

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ

ШИМКО ВЛАДИМИР ИГОРЕВИЧ

УДК 621.785.796

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ
В СЫПУЧЕМ ГРАФИТЕ**

Специальность 05.16.01 – металловедение
и термическая обработка металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание научной степени
кандидата технических наук

Краматорск – 2013

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Донбасской государственной машиностроительной академии Министерства образования и науки Украины, г. Краматорск.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ЗАБЛОЦКИЙ ВЛАДИМИР КИРИЛЛОВИЧ,
Донбасская государственная машиностроительная академия, заведующий кафедрой «Технология и оборудование литейного производства», г. Краматорск

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
АЛИМОВ ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ,
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», профессор кафедры «Физическое материаловедение», г. Донецк;

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
БОРИСЕНКО АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ,
Института черной металлургии им. З.И. Некрасова
НАН Украины, старший научный сотрудник,
г. Днепропетровск.

Защита состоится «__» _____ в 2013 г. в _____ часов на заседании специализированного ученого совета Д12.052.01 ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»
87500, г. Мариуполь Донецкой обл., ул. Университетская, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»
87500, г. Мариуполь Донецкой обл., ул. Апатова, 115.

Автореферат разослан «__» _____ в 2013 г.

Ученый секретарь специализированного
ученого совета Д 12.052.01
доктор технических наук, профессор

_____ В.А. Маслов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важной задачей промышленности является энергосбережение ресурсов при термической обработке поковок и отливок из конструкционных сталей и чугунов. Известно, что высокий комплекс механических свойств в металлоизделиях обеспечивается мелкозернистой однородной структурой. Способы получения подобных структур за счет термической обработки являются весьма энергозатратными. В то же время в практике не известно применение технологий термообработки, в которых бы целенаправленно использовалось тепло, выделяющееся в металле в ходе фазовых превращений. Причиной этого является отсутствие эффективных охлаждающих сред, способных аккумулировать тепло фазово-структурных превращений и использовать его для регулирования протекания самих превращений. Данная диссертационная работа направлена на решение задач поиска подобной охлаждающей среды и получения данных об особенностях фазово-структурных превращений при охлаждении в выбранной среде с целью разработки на их основе новых энергосберегающих технологий термической обработки.

Поскольку решение указанных задач позволит значительно снизить энергозатраты на термическую обработку при обеспечении необходимого качества продукции, тема диссертации является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась согласно плану научно-исследовательских работ кафедры технологии и оборудования литейного производства ДГМА (Дк-03-2009 по теме «Влияние разных факторов технологии и оборудования на структурные превращения при литье, термической и химико-термической обработке сталей и чугунов», регистр. № 0109U007787); госбюджетной работы (Д-05-2011, «Исследование закономерностей формирования структуры сталей и чугунов при термической обработке с охлаждением в сыпучем графите», регистр. № 0111U000886), выполняемой в соответствии с приказом Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины от 20.11.2010 г. № 1177; хоздоговорных работ (Х-14-2012, «Совершенствование технологии термической обработки рабочих и опорных валков из существующих марок сталей и выдача рекомендаций по термической обработке валков из новых марок сталей», регистр. номер 0112U002830; Х-17-2012, «Оптимизация режимов термической обработки поковок из углеродистых и легированных сталей», регистр. номер 0112U004162). Соискатель участвовал в перечисленных работах в качестве исполнителя.

Цель и задание исследования. Цель работы заключается в совершенствовании режимов термической обработки сталей и чугунов путем исследования процессов структурообразования при охлаждении аустенитизированных изделий в сыпучем серебристом графите и разработка на этой основе новых энергосберегающих технологий термообработки поковок и отливок.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие научные и практические задачи:

1. На основании анализа литературных данных установить основные закономерности взаимодействия изделий из сталей и чугунов с охлаждающей средой в процессе термообработки и определить пути обеспечения высокого комплекса механических свойств.

2. Установить закономерности теплоотвода в среде сыпучего серебристого графита при погружении изделий.

3. Установить закономерности структурообразования в сталях и чугунах при непрерывном охлаждении в сыпучем серебристом графите.

4. Разработать технологические схемы применения сыпучего серебристого графита в термической обработке металлоизделий различной формы и массы.

5. Опробовать установленные закономерности фазово-структурных превращений при охлаждении в сыпучем серебристом графите в промышленных условиях.

Объект исследования. Процессы термической обработки поковок и отливок из сталей и чугунов.

Предмет исследования. Структурообразование в процессе термической обработки низколегированных конструкционных сталей и чугунов при охлаждении в сыпучем серебристом графите.

Методы исследований. Поставленные в работе задания решены путем исследования микроструктуры и фазового состава с применением следующих методов: металлографического (с тепловым и химическим травлением), магнитного, рентгеноструктурного, дюрOMETрического, термического анализа; исследования содержания газов в металле на установке газоанализатора фирмы «Leco».

Научная новизна полученных результатов:

1. Исследована кинетика превращения переохлажденного аустенита для новых валковых сталей 45X3ГНМФ, 70X5ВМФ, 80X3СВФ и впервые для этих сталей построены С-диаграммы распада аустенита в субкритическом интервале температур.

2. Впервые установлена возможность формирования требуемого фазово-структурного состояния в сталях и чугунах за счет использования тепла фазового превращения при охлаждении нагретых металлоизделий в сыпучем серебристом графите.

3. Выявлен эффект ускорения процесса вторичной графитизации белого нелегированного чугуна за счет охлаждения с температуры аустенитизации в сыпучем серебристом графите.

4. Показана возможность измельчения ферритного зерна и повышения однородности микроструктуры и механических свойств по сечению металлоизделий диаметром 20–60 мм из сталей, содержащих до 0,45 % С, за счет изменения охлаждающей способности сыпучего серебристого графита в процессе выдержки в нем аустенитизированных металлоизделий.

Практическое значение полученных результатов:

1. Разработаны на уровне патента (пат. № 43690) энергосберегающие режимы термической обработки поковок из конструкционных и валковых марок сталей с применением охлаждения в сыпучем серебристом графите.

2. Разработанные технологические решения опробованы на ПАО «НКМЗ» при производстве поковок из стали 40ХН. Ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии составляет 519,2 грн/т и достигается за счет отмены первичной термообработки поковок.

3. Разработанные технологические решения опробованы на предприятии ПАО «СКМЗ» при производстве отливок из стали 35ХМЛ. Ожидаемый экономический эффект опробованной технологии составляет 217 грн/т, достигается за счет отмены отпуска после нормализации отливок.

Личный вклад претендента. Все научные положения диссертационной работы, которое выносятся на защиту, сформулированы автором лично. Автору принадлежит: обоснование цели, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка результатов экспериментов и их анализ, подготовка статей к печати, участие в проведении производственных испытаний и опробование разработанной технологии в производстве.

Постановка заданий и обсуждения результатов исследований выполнено совместно с научным руководителем и соавторами статей.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: Международной научно-технической конференции, «Университетская наука – 2010», г. Мариуполь; Международной научно-практической конференции «Литье – 2010», г. Запорожье; Международной научно-технической конференции «Современные аспекты металловедения и термической обработки металлов», г. Мариуполь, 2010; Международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований – 2011», г. Одесса, 15–28 марта 2011 г.; Международной научно-технической конференции «Университетская наука – 2011», г. Мариуполь; III Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве», г. Краматорск, 12–16 сентября 2011 г.; Международной научно-технической конференции «Университетская наука – 2012», г. Мариуполь.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 14 работ, 8 работ в специализированных научно-технических журналах и сборниках, 5 тезисов докладов на научно-технических конференциях, 1 патент Украины.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов, общих выводов, перечня использованных источников литературы из 106 наименований, 8 приложений. Общий объем диссертации составляет 161 страницу, в том числе 64 рисунка, 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассмотрены технологии охлаждения при термической обработке в промышленности, обоснована актуальность выбранной темы, очерчен круг вопросов, которые требуют практических решений, сформулированы цель и задачи исследования, указана научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первом разделе проанализирована научная и техническая информация по применению разных видов термической обработки в промышленности. Отмечено, что из известных методов охлаждения при изотермической закалке, наиболее простым и доступными являются способы охлаждения в воде, масле (закалке на мартенсит) и расплавы солей и металлов (изотермическая закалка). Применение расплавов солей для изотермической закалки нуждаются в существенной модернизации из-за высокой сложности процесса и устройств для его приложения в крупносерийном производстве. Применение тепла фазово-структурного превращения позволило бы существенно упростить и видоизменить процессы изотермической закалки с введением новой закалочной среды, что позволит использовать это тепло. Однако в литературе данные по широкому применению тепла фазово-структурных превращений отсутствуют. Так же отсутствуют данные о новых закалочных средах, направленных на использование тепла фазово-структурных превращений. На основании литературного обзора сформулированы цели и задачи исследований.

Во втором разделе приведены химические составы используемых сталей и чугунов, описана методика экспериментов и конструкций лабораторных устройств для проведения непрерывного охлаждения образцов из температуры аустенитизации, а также построения диаграмм изотермического распада переохлажденного аустенита для новых марок сталей дюрOMETрическим методом. Особенное внимание было уделено металлографическому методу (увеличение до 2000 раз) с использованием химического и теплового травления. Фазовый состав сплавов изучали с помощью рентгеноструктурного анализа, на установке ДРОН-3М с применением железного нефильтрованного излучения при соотношении $\sin \theta \alpha / \sin \theta \beta \approx 1,1$. Микротвердость полученных структур определяли с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке 1 Н. Механические свойства стали изучали на образцах при растяжении и на ударный изгиб (по ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78). Механические свойства оценивали по уровню среднеарифметических значений по трем образцам для каждого вида испытаний. Содержание газов в металле определяли с помощью прибора газоанализатора фирмы «Leko» согласно ГОСТ 17745-90. Химический состав элементов в сталях и чугунах определялся с помощью спектрометра SpectroLaV согласно ГОСТ 18895-97.

В третьем разделе представлены результаты исследований теплофизических свойств сыпучего серебристого графита, а также механизм структурообразования в сталях 45 и 40ХН в изотермических условиях и при непрерывном охлаждении в среде графита. Сравнительным анализом в сопоставлении со свойствами других охлаждающих сред показана возможность использования сыпучего графита в каче-

стве новой среды для охлаждения нагретых металлоизделий, применение которой позволяет использовать тепло фазовых превращений. Расчетом теплового баланса установлено, что для эффективной эксплуатации сыпучего серебристого графита соотношение его массы к массе изделия должно составлять не менее 1:5.

При анализе изменения температуры по сечению цилиндрических образцов, был рассчитан критерий Vi для образцов диаметром 20–60 мм. Значения критерия следующие: для образца диаметром 20 мм – 0,05; для образца диаметром 30 мм – 0,07; для образца диаметром 40 мм – 0,09; для образца диаметром 50 мм – 0,1 и для образца диаметром 60 мм – 0,13.

На основании анализа критерия Vi для каждого образца определено, что все образцы являются термически тонкими телами, и охлаждение в них происходит равномерно по всему сечению.

Установлено, что при охлаждении образцов из стали 45 от 870 °С в сыпучем серебристом графите от температуры аустенитизации процесс изменения температуры графита можно разделить на четыре интервала: первый - интервал разогрева графита от 20 до 100 °С в контакте с нагретым изделием. В этом интервале температура графита повышается медленно, что связано с прогреванием графита. Во втором интервале (от 100 до 220 °С) наблюдается более интенсивный нагрев графита, что связано с поглощением им тепла при образовании феррита из аустенита. Третий интервал (от 220 до 250 °С) связан с поглощением тепла, которое выделилось при превращении аустенита в перлит. Четвертый интервал (охлаждение графита от 250 °С и ниже) связан с остыванием образца после того, как в нем завершились фазово-структурные превращения.

Исследовали изменение температурного поля по сечению цилиндров диаметром 20–60 мм из стали 45 в сыпучем графите. Кривые охлаждения образцов приведены на рис. 1.

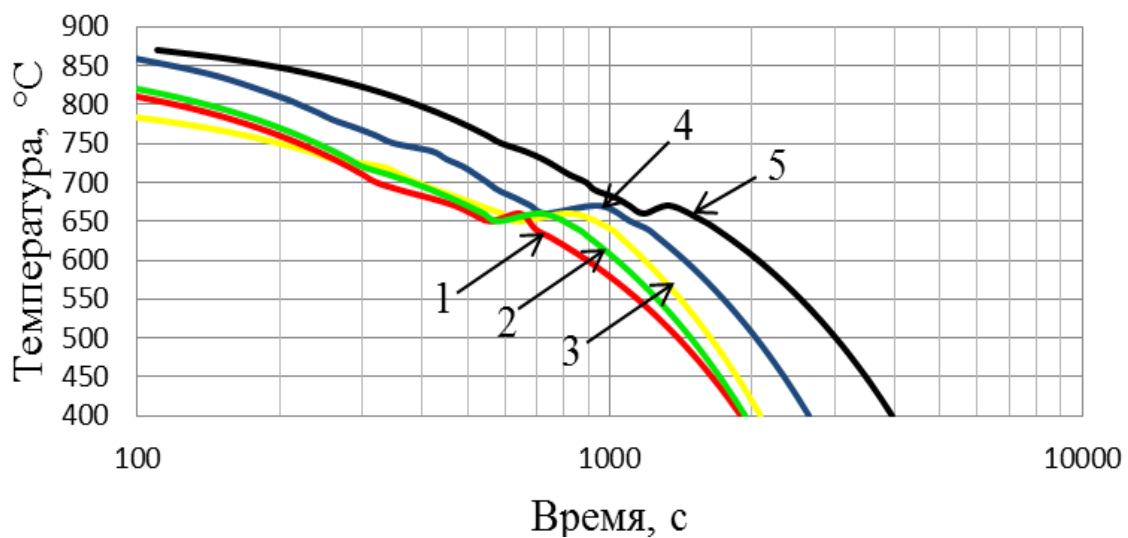


Рис. 1. Изменение температуры образцов из стали 45 Ø 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4) и 60 мм (5) при охлаждении в сыпучем серебристом графите от 870 °С

На кривых охлаждения образцов можно выделить 4 стадии. Первая стадия относится к охлаждению от 870 °С до температуры начала выделения избыточного феррита из аустенита. На этой стадии охлаждение происходит с большой скоростью и слабо зависит от размеров образцов. Для образцов с меньшим диаметром скорость охлаждения в аустенитной области более высока, что приводит к некоторому переохлаждению образцов относительно равновесной температуры $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Это способствует тому, что к началу перлитного превращения для образцов меньшего диаметра выделения избыточного феррита происходит при более низких температурах и в более узком интервале температур. Вторая стадия охлаждения соответствует интервалу температур от начала выделения избыточного феррита из аустенита до начала перлитного превращения. Эта стадия характеризуется меньшей скоростью охлаждения, что можно объяснить перекристаллизацией при образовании избыточного феррита из аустенита. Скорость охлаждения на этой стадии существенно зависит от размеров образцов, при увеличении которых она снижается. Третья стадия охлаждения связана с превращением аустенита в перлит. В связи с выделением скрытой теплоты превращения, охлаждение на этой стадии замедляется, процессы превращения протекают практически при постоянной температуре. Скорость охлаждения и длительность превращения в интервале перлитного превращения существенно зависят от размеров образцов, с увеличением которых скорость охлаждения уменьшается, а длительность превращения увеличивается. Четвертая стадия охлаждения относится к охлаждению феррито-перлитной структуры и зависит от размеров образцов, с увеличением которых скорость охлаждения снижается. Изменение скорости охлаждения образцов из стали 45 в зависимости от их сечения приведена на рис. 2.

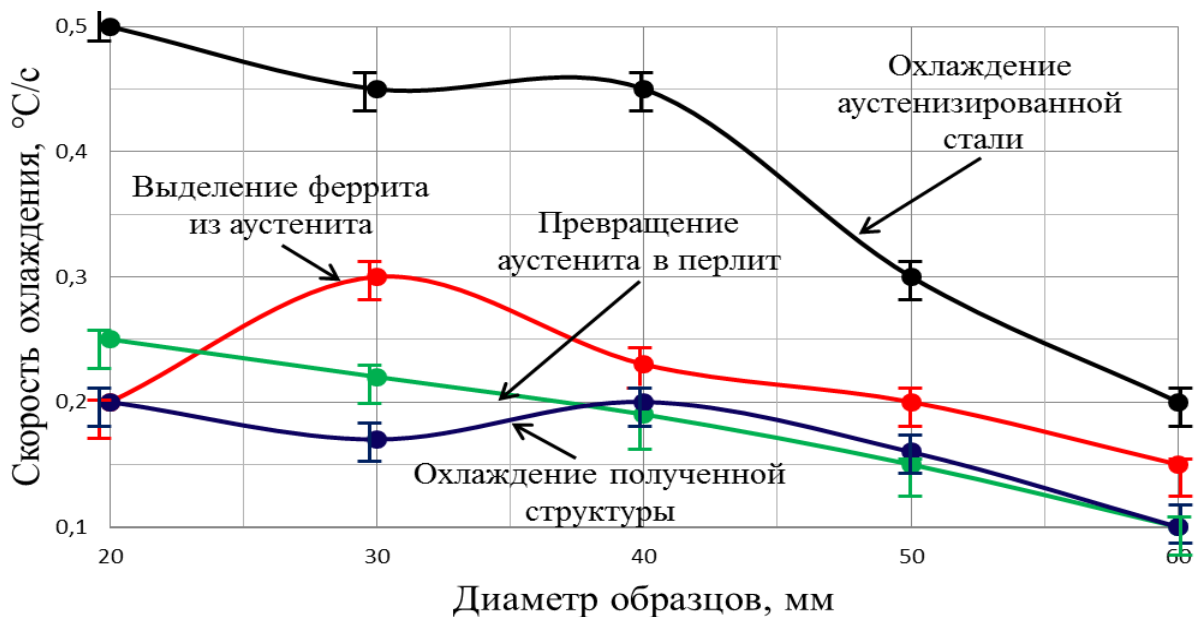


Рис. 2. Изменение скоростей охлаждения в зависимости от диаметра образцов стали 45

Скорость охлаждения образцов в аустенитном состоянии слабо зависит от диаметра использованных образцов. Замедление скорости охлаждения в данном случае должно мало влиять на увеличение размера зерна аустенита. Уменьшение скорости охлаждения в интервале температур A_{r3} – A_{r1} при образовании феррита из аустенита должно также способствовать росту зерна аустенита к тому моменту, пока не завершится формирование сетки феррита по границам зерен. Как показали результаты исследования микроструктуры, при быстром охлаждении по границам зерен аустенита возникает более плотная сетка феррита (рис. 3, а). В случае охлаждения образца диаметром 60 мм (см. рис. 3, б) формируется более крупное перлитное зерно и разорванная сетка феррита. Скорость охлаждения образцов влияет на механические свойства стали. С уменьшением скорости охлаждения снижается предел прочности и текучести, что можно объяснить увеличением зерна перлита и количества феррита, пластические свойства (δ , ψ) при этом увеличиваются.

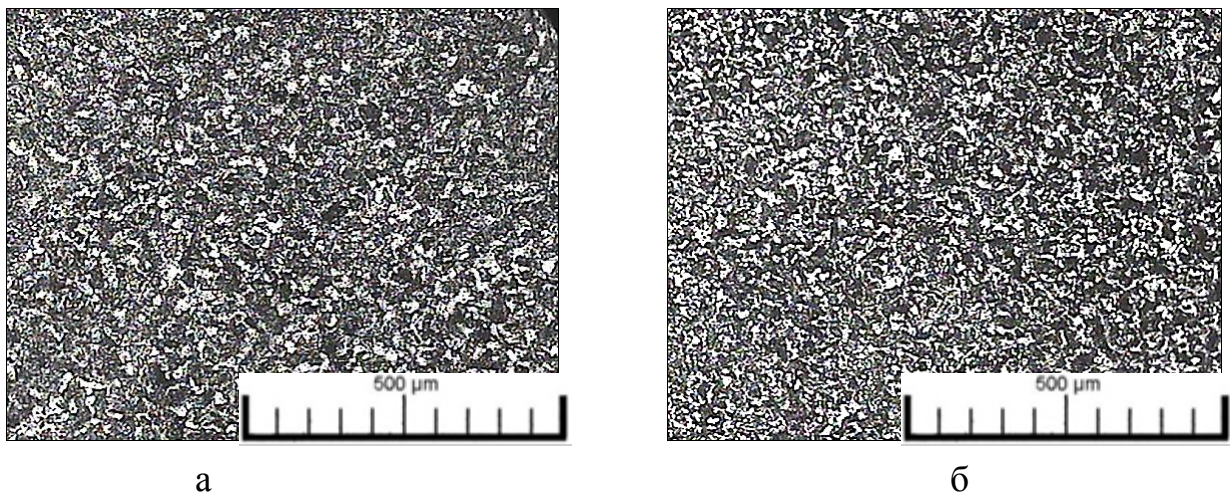


Рис. 3. Микроструктуры образцов диаметром 20 мм (а) и 60 мм (б) из стали 45 после охлаждения в сыпучем графите

Можно допустить следующий механизм влияния длительности превращения на микроструктуру и микротвердость перлита. При небольшой длительности охлаждения происходит перлитное превращение и выделение мелкодисперсных округлых или пластинчатых частиц цементита. Не исключено, что на этой стадии феррит, который выделился, содержит повышенное количество углерода, как следует из диаграммы Fe – Fe₃C. При дальнейшем охлаждении из феррита выделяется углерод, что в дополнении к образовавшимся ранее мелким частицам цементита способствует повышению прочности стали. Увеличение длительности перлитного превращения (как это наблюдается при охлаждении в графите) способствует коагуляции выделившихся частиц цементита, что должно снижать твердость перлита.

Исследования превращений в стали 40ХН при охлаждении в сыпучем серебряном графите проводились по методике, аналогичной для стали 45. Кривые непрерывного охлаждения образцов из стали 40ХН, приведены на рис. 4.

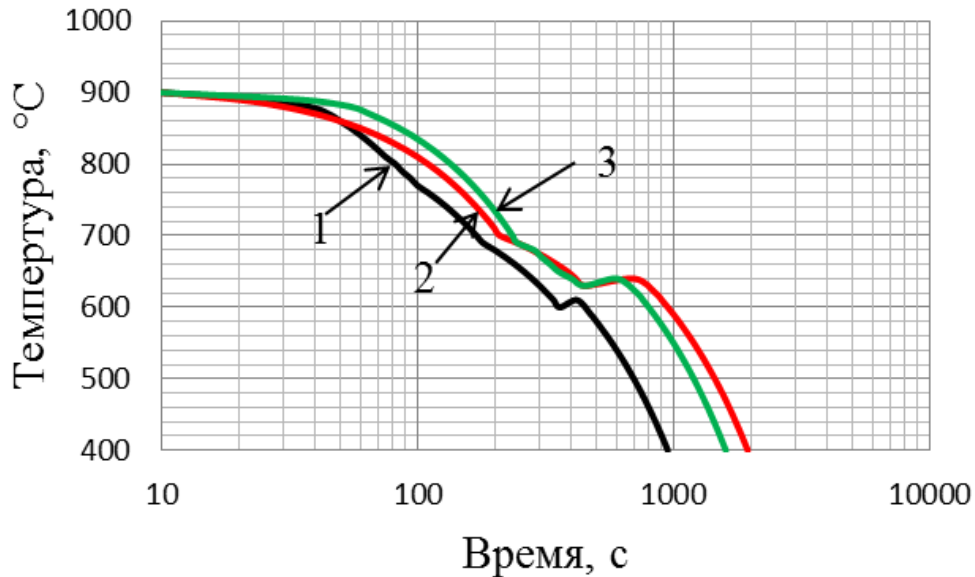


Рис. 4. Изменение температуры образцов из стали 40ХН \varnothing 20 (1), 30 (2) и 40 (3) мм при охлаждении в сыпучем серебристом графите

Как следует из рис. 4, в образцах разного диаметра происходит замедление скорости охлаждения при достижении температуры начала выделения феррита по границам зерен аустенита в связи с выделением тепла фазового превращения. После достижения начала перлитного превращения скорость замедляется, это связано с выделением внутренней теплоты превращения «аустенит \rightarrow перлит».

В связи с полученными результатами исследований для стали 45 и для стали 40ХН предложена схема с учетом диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 5). За счет выделения тепла при фазовых превращениях и аккумуляции этого тепла графитом постепенно происходит повышение температуры образцов по мере выдержки в интервале перлитного превращения.

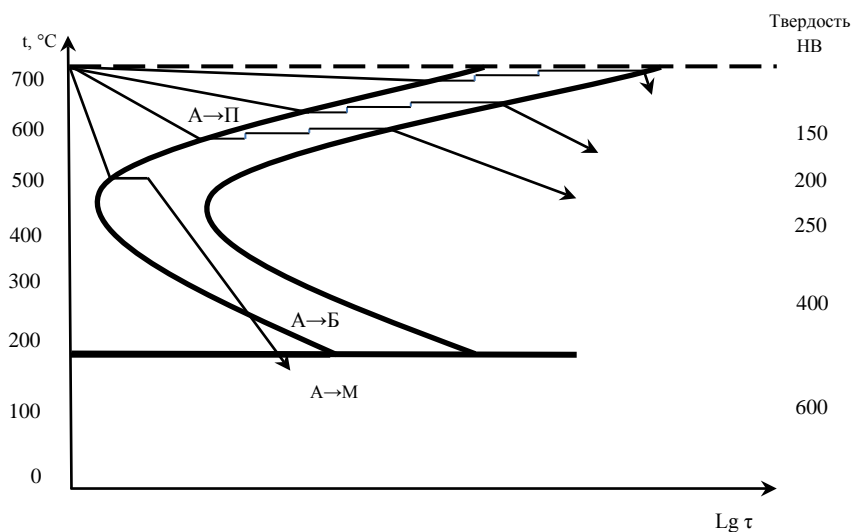


Рис. 5. Схема наложения на диаграмму изотермического распада аустенита кривых охлаждения с учетом изменения скорости за счет выделения тепла превращений

Такая аккумуляция тепла структурного превращения и повышение температуры от поверхности к центру ведет к повышению свойств окончательной структуры за счет однородности полученной структуры в процессе охлаждения с температуры аустенитизации в сыпучем серебристом графите.

Четвертый раздел посвящен исследованию особенностей структурообразования в новых марках валковых сталей 45X3ГНМФ, 70X5ВМФ и 80X3СВФ, построены соответствующие диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита в данных марках стали. Установлено, что все три стали отличаются положением интервалов перлитного и бейнитного превращений на С-образных диаграммах распада.

Сталь 45X3ГНМФ имеет повышенную устойчивость аустенита в перлитной области превращения аустенита. Для определения возможных режимов термической обработки стали 45X3ГНМФ с применением охлаждения в сыпучем графите была построена диаграмма изотермического превращения аустенита (рис. 6). Диаграмма состоит из четырех областей превращений. Первая – область перлитного превращения, которая распространяется на интервал температур 760–550 °С. Вторая – область повышенной устойчивости аустенита в интервале 550–400 °С. Третья – область бейнитного превращения в интервале 400–100 °С. Четвертая – область мартенситного превращения, лежащая ниже 300 °С. В результате дальнейшего анализа этой стали определились пути использования охлаждения в сыпучем серебристом графите для корректировки существующих режим изотермического отжига поковок диаметром до 1600 мм из этой марки стали.

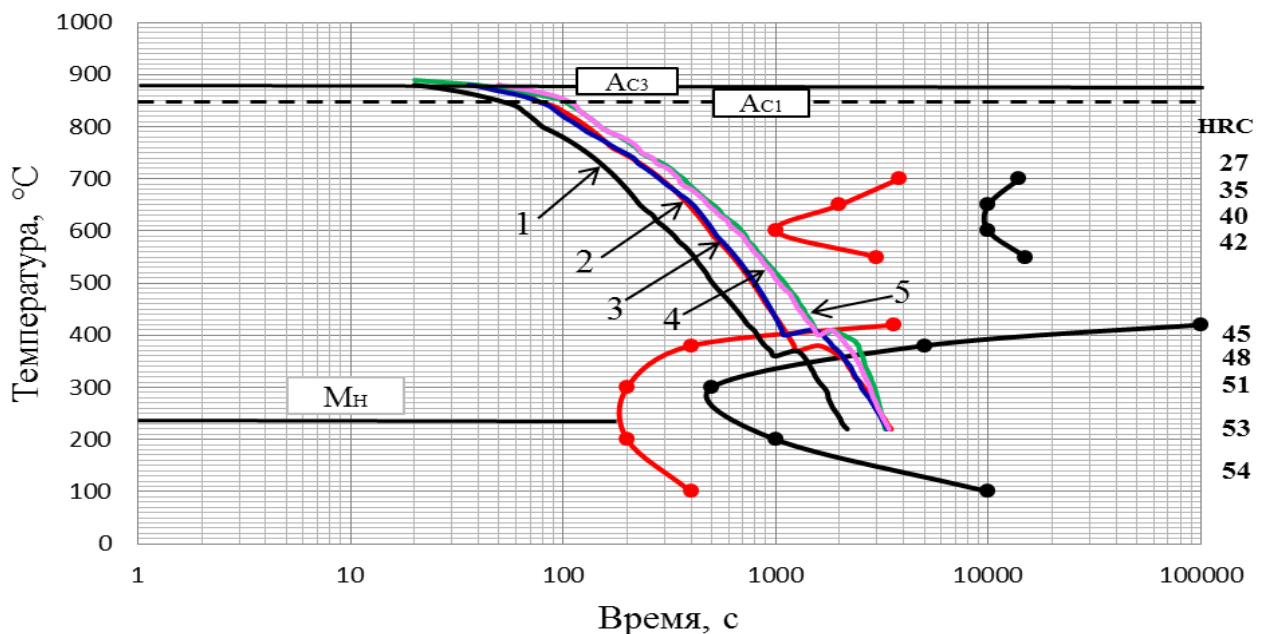


Рис. 6. Кривые непрерывного охлаждения образцов \varnothing 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4) и 60 (5) мм из стали 45X3ГНМФ, наложенные на диаграмму изотермического превращения аустенита

Анализ стали 70X5ВМФ показал, что эта сталь имеет несколько меньшую (по сравнению со сталью 45X3ГНМФ) стойкость аустенита как в перлитной, так

и в бейнитной областях превращения. Непрерывное охлаждение образцов из этой стали показало, что в стали может протекать как перлитное (в больших образцах), так и бейнитное (в малых образцах) превращение. Однако в случае крупных образцов получения чисто бейнитной структуры не наблюдается, поскольку кривые непрерывного охлаждения образцов частично пересекают область перлитного превращения, что ведет к образованию перлитно-бейнитной структуры (рис. 7).

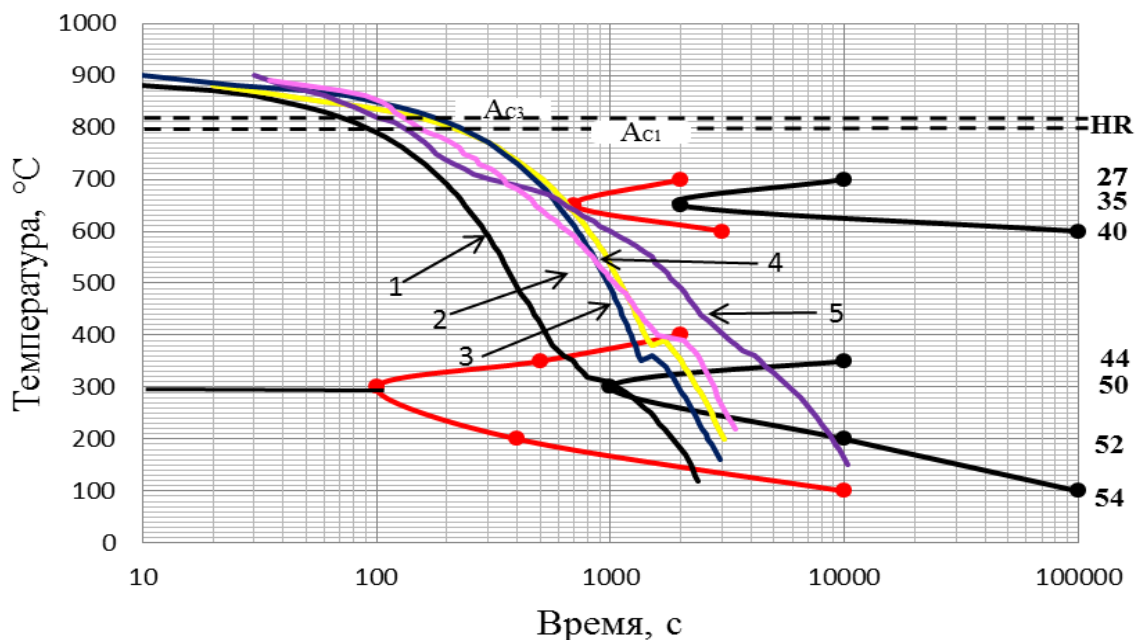


Рис. 7. Кривые непрерывного охлаждения образцов \varnothing 20 (1), 30 (2), 40 (3), 50 (4) и 60 (5) мм из стали 70X5ВМФ, наложенные на диаграмму изотермического превращения аустенита

Анализ кинетики превращения переохлажденного аустенита для данной марки стали используется для корректеровки режимов изотермического ожига поковок диаметром до 650 мм из данной марки стали.

Исследования стали 80X3СВФ показали, что она имеет пониженную устойчивость аустенита в перлитной области, что указывает на склонность стали к перлитному превращению вне зависимости от размеров образцов (рис. 8).

Как следует из рис. 8, образцы диаметром 20 мм охлаждаются на воздухе и в сыпучем графите со скоростью выше критической, что обеспечивает их закалку на мартенсит. На кривых 1 и 2 наблюдается перегиб, связанный с уменьшением скорости охлаждения в результате выделения тепла в ходе выделения из аустенита вторичных карбидов. После окончательного охлаждения структура этих образцов состоит из мартенсита, остаточного аустенита и карбидов. При охлаждении образцов \varnothing 30 и 40 мм превращение происходит в перлитной области диаграммы, поэтому структура в этих образцах после окончательного охлаждения состоит из вторичных карбидов и перлита. Поскольку перлитное превращение в образце \varnothing 40 мм протекает при наиболее высокой температуре и в течение более длительного времени, в его структуре преобладают карбиды больших размеров, что связано с их коагуляцией в процессе превращения.

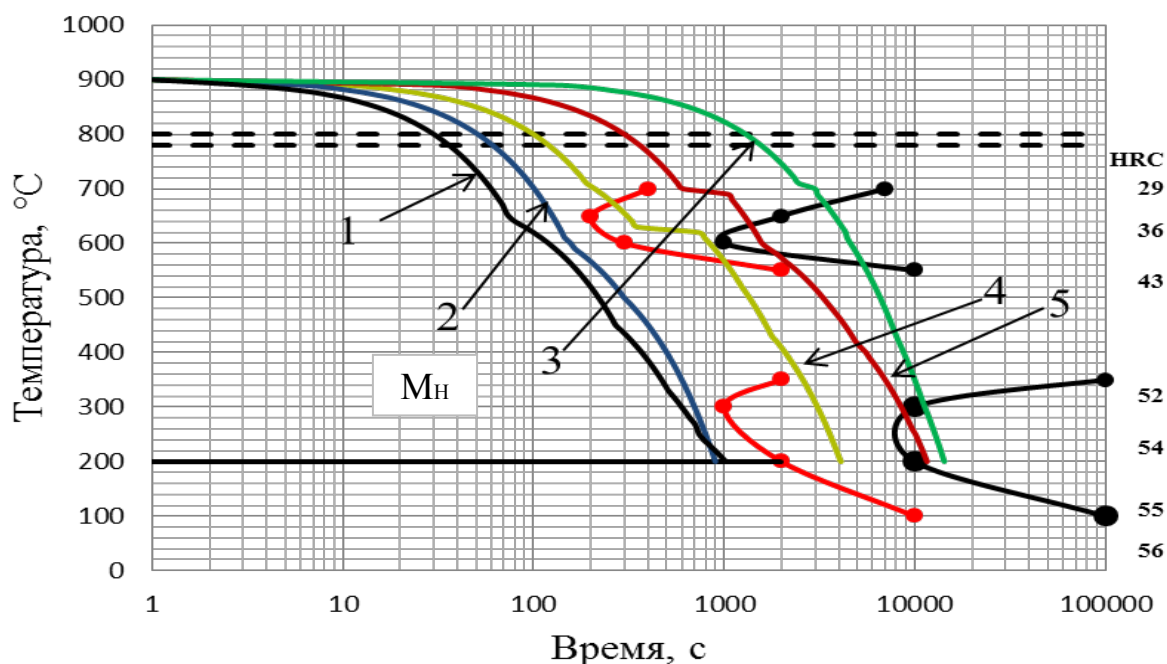


Рис. 8. Диаграмма изотермического превращения аустенита в стали 80X3CBФ с наложенными кривыми изменения температуры для образцов \varnothing 20 мм (1 – охлаждение в сыпучем графите; 2 – охлаждение на воздухе, 3 – охлаждение с печью), 30 мм (4) и 40 мм (5) – с охлаждением в сыпучем графите

В пятом разделе представлен анализ влияния охлаждения в сыпучем графите от температуры аустенитизации на структуру чугунов. При анализе кривой охлаждения образца из белого чугуна со структурой «аустенит + цементит» отмечено, что кривая охлаждения белого чугуна в интервале 950–830 °С изменяется плавно, скорость охлаждения остается высокой. При охлаждении в интервале температур от 830–660 °С скорость охлаждения замедляется, что можно объяснить выделением вторичного цементита из аустенита, сопровождаемым выделением скрытой теплоты, что замедляет охлаждение. В интервале температур 660–650 °С охлаждение чугуна резко замедляется, на кривой наблюдается практически прямой участок постоянной температуры. Это можно объяснить тем, что при такой температуре происходит превращение аустенита в перлит, которое сопровождается значительным выделением внутренней теплоты превращения. Вторым фактором, который влияет на замедление температуры, является диссоциация разных видов цементита (ледебуритного, вторичного и перлитного), происходящая при температуре перлитного превращения с образованием хлопьевидного графита и ферритной оторочки вокруг него. Отсюда следует, что структура белого чугуна по завершении перлитного превращения состоит из пластинчатого перлита, а также включений хлопьевидного графита с ферритной оторочкой. Охлаждение чугуна ниже 650 °С не оказывает влияния на структурные изменения в чугуне.

Полученные результаты позволяют допустить схему формирования структуры ковкого феррито-перлитного чугуна в результате выдержки при температуре аустенитизации и дальнейшего охлаждения из температуры аустенитизации белого чугуна.

на в сыпучем графите. Суть схемы заключается в следующем: в структуре, которая состоит из аустенита и цементита при выдержке выше A_{C1} ; наиболее активные поверхностные части цементита захватываются атомами аустенита и растворяются в нем, а часть диффундирует по границам зерен аустенита и концентрируется в местах дефектов, образуя графитные включения. По завершению выдержки при температуре $930-950^{\circ}\text{C}$ структура белого чугуна состоит из графитных включений, окруженных аустенитом. При охлаждении ниже A_{r1} аустенит распадается на перлит. В этом случае наступает период взаимодействия между цементитом и ферритом по схеме, аналогичной случаю взаимодействия аустенита с цементитом (рис. 9).

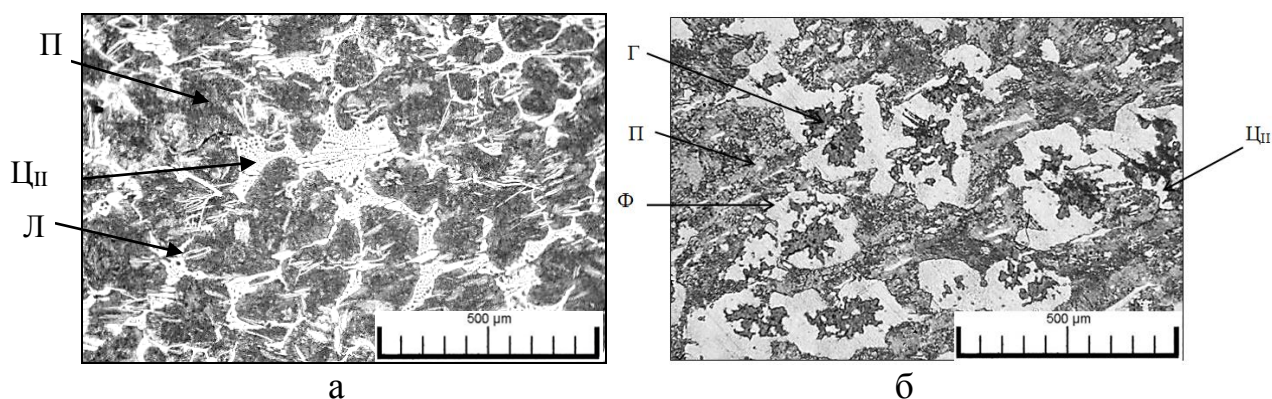


Рис. 9. Микроструктура белого чугуна начальная (а) и после охлаждения в сыпучем графите (б)

Поскольку феррит практически не растворяет углерод, то все захваченные им атомы углерода диффундируют по границам зерен к местам скопления ранее возникших графитных включений и увеличивают их в размере. Часть атомов углерода попадает в дефектные места и образует новые, более мелкие скопления графита. Поэтому структура белого чугуна состоит из мелких и крупных графитных включений хлопьевидной (лепестковой) формы.

Подобный характер структурообразования подтвердился и для случая охлаждения серого перлитного чугуна в сыпучем графите (рис. 10).

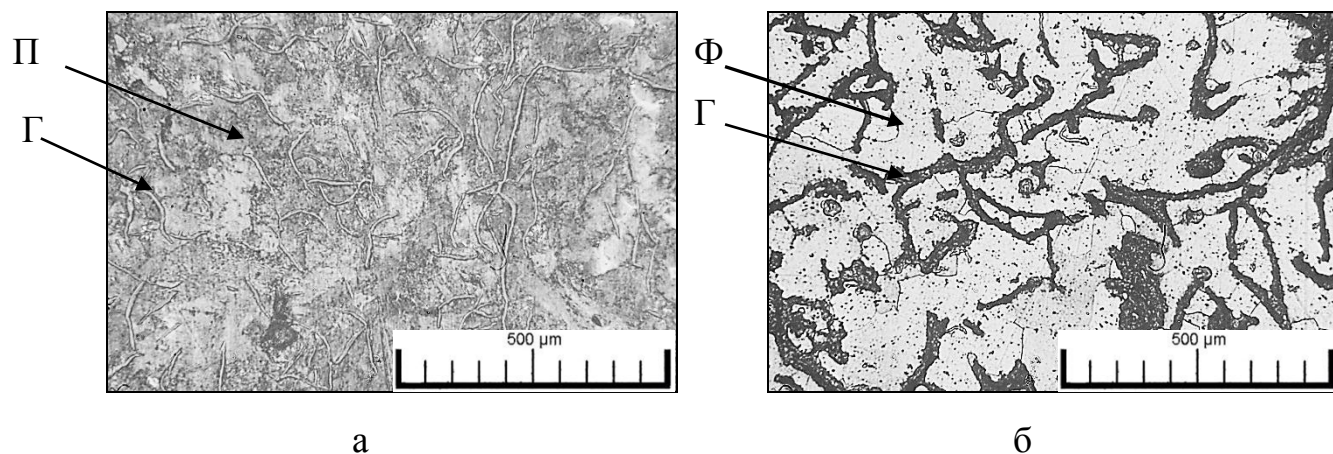


Рис. 10. Микроструктура серого чугуна: а – начальная структура, б – после охлаждения в сыпучем графите

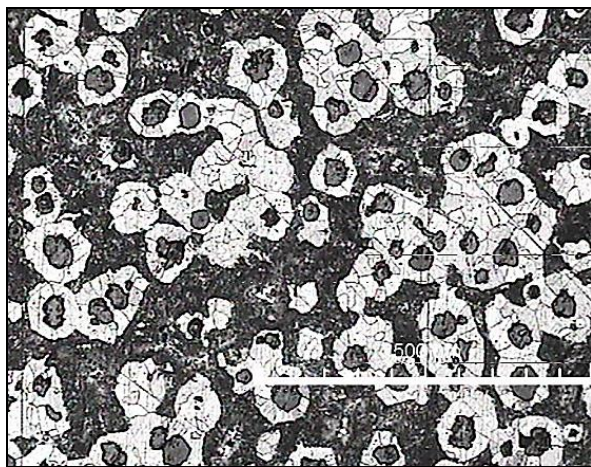
После анализа влияния охлаждения в сыпучем графите с разной начальной температурой (20, 200 и 300 °С) было выяснено, что по изменению скорости охлаждения можно допустить следующие структурные превращения. На первом этапе ускоренно охлаждается аустенит, который образовался при нагреве до 950 °С, и графит, имеющийся изначально в структуре ВЧ500. Такая структура сохраняется на первом этапе охлаждения до момента первого замедления скорости охлаждения образцов, связанного с распадом аустенита и выделением при этом внутренней теплоты превращения (вторая стадия охлаждения). По завершению второй стадии охлаждения структура состоит из графита и перлита. Дальнейшее охлаждение ускоряется в виду отсутствия дополнительного тепла для компенсации потерь в окружающую среду. Это - третья стадия охлаждения и она характеризуется более быстрым охлаждением, чем вторая стадия. За третьей стадией следует четвертая стадия охлаждения, связанная с выделением из феррита третичного цементита, что сильно замедляет скорость охлаждения. Вероятнее всего, что выделение третичного цементита является причиной того, что некоторые марки высокопрочных чугунов рекомендуют охлаждать с печью лишь до температуры 600–500 °С, а далее – на воздухе. Особенность охлаждения в сыпучем графите из температуры 20 °С заключается в том, что сначала он имеет высокую теплопроводность и погруженный в него образец быстро охлаждается. Однако в процессе охлаждения нагревается слой графита, непосредственно контактирующий с образцом, что резко снижает теплопроводность графита. Этим обеспечивается тепловая изоляция образца, и создаются условия для эффективного использования тепла, выделяющегося в ходе превращения. Исходя из изложенного, можно полагать, что эффективность использования тепла фазовых превращений должна повышаться при подогреве сыпучего графита. Это было подтверждено экспериментально.

После охлаждения в сыпучем графите в структуре чугуна ВЧ500 увеличивается доля феррита и уменьшается доля перлита. В начальном состоянии микроструктура чугуна ВЧ500 состоит из графитовых включений шаровидной формы, вокруг которых располагается тонкое обрамление феррита. Площадь, занятая ферритом, составляет 10 %, остальная структура представлена перлитом и графитом. После охлаждения в атмосфере печи, нагретой до 200 °С, микроструктура чугуна отличается от начальной повышенным до 15 % количеством феррита (см. рис. 11, г).

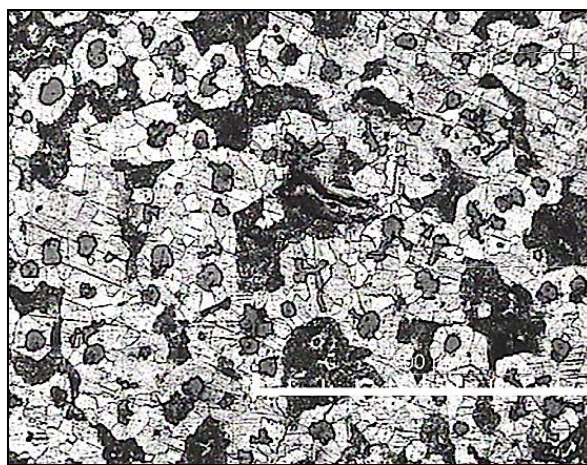
После охлаждения в сыпучем графите с температурой 20 °С в микроструктуре доля феррита увеличивается до 25–30 % (см. рис. 11, а), все графитовые включения окружены широкой ферритной прослойкой. После охлаждения в графите, имеющего начальную температуру 200 °С, количество феррита резко возрастает до 60 % (см. рис. 11, б), большая часть графитовых включений полностью окружена ферритом.

Результаты исследований указывают на возможность использования охлаждения белого чугуна в сыпучем графите для получения ковкого чугуна с использованием тепла, которое выделяется в результате превращения аустенита в перлит. Графитизация ледебурита происходит в две стадии: первичная (при нагреве в интервале температур от A_1 до 950 °С) и вторичная (при охлаждении от 950 °С к температуре ниже A_{r1}). Выявлен эффект резкого ускорения вторичной графитизации в случае

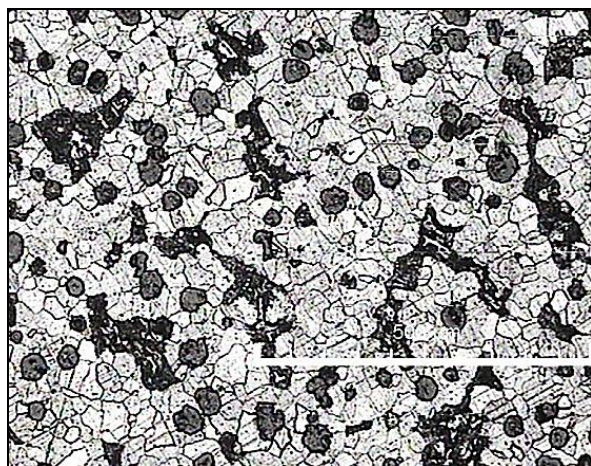
охлаждения чугуна в сыпучем графите. Охлаждение высокопрочного чугуна в сыпучем графите позволяет увеличивать долю феррита в структуре, что повышает пластичность и вязкость чугуна.



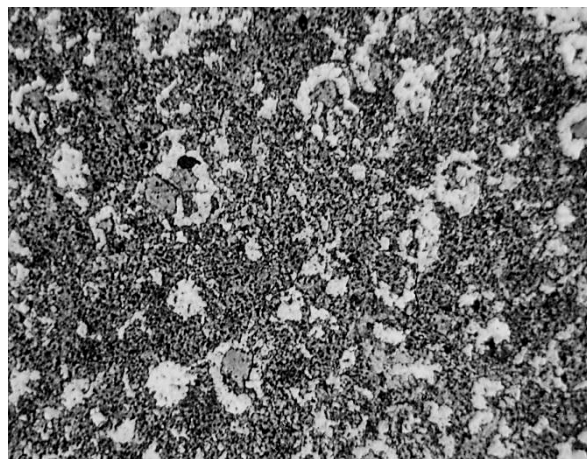
а



б



в



г

Рис. 11. Микроструктура образцов из чугуна ВЧ500 после охлаждения в сыпучем графите, имеющем температуру 20 °С (а), 200 °С (б), 300 °С (в) и с печью (г)

В шестом разделе представлены данные об опробовании результатов диссертации в промышленности. По договору с ПАО «НКМЗ» разработаны диаграммы изотермического превращения аустенита сталей 45Х3ГНМФ, 70Х5ВМФ и 80Х3СВФ, проведены исследования этих сталей относительно выбора режимов предварительной термической обработки валков. На основании проведенных исследований, предложены схемы одинарной термической обработки валков (отжига) с применением сыпучего графита.

В качестве объекта промышленного испытания и внедрения результатов исследований были выбраны поковки из стали 40ХН, которые при обычных условиях производства послековки подвергались отжигу по антифлоккеному режиму. Поковки размерами 100x100x300 мм массой 23–25 кг получали на кузнечном молоте с массой падающей части 2 т в интервале температур 1150–850 °С за три выноса.

По завершенииковки часть заготовок передавали на капеж для дальнейшего отжига по режиму, а часть охлаждалась в контейнерах с сыпучим серебристым графитом. В контейнере заготовка помещалась горизонтально, таким образом, что слой графита вокруг нее составлял не менее 140–150 мм. Заготовка с контейнером удалялась из зоны действия молота на свободное место, где охлаждалась до температуры цеха.

Анализ структуры и свойства стали 40ХН после охлаждения в сыпучем графите показал следующее. Структура образцов, вырезанных из поверхности и в центре заготовки, является феррито-перлитной, более мелкозернистой на поверхности, феррит в виде разорванной сетки располагается по границам зерен перлита, количество феррита выше в центре, перлит имеет зернистое строение. Установлено, что поковки, охлажденные по завершенииковки в сыпучем графите, имеют более высокие механические свойства по сравнению с аналогичными поковками, прошедшими отжиг по заводскому режиму, применяемому для поковок второй группы по флокочувствительности. Качество поковок, охлажденных послековки в сыпучем графите, приближается к качеству поковок после нормализации с отпуском. Таким образом, охлаждение в графите может заменить операцию отжиг, что приведет к существенному снижению энергозатрат на термообработку. Ожидаемый экономический эффект от внедрения этого предложения составляет 519, 17 грн/т при долевом участии соискателя 20 %.

Применительно к производственным условиям кузнечно-термического цеха ПАО «СКМЗ» разработана новая технология обработки стальных отливок (корпус барабана, зубчатый венец) из стали 35ХМЛ. В литом состоянии структура этой стали 35ХМЛ отличается крупнозернистостью с неоднородным распределением феррита по границам перлитных зерен, связанным с разнотолщиностью отливок. Для получения однородной структуры отливок использовали отжиг с нагревом до температуры аустенитизации (860–880 °С) и дальнейшим охлаждением в сыпучем графите, располагая отливки в контейнере таким образом, что слой графита вокруг них составлял не менее 150 мм. Это обеспечило формирование однородного мелкого перлитного зерна с равномерной по толщине ферритной сеткой. Сравнение механических свойств термообработанных в сыпучем графите отливок со свойствами отливок, прошедших нормализацию с высоким отпуском, показал идентичность полученных результатов. Полученные результаты показали возможность замены операции «нормализация + высокий отпуск» охлаждением в сыпучем графите. Внедрение этого мероприятия обеспечит получение экономического эффекта в размере 209 грн/т литья (при долевом участии соискателя 30 %).

Таким образом, промышленное опробование результатов диссертации подтвердило их высокую эффективность применительно к термообработке поковок и литья из низколегированных марок стали. С учетом этого в работе были разработаны и предложены к промышленному использованию различные технологические схемы применения сыпучего серебристого графита в виде теплоизолирующей среды для охлаждения металлоизделий изделий разной формы и размеров.

ВЫВОДЫ

В диссертации приведено новое решение актуальной научно-технической задачи усовершенствования технологии термической обработки сталей и чугунов в направлении снижения энергозатрат путем использования в качестве охлаждающей среды сыпучего серебристого графита, что обеспечивает достижение заданного комплекса механических свойств при пониженном уровне себестоимости, и в связи с этим, имеет большое значение для металлургической и машиностроительной отраслей промышленности.

Основные научные положения и практические результаты заключаются в следующем:

1. Впервые предложено использовать тепло фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения для формирования необходимого фазово-структурного состояния в стальных и чугунных изделиях путем их выдержки после аустенитизации в сыпучем серебристом графите при соотношении объемов графита и металла 1:5, что позволяет существенно уменьшить энергозатраты на термическую обработку за счет исключения операций, связанных с изотермической выдержкой или замедленным охлаждением в области распада аустенита.

2. Обоснована целесообразность применения сыпучего серебристого графита в практике термической обработки поковок и отливок. Оценка теплофизических, технологических и стоимостных характеристик позволяет использовать серебристый графит в качестве теплоизолирующей среды при проведении обработки низколегированных конструкционных сталей и нелегированных чугунов взамен непрерывного или изотермического отжига.

3. На основании выявленных особенностей изменения охлаждающей способности сыпучего серебристого графита в процессе выдержки в нем аустенитизированных металлоизделий, способствующие измельчению ферритного зерна и повышению однородности микроструктуры и механических свойств по сечению изделий, получен рост прочностных и пластических характеристик стального литья на 15–20 % соответственно без проведения дополнительных операций его термической обработки.

4. Экспериментально доказана возможность замены отжига поковок II-й группы на выдержку в сыпучем серебристом графите с температуры окончанияковки без снижения комплекса механических и технологических свойств, что позволило сократить длительность и энергозатратность режима термообработки на 20–35 % в зависимости от марки стали.

5. Впервые построены C-образные диаграммы распада переохлажденного аустенита в новых валковых сталях 45X3ГНМФ, 70X5ВМФ, 80X3СВФ, что позволило разработать и оптимизировать режимы термической обработки валков с применением этих диаграмм.

6. На основе выявленного эффекта ускорения процесса вторичной графитизации за счет применения выдержки чугунных отливок после аустенитизации в сыпучем серебристом графите обеспечено увеличение эффективности регулирования формы

графитовых включений в ковком чугуна, повышение количества феррита в высокопрочном чугуна до 80 % при сокращении длительности графитизирующего отжига в 2–3 раза.

7. Разработаны и предложены для промышленного внедрения технологические схемы применения сыпучего серебристого графита в виде теплоизолирующей среды для охлаждения металлоизделий разной формы и размеров.

8. Результаты работы опробованы и переданы к внедрению на ПАО «НКМЗ» и ПАО «СКМЗ» в виде технологии термической обработки (пат. № 43690). Ожидаемый экономический эффект составляет 519,17 грн/т при термообработке поковок из стали 40ХН и 209,0 грн/т при термообработке отливок из стали 35ХМЛ. Долевой вклад соискателя составляет 25 %.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Заблоцкий В.К. Самоотжиг поковок из стали 45 / В.К. Заблоцкий, В.И. Шимко, В.Е. Фельдман, А.И. Шимко. – Строительство, Материаловедение, Машиностроение: – Сб. науч. трудов. Выпуск 53, Днепропетровск, ПГАСиА, 2010 – 100–104 с.

2. Заблоцкий В.К. Влияние исходной структуры стали 45Х3ГНМФ на превращение при нагреве для повторной закалки / В.К. Заблоцкий В.И. Шимко. – Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2010 – 6/1(48) – С. 31–34.

3. Заблоцкий В.К. Самоотжиг и изотермическая закалка чугуна / В.К. Заблоцкий, А.Н. Фесенко, В.И. Шимко, М.А. Фесенко, В.Е. Фельдман, А.И. Шимко. – Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии, 2010 – №3(20) – С. 116–120.

4. Заблоцкий В.К. Особенности структурно-фазовых превращений в стали 45Х3ГНМФ при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях / В.К. Заблоцкий, В.И. Шимко. – Строительство, Материаловедение, Машиностроение: – Сб. науч. трудов. Выпуск 58, Днепропетровск, ПГАСиА, 2011г – 292–294 с.

5. Заблоцкий В.К. Особенности охлаждения стали 70Х5ВМФ с температуры аустенитизации в сыпучем графите / В.К. Заблоцкий, В.И. Шимко, А.И. Шимко. – Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2012 – 1/1(55) – С. 34–41.

6. Заблоцкий В.К. Особенности структурно-фазовых превращений в сталях 45Х3ГНМФ и 70Х5ВМФ при охлаждении в изотермических условиях / В.К. Заблоцкий, В.И. Шимко. – Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии, 2012 - №1(22) – С.193–198.

7. Заблоцкий В.К. Термическая обработка стали 80Х3СВФ с применение охлаждения в сыпучем графите / В.К. Заблоцкий, В.И. Шимко, А.И. Шимко. – Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2012 – 4/5(58) – С. 14–17.

8. Заблоцкий В.К. Превращения при охлаждении стали 45 / В.К. Заблоцкий, В.И. Шимко, В.Е. Фельдман, А.И. Шимко. – Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии, 2011 – №1(22) – С. 193–198.

9. Заблоцкий В.К. Закалка стали 45Х3ГНМФ на бейнит / В.К. Заблоцкий, В.И. Шимко. – Международная научно-техническая конференция, «Сучасні аспекти металознавства та термічної обробки металів», г. Мариуполь 2010 – 70–72 с.

10. Заблоцкий В.К. Структурообразование при энергосберегающей технологии самоотжига высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В.К. Заблоцкий, А.Н. Фесенко, В.И. Шимко, М.А. Фесенко, В.Е. Фельдман, А.И. Шимко. – Материалы VI международной научно-практической конференции «Литье 2010», г. Запорожье.

11. Заблоцкий В.К. Термическая обработка с использованием тепла структурно-фазовых превращений / В.К. Заблоцкий, А.Н. Фесенко, М.А. Фесенко, В.И. Шимко, А.И. Шимко. – Материалы III международной научно-технической конференции «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве», Краматорск, 2011 г.

12. Заблоцкий В.К. Перспективные технологии термической обработки бейнитных чугунов с шаровидным графитом / В.К. Заблоцкий, А.Н. Фесенко, М.А. Фесенко, В.И. Шимко. – Материалы III международной научно-технической конференции «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве», Краматорск, 2011 г.

13. Заблоцкий В.К. Обработка отливок из стали 35ХМЛ / В.К. Заблоцкий, В.И. Шимко, В.В. Удовиченко. – Материалы международной научно-практической конференции – Одесса, 2011 – том 7 (15-28 марта 2011) – 38–41 с.

14. Пат. 43690 U 2009 03360, C21D9/22. Способ термической обработки стали // В.К. Заблоцкий, В.Є. Фельдман, А.М. Фесенко, В.А. Федорінов, А.І. Шимко, І.Ю. Мелещенко, М.А. Фесенко, В.А. Корсун, В.І. Шимко. – Заявл. 08.04.2009. – Оpubл. 25.08.2009. – Бюл. №16, 2009 р.

АНОТАЦІЯ

Шимко В.І. Удосконалення режимів термічної обробки сталей та чавунів з охолодженням в сипкому графіті для забезпечення високого комплексу механічних властивостей

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.01 – металознавство та термічна обробка металів. – ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». – Маріуполь, 2013.

У дисертації вирішено актуальну науково-технічну задачу розроблення нового енергоощадного процесу термічного оброблення сталевих і чавунних металовиробів за рахунок використання тепла фазових перетворень. У роботі вперше запропоновано використовувати тепло фазово-структурних перетворень при витримці виробів у сипкому графіті з температури аустенітизації (кінця кування) для формування необхідного фазово-структурного стану в сталевих і чавунних виробках, що дозволяє виключити певні операції термічного оброблення та зменшити енергоємність процесу термооброблення. Встановлено, що при охолодженні у сипкому сріблястому графіті перлітне (бейнітне) перетворення протікає в умовах, близьких до ізотермічних умов, що сприяє більш повній реалізації перетворення та підвищенню однорідності мікроструктури й механічних властивостей. Встановлено, що після занурення в сипкий графіт нагрітих виробів зі сталі та чавунів, навколо них утворюється оболонка графіту зі зниженою теплопровідністю, яка забезпечує умови збереження тепла фазових перетворень і забезпечує подовження перлітного пе-

ретворення до його повного закінчення. Вперше досліджено кінетику фазових перетворень при безперервному охолодженні та в ізотермічних умовах у сталях 45X3ГНМФ, 70X5ВМФ, 80X3СВФ і чавуну ВЧ450 із побудовою діаграм розпадання аустеніту. Нові режими термооброблення з охолодженням у сипкому графіті успішно апробовано в умовах виробництва на ПАТ «СКМЗ» та ПАТ «НКМЗ», що дозволило рекомендувати їх замість відпалу (для поковок II групи) та замість нормалізації з високим відпуском – при термообробленні литва машинобудівного призначення.

Ключові слова: термічна обробка, графіт, фазові перетворенні, сталь, чавун, мікроструктура.

АННОТАЦІЯ

Шимко В.И. Усовершенствование режимов термической обработки сталей и чугунов с применением охлаждения в сыпучем графите. – Рукопис.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов. – ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». – Мариуполь, 2013.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача обеспечения высокого комплекса механических свойств за счет внутреннего тепла, которое выделяется в результате фазовых превращений при охлаждении в сыпучем графите нагретых до температуры аустенитизации сталей и чугунов. Впервые предложено использовать тепло фазового превращения, которое выделяется за счет $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, при выдержке изделий в сыпучем серебристом графите с температуры аустенитизации (концаковки) для формирования необходимого фазово-структурного состояния в стальных и чугунных изделиях, что существенно уменьшит энергозатраты термической обработки. Установлено, что при охлаждении в сыпучем серебристом графите перлитное (бейнитное) превращение протекает в условиях, близких к изотермическим условиям, что способствует более полной реализации превращения и повышению однородности микроструктуры и механических свойств по сечению изделий. Экспериментально доказана возможность замены изотермического отжига поковок II-й группы на выдержку в сыпучем серебристом графите с температуры окончанияковки; такая замена не ухудшает комплекс механических свойств, но сокращает длительность и энергозатратность режима термообработки по сравнению с отжигом на 20 % и более, в зависимости от марки стали. Выявлен эффект ускорения процесса вторичной графитизации за счет применения выдержки чугунных отливок после аустенитизации в сыпучем серебристом графите, что позволяет повысить эффективность регулирования формы графитовых включений в ковком чугуне и увеличивает количество феррита в высокопрочном чугуне до 80 %.

Впервые построены C-образные диаграммы распада переохлажденного аустенита для новых валковых сталей 45X3ГНМФ, 70X5ВМФ, 80X3СВФ; диаграммы могут быть использованы для назначения режимов термообработки валков с применением охлаждения в сыпучем графите. Разработаны и рекомендованы для широкого

промышленного внедрения технологические схемы применения сыпучего серебристого графита в виде теплоизолирующей, упругоподатливой среды охлаждения изделий разной формы и размеров.

Ключевые слова: термическая обработка, графит, фазовые превращения, сталь, чугун, микроструктура.

ANNOTATION

Shimko V.I. Improvement of the modes of heat treatment of steels and cast-irons with the use of cooling in a friable graphite.

Dissertation on competition of scientific degree of candidate of engineering sciences by speciality 05.16.01 is Physical metallurgy and heat treatment of metals. – SNHU «Priazovskiy state technical university». it is Mariupol, 2013.

In dissertation the actual is decided scientific and technical task of providing of high complex of mechanical properties due to an internal heat which is selected as a result of phase transformations at cooling in a friable graphite heated to the temperature of austenitization steels and cast-irons. It is investigational, that after immersion in the friable graphite of the heated wares from steel and cast-irons the shell of graphite, which reduces a heat-conducting and provides terms for the maintenance of heat which is selected at phase transformations, appears round them. It warmly provides beginning of phase transformations and their continuation to completion. Phase transformations are investigational at the continuous cooling and in isothermal for steel of 45X3ГНМФ, 70X5ВМФ, 80X3СВФ and cast-iron of ВЧ 450, with the use of the known diagrams of transformation of austenite (45, 40 XH) and specially built for other investigational steels. On the basis of the detailed study of phase transformations at cooling in a friable graphite there were the inculcated modes of heat treatment, which are used for development of the modes of annealing of steels with different firmness of austenite.

Keywords: heat treatment, graphite, phase transformations, steel, cast-iron, microstructure.

Підп. до друку 19.08.2013. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.
Тираж 100 пр. Зам. № 274.

Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №1633 від 24.12.2003