Механика деформируемого твердого тела

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-3>
УДК 539.3, 669.094.2-926.62, 620.17

А.В. Попов, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров

ПОПОВ АРТЁМ ВЛАДИМИРОВИЧ – младший научный сотрудник, AuthorID: 780525, SPIN: 2571-7958, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6588-9937>, ScopusID: 57193351972, e-mail: popov.av@protonmail.com

ЖИЛИН СЕРГЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ – ведущий научный сотрудник, к.т.н., доцент, AuthorID: 177858, SPIN: 7519-1172, ScopusID: 56047191300, e-mail: zhilin@imim.ru

КОМАРОВ ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ – к.т.н., ведущий научный сотрудник, доцент, AuthorID: 625515, SPIN: 8087-2080, ScopusID: 56432713000, e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Металлургов ул., 1, Комсомольск-на-Амуре, Россия, 681005

Влияние режимов термообработки на структуру и свойства стальных заготовок, полученных методом алюмотермии

Аннотация: Анализируется влияние последовательных операций термической обработки (неполного отжига, закалки и низкого отпуска) на образование структурных составляющих, определяющих предел прочности при растяжении, относительное удлинение и характер разрушения образцов железоуглеродистых сплавов, полученных методом алюмотермии. Механическим испытаниям подвергались высокоуглеродистые (содержание углерода 1,32–1,93%) экспериментальные образцы конструкционных металлов, полученные с применением термитных смесей, содержащих 0,2–5,6% наполнителей, с использованием углеродных тиглей и форм. Установлено, что неполный отжиг позволяет повысить значения таких свойств, как предел прочности – на 33–84% и относительное удлинение – на 108–893%, образцов при растяжении вследствие сокращения внутренних напряжений при переходе структурных составляющих в зернистый перлит. Операции закалки и низкого отпуска позволяют повысить показатели предела прочности при растяжении на 25–64%, при этом значения их относительного удлинения снижаются (от 11 до 57%). Структура термообработанных образцов представляет собой мартенсит и карбидные фазы. Установлено, что у образца, полученного из термитной композиции, содержащей 4,3% наполнителей, относительное удлинение практически не меняется в зависимости от видов операций термообработки, а предел прочности при растяжении существенно возрастает только после закалки и низкого отпуска. В целом последовательные операции термообработки позволили снизить внутренние напряжения литых заготовок, исправить их структуру, существенно увеличить показатели прочности при растяжении исследуемых образцов, корректировать показатели относительного удлинения. В результате применения алюмотермии достигаются высокие механические свойства материалов и изделий ответственного назначения, в том числе режущих инструментов, пружин и рессор. На основе полученных результатов перспектива дальнейших исследований – температуры,

отличающиеся от температур при традиционных условиях термообработки на твердость, износостойкость, ударную вязкость, прочность и относительное удлинение.

Ключевые слова: сокращение напряжений отливок, повышение прочности, термообработка алюмотермитных сталей, неполный отжиг, закалка, низкий отпуск, механические свойства, алюмотермия, литье.

Введение

В большинстве случаев литые заготовки из черных сплавов характеризуются неупорядоченностью структуры, дендритной и зональной ликвацией, что приводит к неоднородности материала и чередованию показателей свойств в различных частях отливок, значения которых в ряде случаев достигают недопустимых величин. В зависимости от размера отливки, температуры заливки металла в форму, условий кристаллизации и последующего охлаждения заготовки могут формироваться крупнозернистая или видманштеттова структуры. Это характерно как для отливок, полученных по традиционным технологическим процессам, так и для экспериментальных технологий, основывающихся на алюмотермии [6, 9]. При схожем химическом составе заготовки, обладающие указанными структурами, имеют существенные расхождения по параметрам комплекса физико-механических свойств [7, 8], а также различия по показателям обработки резанием. Для исправления структур (снятия внутренних напряжений и формирования требуемых свойств заготовок) применяются различные методы термообработки [4]. Для корректировки литой структуры, в зависимости от ее состояния и химического состава сплава, используют разные виды отжига: гомогенизирующий, полный и неполный [5, 10]. В частности, для высокоуглеродистых заэвтектоидных сталей применяется неполный отжиг для получения зернистого и исключения образования пластинчатого перлита, что позволяет улучшить обрабатываемость заготовок резанием. После получения требуемой конфигурации изделий осуществляется формирование необходимых свойств заготовок, в частности повышение прочности последних, что достигается применением еще одного вида термообработки – закалки. Образование мартенсита у высокоуглеродистых сплавов происходит при более низкой, чем у металлов, температуре. В таких сплавах содержится меньшее количество углерода, что может явиться причиной образования трещин, высоких внутренних напряжений и других закалочных дефектов. Для снятия остаточных напряжений и устранения эффекта охрупчивания [1–3] заготовок после операций закалки дополнительно применяется низкий отпуск. Методы литья с применением алюмотермии характеризуются высокими температурами продуктов реакции и их интенсивным перемешиванием. Оба указанных фактора оказывают существенное влияние на формирование структурных составляющих, состав образующихся фаз, величину остаточных напряжений и свойств заготовок. Данные особенности алюмотермитного переплава определяют выбор режимов термической обработки, определяющие актуальность исследований для области металлургии и машиностроения в целом, а также литейного производства в частности.

Цель работы – определение влияния режимов термообработки на структуру и механические свойства высокоуглеродистых образцов сталей, полученных алюмотермией.

В работе мы полагаем решить следующие задачи:

- получить образцы из термитных смесей, содержащих наполнители, методом алюмотермии;
- определить влияние неполного отжига, закалки и низкого отпуска на предел прочности и относительное удлинение при растяжении экспериментальных образцов;
- провести сравнительный анализ структур образцов экспериментальных сплавов до и после термообработки;
- исследовать изломы образцов на характер разрушения.

Описание эксперимента и методик исследований

Экзотермические реакции проводили в огнеупорных тиглях, выполненных из боя графитированных электродов, применяемых для плавки стали в электродуговых печах марки ЭГ15 по ТУ 14-139-177-2003 «Электроды графитированные диаметром от 75 до 555 мм и ниппели к ним. Технические условия». Плотность огнеупорного материала 1700 кг/м^3 . Объём рабочего пространства тигля $0,000572 \text{ м}^3$, толщина стенки $0,01 \text{ м}$, масса тигля $0,71 \text{ кг}$. Объём рабочего пространства соответствует засыпке смеси массой 1 кг с минимальной насыпной плотностью (без уплотнения) для получения образца необходимого размера. Тигель после засыпки смеси накрывается крышкой с отверстием диаметром 20 мм для выхода газов. Внутренний диаметр тигля равен высоте его рабочего пространства и составляет $0,09 \text{ м}$. В дне тигля устанавливается разовая вставка с отверстием диаметром $0,007 \text{ м}$ для стабилизации скорости разливки расплава. Отверстие для слива металла закрывается конусной пробкой из графита марки ЭГ15. После прохождения реакции и выдержки расплава в тигле в течение 10 с (для обеспечения разделения металла и шлака) пробка выбивается, форма заполняется металлом. Форма для получения образцов представляет собой цилиндр с глухим дном с внутренним диаметром $0,03 \text{ м}$, толщиной стенки $0,03 \text{ м}$ и высотой $0,15 \text{ м}$. Перед проведением экспериментов огнеупорная оснастка нагревается до 150°C и покрывается противопригарной краской следующего состава: маршалит – 20% , жидкое стекло – 5 , вода – 74 , борная кислота – 1% . Железоалюминиевая термитная смесь включает компоненты фракций $0,2\text{--}1,5 \text{ мм}$ и преимущественно состоит из восстановителя, железной окалины и добавок. Химический состав восстановителя, %: $\text{Al} = 98,627$; $\text{Cu} = 0,018$; $\text{Si} = 0,855$; $\text{Mn} = 0,019$; $\text{Fe} = 0,462$; $\text{Cr} = 0,016$; $\text{Ni} = 0,004$. Химический состав железной окалины, %: $\text{Fe} = 71,500$; $\text{O}_2 = 22,639$; $\text{Si} = 2,960$; $\text{Mn} = 1,188$; $\text{Al} = 0,697$; $\text{Cu} = 0,444$; $\text{Ni} = 0,188$; $\text{Cr} = 0,173$; $\text{C} = 0,150$; $\text{S} = 0,030$; $\text{P} = 0,030$. В качестве наполнителей использованы ферромарганец ФМн-78(А) и крупка стального сплава марки Ст3сп. Ферромарганец ФМн-78(А) фракции до $0,04 \text{ мм}$, отвечающий требованиям ГОСТ 4755-91 «Ферромарганец. Технические требования и условия поставки», с химическим составом, %: $\text{Mn} = 78,050$; $\text{C} = 6,990$; $\text{Si} = 0,790$; $\text{S} = 0,008$; $\text{P} = 0,189$. Крупка стального сплава марки Ст3сп по ГОСТ 380-2005, фракции $1\text{--}3 \text{ мм}$ с химическим составом, %: $\text{C} = 0,180$; $\text{Mn} = 0,520$; $\text{Si} = 0,210$; $\text{S} = 0,021$; $\text{P} = 0,028$; $\text{Ni} = 0,010$; $\text{Cr} = 0,110$; $\text{Cu} = 0,220$. Основой смесей является термит с 22% алюминиевого сплава и 78% комплекса оксидов железа. В термит свыше 100% вводятся наполнители, которые содержат $0,2\%$ ФМн-78(А) от массы экзотермической смеси, остальное Ст3сп. Составы применяемых термитных композиций и химический состав получаемых сплавов приведены в таблице.

Подготовка термитных смесей осуществляется следующим образом: перемешивание в смесителе в течение 10 мин ; сушка при 150°C в течение 1 ч ; при повторном перемешивании (в течение 10 мин) достигается гомогенизация смеси и частичное дробление компонентов, приводящее к очистке поверхности частиц восстановителя от оксидной плёнки и обеспечению интенсивного взаимодействия между реагирующими частицами.

Химический состав образцов определяли с помощью оптико-эмиссионного спектроанализатора TASMAR Q4 170 производства BRUKER (США). При определении микроструктуры металла отливок использовали растровый электронный микроскоп EVO LS-10 производства ZEISS (Великобритания) при 10000 -кратном увеличении. Механические характеристики определяются посредством выполнения стандартизированного теста на растяжение согласно ГОСТ 1497-84. В качестве средства измерения использовали универсальную испытательную машину AGXplus-250kN производства Shimadzu (Япония). Фрактограммы мест излома образцов после испытаний на растяжения исследовали посредством растрового электронного микроскопа EVO LS-10 производства ZEISS (Великобритания) при 1200 -кратном увеличении.

Процедура неполного отжига образцов алюмотермитных сплавов производилась в электрической лабораторной печи SNOL 12/1300 муфельного типа. Режимы неполного отжига для всех образцов следующие: нагрев со скоростью 10 °С/мин в течение 76 мин до 760 °С, выдержка при этой температуре – 720 мин, охлаждение со скоростью 0,8 °С/мин на протяжении 592 мин до температуры окружающей среды. Закалка экспериментальных образцов металлов, полученных методом алюмотермии, осуществляется нагревом образцов до 770 °С в течение 9 мин с последующим погружением в машинное масло до полного охлаждения.

Применяемые экзотермические смеси и химический состав получаемых экспериментальных сплавов

Компоненты	Содержание компонентов в экзотермических смесях, %				
	Смесь № 1	Смесь № 2	Смесь № 3	Смесь № 4	Смесь № 5
	Термит				
Суммарное содержание наполнителей, %	0,2	1,6	3	4,3	5,6
Химический состав получаемых сплавов, %					
C	1,93	1,870	1,830	1,830	1,320
Mn	0,25	0,290	0,290	0,280	0,280
Si	0,25	0,280	0,260	0,240	0,240
S	0,015	0,017	0,016	0,016	0,017
P	0,017	0,027	0,026	0,027	0,027
Cr	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Ni	0,100	0,100	0,100	0,110	0,110
Cu	0,150	0,160	0,160	0,160	0,160
Al	0,085	0,260	0,220	0,320	0,440
Fe	97,153	96,946	97,048	96,967	97,356
Итого, %	100	100	100	100	100

Примечание. Здесь и далее иллюстративный материал сделан авторами.

Режимы низкого отпуска: нагрев заготовок до температуры 180 °С, выдержка в печи при этой температуре 40 мин с дальнейшим охлаждением на воздухе до температуры окружающей среды.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Экспериментально установлено, что предел прочности при растяжении образцов получаемых металлов с увеличением содержания добавок в термитных смесях от 0,2 до 1,6% снижается на 14%. Это обусловлено снижением энергетического запаса термитной смеси за счет введения наполнителей, влияющего на количество аккумулированного тепла сплавом и его невысоким выходом. В целом снижение показателей предела прочности при испытаниях образцов на разрыв обусловлено наличием в них высоких внутренних напряжений, способствующих разрушению и определяемых высокой скоростью охлаждения отливки в форме. При содержании добавок более 1,6% предел прочности при растяжении растет. При содержании наполнителей в смесях 4,3% предел прочности при растяжении образцов достигает 509 МПа, что свидетельствует о благоприятных условиях их получения: температуре заливки сплава, начальной температуре формы, химическом составе сплава, количестве заливаемого сплава и интенсивности охлаждения литых заготовок. После пика значений прочности наблюдается ее снижение на 57%, связанное с общим снижением выхода металлической фазы, а также с невысокой теплотворной способностью экзотермической смеси. Неполный отжиг позволяет снять внутренние напряжения образцов за счет исправления литой структуры заготовок и устранения ликвации отдельных элементов, в результате чего предел прочности

образцов для большинства используемых смесей возрастает. Так, увеличение содержания наполнителей в термитных композициях обеспечивает почти линейную зависимость снижения предела прочности от 562 до 402 МПа. После неполного отжига предел прочности образцов в большей степени зависит от химического состава сплава и в меньшей – от условий охлаждения, что подтверждается сопоставлением кривой содержания углерода в сплавах с кривой предела их прочности. Снижение содержания углерода в образцах приводит к сокращению предела их прочности. При использовании смесей с содержанием наполнителей 4,3% у термообработанных образцов наблюдается незначительное снижение предела прочности при растяжении, связанное с устранением напряженных структур. Следующие после неполного отжига закалка и низкий отпуск позволили повысить предел прочности исследуемых образцов еще на 25–64% за счет изменения структурных составляющих. Максимальный предел прочности при растяжении (793 МПа) наблюдается у сплавов, полученных с применением термитных композиций, содержащих 4,3% наполнителей (так же, как у образцов, не прошедших неполный отжиг).

Анализ полученных результатов показал, что зависимости пределов прочности обработанных и необработанных образцов имеют схожий характер. Увеличение предела прочности необработанных образцов и образцов, прошедших полный цикл термообработки, составляет от 56 до 201%. На рис. 1 представлены зависимости влияния содержания наполнителей в термитных композициях на предел прочности при растяжении экспериментальных образцов и на содержание в них углерода.

Рис. 1. Зависимости предела прочности при испытании на разрыв образцов из экспериментальных сплавов и содержания в них углерода от количества вводимых добавок:

А – литые образцы (без термообработки); Б – образцы, прошедшие неполный отжиг; В – образцы, прошедшие закалку и низкий отпуск; Г – содержание углерода (по вспомогательной оси).

Установлено, что образцы, не прошедшие термическую обработку, имеют зависимость относительного удлинения, подобную закономерности изменения предела прочности от количества вводимых наполнителей в смесь, но со своими значениями. Так, при испытании экспериментальных образцов на растяжение, с увеличением содержания добавок в термитных смесях от 0,2 до 1,6%, показатель относительного удлинения снижается на 23% и составляет 1,3%. Затем следует прирост этого параметра на 118% до содержания добавок в

смесях 4,3% со значением 3,29%, после чего происходит интенсивное снижение значений относительного удлинения при растяжении до 0,43%. Изменение значений относительного удлинения образцов объясняется схожими причинами и условиями, что и изменение значений предела прочности при растяжении. Повышение показателей относительного удлинения осуществляется за счет неполного отжига, позволяющего сокращать внутренние напряжения путем исправления структуры и устранения ликвации отдельных элементов. Показатели относительного удлинения образцов, подвергшихся неполному отжигу, в интервале содержания наполнителей в термитных смесях от 0,2 до 4,3%, снижаются на 36% и составляют 2,93%. Далее следует интенсивный рост (до 4,27%) – при содержании наполнителей в термитных смесях до 5,6%, вызванный изменением вида структурных составляющих. Закалка и низкий отжиг, отпуск приводят к снижению показателей относительного удлинения образцов в интервале содержания наполнителей в термитных смесях от 0,2 до 3% на 33–57%. При исследовании образцов, полученных с применением термитных композиций с содержанием наполнителей свыше 4,3%, наблюдается незначительное, по сравнению с образцами, прошедшими отжиг, изменение (не более 11%). В целом проведенный комплекс операций термообработки позволил повысить показатели относительного удлинения образцов на 20–784% по сравнению с образцами, не подвергаемыми термообработке. На рис. 2 представлены зависимости изменения значений относительного удлинения экспериментальных образцов при испытании на растяжение и содержания в них углерода от количества вводимых наполнителей в термитную смесь.

Рис. 2. Зависимости относительного удлинения при испытании на разрыв образцов из экспериментальных сплавов и содержания в них углерода от количества добавок: А – литые образцы (без термообработки); Б – образцы, прошедшие неполный отжиг; В – образцы, прошедшие закалку и низкий отпуск; Г – содержание углерода (по вспомогательной оси).

Экспериментально определено, что в сплаве, получаемом с применением термитной смеси с содержанием наполнителей 4,3%, практически не меняются показатели относительного удлинения при проведении неполного отжига. В сплаве не меняются показатели этого параметра после **закалки низкого отпуска**. Различие составляет не более 11%. Таким образом, свойства образцов, сформированные исходными структурными составляющими, соответствуют свойствам образцов, определяемых структурами, образующимися в результате

термической обработки. Это позволяет эксплуатировать литые заготовки в условиях высоких температур без изменения свойств.

На рис. 3 приведена диаграмма испытания на растяжение образцов, полученных с применением термитной смеси № 4 и характеризующихся незначительным изменением значений их относительного удлинения после комплекса термической обработки. В целом для всех экспериментальных образцов характерно упрочнение при пластическом течении.

Рис. 3. Диаграммы растяжения образцов, полученных из термитной смеси № 4:
А – до термообработки; Б – после неполного отжига; В – после закалки и низкого отпуска.

По диаграммам испытаний на растяжение можно сделать вывод, что все образцы имеют хрупкое разрушение. Сложность визуального определения характера излома в месте разрушения образцов определила необходимость проведения исследований на электронном микроскопе. Анализ результатов исследований подтвердил наличие хрупкого транскристаллитного разрушения. На рис. 4 представлены фрактограммы изломов образцов, полученных с применением термитной смеси № 4, до и после термической обработки.

Рис. 4. Фрактограммы изломов образцов, полученных из термитной смеси № 4 (x1200):
а – до термообработки; б – после комплекса термообработки.

Полученные образцы с применением термитных составов (от 0,2 до 4,3% наполнителей) содержат от 1,83 до 1,93% углерода. Основной структурной составляющей до применения термообработки является троостит с участками цементитного видманштетта, образование которого обуславливается большим переохлаждением и небольшой скоростью теплоотвода. При этом кристаллы цементита растут в аустените в виде пластин и игл. Образцы, полученные из термитной смеси с содержанием наполнителей 5,6%, имеют химический состав, соответствующий марочному инструментальному сплаву У13 по ГОСТ 1435-74. В них идентифицируется видманштеттова структура с локализованными областями пластинчатого перлита, переходящего в дисперсную форму – сорбит. Соответствие по химическому составу экспериментальных сплавов инструментальным сталям обусловило выбор режима отжига. Для получения зернистого перлита в структурах указанных сталей нагрев должен ненамного превышать критическую точку A_{C1} для исключения образования пластинчатого перлита, осложняющего механическую обработку заготовок. При нагреве до 760 °С заэвтектоидных сталей происходит превращение в аустенит только перлита, а цементит остается, и образуется структура цементита и аустенита. При дальнейшем медленном охлаждении из аустенита образуется перлитная структура с зернистым цементитом.

После неполного отжига структура экспериментальных образцов с содержанием углерода свыше 1,3% состоит из зернистого перлита с баллом зерна 9–10 по ГОСТ 8233-56. Структура зернистого перлита стали позволяет улучшить обработку резанием, следовательно – изготовить из исследуемых сплавов инструмент с требуемыми свойствами.

Для определения возможности упрочнения экспериментальных сплавов путем термообработки образцы, выполненные из них, подвергались закалке и низкому отпуску. Установлено, что структура заэвтектоидных сталей, полученных экспериментально, представляет собой мартенсит с размером зерна, соответствующим 1–2 баллам по ГОСТ 8233-56, с локализованными областями структурно свободного цементита.

На рис. 5 представлены структуры образцов, полученных с применением термитных смесей № 4 и № 5.

Установлено, что литые заготовки, полученные методом алюмотермии с использованием термитных смесей, содержащих 0,2–5,6% наполнителей, имеют структуру перлита и более дисперсных фаз сорбита и троостита с участками цементитного видманштетта. Применение неполного отжига позволило сформировать структуру с зернистым перлитом, улучшить показатели предела прочности при растяжении и значения относительного удлинения. Последующая закалка и низкий отпуск обеспечили возможность в значительной степени повысить показатели предела прочности при растяжении по сравнению с отожжёнными образцами, при снижении показателей относительного удлинения экспериментальных образцов, полученных методом алюмотермии путем формирования в их структуре мартенсита и структурно свободного цементита.

Выявлено, что термитная смесь с содержанием 4,3% наполнителей обеспечивает получение образцов с показателями относительного удлинения 2,93–3,29%, которые фактически не зависят от условий термообработки, при этом предел прочности имеет значение 490–509 МПа и не зависит от неполного отжига, однако возрастает при закалке и низком отпуске до 62% и достигает значения 793 МПа.

а

б

в

г

д

е

**Рис. 5. Структура образцов, полученных при использовании смесей (x10000):
а – № 4 до термообработки; в – № 4 после неполного отжига; д – № 4 после заковки
и низкого отпуска; б – № 5 до термообработки; г – № 5 после неполного отжига;
е – № 5 после заковки и низкого отпуска.**

Выводы

Таким образом, алюмотермия позволяет получать сплавы с различным химическим составом и свойствами, в том числе соответствующими или превышающими прочностные характеристики марочных видов сплавов путем введения в состав термитных композиций различных наполнителей, обеспечивающих высокий выход металлической фазы и оптимальные температурные показатели продуктов реакции. Комплекс операций термической обработки экспериментальных образцов исключает неоднородность структуры и формирует её необходимые составляющие, что обуславливает получение высоких механических свойств материалов посредством применения алюмотермии и изделий из них, в том числе ответственного назначения, например режущих инструментов, пружин и рессор. Следующим этапом исследований станет изучение поведения таких свойств заготовок, как твердость, износостойкость, ударная вязкость, прочность и относительное удлинение при температурах, отличающихся от температур, соответствующих традиционным операциям термообработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герцык С.И., Волгина Н.И., Фурсов Д.С. Влияние параметров термообработки на ударную вязкость и структуру стали 40ХГМ // *Электromеталлургия*. 2018. № 10. С. 18–23.
2. Карпов Е.Ю., Габельченко Н.И., Габурай Ю., Карпова Н.В. Повышение качества отливок из стали 45Л путем подбора оптимального режима термической обработки // *Технология машиностроения*. 2018. № 5. С.10–14.
3. Мешков Ю.А., Шиян А.В. Оценка степени охрупчивания конструкционных сталей под действием концентраторов напряжений // *Сталь*. 2014. № 11. С 72–81.
4. Bin S.U., Zhiqiang Han, Yongrang Zhao, Bingzhen Shen, Enxian Xu, Shujun Huang, Baicheng Liu. Numerical Simulation of Microstructure Evolution of Heavy Steel Casting in Casting and Heat Treatment Processes. *ISIJ International*. 2014;54(2):408–414. DOI: 10.2355/isijinte-rnational.54.408
5. Efendi Maburri, Rahmat Ramadhan Pasaribu, Moh. Tri Sugandi, Sunardi Sunardi. Effect of high temperature tempering on the mechanical properties and microstructure of the modified 410 martensitic stainless steel. *AIP Conference Proceedings*. 2018(1964):020032, May 2018 with 51 Reads. DOI: 10.1063/1.5038314
6. Kallio M., Ruuskanen P., Maki J., Poylio E., Lahteenmaki S. Use of the Aluminothermic Reaction in the Treatment of Steel Industry By-Products. *J. of Materials Synthesis and Processing*. 2000;8:87–92. DOI: 10.1023/A:1026569903155
7. Komarov O.N., Zhilin S.G., Potianikhin D.A., Predein V.V., Abashkin E.E., Sosnin A.A., Popov A.V. The influence of structure on the strength properties of casting steel obtained with the use of thermite materials. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1785:040027. DOI: 10.1063/1.4967084
8. Popov A.V., Komarov O.N., Predein, V.V., Zhilin S.G. Nondestructive evaluation of the service life of casting products made of thermite alloys. *AIP Conference Proceedings*. 2018;2053. DOI: 10.1063/1.508451
9. Ziatdinov M.K., Shatokhin I.M., Leont'ev L.I. SHS technology for composite ferroalloys. *Metallurgical SHS: nitrides of ferrovandium and ferrochromium*. Steel in translation. 2018;48(5):269–276. DOI: 10.3103/S0967091218050133
10. Zhengning Li, Fuan Wei, Peiqing La, Hongding Wang, Yupeng Wei. Enhancing Ductility of 1045 Nanoeutectic Steel Prepared by Aluminothermic Reaction through Annealing at 873 K. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017, Article ID 5392073. DOI: 10.1155/2017/5392073.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-3>

Popov A., Zhilin S., Komarov O.

ARTYOM POPOV, Junior Researcher, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6588-9937>,
ScopusID: 57193351972, e-mail: popov.av@protonmail.com
SERGEY ZHILIN, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
ScopusID: 56047191300, e-mail: zhilin@imim.ru
OLEG KOMAROV, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences.,
Associate Professor, ScopusID: 56432713000, e-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru
Institute of Machinery and Metallurgy, FEB RAS
1 Metallurgov St., Komsomolsk-na-Amure, Russia, 681005

Influence of heat treatment modes on the structure and properties of cast blanks obtained by aluminothermy method

Abstract: The influence of sequential operations of heat treatment (under annealing, heat hardening, low-temperature tempering) on formation of structural components, which determine the tensile strength, extension strain and fracture mode of iron-carbon alloy obtained by aluminothermy method is investigated in this work. High-carbon (with a carbon content of 1.32–1.93%) experimental samples of metals obtained from thermite mixtures with a content of 0.2 to 5.6% of sealant with carbon crucibles and molds were studied. It was defined that under annealing makes it possible to increase the tensile strength (from 33 to 84%) and relative elongation of samples (from 108 to 893%) under tension, due to reduction of internal stresses, when structural components transfer to granular perlite. Quenching and low annealing operations can increase the tensile strength (from 25 to 64%), while decreasing their relative elongation (from 11 to 57%). The structure of the heat-treated samples can be described as martensite and carbide phases. It was found that in a sample obtained from a termite composition containing 4.3% of fillers, the elongation practically does not change depending on the applied heat treatment operations, and tensile strength increases significantly only after quenching and low tempering. Generally, sequential heat treatment operations enabled reduction of internal stresses of cast billets, correct their structure, significantly increase the tensile strength of the samples under study, while changing the relative elongation.

As a result of aluminothermy application, high mechanical properties of materials and critical products, including cutting tools, springs and springs, were achieved.

Perspective of further research: effects of temperatures different from those under traditional heat treatment conditions on hardness, wear resistance, impact strength, strength and elongation.

Keywords: reduction of casting stresses, increase in strength, heat treatment of aluminothermic steels, incomplete annealing, physical and mechanical properties, aluminothermy, casting.

REFERENCES

1. Gercyk S.I., Volgina N.I., Fursov D.S. Influence of heat treatment parameters on impact strength and structure of 40KhGM steel. *Electrometallurgy*. 2018(10):18–23.
2. Karpov E.Ju., Gabel'chenko N.I., Gaburaj Ju., Karpova N.V. Improving the quality of steel castings 45L by selecting the optimal heat treatment mode. *Engineering Technology*. 2018(5):10–14.
3. Meshkov Yu.A., Shiyani A.V. Assessment of the degree of embrittlement of structural steels under the action of stress concentrators. *Steel*. 2014(11):72–81.

4. Bin S.U., Zhiqiang Han, Yongrang Zhao, Bingzhen Shen, Enxian Xu, Shujun Huang, Baicheng Liu. Numerical Simulation of Microstructure Evolution of Heavy Steel Casting in Casting and Heat Treatment Processes. *ISIJ International*. 2014;54(2):408–414. DOI: 10.2355/isijinternational.54.408
5. Efendi Maburi, Rahmat Ramadhan Pasaribu, Moh. Tri Sugandi, Sunardi Sunardi. Effect of high temperature tempering on the mechanical properties and microstructure of the modified 410 martensitic stainless steel. *AIP Conference Proceedings*. 2018(1964):020032, May 2018 with 51 Reads. DOI: 10.1063/1.5038314
6. Kallio M., Ruuskanen P., Maki J., Poylio E., Lahteenmaki S. Use of the Aluminothermic Reaction in the Treatment of Steel Industry By-Products. *J. of Materials Synthesis and Processing*. 2000;8:87–92. DOI: 10.1023/A:1026569903155
7. Komarov O.N., Zhilin S.G., Potianikhin D.A., Predein V.V., Abashkin E.E., Sosnin A.A., Popov A.V. The influence of structure on the strength properties of casting steel obtained with the use of thermite materials. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1785:040027. DOI: 10.1063/1.4967084
8. Popov A.V., Komarov O.N., Predein, V.V., Zhilin S.G. Nondestructive evaluation of the service life of casting products made of thermite alloys. *AIP Conference Proceedings*. 2018;2053. DOI: 10.1063/1.508451
9. Ziatdinov M.K., Shatokhin I.M., Leont'ev L.I. SHS technology for composite ferroalloys. *Metallurgical SHS: nitrides of ferrovanadium and ferrochromium. Steel in translation*. 2018;48(5):269–276. DOI: 10.3103/S0967091218050133
10. Zhengning Li, Fuan Wei, Peiqing La, Hongding Wang, Yupeng Wei. Enhancing Ductility of 1045 Nanoeutectic Steel Prepared by Aluminothermic Reaction through Annealing at 873 K. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017, Article ID 5392073. DOI: 10.1155/2017/5392073.