правило, ограничивается такими элементами, как никель, медь, марганец и молибден. Типовой диапазон химического состава бейнитного чугуна следующий [15]: углерод – 3,2–3,8 мас.%; кремний – 2,0–2,4; марганец – 0,2–0,5; никель – 0,8–2,5; медь – 0,5–1,5; молибден – 0,2–0,8 мас.%. Следует отметить, что начиная с 70-х годов во всем мире происходило активное патентование химических составов бейнитных чугунов [16–18].

Термическая обработка бейнитного чугуна состоит из двух этапов: аустенизация (нагрев до температур порядка 950 °С) и изотермическая закалка – очень быстрый (до начала наступления мартенситного превращения) перенос в среду с температурой в диапазоне 300–500 °С с последующей выдержкой. За счет этого на определенной стадии прерывается распад аустенита и в структуре формируются две фазы: бейнит (феррито-карбидная смесь) и остаточный аустенит. Бейнит обеспечивает прочность, аустенит – пластичность.

Различают два основных структурных типа бейнитов в чугунах, так называемые нижний и верхний, которые получают соответственно при более низких (в интервале 280–350 °С) и более высоких (ориентировочно – 350–450 °С) температурах закалки и изотермической выдержки. Детали со структурой матрицы нижнего бейнита обладают максимальными прочностью, твердостью и износостойкостью при хорошей ударной вязкости и относительном удлинении, а детали со структурой матрицы верхнего бейнита – высокой прочностью наряду с высокими ударной вязкостью и относительным удлинением. Диапазон механических свойств аустенито-бейнитных чугунов со структурой нижнего и верхнего бейнита приведен в таблице.

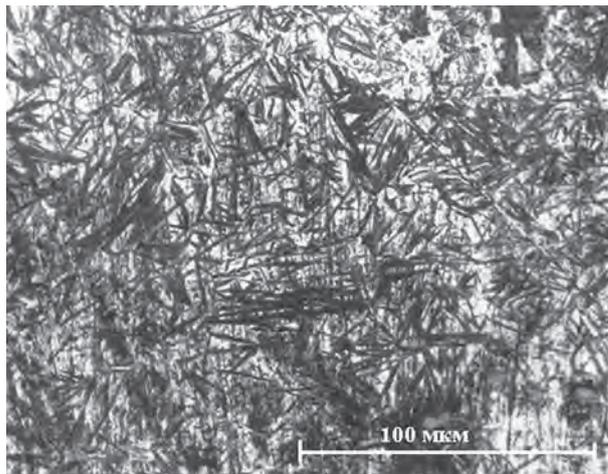


Рис. 2. Пример микроструктуры чугуна с аустенито-бейнитной структурой (темные пакеты в виде игл – бейнит, светлый фон – остаточный аустенит)

Некоторые механические свойства чугуна с аустенито-бейнитной структурой [15]

Тип структуры бейнита в чугуне	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость HRC	Ударная вязкость, МДж
Нижний бейнит	1100–1500	1–4	42–48	0,2–0,5
Верхний бейнит	800–1200	3–10	36–45	0,2–0,4

Особенностями бейнитного превращения являются мартенситный механизм $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода с протеканием перераспределения углерода по диффузионному механизму.

Возможны два способа получения чугунов с аустенито-бейнитной структурой [15]:

- 1) в литом состоянии за счет индивидуально подобранного легирующего комплекса, а также технологии литья и конструкции отливки;
- 2) в результате термической обработки литых заготовок.

По первому способу целесообразно изготавливать детали массового производства, не требующие механической обработки. При этом дополнительные затраты на разработку конструкции и технологии изготовления отливки, а также на дополнительное легирование такими элементами, как никель и молибден, компенсируются исключением затрат на достаточно сложную термическую обработку. Номенклатура таких отливок весьма ограничена. Более часто используют второй метод изготовления деталей из высокопрочных аустенито-бейнитных чугунов. При этом на стадии изготовления отливки необходимо грамотно подобрать химический состав и технологические параметры для получения в литой заготовке оптимальной структуры с точки зрения механической и термической обработки.

Меняя соотношение бейнита и аустенита в структуре чугуна, можно получать одновременно высокую прочность и пластичность. Кроме того, используя пластическую деформацию литой заготовки, можно повысить прочность материала до 1700–1900 МПа [19].

Достижимые высокие показатели позволили использовать бейнитный чугун для изготовления ответственных изделий, заменяя при этом сталь. В частности, первые упоминания об использовании бейнитного чугуна для зубчатых колес относятся к 80-м годам прошлого столетия [20–22]. После того, как на опытных образцах были достигнуты значения предела прочности при растяжении на уровне 1500 МПа и относительного удлинения до 10%, началось широкое освоение высокопрочного бейнитного чугуна. В настоящее время в промышленных масштабах выпускаются (в частности, фирмами «General Motors» и «Ford») сотни типоразмеров деталей, причем за рубежом наиболее массовыми изделиями являются зубчатые колеса [23].

Активно проводились работы по освоению изделий из бейнитного чугуна в России, в частности, на автомобильных заводах ВАЗ [24] и КамАЗ. Большое внимание внедрению бейнитного чугуна уделял директор КамАЗа Н. И. Бех [25–27]. В России была разработана комплексная программа «Разработка и внедрение аустенито-бейнитных чугунов с шаровидным графитом и технологии получения из них литых деталей в автомобилестроении», участниками которой являются АО «КамАЗ», НХМА «Авангард» (Москва), НТКЦ «САНТОКАМ» (Санкт-Петербург), ЦНИИ Материалов (Санкт-Петербург) и др., всего 25 организаций. Следует отметить, что и в настоящее время это направление продолжает активно развиваться, о чем свидетельствуют последние публикации [13–15, 28, 29].

Авторами данной статьи с использованием сложившегося мирового опыта была сделана попытка применить бейнитный чугун к условиям литейного производства Минского автомобильного завода и конкретным деталям типа средних и крупных зубчатых колес. Работы выполняли в рамках заданий двух государственных научно-технических программ: 1) «Технологии», задание «Разработать и освоить литейную и литейно-деформационную технологии изготовления зубчатых колес из бейнитного чугуна»; 2) «Белавоттракторостроение», задание «Разработать опытно-промышленную технологию изготовления конических шестерен трансмиссии автомобиля МАЗ из бейнитного чугуна». Большую помощь в работе оказали главный инженер завода И. С. Гаухштейн и начальник ЦЗЛ П. С. Гурченко. Немаловажным оказалось и то, что МАЗ на тот момент был заинтересован иметь в своем распоряжении импортозамещающую технологию, альтернативную традиционной, основанной на механической обработке проката легированной стали 20ХНЗА, поставляемой из России.

Технологию отработывали на шестернях дифференциала заднего моста автомобиля МАЗ-5336: шестерни полуоси (№ 5336–2402050) и сателлита (№ 5336–2402055) (рис. 3).

На основании анализа полученных результатов было установлено следующее:

1. В качестве заменителя традиционного материала для зубчатых колес (стали 20ХНЗА) возможно использование высокопрочного чугуна, а также низколегированного ковкого чугуна, характеристики которого после изотермической закалки приближались к показателям высокопрочного. Для условий МАЗа, имеющего в то время цех ковкого чугуна, это было достаточно важным.

2. Применение горячей пластической деформации чугунной заготовки в составе технологического процесса способствует устранению литейных дефектов, дальнейшему повышению механических свойств [30–33] и изменяет кинетику бейнитного превращения. Особенностью сплава с наложением

пластической деформации является возможность формирования бейнитной структуры в низколегированном чугуна [34].

3. Доказана технологическая возможность применения водовоздушной закалки чугунных заготовок для получения деталей с бейнитной структурой. Это было также достаточно важно в условиях МАЗа, располагающего соответствующим оборудованием.

4. Производственные испытания опытных и опытно-промышленных партий штампованных шестерен из чугуна показали, что их прочностные показатели повышаются до уровня легированных сталей (1200 МПа и более), а уровень шума при работе зубчатой пары снижается на 2–4 дБ [35] (рис. 4), что крайне важно для соответствия современным европейским нормам ЕЭК ООН, предъявляемым к автомобильной технике.

Эффективность предложенной технологии при замене стали на литой или деформированный чугун заключалась в следующем: экономия импортируемого проката 20ХН3А, достигающая по детали «сателлит» 200 т на программу; снижение массы деталей на 9% за счет меньшей плотности чугуна по сравнению со сталью, что позволяет облегчить каждую шестерню на 700 г; снижение затрат на термическую обработку за счет устранения цементации; уменьшение трудоемкости механической обработки и расхода инструмента за счет получения более точной заготовки и лучшей обрабатываемости чугуна. Предполагаемый экономический эффект от внедрения новой технологии при изготовлении годовой программы зубчатой пары сателлитов дифференциала составлял 442 400 долл. США.

Следующим этапом, выполненным в рамках ГНТП «Белавтотракторостроение», была разработка состава бейнитного чугуна и литейно-деформационных технологий изготовления из него шестерен № 5551-2402017 и 5551-2402060 главной передачи автомобиля МАЗ-5551 (рис. 5) Технологию реализовали на имеющихся производственных площадях завода. Первоначально была разработана и реализована опытная технология плавки и разливки высокопрочного чугуна в объеме 300 кг. Литые заготовки передавали в цех редукторов, где производили их предварительную и окончательную механическую обработку. Обработанные детали подвергали изотермической закалке на термическом участке инструментально-штампового производства, после чего были переданы для прохождения производственных испытаний в испытательный центр. С учетом полученных результатов была разработана опытно-промышленная технология изготовления зубчатых колес. Она включала выплавку высокопрочного чугуна объемом 3 т, предварительную термообработку, горячую пластическую деформацию, предвари-

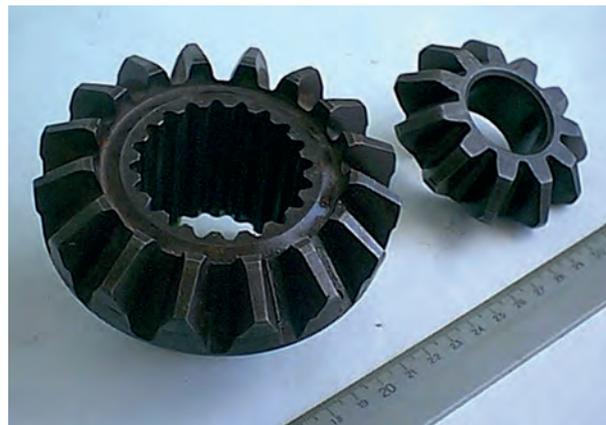


Рис. 3. Шестерни дифференциала заднего моста автомобиля МАЗ-5336, которые изготавливали из высокопрочного и ковкого чугунов с аустенито-бейнитной структурой, а также с использованием горячей пластической деформации литой чугунной заготовки

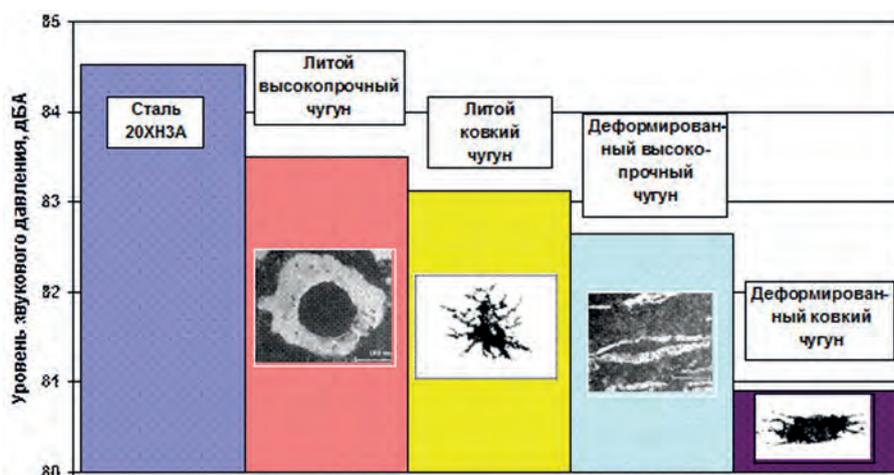


Рис. 4. Гистограмма, иллюстрирующая величину снижения уровня звукового давления при работе зубчатых пар, изготовленных из различных материалов: литого и деформированного ковкого и высокопрочного чугунов по сравнению со сталью 20ХН3А. На фоне диаграмм приведены фотографии графитных включений, соответствующих данному типу чугуна

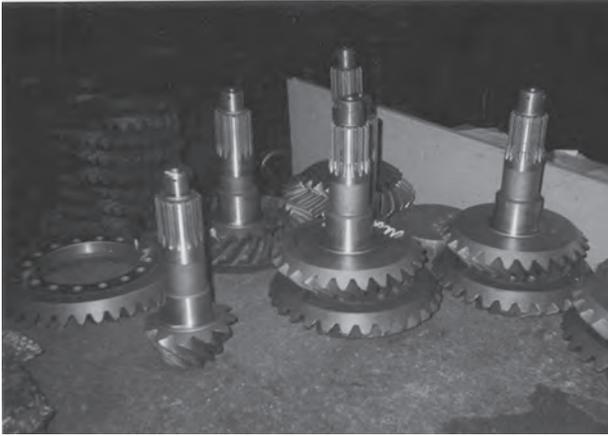


Рис. 5. Шестерни главной передачи автомобиля МАЗ-5551: ведущая (№ 5551-2402017) и ведомая (№5551-2402060), которые были изготовлены из бейнитного чугуна



Рис. 6. Шестерни главной передачи МАЗ-5551 из бейнитного чугуна на стенде испытаний на статическую изгибную прочность (шестерня слева жестко закреплена, шестерня справа медленно вращается)

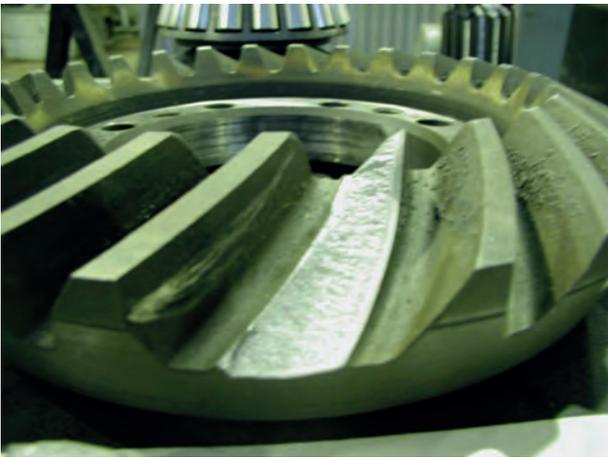


Рис. 7. Пример разрушения зуба шестерни при статических испытаниях (в большинстве случаев при одинаковой нагрузке в первую очередь ломался зуб не чугунной, а стальной шестерни)

тельную и окончательную механическую обработку на автоматических линиях, изотермическую закалку в соляных ваннах, притирку зубьев и шлифовку.

Стендовые испытания на специальной установке в испытательном центре завода заключались в том, что одну из шестерен зубчатой пары закрепляли жестко (рис. 6), а вторую, находящуюся с ней в зацеплении, плавно вращали с очень малой скоростью.

При определенном угле закручивания происходило разрушение одной из деталей (рис. 7). Показано, что в большинстве случаев при одинаковой нагрузке в первую очередь ломался зуб не чугунной, а стальной шестерни.

Некоторые результаты испытаний шестерен на прочность при кручении приведены на рис. 8. Из рисунка следует, что максимальные нагрузки, приводящие к разрушению стали 20ХН3А и бейнитного

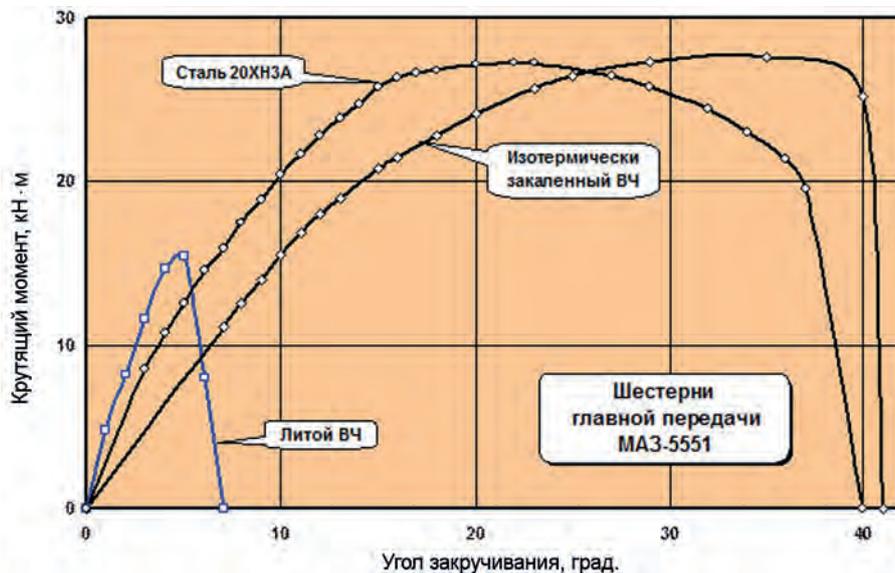


Рис. 8. Зависимость крутящего момента от угла закручивания при стендовых испытаниях на изгибную статическую прочность шестерен главной передачи МАЗ-5551, изготовленных из различных материалов

чугуна, примерно одинаковы, а максимально допустимый угол закручивания для шестерен из чугуна несколько больше, чем у стали.

Проведенные исследования подтвердили общемировые данные об эффективности применения бейнитного чугуна для изготовления шестерен. Кроме того, полученные результаты имели определенную новизну, в частности, впервые была исследована специфика получения бейнитной структуры у низколегированного ковкого чугуна, доказана возможность его использования для изготовления шестерен, показана эффективность применения горячей пластической деформации для улучшения свойств чугунных деталей.

Выводы

1. Высокопрочные чугуны с аустенито-бейнитной структурой – перспективный материал для изготовления ответственных машиностроительных деталей. Получаемые высокие характеристики позволяют заменить чугуном сталь, экспортируемую из-за пределов Беларуси, и использовать его при изготовлении широкого круга изделий.

2. Указанные изделия могут быть высоконагруженными, достаточно массогабаритными, но должны быть компактными (под компактностью понимаем то, что они имеют размеры, близкие или соотносимые между собой по трем осям координат). Это, например, шестерни, гильзы, втулки. В условиях Беларуси, где, по данным Министерства промышленности насчитывается более 60 организаций, располагающих литейными цехами, а термические отделения имеются у большинства машиностроительных предприятий, высокопрочные бейнитные чугуны могут составить существенную конкуренцию импортируемому стальному прокату.

3. Возможной альтернативой соляным ваннам могут служить ведущиеся сейчас разработки по автоматизированному управляемому охлаждению в газовой или водовоздушной среде («спрейерное охлаждение» или «душирование»). При этом водовоздушная смесь, содержащая капли воды заданной дисперсности, создается специальными устройствами и равномерно распределяется по поверхности охлаждаемой детали. Управление скоростью охлаждения обеспечивается за счет изменения плотности орошения поверхности.

4. Для координации исследований и разработок в области высококачественных чугунов необходимо создание в Беларуси отдельной государственной научной программы. В России, например, давно существует госпрограмма исследований аустенито-бейнитных чугунов, объединяющая научные центры с рядом таких крупных предприятий, как, например, «КамАЗ». Комплексная программа в Беларуси должна включать разделы, относящиеся к централизованному определению типоразмеров деталей, подходящих для перевода на изготовление из чугуна, а также содержать направления исследований, относящиеся к материаловедению, а также к технологическим процессам получения отливок и их обработки, разработке необходимой документации, в том числе соответствующих стандартов.

Литература

1. ВЧШГ – высокопрочный чугун с шаровидным графитом. Исследовательский центр Модификатор [Электронный ресурс], 2015 – Режим доступа: http://www.modificator.ru/terms/ductile_nci.html, свободный. – Загл. с экрана (ссылка актуальна на 02.03.2015).
2. K e i t h D. Millis: the father of ductile iron. Online Library [Электронный ресурс] 2015 – Режим доступа: <http://www.thefreelibrary.com>, свободный. – Загл. с экрана (ссылка актуальна на 02.03.2015).
3. Ductile Iron Data // Ductile Iron Society. Promoting the production and application of ductile iron castings [Электронный ресурс], 2015 – Режим доступа: <http://www.ductile.org>, свободный. – Загл. с экрана (ссылка актуальна на 02.03.2015).
4. Patent US2485760. Cast ferrous alloy. Oct. 25, 1949. K. D. Millis et al. (заявлен 21.11.1947).
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 7293–85. Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки // Spheroidal graphite iron for casting. Grades.
6. H u m m e l, U., P i w o w a r s k y E. Über die Zwischenstufenvergütung von Gusseisen // Giesserei, Technisch-wiss. Beihilfe (1951) 5. S. 378–381.
7. П и в о в а р о в В. М., Т а н а н к е И. А., Л е в ч е н к о А. А. О бейнитном превращении высокоуглеродистого аустенита, легированного кремнием // Физика металлов и металловедение. 1972. Т. 33. № 6. С. 346–352.
8. D o d d J. Zwischenstufenvergütung von Guseisen mit Kugelgraphit // Giesserei. 1978. Bd 65. N 4. S. 73–80.
9. J o h a n s o n M. Austenitisch-beinitisches Guseisen mit Kugelgraphit // Giesserei-Praxis. 1979. N 6. S. 92–98.
10. S t e n f o r s S. E. The effect of alloying elements on the beinite transformation in ductile iron // Materials of Research Society Symposium. 1985. pp. 423–432.
11. V o i g t R. Gefügeuntersuchung mit Rem-rasterelektronenmikroskop von Zwischenstufevergütetem guseisen mit kugelgraphit // Giesserei-Praxis. 1985. N 7. S. 95–104.

12. Kuoichi Nagai, Katsuhiko Kishitake. Tensile and Impact Properties of Forged Spheroidal Graphite Cast Iron // The 57-th World Foundry Congress. Osaka. September 1990. S. 31.
13. Rohrig K. ADI – ein Leichtbauwerkstoff mit hohem Potential // Giesserei Rundschau. 2002, Jng.49, heft 11/12. S. 192–201.
14. Дудецкая Л. Р., Покровский А. И., Гаухштейн И. С., Демин М. И., Гурченко П. С. Бейнитный чугун: опыт получения и применения // Автомобильная промышленность. 2001. № 11. С. 33–35.
15. Корниенко Э. Н., Панов А. Г., Хальфин Д. Ф. Перспективы производства отливок из ЧШГ аустенитно-бейнитного класса // Литейщик России. 2004. № 6. С. 11–16.
16. Патент 60106946 Японии, С 22 С 37/08, С 21 D 5/00. Бейнитный высокопрочный чугун. Заявлено 15.11.1983; опубл. 12.06.1985.
17. Патент 6133361 Япония, С22 С37/04, С21 D5/00. Бейнитный высокопрочный чугун. Заявлено 30.11.1984; опубл. 20.06.1986.
18. Патент 2590508 Франция, МКИ В22 D 27/20, С 21 D 1/20. Бейнитный высокопрочный чугун. Опубл. 29.05.1987.
19. Patent 53–20448 2/1978 Japan, МКИ С 21 D 7/14. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом. Заявл. 06.09.71; опубл. 27.06.1978.
20. Mann R., Liebera R. Einsatz von Gusseisen mit Kugelgraphit fur Zahnrad // Giessereitechnik. 1981. Sd 27. N 7. S. 206–210.
21. Mann R., Wolf K., Mirr E. Zwischenstufen verguten von Zahnrad aus unlegiertem Guseisen mit Kugelgraphit // Giessereitechnik. 1983. N 5. S. 135–140.
22. Retting H., Hornung K., Mannes W. Zahnrad aus beinitischem Guseisen mit Kugelgraphit. BDJ-Berichte, 1983, pp. 14–33.
23. Roedter H. ADI – Austempering Ductile Iron. Аустемперированный чугун // Литейщик России. 2004/ № 3. С. 12–21.
24. Неделько Л. А., Шестаков А. В., Шмидт В. И. Применение бейнитного чугуна для автомобильных отливок // Обзорная информация. Тольятти, 1990. 34 с.
25. Бех Н. И. Перспективы применения бейнитного высокопрочного чугуна в автомобилестроении // Литейное производство. 1993. № 8. С. 2–3.
26. Бех Н. И. Изготовление тяжело нагруженных автомобильных деталей из высокопрочного чугуна // Литейное производство. 1994. № 10–11. С. 11–14.
27. Косников Г. А., Морозова Л. М., Бех Н. И. Влияние условий изотермической закалки на структуру и свойства ЧШГ // Литейное производство. 1998. № 12. С. 27–29.
28. Артеменко Т. В. Исследование и разработка технологии производства массивных отливок из бейнитного чугуна с шаровидным графитом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 26 с.
29. Косников Г. А., Морозова Л. М. Аустемперированные чугуны с шаровидным графитом // Литейное производство. 2013. № 12. С. 8–12.
30. Деформирование как средство упрочнения чугунных отливок / Л. Р. Дудецкая, А. И. Покровский, И. С. Гаухштейн, М. И. Демин, П. С. Гурченко // Автомобильная промышленность. 2001. № 7. С. 30–33.
31. Промышленное опробование технологии получения ответственных автомобильных деталей из деформированного чугуна / Л. Р. Дудецкая, А. И. Покровский // Весці НАН Беларусі. Сер фіз.-тэхн. навук. 2003. № 2. С. 47–53.
32. Разработка и внедрение технологии изготовления высококачественных изделий из деформированного чугуна / А. И. Покровский // Наука и инновации. 2005. № 4 (26). С. 54–65.
33. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / А. И. Покровский. Минск: Беларуская навука, 2010. 256 с.
34. Особенности бейнитного превращения в ковком чугуне / Л. Р. Дудецкая, В. А. Ткачева, А. И. Покровский // Материалы, технологии, инструменты. Гомель: Изд-во ИММС НАН Беларусі. 1998. Т. 3. № 2. С. 41.
35. Влияние формы графитовых включений на акустические характеристики изделий из литого и деформированного чугуна / А. И. Покровский, А. С. Чаус, Э. Б. Куновский // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 7. С. 3–10.

References

1. VChShG – vysokoprochnyi chugun s sharovidnym grafitom (VChShG–high-strength cast iron with globular graphite). Available at: http://www.modificator.ru/terms/ductile_nci.html (accessed 2 March 2015).
2. Keith D. Millis: the father of ductile iron. Online Library. Available at: <http://www.thefreelibrary.com> (accessed 2 March 2015).
3. Ductile Iron Data. Ductile Iron Society. Promoting the production and application of ductile iron castings. Available at: <http://www.ductile.org> (accessed 2 March 2015).
4. Millis K. D. et al. Cast ferrous alloy. Patent US2485760, 1949.
5. State Standard 7293–85. Spheroidal graphite iron for casting. Grades. Moscow, Standartinform Publ., 1987. 3 p. (In Russian).
6. Hummel U., Pivovarsky E. Uber die Zwischenstufenvergutung von Gusseisen. *Giesserei, Technisch-wissenschaft*, 1951, no. 5, pp. 378–381.
7. Pivovarov V. M., Tananko I. A., Levchenko A. A. O beinitnom prevraschenii vysokouglerodistogo austenita, legirovannogo kremniem [Bainite transformation in high-C austenite alloyed with Si]. *Fizika metallov i metallovedenie – Physics of Metals and Metallography*, 1972, vol. 33, no. 2, pp. 346–352.
8. Dodd J. Zwischenstufenvergutung von Guseisen mit Kugelgraphit. *Giesserei*, 1978, vol. 65, no. 4, pp. 73–80.
9. Johnson M. Austenitisch-beinitisches Guseisen mit Kugelgraphit. *Giesserei-Praxis*, 1979, no. 6, pp. 92–98.
10. Stenfors S. E. The effect of alloying elements on the bainite transformation in ductile iron. *Materials of Research Society Symposium*, 1985, pp. 423–432.

11. Voigt R. Gefuegeuntersuchung mit Rem-rasterelektronenmikroskop von Zwischenstufevergütetem guseisen mit kugelgraphit. *Giesserei-Praxis*, 1985, no. 7, pp. 95–104.
12. Kuoichi Nagai, Katsuhiko Kishitake. Tensile and impact properties of forged spheroidal graphite cast iron. *The 57-th World Foundry Congress*. Osaka, 1990, p. 31.
13. Rohrig K. ADI – ein Leichtbauwerkstoff mit hohem Potential. *Giesserei Rundschau*, 2002, vol. 49, no. 11/12, pp. 192–201.
14. Dudetskaya L. R., Pokrovskiy A. I., Gauhshtein I. S., Demin M. I., Gurchenko P. S. Beinitnyy chugun: opyt polucheniya i primeneniya [Bainitic cast iron: practice of production and application]. *Avtomobilnaya promyshlennost – Automotive Industry*. 2001, no. 11, pp. 33–35.
15. Kornienko E. N., Panov A. G., Hal'fin D. F. Perspektivy proizvodstva otlivok iz ChShG austenitno-beinitnogo klassa [Prospects for producing castings from cast iron with globular graphite of the austenite-bainite class]. *Liteischik Rossii – Russian Foundryman*, 2004, no. 6, pp. 11–16.
16. Patent 60 106946 Japan. Bainitic high-strength cast iron, 1985.
17. Patent 61 33361 Japan. Bainitic high-strength cast iron, 1986.
18. Patent 2590508 France. Bainitic high-strength cast iron, 1987.
19. Patent 53–20448 2 Japan. High-strength cast iron with globular graphite, 1978.
20. Mann R., Liebera R. Einsatz von Gusseisen mit Kugelgraphit für Zahnrad. *Giessereitechnik*, 1981, vol. 27, no. 7, pp. 206–210.
21. Mann R., Wolf K., Mirr E. Zwischenstufen vergüten von Zahnrad aus unlegiertem Guseisen mit Kugelgraphit. *Giessereitechnik*, 1983, no. 5, pp. 135–140.
22. Retting H., Hornung K., Mannes W. Zahnrad aus beinitischem Guseisen mit Kugelgraphit. *BDJ-Berichte*, 1983, pp. 14–33.
23. Roedter H. ADI – Austeperirovannyi chugun [ADI – Austempered Ductile Iron]. *Liteischik Rossii – Russian Foundryman*, 2004, no. 3, pp. 12–21.
24. Nedelko L. A., Shestakov A. V., Shmidt V. I. Primenenie beinitnogo chuguna dlya avtomobil'nyh otlivok [Use of bainitic cast iron for automobile castings]. *Obzornaya informatsia – Review Information*. Tolyatti, 1990. 34 p.
25. Beh N. I. Perspektivy primeneniya beinitnogo vysokoprochnogo chuguna v avtomobilestroenii [Prospects of the use of bainitic high-strength cast iron in automotive industry]. *Liteinoe proizvodstvo – Foundry Engineering*, 1993, no. 8, pp. 2–3.
26. Beh N. I. Izgotovlenie tyazhelonagruzhennyh avtomobil'nyh detalei iz vysokoprochnogo chuguna [Production of heavy-duty automobile parts from high-strength cast iron]. *Liteinoe proizvodstvo – Foundry Engineering*, 1994, no. 10–11, pp. 11–14.
27. Kosnikov G. A., Morozova L. M., Beh N. I. Vliyanie usloviy izotermicheskoi zakalki na strukturu i svoystva ChShG [The effect of conditions of isothermal quenching on structure and properties of cast iron with globular graphite]. *Liteinoe proizvodstvo – Foundry Engineering*, 1998, no. 12, pp. 27–29.
28. Artemenko T. V. *Issledovanie i razrabotka tehnologii proizvodstva massivnyh otlivok iz beinitnogo chuguna s sharovidnym grafitom*. Avtoref. kand. tehn. nauk [Study and development of the technology for producing large castings from bainitic cast iron with globular graphite. PhD thesis]. Moscow, 2001. 26 p.
29. Kosnikov G. A., Morozova L. M. Austemirovannye chuguny s sharovidnym grafitom [Austempered cast irons with globular graphite]. *Liteinoe proizvodstvo – Foundry Engineering*, 2013, no. 12, pp. 8–12.
30. Dudetskaya L. R., Pokrovskiy A. I., Gauhshtein I. S., Demin M. I., Gurchenko P. S. Deformirovanie kak sredstvo uprochneniya chugunnyh otlivok [Plastic deforming as a means for strengthening foundry goods]. *Avtomobilnaya promyshlennost – Automotive Industry*, 2001, no. 7, pp. 30–33.
31. Dudetskaya L. R., Pokrovskiy A. I. Promyshlennoe oprobovanie tehnologii polucheniya otvetstvennyh avtomobil'nyh detalei iz deformirovannogo chuguna [Industrial testing of technology for producing critical automobile parts from deformed cast]. *Vesci Natsiyanalnai akademii navuk Belarusi, seriya fizika-tehnichnyh navuk – Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, ser. Physical and Technical Sciences*, 2003, no. 2, pp. 47–53.
32. Pokrovskiy A. I. Razrabotka i vnedrenie tehnologii izgotovleniya vysokokachestvennyh izdelij iz deformirovannogo chuguna [Development and application of the technology for producing high-quality parts from deformed cast iron]. *Nauka i innovatsii – Science and Innovations*, 2005, no. 4 (26), pp. 54–65.
33. Pokrovskiy A. I. *Goryachaya plasticheskaya deformatsia chuguna: struktura, svoystva, tehnologicheskie osnovy* [Hot plastic deformation of cast iron: structure, properties, technological basics]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2010. 256 p.
34. Dudetskaya L. R., Tkacheva V. A., Pokrovskiy A. I. Osobennosti beinitnogo prevrascheniya v kovkom chugune [Specific features of bainite transformation in a ductile cast iron]. *Materialy, tehnologii, instrumenty. – Materials, Technologies, Tools*, 1998, vol. 3, no. 2, p. 41.
35. Pokrovskiy A. I., Chaus A. S., Kunovskiy E. B. Vliyanie formy grafitovykh vklucheniya na akusticheskie kharakteristiki izdelii iz litogo i deformirovannogo chuguna [Effect of the shape of graphite inclusions on acoustic characteristics of articles from cast and deformed iron]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 2011, vol. 53, no. 7–8, pp. 311–317.

Сведения об авторах

Покровский Артур Игоревич (E-mail: arturu@tut.by), Дудецкая Лариса Романовна (тел. раб. (+375 17) 263-58-38), Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, 220141, Беларусь, г. Минск, ул. Купревича, 10.

Information about the authors

Pokrovskiy Artur (E-mail: arturu@tut.by), Dudetskaya Larisa (tel.: (+375 17) 263-58-38), Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 10, Kuprevicha Str., Minsk, Belarus.