

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 669.13.017: 620.18

КОВАЛЬКО
Михаил Сергеевич

**ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЧУГУНЫ С АУСФЕРРИТНОЙ И АУСФЕРРИТНО-
КАРБИДНОЙ МАТРИЦЕЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ С ПОВЫШЕННОЙ
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Минск, 2023

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Научный руководитель **Волочко Александр Тихонович**,
доктор технических наук, профессор, начальник отдела материаловедения и литейно-деформационных технологий - зав. лабораторией,
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск

Официальные оппоненты **Кузей Анатолий Михайлович**,
доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией физики поверхностных явлений,
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», г. Минск

Константинов Валерий Михайлович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение в машиностроении» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

Защита состоится «06» июля 2023 г. в 14-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.18.01 при ФТИ НАН Беларуси по адресу: Республика Беларусь, 220141, г. Минск, ул. Купревича, 10. Тел. +375 017 267-60-10 (приемная), +375 017 367-06-05 (ученый секретарь совета), факс +375 017 263-76-93, e-mail: priemnaya@phti.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ «ФТИ НАН Беларуси».

Автореферат разослан «05» июня 2023 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д 01.18.01, кандидат технических наук



С.Д. Латушкина

ВВЕДЕНИЕ

В промышленности достаточно широко используются высокопрочные чугуны с шаровидным графитом (ВЧШГ) в качестве конструкционного материала. Однако их применение для более жёстких условий эксплуатации ограничивается недостаточным уровнем механических свойств и невысокой износостойкостью.

Эффективным средством для повышения свойств ВЧШГ (до 2-х и более раз) является термообработка, при которой в матрице чугуна формируется специфическая структура смеси остаточного аустенита (γ -Fe) и игольчатого феррита (α -Fe), называемая аусферритом. Для ее формирования при охлаждении от температуры аустенизации и изотермической выдержки используют энергоёмкие ванны с расплавами солей, щелочей или металлических расплавов на основе Pb, Zn, Sn и Sb. Использование большого объема экологически небезопасных жидких сред требует повышенных энергозатрат. Кроме того, фактором, сдерживающим более широкое применение таких материалов, является использование дорогостоящих элементов Ni, Mo, Cr (от 5 до 10 мас. %) для повышения прокаливаемости при закалке.

Вместе с тем, изделия из ВЧШГ характеризуются меньшей на 10 % удельной массой в сравнении со сталью, обладают более высокой износостойкостью, демпфирующей способностью, сопротивлением усталостному разрушению и могут рассматриваться как альтернатива различным высоколегированным железоуглеродистым сплавам.

Перспективным является разработка экономно легированных составов чугунов с аусферритной или аусферритно-карбидной структурой и высокой устойчивостью к распаду переохлажденного аустенита, что может быть достигнуто путем изотермической закалки с использованием сжатого воздуха. Поэтому необходимо изучение закономерностей кинетики превращения переохлажденного аустенита в процессе их закалки, т.е. построение диаграмм изотермического распада при различном содержании легирующих (Cu, Mo, Cr, Al) и дополнительных микролегирующих (B) добавок, что позволяет при меньшей в 2–10 раз скорости охлаждения сформировать требуемую аусферритную или аусферритно-карбидную структуру. В то же время задача состоит и в установлении влияния размера и морфологии исходной (литой) структуры на кинетику данных превращений, которые могут контролироваться модифицированием и дополнительной ультразвуковой обработкой (УЗО).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Результаты диссертационной работы получены в рамках выполнения заданий: ГНТП «Инновационное машиностроение и машиностроительные технологии», дог. № ТМ 3.19 по заданию «Разработка технологии и комплекса оборудования для дуплекс-процесса получения марочных железоуглеродистых сплавов и отливок из них с использованием низкосортных железосодержащих отходов» от 31.12.2020 г.; НИР № 2018/212 «Исследование способов получения высокопрочных модифицированных чугунов при физическом воздействии в процессе кристаллизации» от 04.07.2018 г.; НИР № 2018/122А «Разработка железоуглеродистых материалов с аусферритной структурой» от 23.04.2018 г.; грантов БРФФИ № Т19М-119 «Исследование особенностей изотермического распада переохлажденного аустенита в условиях струйного охлаждения изделий из высокопрочных чугунов» от 02.05.2019 г. и № Т22М-056 «Разработка составов и способов повышения свойств износостойких графитизированных чугунов для изделий, работающих в условиях абразивного воздействия» от 04.05.2022 г.

Цель и задачи исследования

Цель работы – разработка составов высокопрочных чугунов с аусферритной и аусферритно-карбидной матрицей для изделий с повышенной износостойкостью.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- изучить кинетику изотермических превращений в высокопрочных чугунах при их легировании добавками на основе Cu-Cr-Mo-Al-B;
- исследовать влияние модифицирования и УЗО на размер и морфологию литой структуры чугуна, а также определить влияние размера шаровидного графита чугуна на кинетику изотермического превращения в нем;
- определить влияние углеродного эквивалента ($C_{ЭК}$) в совокупности с добавками карбидообразующих (Cr, Mn, Mo, V) и не карбидообразующих (Cu, Al, Ni) элементов на формирование аусферритной и аусферритно-карбидной матрицы в чугунах, провести сравнительные испытания свойств;
- разработать технические условия на чугун с аусферритно-карбидной матрицей и технологию струйно-воздушной изотермической закалки отливок из него.

Объект исследования: износостойкие отливки из высокопрочных чугунов с аусферритной и аусферритно-карбидной матрицей.

Предмет исследования: химический состав, структурно-фазовое состояние и свойства отливок из высокопрочных чугунов.

Научная новизна

1. Установлено влияние легирования Cu, Mo, Cr и микролегирования В и Al на кинетику изотермических превращений структуры чугунов, что позволило определить пределы содержания в них легирующих элементов (Cu от 0,4 до 0,52 мас. %, Mo от 0,2 до 0,21 мас. %, Cr от 0,18 до 0,2 мас. %, В до 0,02 мас. % и Al до 0,12 мас. %), обеспечивающие устойчивость аустенита в областях перлитного и промежуточного превращений до 60 с и 120 с соответственно, обуславливающую формирование в них аусферритной структуры при закалке методом струйно-воздушного охлаждения.

2. Определены закономерности формирования литой структуры чугуна при динамическом затвердевании расплава за счет подвода к нему ультразвуковых колебаний частотой 21-23 кГц и мощностью 1 кВт, заключающиеся в увеличении количества центров кристаллизации и сопутствующих этому эффектов ультразвуковой кавитации и звукового ветра.

3. Установлены особенности формирования мелкодисперсного (толщиной 300 – 450 нм) игольчатого феррита в аусферритной матрице чугунов в диапазоне температур 250 – 400 °С при охлаждении в расплаве солей с дополнительной ультразвуковой обработкой, что позволило обеспечить повышение его механических свойства.

4. Разработана математическая модель процесса струйно-воздушного охлаждения чугуна при закалке, связывающая давление и расход сжатого воздуха с температурно-временными параметрами охлаждения чугуна при индукционно-спрейерной и струйно-воздушной закалке с показателями прочности и пластичности чугунов, позволившая оптимизировать режимы закалки, повысить прочность литых чугунов на 30-40 % и их пластичность на 10 %.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально установленные пределы содержания легирующих элементов в высокопрочных чугунах системы Fe–C–Cu–Mo–Cr–Al–S, составляющие, в мас. %: 0,40-0,52 Cu; 0,20-0,21 Mo; 0,18-0,33 Cr; 0,10-0,14 Al и 0,01-0,02 В, отличающиеся повышенной устойчивостью аустенита в области перлитного превращения до 160 с, а в области промежуточного превращения до 120 с, что позволяет формировать аусферритную структуру металлической матрицы чугунов при воздушной закалке отливок с критической скоростью охлаждения в диапазоне от 2 до 5 °С/с.

2. Особенности формирования литой структуры высокопрочных чугунов со средним размером (диаметром) графитовых включений 10-20 мкм и дисперсной металлической матрицы размером зерна 30-40 мкм, полученной при динамическом затвердевании расплава за счет подвода к нему ультразвуковых колебаний частотой 22 кГц и мощностью 1 кВт, что приводит к одновременному повышению прочностных свойств на 20-30 % и пластичности на 10-15 %.

Установлено влияние размера шаровидного графита в литой структуре чугуна на процесс формирования аусферритной матрицы при изотермической закалке, заключающееся в сокращении времени аусферритного превращения в 1,5 раза при уменьшении среднего диаметра графитовых включений с 120 до 20 мкм.

3. Экспериментальные зависимости количества остаточного аустенита от величины углеродного эквивалента (от 4,4 до 4,6 %) и концентрации Cr (от 0,18 до 2,2 мас. %) при воздушной закалке чугунов, позволившие увеличить его содержания от 10-15 до 28-30 %, что обеспечило формирование аусферритной матрицы с высокими механическими свойствами ($\sigma_B=1100$ МПа; 360-380 НВ; $\delta=8\%$; КС=40-50 Дж/см²), а также аусферритно-карбидной матрицы с высокой твердостью, удовлетворительной прочностью и вязкостью (55-60 HRC; $\sigma_B=350-400$ МПа; $\delta=2\%$; КС=15-20 Дж/см²) при изотермической закалке с аустенизацией при 910 ± 5 °С в течение 40 мин, закалочном охлаждении со скоростью 10-80 °С/с и последующей изотермической выдержкой при 300-350°С в течение 30 мин.

4. Результаты моделирования процессов распределения температуры в чугунных отливках при охлаждении, позволившие определить требуемый расход воздуха (0,03 – 0,05 кг/с) и время охлаждения (от 20 до 120 с) в зависимости от их массы и размеров, требуемые для разработки технологии получения и термоупрочнения деталей шестерен КПП и лопаток дробеметных установок, что позволило повысить их износостойкость при аусферритной матрице (сплав, легированный в мас. %: 0,33 Cr; 0,44 Cu; 0,20 Mo; 0,10 Al; 0,015 V) на 30 % и при аусферритно-карбидной матрице (сплав, легированный в мас. %: 1,8 Cr; 0,51 Ni; 0,65 Cu; 0,102 Al; 0,015 V) на 20 %, по сравнению с чугунами марки ВЧ50 и ИЧХ17 соответственно.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные научные и практические результаты диссертации получены соискателем самостоятельно. Автором лично получены образцы различных составов высокопрочных чугунов; выявлены закономерности формирования структуры чугунов при статической и динамической кристаллизации расплава; изучена кинетика фазовых превращений в чугунах при изотермической закалке, а также построены диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита для чугунов различных составов.

Совместно с научным руководителем, д.т.н., проф. Волочко А.Т. были определены цель и задачи исследований, а также сформулированы основные положения диссертации, её научные выводы и практические рекомендации. Профессор А. Нофаль, академик Марукович А.П. д.т.н., член-кор. НАН Беларуси Рубаник В.В., д.т.н. Рубаник В.В. мл, к.т.н. Марков Г.В, научные сотрудники ГНУ ИТА НАН Беларуси Луцко В.Ф., Савицкий В.О, Янусов В.А., Самолетов В.Г., Лабетский В.С., Гутев А.П. принимали участие в выборе методик исследований и анализе результатов. Анализ и моделирование процессов ультразвуковой

обработки расплава чугуна проводился совместно с научными сотрудниками Магдебургского университета им. Отто фон Герике (Германия) М. Ахмедом, Э. Ридель и Р. Бер, моделирование процессов закалочного охлаждения в чугунных отливках осуществлялось совместно с Зизико А.В. (ФТИ НАН Беларуси). Помощь в получении экспериментальных партий из разработанных составов чугунов осуществляли к.т.н. Королев С.П. и к.т.н. Трубицкий Р.Э.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 7 международных симпозиумах, конференциях и семинарах, в т.ч.: XIII международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», 12-14 сентября 2018 г., г. Минск, Беларусь; международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии», 23-27 мая 2021 г., г. Минск; МНТК «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2022), 28–30 июня 2022 г., г. Гомель, Беларусь; IV МНТК «Наука и технологии модифицирования чугуна», 18-19 октября 2022, Набережные Челны, Россия, и др.

За установление кинетики распада переохлажденного аустенита при физико-химическом воздействии на процесс кристаллизации и последующей термической обработке, разработку экономнолегированных составов высокопрочных чугунов, позволяющих проводить их изотермическую закалку менее энергозатратным и трудоемким способом в 2021 г. присуждена стипендия Президента РБ.

Проект «Высокопрочные чугуны с аусферритной структурой» стал победителем республиканского молодежного инновационного проекта «100 идей для Беларуси» в секции «Промышленные и строительные технологии» в 2022 г.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, из которых 5 – статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 3,33 авторского листа), 3 – статьи в других научных изданиях, 7 – статьи в сборниках материалов и трудов научных конференций, 2 – тезисы докладов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 203 страницы, включая 96 рисунков, 27 таблиц, библиографический список из 151 источника (в том числе 17 публикаций автора) и 4 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** рассмотрена общая классификация чугунов и особенности формирования их структуры при литье, модифицировании и термической обработке. Приведен обзор способов получения в матрице чугунов графита шаровидной формы, т.е. высокопрочных чугунов. Отмечено, что данные чугуны обладают наибольшей прочностью среди железоуглеродистых сплавов данного класса. Проведен анализ диаграмм изотермического распада переохлажденного аустенита при использовании различных легирующих элементов. Рассмотрен механизм повышения прокаливаемости за счет различных легирующих элементов.

Проведен анализ основных способов повышения эксплуатационных свойств чугунов как за счет изменения структурного состояния на стадии их кристаллизации при внешнем физическом воздействии (в т.ч. при УЗО), так и при дальнейшей термической обработке.

Во **второй главе** представлено описание материалов и оборудования, а также методик исследования и обработки экспериментальных данных, которые были использованы при проведении исследований для решения поставленных задач.

Плавку шихтовых компонентов проводили в индукционной тигельной печи ИСВ 0.04, сфероидизирующее и графитизирующее модифицирование осуществляли в подогретом тигле. УЗО расплава чугуна осуществляли с использованием генератора ультразвуковых колебаний УЗГ 20-15 с выходной мощностью 1 кВт и частотой тока 21-23 кГц.

Термическую обработку осуществляли в лабораторных печах камерного и шахтного типа, закалочное охлаждение при изотермической закалке проводили с использованием расплавов солей и с подачей сжатого воздуха. Температуру образцов в процессе нагрева и охлаждения контролировали при помощи тепловизора VarioCAM HD head 900 с отображением распределения температурных полей в ПО «IRBIS 3.1», а также оптического пирометра Optris СТ 3М.

Металлографические исследования проводились с использованием металлографического комплекса МИКРО 200. Фазовый состав определялся на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. Распределение структурных элементов и элементный состав матрицы чугунов определяли с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3.

Механические свойства определяли с использованием универсальной разрывной машины WDW-100E, твердомеров ТШ-2М, ТК-2М, ТКМ-459 и маятникового копра МК-30. Определение износа измеряли по изменению

профиля поверхности после триботехнических испытаний на профилометре Mitutoyo SurfTest SV-2100, а также по изменению массы образца после испытаний.

Устойчивость переохлажденного аустенита в чугунах определяли структурным, дюрOMETрическим (твердомер ТШ-2М) и дилатометрическим (дилатометр Quenching LINSEIS L87/RITA) методами.

Для моделирования процессов кристаллизации, нагрева и охлаждения экспериментальных образцов из высокопрочных чугунов применяли программное обеспечение FLOW-3D v12.043, FlowSight v12.0.44 и Universal 2D.

В третьей главе рассмотрено влияние легирования добавками на основе Cu-Cr-Mo-Al-B и размера шаровидного графита на особенности кинетики фазовых превращений в чугуне в области перлитного (700-500 °С) и промежуточного (450-200 °С) распада

Для выбора оптимальной концентрации углерода и кремния в чугуне было изучено влияние углеродного эквивалента на устойчивость аустенита к распаду в процессе закалочного охлаждения с построением диаграмм начала изотермического распада (рисунок 1). Установлено, что наибольшей устойчивостью аустенита обладают чугуны с показателем углеродного эквивалента близким к эвтектическому ($\approx 4,26\%$). В этом случае минимальное время устойчивости аустенита в области перлитного распада при 650 °С составляет около 5 с (рисунок 1а), а в области промежуточного превращения при 300-400 °С около 50 с (рисунок 1б).

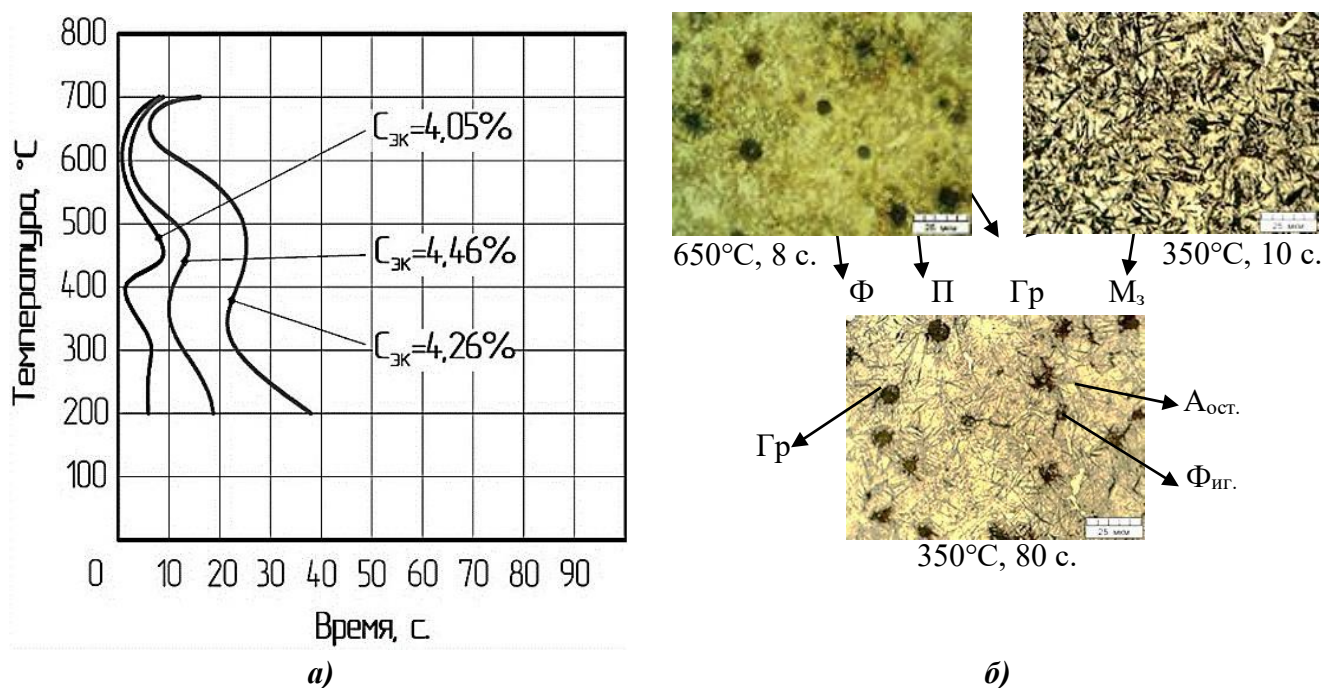
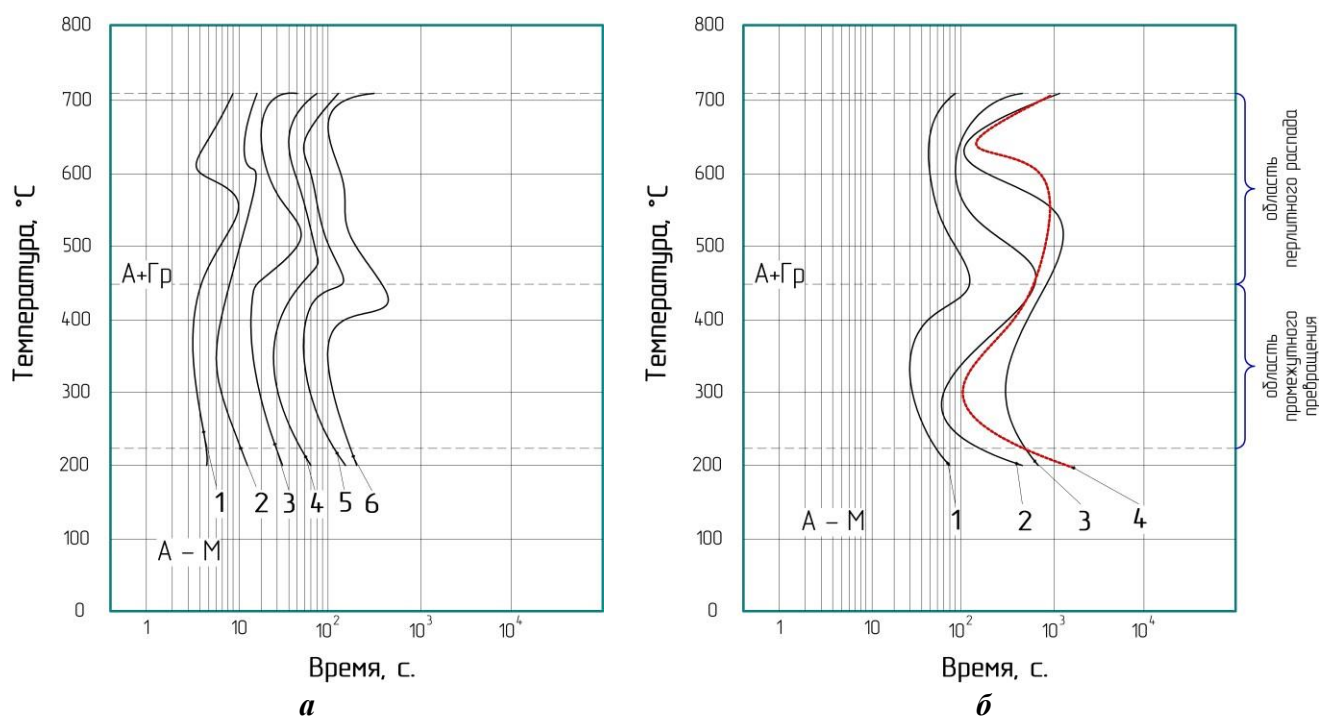


Рисунок 1. – Кривые начала изотермического распада переохлажденного аустенита в чугунах с различным C_3 (а) и структура эвтектического чугуна ($C_3 = 4,26\%$) после различной температуры и времени выдержки (б), $T_n = 920\text{ °С}$

Исходя из построенных диаграмм показано, что получение аусферритной матрицы в чугунах при изотермической закалке подразумевает создание высокой устойчивости переохлажденного аустенита в области перлитного распада с целью снижения критической скорости закалки (скорости охлаждения), что возможно при использовании дополнительного легирования или микролегирования.

Для оценки эффективности использования комплексного легирования и микролегирования (рисунок 2) были изучены чугуны, содержащие различные концентрации Cu (как наиболее дешевого из традиционно применяемых легирующих элементов), а также Cu с микродобавками V , который растворяясь в металлической матрице при нагреве концентрируется в приграничных слоях зерен аустенита и приводит к сдерживанию роста самих зерен и их стабилизации в процессе переохлаждения. При содержании Cu менее 0,4 % не происходит заметного влияния на прокаливаемость чугунов, а при ее концентрации свыше 1,2 % происходит выделение крупных включений медистой фазы, которые ухудшают его свойства, поэтому концентрация Cu в экспериментальных образцах изменялось от 0,4 до 1,2 %, а содержание V находилось в пределах 0,01÷0,02 % (рисунок 2а).



Содержание легирующих элементов, в мас. %:

- а) 1: $\text{Cu } 0,4$; 2: $\text{Cu } 0,8$; 3: $\text{Cu } 1,2$; 4: $\text{Cu } 0,4 + \text{V } 0,02$; 5: $\text{Cu } 0,8 + \text{V } 0,018$; 6: $\text{Cu } 1,2 + \text{V } 0,016$;
 б) 1: $\text{Cu } 0,4 + \text{Mo } 0,2 + \text{V } 0,015$; 2: $\text{Cu } 0,6 + \text{Mo } 0,21 + \text{V } 0,017$; 3: $\text{Cu } 0,8 + \text{Mo } 0,2 + \text{V } 0,018$; 4: $0,51 \text{ Cu} + 0,21 \% \text{ Mo} + 0,19 \% \text{ Cr} + 0,11 \% \text{ Al} + 0,01 \% \text{ V}$

Рисунок 2. – Влияние добавок Cu-V (а) и Cu-Mo-V (б) на кинетику устойчивости переохлажденного аустенита, $T_{\text{н}}=920 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Построенные кривые начала изотермического превращения показывают, что добавки 0,4 % Cu (кривая 1, рисунок 2а) способствуют увеличению минимальной устойчивости переохлажденного аустенита с 1,5 до 7 с в области перлитного превращения и с 2 до 8 с в области промежуточного превращения. Постепенное повышение содержания Cu до 1,2 % (кривая 3, рисунок 2а) позволяет повысить устойчивость аустенита до 80 и 60 с в перлитной и промежуточной областях соответственно.

Совместное легирование Cu и В также повышает минимальную устойчивость переохлажденного аустенита. Так, добавка 0,016 % В (кривая 6, рисунок 2а) повышает минимальные устойчивости с 80 до 120 с и с 60 до 100 с в перлитной и промежуточной областях соответственно в сравнении с чугуном, легированным только Cu.

Для оценки эффективности использования комплексного легирования и микролегирования также были исследованы экспериментальные образцы чугунов со следующим диапазоном концентраций элементов: 0,4-0,8 % Cu, 0,2-0,21 % Mo и 0,01-0,02 % В. Полученные данные указывают на значительный рост прокаливаемости чугуна при легировании данными комплексами (рисунок 2б). При этом, дополнительные добавки Mo позволяют сокращать содержание Cu в чугуне до двух раз при сохранении такого же уровня устойчивости к распаду аустенита – около 120 с при 600-700°C.

Для максимально возможного снижения основных легирующих компонентов в чугуне и получения высокой прокаливаемости проведена оценка влияния комплексного легирования на основе Cu-Mo-Cr-Al и микродобавок В на закономерности распада переохлажденного аустенита. Установлено, что использование комплексного легирования на основе 0,48-0,52% Cu; 0,20-0,21 % Mo; 0,18-0,21 % Cr; 0,10-0,12 % Al; 0,01-0,02 % В (рисунок 2б, кривая 4) позволяет повышать устойчивость переохлажденного аустенита в области перлитного распада до 160 с. При этом область промежуточного распада на диаграмме изотермического распада сдвигается вправо с устойчивостью порядка 120 с., что приводит к более быстрому формированию аусферритных структур в чугуне при выдержке в данной области.

Таким образом, использование микродобавок бора позволяет заменять более дорогие легирующие элементы (Ni, Mo), а также уменьшать концентрацию Cu в чугуне при сохранении высокого уровня прокаливаемости, а добавки комплекса легирующих элементов на основе Cu-Cr-Mo-Al-B сдвигают область промежуточных превращений на диаграммах изотермического распада влево, что дает возможность более быстрого начала формирования аусферритной структуры в чугуне.

С помощью дилатометрических исследований (рисунок 3) определено влияние исходной структуры, в первую очередь размера шаровидного графита, на

время полного превращения аустенита в аусферрит при изотермической выдержке (рисунок 3а). Установлено, что уменьшение среднего размера графита с 125 до 20 мкм (рисунок 3б) позволяет сократить время превращения в 1,5 раза.

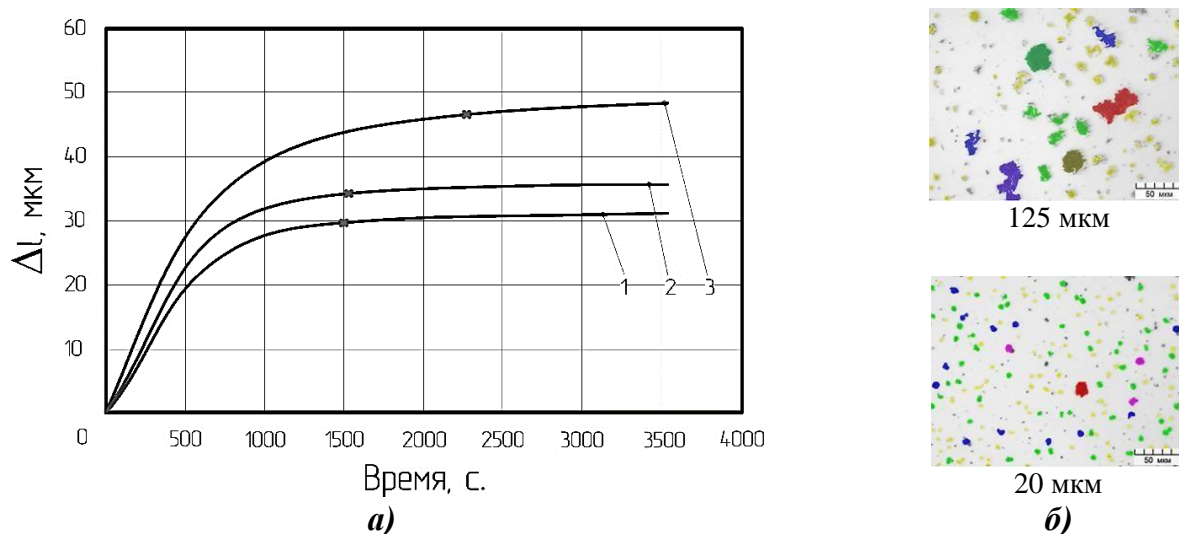


Рисунок 3. – Дилатометрические кривые изотермического превращения в образцах из высокопрочных чугунов с различным средним размером шаровидного графита, мкм: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 125 (а) и структура чугунов со средним размером графита 125 и 20 мкм (б)

Четвертая глава посвящена исследованию влияния модифицирования и УЗО на формирование литой структуры чугуна, а также исследованию влияния температурно-временных параметров и способов изотермической закалки на характер и свойства формирующейся аусферритной и аусферритно-карбидной матрицы в чугунах.

Размер и морфология литой структуры влияет не только на кинетику фазовых превращений переохлажденного аустенита, но и определяет свойства чугунов. Среди способов изменения дисперсности графита (до 10-20 мкм) в высокопрочном чугуне исследовано влияние количества магнийсодержащего модификатора и воздействия ультразвуковых колебаний (УЗК).

Установлено, что для получения шаровидного графита правильной формы (ШГф 4-5 по ГОСТ 3443-87) со средним размером 10-20 мкм за счет модифицирования количество магнийсодержащего модификатора необходимо не менее 2,0÷2,5 % от массы расплава чугуна (рисунок 4). В то же время показано, что дополнительное ультразвуковое воздействие в процессе кристаллизации чугунов различных структурных состояний позволяет получать шаровидный графит среднего размера 10-20 мкм при добавлении 1 % комплексного магнийсодержащего модификатора. Таким образом, использование УЗО расплава

чугуна позволяет снижать расход используемых сфероидизирующих модификаторов в 2÷2,5 раза.

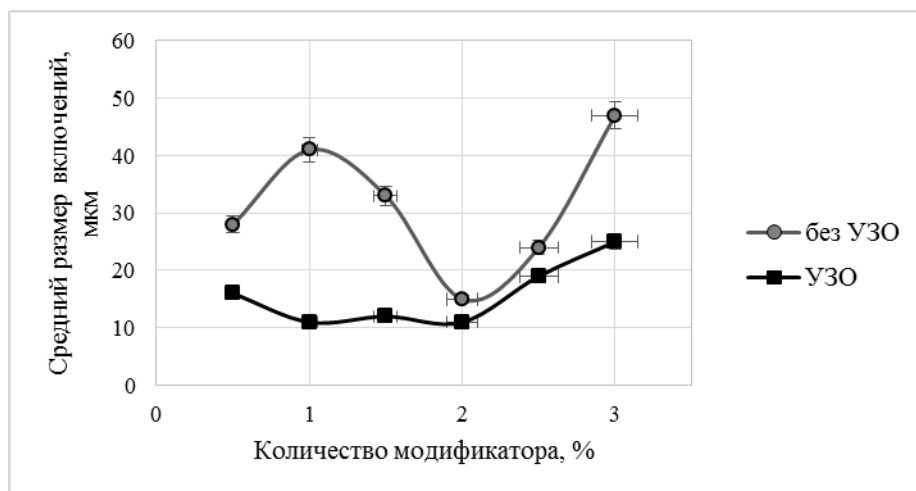


Рисунок 4. – Зависимость средних размеров графитовых включений в чугуне от содержания комплексного модификатора и условий кристаллизации

Использование УЗК при кристаллизации расплава чугуна позволяет увеличить количество дисперсных графитных включений со средним размером 10 мкм с 30 до 55-80 % от занимаемой площади графитовой фазы. Установлено, что для эвтектических и заэвтектических чугунов наблюдается более выраженная степень измельчения шаровидного графита. Изменения в морфологии графитных включений в чугуне сказываются и на его свойствах. Наименьший прирост твердости (около 5 %) при УЗО наблюдается в чугунах с доэвтектической структурой, а в чугунах эвтектического и заэвтектического класса прирост твердости составляет 12 и 15 % соответственно.

Следующим направлением использования УЗК, применительно к процессам получения высокопрочных чугунов, стала УЗО жидких охлаждающих сред на стадии их термической обработки. Установлено, что дополнительная УЗО расплава смеси солей (50 % NaNO_2 и 50 % KNO_3) при закалке нелегированных чугунов позволяет значительно интенсифицировать процесс охлаждения. После изотермической выдержки при 350°C в течении 1 минуты в расплаве солей без УЗО в матрице чугуна формируется ферритно-карбидная смесь твердостью 220 НВ. При выдержке чугуна в расплаве солей с дополнительной УЗО (частотой 22,4 кГц) в течении такого же времени в матрице происходит формирование аусферритной структуры твердостью 265 НВ. Следовательно, такой способ изотермической закалки позволяет повышать закаливаемость чугунов и сокращать время обработки в целом.

Для чугунов, легированных добавками на основе Cu-Cr-Mo-Al-B, определены особенности морфологии, фазового состава и свойства аусферритной

структуры, получаемой при различных скоростях охлаждения. Сравнительно изотермическая закалка проводилась по следующему режиму: нагрев (аустенизация) до 915 ± 5 °С, выдержка в течении 30-60 минут, закалочное охлаждение до 300 °С со скоростью 10-250 °С (в зависимости от используемого типа среды) и изотермическая выдержка при 300 °С в течении 60 минут.

Экспериментальные исследования показали, что наиболее высокий уровень свойств достигается в чугунах при его закалочном охлаждении со скоростью 10-60 °С/с, что достигается при использовании струйно-воздушного способа подачи охлаждающего воздуха давлением не менее 0,5-0,6 МПа (рисунок 5). В этом случае достигается уровень предела прочности до 1100 МПа и твердости до 380 НВ при относительном удлинении образцов свыше 8 % и ударной вязкостью 40-50 Дж/см².

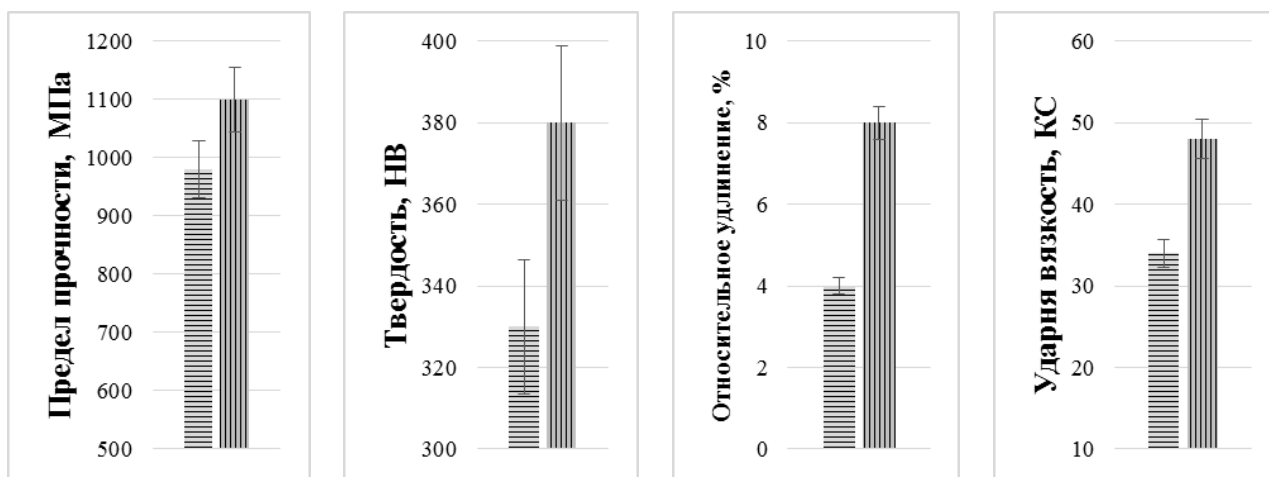
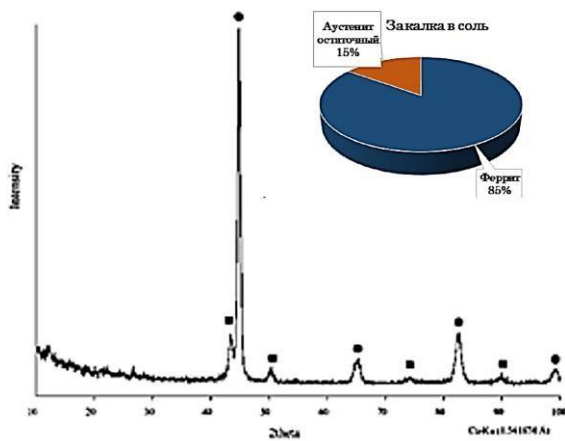
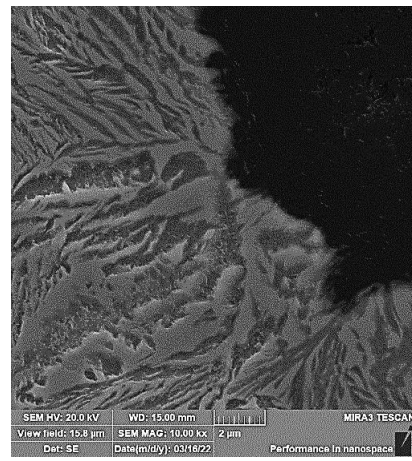
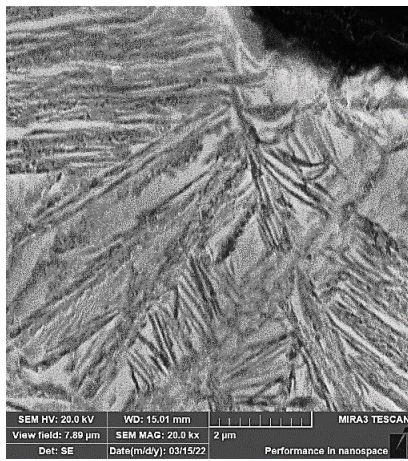
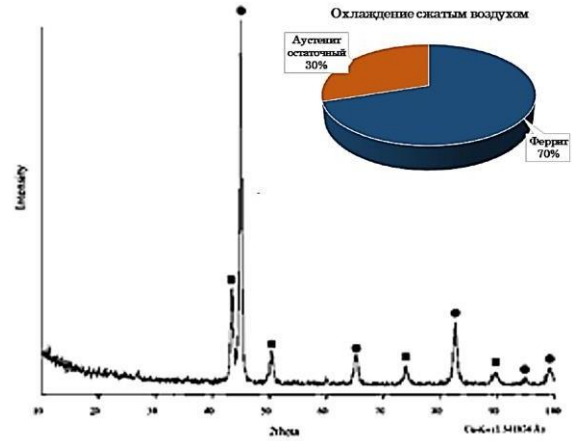


Рисунок 5. – Механические свойства чугунов с аусферритной матрицей, полученной в расплаве солей (горизонтальные линии) и сжатым воздухом (вертикальные линии)

Исследования структурно-фазового состава (рисунок 6) также показали отличия в аусферритной матрице, полученной при закалке в расплаве солей и при струйно-воздушной закалке. Пластинки феррита (видимые как иглы в плоскости шлифа) в случае закалки в солях имеют более строго ориентированную форму (рисунок 6а), тогда как после струйно-воздушного закалочного охлаждения их форма более разветвленная (рисунок 6б). Фазовый анализ исследуемых чугунов показал также и различное содержание остаточного аустенита в аусферритной матрице: 18 % в чугуне, закаленном в расплаве солей, и 30 % в чугуне, закаленном сжатым воздухом. Изменение его количества в 2 раза, по всей видимости, и является основным фактором получения более высокого уровня свойств в высокопрочных чугунах.



a



б

a) закалка в расплаве солей (x20000);
б) струйно-воздушная закалка (x10000)

Рисунок 6. – Микроструктура и фазовый состав чугуна после изотермической заковки в различных средах

Для получения чугунов, обладающих повышенной стойкостью при работе в ударно-абразивных условиях, возможно использование дополнительного легирования Cr с целью формирования в их металлической матрице карбидной структуры. При этом, важным является и сохранение в структуре стабильной фазы перлита или феррита в количестве свыше 50 %, чтобы в дальнейшем из них формировать аусферритную структуру. Поэтому для рационального выбора концентрации как основных компонентов чугуна (C и Si), так и дополнительно легирующих, проводилась оценка влияния углеродного эквивалента $C_{ЭК}$ и содержания Cr на твердость чугуна после заковки (рисунок 7). В этом случае максимальную твердость возможно получить при $C_{ЭК}$ в пределах 4,4-4,6 % при содержании 1,9-2,2 % Cr.

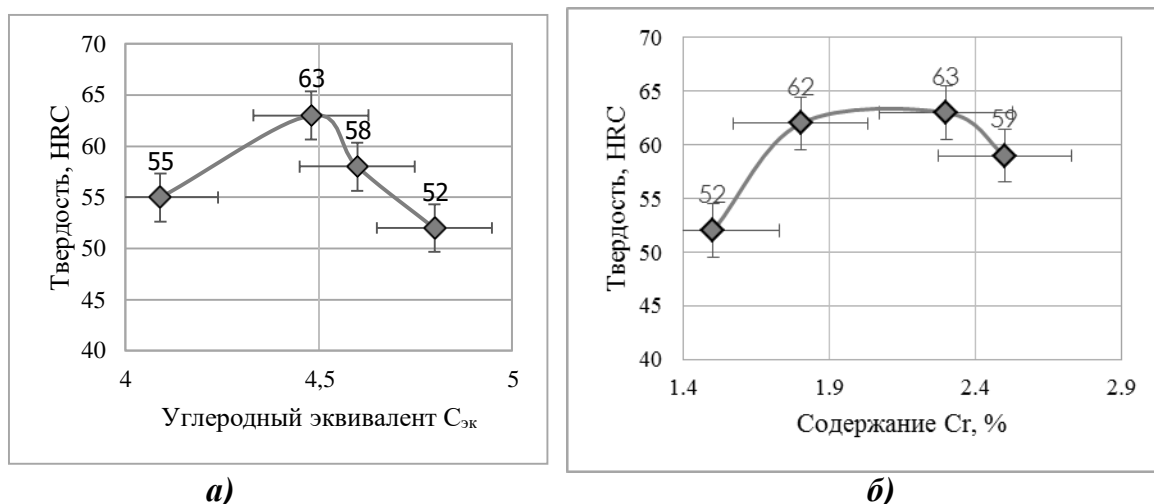


Рисунок 7. – Твердость чугуна с различным углеродным эквивалентом (а) и содержанием Cr (б) после закалки

В чугуне, легированном 1,8-2,2 % Cr; 0,5-0,6 % Ni; 0,6-0,7 % Cu; 0,10-0,15% Al; 0,01-0,015 % В, для получения наиболее высокой твердости и износостойкости были определены оптимальные температурно-временные параметры его изотермической закалки: нагрев до 915 °С с аустенизацией в течении 60 мин, струйно-воздушное охлаждение со скоростью 10 °С/с до 300 °С, изотермическая выдержка в течении 40 минут. В результате данной изотермической обработки матрица чугуна состоит из смеси аусферрита, в основном расположенного около графитовых сфероидов, и ледебуритно-карбидной эвтектики. Такой тип структуры придает чугуну не только высокую твердость (58-60 HRC) и прочность (350-400 МПа), но и высокую износостойкость, что было исследовано в следующей главе.

В пятой главе представлена разработка составов и технологии получения экономно легированных чугунов с аусферритной и аусферритно-карбидной матрицей, а также практическая реализация результатов экспериментальных исследований.

Разработана математическая модель процесса закалочного охлаждения чугунной отливки (цилиндра), которая выбиралась из условий, что в первоначальный момент времени $t = t_0 = 0$ температура в чугунном цилиндре распределена равномерно и равна $T = T_0 = const$, а охлаждение цилиндра происходит в среде с постоянной температурой $T_c = const$. На боковой поверхности цилиндра отвод тепла осуществляется при одинаковом коэффициенте теплоотдачи $\alpha = const$ во всем промежутке времени охлаждения. Отсчет температуры цилиндра для любого времени будем вести от температуры окружающей среды, т.е. $T - T_c = \theta$. Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности будет иметь вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right). \quad (1)$$

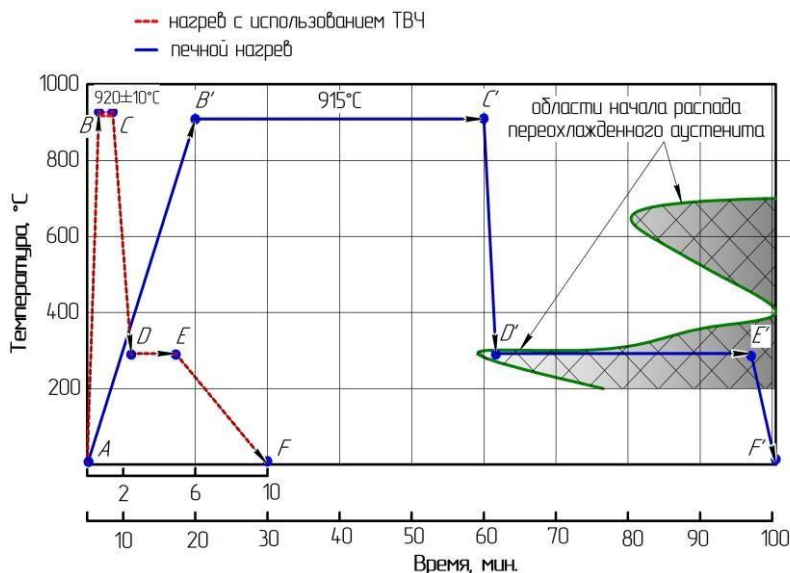
Из теплового баланса (1) для процесса струйно-воздушной закалки отливок из разработанных экономно легированных чугунов следует, что массовый расход охлаждающей среды (сжатого воздуха) при скорости охлаждения не ниже 6 °C/с можно рассчитать из выражения:

$$V = \frac{\pi r^2 l \rho c (T_0 - T_k) [1 - M(For_k)]}{c_B (T_c - T_H) t_k}, \quad (2)$$

где V – массовый расход сжатого воздуха; r – радиус обрабатываемой отливки; l – длина обрабатываемой отливки; ρ – плотность материала отливки; c – удельная теплоемкость материала; T_0 – начальная температура охлаждения; T_k – конечная температура закаливаемой отливки; c_B – удельная теплоёмкость воздуха; T_H и T_c – температуры охлаждения отливки; t_k – время охлаждения; $M(For_k)$ – многочлен из решения уравнения (1).

Из выражения (2) установлено, что массовый расход воздуха для охлаждения экспериментальных чугунных отливок с максимальной толщиной стенки 20 мм составляет $\approx 0,03$ кг/с. Показано, что создать такой поток воздуха можно при давлении воздуха не менее $2 \cdot 10^5$ Па, если размер выходного отверстия, через которое подается сжатый воздух, больше 2 мм.

Полученные данные стали основой для разработки технологии изотермической закалки различных изделий из аусферритных и аусферритно-карбидных чугунов (рисунок 8). Из аусферритного чугуна были получены различные отливки для коробки переключения передач: 154.1701055 «Шестерня четвертой передачи промежуточного вала» и 154.1701056 «Шестерня привода промежуточного вала» для ПАО «КАМАЗ». В этом случае, нагрев шестерен под аустенизацию производился с использованием ТВЧ (рисунок 8а, красная линия), так для данных отливок важны структура и свойства именно в приповерхностных слоях. Для индукционного нагрева и спрейерного охлаждения шестерен использовали одновитковый индуктор, содержащий перфорированный контур для подачи сжатого воздуха и контур водяного охлаждения непосредственно самого индуктора (рисунок 8б). Для производства лопаток дробеструйных барабанов ОАО «ЛЛМЗ» и ОАО «Амкодор» предложено использование разработанного чугуна с шаровидным графитом, дополнительно легированного Cr-Ni-Cu-Mo-Al-B, взамен используемым белым высокохромистым чугунам (>15 % Cr). Для получения аусферритно-карбидной металлической матрицы в данном чугуне разработаны технические условия на материал и технология термической обработки.

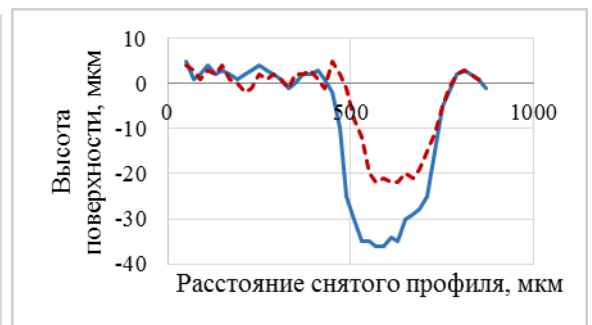
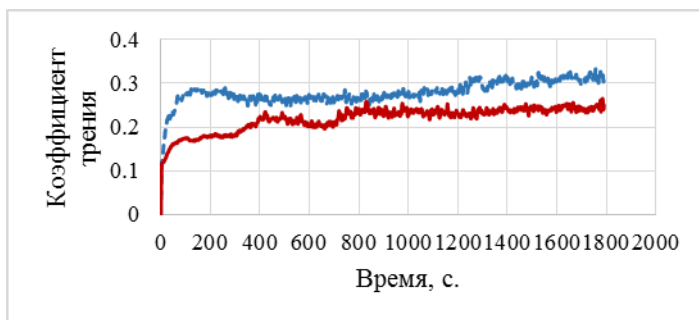


а)

б)

Рисунок 8. – Схема струйно-воздушной изотермической заковки шестерен и лопаток дробетных барабанов с использованием печного и индукционного нагрева (а), общий вид процесса заковки ТВЧ и обрабатываемых изделий (б)

Производственные испытания лопаток на ОАО «ЛЛМЗ» и ОАО «Амкор» показали увеличение их ресурса работы (в 1,5 раза) при использовании аусферритного чугуна взамен белого высокохромистого. Сравнение триботехнических характеристик аусферритного и белого высокохромистого указывают на большую износостойкость первого (рисунок 9).



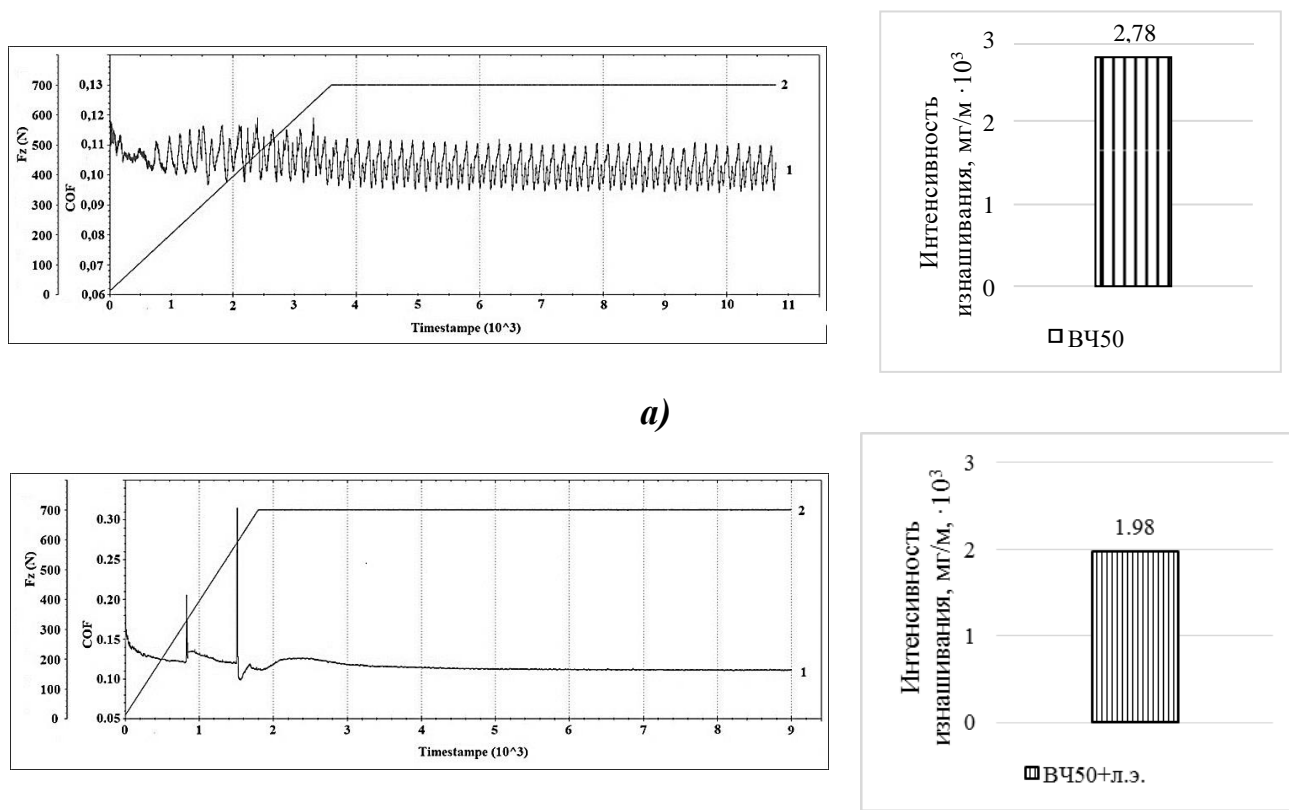
а)

б)

Рисунок 9. – Коэффициент трения (а) и износ (б) образцов из белых высокохромистых чугунов марки ИЧХ17 (синяя линия) и аусферритно-карбидных чугунов (красная линия)

После заковки ТВЧ шестерен с использованием сжатого воздуха в качестве охлаждающей среды твердость поверхности зубьев составила 34-36 HRC при сохранении мягкой (220-230 HB), но вязкой сердцевины ($K_{IC} = 55-62 \text{ Дж/см}^2$). Сравнение триботехнических характеристик легированного чугуна с аусферритной матрицей в сравнении с исходным ВЧ50 показывает стабилизацию

коэффициента трения и уменьшение интенсивности изнашивания с $2,78 \cdot 10^{-3}$ до $1,98 \cdot 10^{-3}$ мг/м (рисунок 10). Результаты испытаний отражены в акте о выполнении совместных исследований экспериментальных отливок шестерен ПАО «КАМАЗ».



а)

б)

Рисунок 10. – Сравнительные триботехнические характеристики при граничном трении образцов чугуна марки ВЧ50 (а) и дополнительно легированного Cu-Cr-Mo-Al-B (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлено влияние комплексного легирования добавками Cu, Cr, Mo и микролегирования В и Al на время начала структурно-фазовых изменений в области перлитного (700-400 °С) и промежуточного (400-250 °С) превращения при охлаждении от температуры аустенизации 910-920 °С, позволившее определить интервал критических скоростей закалки ($v_{кр}$), который снижается с 250-300 °С/с до 5 °С/с в случае оптимизации состава экономно легированного чугуна на основе Cu-Cr-Mo-Al-B [1, 2, 11, 13, 14, 17].

2. Установлены особенности формирования литой структуры высокопрочных чугунов, основанные на динамической интенсификации процессов кристаллизации за счет УЗО, что проявляется в диспергировании

графитовых включений с 125 до 10-20 мкм и измельчении ферритных зерен на 30 %. Это позволило при изотермической закалке сократить время полного превращения аустенита в аусферрит в 1,5 раза [3, 5-10, 12, 15].

3. Определены закономерности протекания аусферритного (промежуточного) превращения при 250-400 °С в высокопрочных чугунах при их изотермической закалке с использованием охлаждения в расплаве соли и дополнительной ультразвуковой обработки, выражающиеся в ускорении начала аусферритного превращения и формировании более равномерного и дисперсного игольчатого феррита в аусферритной структуре чугуна, что приводит к повышению механических свойств чугунов на 20-30 % [4,15].

4. Установлены особенности влияния скорости закалочного охлаждения на размер, морфологию и соотношение основных структурных составляющих металлической матрицы (остаточного аустенита γ -Fe и игольчатого феррита α -Fe). Показано, что уменьшение скорости охлаждения с 250-300 °С до 10-60 °С/с увеличивает долю остаточного аустенита с 15 до 30 % и позволяет повышать пластичность в 2 раза ($\delta=8\%$) и прочностные характеристики на 25-30 % ($\sigma_B=1100$ МПа; 360-380 НВ) [2, 13, 14, 17].

5. Установлены зависимости влияния углеродного эквивалента ($C_{ЭК}$) в совокупности с добавками карбидообразующих (Cr, Mn, Mo, V) и не карбидообразующих (Cu, Al) элементов на свойства износостойких ВЧ. Показано, что в этой системе при оптимальном содержании $C_{ЭК}=4,4-4,6$ % и Cr=1,8-2,2 % дополнительно формируется карбидная фаза типа $(Fe, Cr, Me)_3C$ в количестве до 30-40 %, что приводит к повышению прочностных характеристик (увеличение твердости до 55-60 HRC) и износостойкости, а также снижению коэффициента трения на 30 %. Сравнительные испытания разработанных аусферритно-карбидных чугунов показали их большую стойкость (на 20-30 %) в сравнении с высокохромистыми чугунами типа ИЧХ (15-25 % Cr) [2, 16].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Созданные составы материалов, технические условия и технология изотермической закалки отливок способствуют повышению эксплуатационных характеристик механизмов машин, снижению их себестоимости. При этом, обладая невысокой массой, повышенной износостойкостью, прочностью и ударной вязкостью ВЧШГ с аусферритной и аусферритно-карбидной структурой следует рассматривать как альтернативу высоколегированным железоуглеродистым сплавам. Сравнительные исследования свойств ВЧШГ с аусферритно-карбидной матрицей показали возможность их использования при работе в условиях ударно-абразивного изнашивания для дробеметного оборудования при замене дорогостоящих белых высокохромистых чугунов, содержащих более 15 % хрома.

Результаты исследований явились основой для разработки технических условий (ТУ ВУ 100185302/397-2022) на аусферритно-карбидный чугун и технологии термической обработки отливок из данных чугунов (МШЕЛ 01050.00050).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах и сборниках, включенных в перечень ВАК

1. Ковалько М.С. Анализ возможностей получения аусферритных структур в высокопрочных чугунах без применения жидких охлаждающих сред / М.С. Ковалько, А.Т. Волочко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редкол.: А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2018. – С. 85–93.

2. Формирование аусферритной и аусферритно-карбидной структур в высокопрочных чугунах при регулируемом воздушном охлаждении / А.Т. Волочко, М.С. Ковалько, Г.В. Марков // Вестник БРФФИ, №4, 2022. – С. 104–112.

3. Ahmed M., Riedel E., Kovalko M., Volochko A., Bähr R. Ultrafine Ductile and Austempered Ductile Irons by Solidification in Ultrasonic Field. // Inter Metalcast. – Tome XVI. – (2022) – p. 1463–1477.

4. Ковалько М. С., Волочко А. Г., Зизико А. В., Рубаник В. В. Формирование структуры и свойств в высокопрочном чугуне при его изотермической закалке с использованием ультразвука // Литьё и металлургия. 2020. №4, с.118–124.

5. Ковалько М.С. Влияние химического состава и условий кристаллизации на структуру и свойства высокопрочных чугунов в литом и термообработанном состояниях / Волочко А.Т., Рубаник В.В., Нофаль А. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редколлегия: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2020. — С. 25 — 35.

Статьи в сборниках материалов конференций и научных трудов

6. Исследование влияния нормализации на структуру и свойства наномодифицированных чугунов / М.С. Ковалько // Магистерский вестник: сборник научных работ магистрантов и аспирантов / редкол.: И. И. Ганчеренок [и др.] – Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – с. 28-32.

7. Исследование влияния ультразвуковой обработки на структуру и свойства чугунов различного структурного состояния / М.С. Ковалько, А.Т. Волочко, В.В. Рубаник, А. Nofal // Международный симпозиум «Перспективные

материалы и технологии». 27–31 мая 2019 года. Брест. Беларусь: материалы конференции / ИТА НАН Беларуси – Витебск. 2019 – 595 с. – С 490–493.

8. Влияние ультразвуковой обработки расплава чугуна и силуминов в процессе кристаллизации на свойства отливок / В.В. Рубаник, В.О. Луцко, В.О. Савицкий, А. Nofal, А.Т. Волочко, М.С. Ковалько // МНТК «Литейное производство и металлургия». – 2019. – С.89–95.

9. Crystallization of cast iron in ultrasonic field / V. Rubanik, A. Volochko, A. Nofal, V. Lutsko, V. Savitsky, V.jr. Rubanik, M. Kovalko, V. Yanysov // Nonequilibrium phase transformations. Issue 1(3) 2019, – p.111–113.

10. Влияние ультразвуковой обработки расплава чугуна и силуминов в процессе кристаллизации на свойства отливок / В.В. Рубаник, В.Ф. Луцко, В.О. Савицкий, мл. В.В. Рубаник, В.А. Янусов, В.Г. Самолетов, В.С. Лабецкий, Е.И. Марукович, А.П. Гутев, А. Нофал, А.Т. Волочко, М.С. Ковалько // Литейщик России, издательство: Общероссийская общественная организация «Российская ассоциация литейщиков» (Москва), 2020 – вып. 2. – С. 34 – 40.

11. Влияние содержания меди и бора на структуру, механические свойства и устойчивость переохлажденного аустенита изотермически закаленных высокопрочных чугунов / М.С. Ковалько, А.Т. Волочко, А.В. Зизико // Актуальные проблемы прочности: материалы международной научной конференции, Витебск, 25 – 29 мая 2020 года / под ред. В.В. Рубаника. 2020. – С. 203–206.

12. Effect of ultrasonic vibrations on the structure refinement of the ductile and austempered ductile iron alloys / Nofal A., Ahmed M., Bahr R., Rubanik V., Volochko A., Kovalko M. // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума, Минск, 23 – 27 августа 2021 г. / под. ред. В.В. Рубаника – Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации», 2021. – 475 с.

13. Структура и свойства рационально легированных высокопрочных чугунов после струйно-воздушной изотермической закалки / Ковалько М.С., Волочко А.Т. // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума, Минск, 23 – 27 августа 2021 г. / под. ред. В.В. Рубаника – Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации», 2021. – 475 с.

14. Особенности аусферритной матрицы, полученной в высокопрочном чугуне при его изотермической закалке с использованием струйно-воздушного охлаждения / Ковалько М.С., Волочко А.Т., Королев С.П. // Актуальные проблемы прочности: материалы международной научной конференции, Витебск, 23–27 мая 2022 года / под ред. В.В. Рубаника. – Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. – 440 с.

15. Использование УЗ-колебаний для интенсификации процессов получения дисперсной структуры в чугунах при кристаллизации и изотермической закалке / Ковалько М.С., Волочко А.Т., Рубаник В.В., Nofal A. // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: материалы IV международной научной конференции, Витебск, 29-31 марта 2023 г. / под. ред. чл.-корр. Рубаника В.В. – УП «ИВЦ Минфина», 2023. – 182 с.

Тезисы докладов на конференциях

16. Износостойкие высокопрочные чугуны с аусферритно-карбидной металлической матрицей / Ковалько М.С., Волочко А.Т., Трубицкий Р.Э. // Тезисы докладов международной научно-технической конференции. — Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2022. — с. 53.

17. Формирование аусферритной матрицы в экономно легированных чугунах при изотермической закалке с использованием сжатого воздуха / Волочко А.Т., Ковалько М.С., Трубицкий Р.Э. // Наука и технологии модифицирования чугуна: тезисы докладов Международной научно-технической конференции (Набережные Челны, 25–26 октября 2022 г.) / под ред. А.Г. Панова. – Казань: Издательство Казанского университета, 2022. – 36 с.



РЕЗЮМЕ

Ковалько Михаил Сергеевич

Высокопрочные чугуны с аусферритной и аусферритно-карбидной матрицей для изделий с повышенной износостойкостью

Ключевые слова: высокопрочный чугун, аустенит, графит, изотермический распад, изотермическая закалка, аусферритная матрица, карбиды, износостойкость

Цель работы: разработка высокопрочных чугунов с аусферритной и аусферритно-карбидной матрицей для изделий с повышенной износостойкостью.

Методы исследования: оптико-эмиссионный химический состав (SPECTROTEST ТХС325), оптическая и электронная микроскопия (Микро 200, Image SP, Tescan Mira 3), рентгеноструктурный фазовый анализ (ДРОН 3М), механические свойства (универсальная испытательная машина WDW-100E, твердомеры ТШ-2М, ТК-2М, ТКМ-459, маятниковый копер МК-30), определение профиля поверхности после триботехнических испытаний (Mitutoyo Surftest SV-2100), дилатометрические исследования (Quenching LINSEIS L87/RITA).

Полученные результаты и их новизна: разработаны составы высокопрочных чугунов с аусферритной и аусферритно-карбидной матрицей, отличающиеся высокой устойчивостью аустенита к распаду при охлаждении как в области перлитного (160 с), так и в области промежуточного превращения (до 120 с) при изотермической выдержке. Установлено влияние количества добавок при сфероидизирующем модифицировании и дополнительной ультразвуковой обработки на размер и морфологию формируемых включений шаровидного графита в чугунах. Определены закономерности формирования структуры, фазового состава и свойств разработанных экономно легированных чугунов в зависимости от размера исходной (литой) структуры и температурно-временных параметров изотермической закалки. Разработаны технические условия на аусферритно-карбидный чугун и технология его изотермической закалки с использованием сжатого воздуха.

Рекомендации по использованию и область применения: изделия, работающие в условиях ударно-абразивного износа (в литейной и горнодобывающей промышленности), детали трансмиссии грузовой техники в машиностроении.

РЭЗІЮМЭ

Кавалька Міхаіл Сяргеевіч

Высокатрывалыя чыгуны з аўсферытнай і аўсферытна-карбіднай матрыцай для вырабаў з павышанай зносастойкасцю

Ключавыя словы: высокатрывалы чыгун, аўстэніт, графіт, ізатэрмічны распад, ізатэрмічная загартоўка, аўсферытная матрыца, карбіды, зносастойкасць.

Мэта работы: распрацоўка высокатрывалых чыгуноў з аўсферытнай і аўсферытна-карбіднай матрыцай для вырабаў з павышанай зносастойкасцю.

Метады даследавання: опытка-эмісійны хімічны састаў (SPECTROTEST ТХС325), аптычная і электронная мікраскапія (Мікра 200, Image SP, Tescan Mira 3), рэнтгенаструктурны фазавы аналіз (Дрон 3М), механічныя ўласцівасці (універсальная выпрабавальная машына WDW-100E, цвёрдамеры ТШ-2М, ТК-2М, ТКМ-459, маятнікавы копер МК-30), вызначэнне профілю паверхні пасля трыбатэхнічных выпрабаванняў (Mitutoyo Surftest SV-2100), дылатаметрычныя даследаванні (Quenching LINSEIS L87/RITA).

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны саставы высокатрывалых чыгуноў з аўсферытнай і аўсферытна-карбіднай матрыцай, якія адрозніваюцца высокай устойлівасцю аўстэніту да распаду пры ахаладжэнні як у галіне перлітнага (160 с), так і ў галіне прамежкавага ператварэння (да 120 с) пры ізатэрмічнай трываласці. Устаноўлены ўплыў колькасці дабавак пры сфераізаваным мадыфікаванні і дадатковай ультрагукавой апрацоўкі на памер і марфалогію фарміруемых уключэнняў шарападобнага графіту ў чыгунах. Вызначаны заканамернасці фарміравання структуры, фазовага саставу і ўласцівасцей распрацаваных эканомна легіраваных чыгуноў у залежнасці ад памеру зыходнай (літой) структуры і тэмпературна-часавых параметраў ізатэрмічнай загартоўкі. Распрацаваны тэхнічныя ўмовы на аўсферытна-карбідны чыгун і тэхналогія яго ізатэрмічнай загартоўкі з выкарыстаннем сціснутага паветра.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення: вырабы, якія працуюць ва ўмовах ударна-абразіўнага зносу (у ліцейнай і горназдабыўной прамысловасці), дэталі трансмісіі грузавой тэхнікі ў машынабудаванні.

SUMMARY

Kovalko Mikhail S.

Ductile cast iron with ausferritic and ausferritic-carbide matrix for products with increased wear resistance

Keywords: ductile iron, austenite, graphite, isothermal decomposition, isothermal hardening, ausferritic matrix, carbides, wear resistance.

Objective: development of high-strength cast irons with ausferrite and ausferrite-carbide matrix for products with increased wear resistance.

Research methods: optical emission chemical composition (SPECTROTEST TXC325), optical and electron microscopy (Micro 200, Image SP, Tescan Mira 3), X-ray diffraction phase analysis (DRON 3M), mechanical properties (universal testing machine WDW-100E, hardness testers TSH-2M, TK-2M, TKM-459, MK-30 pendulum impact tester), determination of the surface profile after tribotechnical tests (Mitutoyo Surftest SV-2100), dilatometric studies (Quenching LINSEIS L87/RITA).

The results obtained and their novelty: compositions of ductile irons with ausferritic and ausferritic-carbide matrix have been developed, which are characterized by a high resistance of austenite to decomposition upon cooling both in the region of pearlitic (160 s) and in the region of intermediate transformation (up to 120 s) during isothermal holding. The influence of the amount of additives during spheroidizing modification and additional ultrasonic treatment on the size and morphology of the formed nodular graphite inclusions in cast irons has been established. The patterns of formation of the structure, phase composition and properties of economically alloyed cast irons developed depending on the size of the initial (cast) structure and the temperature-time parameters of isothermal hardening are determined. Specifications for ausferritic-carbide cast iron and technology for its isothermal hardening using compressed air have been developed.

Recommendations for use and scope: products operating in conditions of shock-abrasive wear (in the foundry and mining industry), transmission parts for trucks in mechanical engineering.

Подписано в печать 01.06.2023.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,395. Тираж 60 экз. Заказ № 191.

ФТИ НАН Беларуси.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/12 от 21.11.2013.
220084, ул. Академика Купревича, 10, г. Минск.