**УДК 620.22: 669.017**

**Ю.Ю. Жигуц**
ДВНЗ «Ужгородский национальный университет», Украина
*Тел.:* +38 (0312) 643092; *E-mail:* yuzhiguts@gmail.com

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМИТНОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

*Одним из перспективных путей создания материалов с новыми свойствами является использование, предложенной в данной работе, технологии производства высокопрочных чугунов с помощью высокоэкзотермических реакций. Исходные порошковые материалы – ингредиенты химической реакции вступают в металлотермическое взаимодействие. В результате экспериментальных термитных плавок получены фасонные отливки. Для них устанавливали химический состав, механические и технологические свойства. Проведенное исследование позволило определить состав шихты для синтеза термитного чугуна, усовершенствовало технологию получения металлотермической шихты и синтеза сплава.*

***Ключевые слова:*** *металлотермия, высокопрочный термитный чугун, свойства.*

**Введение**

Термитные реакции известны уже более века и их используют для изготовления ферросплавов и разогрева экзотермических литейных прибылей в литейном производстве [1,2]. Использование термитных реакций для синтеза материалов, открывает широкие возможности получения литых сплавов практически любого химического состава и структуры.

**Цель и постановка задачи исследования**

Улучшение свойств материалов достигают, преимущественно, использованием традиционных технологий получения сплавов и последующей термической, химико-термической и другими способами обработки. Но их высокая энергоемкость, необходимость сочетания нескольких технологических этапов обработки, соблюдение экологических требований приводят к потребности поиска других путей получения свойств материалов, дающих возможность избежать названных недостатков. Одним из таких перспективных путей может быть использование теоретически разработанного и экспериментально обоснованного способа получения термитных высокопрочных чугунов в результате высокоекзотермических реакций.

Учитывая преимущества и специфические области использования термитных методов получения высокоуглеродистых сплавов, возникла проблема комплексного исследования термитных чугунов, определения их механических, технологических и служебных свойств, и на основании полученных данных установление наиболее оптимальных областей использования данных сплавов.

**Анализ метода исследования**

В пользу термитных сплавов говорят преимущества термитных процессов, а именно, их автономность, отсутствие потребности в источниках электроэнергии, простота и дешевизна технологического оборудования, высокая производительность процесса (время проведения синтеза длится в зависимости от массы и объема металлотермической шихты от нескольких десятков секунд до нескольких минут) [1-3]. Кроме перечисленного, обращает на себя внимание и возможность использования для компоновки шихты отходов металлообрабатывающего и термического производств (железной окалины, помола алюми-

ниевой стружки и огарков графитовых электродов, отсева пыли легированной стали с фильтров в литейных цехах и др.).

Широкое применение высокопрочных чугунов обусловлено кроме их высоких механических и технологических свойств неплохой свариваемостью.

Таким образом, для изготовления и ремонта фасонных деталей из высокопрочных чугунов появляется возможность использовать металлотермические методы, которые в последнее время находят все большее распространение.

**Материалы и методика приготовления экзотермической смеси**

При компоновке металлотермической шихты были использованы материалы: алюминий для раскисления и алюминотермии А-897 ГОСТ 295-79; силикомарганец СМн26 ГОСТ 4756-77; ферросилиций ФС65Ал3,5 ГОСТ 1415-78; порошок алюминиевый ПА-3 ГОСТ 6058-73; ферромарганец ФМн70 ГОСТ 4761-80; технический углерод ТУ 14-7-24-80; порошок титановый химический ПТХ-1 ТУ 48-10-78-83; железная окалина (кузнечного и прокатного производств) среднего химического состава (в % по массе): 0,05 *C*; 0,10…0,35 *Si*; 0,10…0,35 *Mn*; 0,01…0,03 *S*; 0,01…0,03 *P*; 40…50 $Fe_2O_3$; 50…60 *FeO*.

Следует отметить, что порошковую шихту предварительно просушивали при температуре 150-180$^0$С, смешивали и уплотняли, а после этого помещали в камеру металлотермического реактора. Для улучшения шлакоотделения в шихту добавляли полевой шпат ($CaF_2$). Шихту рассчитывали по стехиометрическим соотношениям компонентов реакции [5], а далее учитывали усвоение отдельных компонентов реакции с помощью соответствующих коэффициентов. Одновременно проводили термодинамический расчет, который позволял установить адиабатическую температуру реакции [5], которая должна быть выше температуры плавления глиноземистых шлаков (приблизительно 2400$^0$С).

Для определения массы металлического слитка и выхода металла из шихты были проведены микроплавки в металлотермическом реакторе с разным процентным соотношением компонентов в смеси. Инициирование процесса горения проводилось специальным запалом, изготовленным из титанового порошка. В последующем конструкция металлотермического реактора была усовершенствована [4] и использована как для получения термитного высокопрочного чугуна в виде отливок, так и для сваривания чугунных заготовок. В результате проведения экспериментальных термитных плавок были получены фасонные отливки, для которых устанавливали химический состав, механические, технологические и некоторые служебные свойства синтезированного сплава.

**Теоретические и экспериментальные исследования**

Отличительной особенностью термитного высокопрочного чугуна являлись не только его способ получения, но и весьма компактная, близкая к шаровидной форма включений графита. Как и в промышленном чугуне, регулировать свойства термитного высокопрочного чугуна можно изменяя структуру металлической основы.

Варьируя химический состав шихты при металлотермическом способе синтеза, условия охлаждения отливки, формировали термитный чугун с ферритной, перлитной, сорбитной, мартенситной, аустенитной структурой и соответственно с заданными прочностными и эксплуатационными свойствами.

Результаты механических испытаний полученных чугунов показаны в табл. 1. Анализ и сравнение полученных данных свидетельствовал о том, что основные механические свойства термитных марок высокопрочных чугунов не хуже промышленных.

При шаровидной форме графита и перлитной структуре основы термитные чугуны показали наиболее высокие значения предела прочности, а максимальная пластичность получена – при ферритной структуре. В литом состоянии предел прочности термитного чугуна с перлитной структурой достигал 600…700 МПа, предел прочности при сжатии

термитного высокопрочного чугуна составлял ~2000 МПа, на изгиб – 700…1200 МПа, а стрела прогиба изменялась в пределах 4...30 мм, предел прочности при кручении составлял 440 МПа при ферритной структуре и 700...800 МПа при перлитной структуре. Предел текучести термитного чугуна выше, чем у углеродистой стали и составлял 320…430 МПа, а для некоторых образцов достигал 800 МПа. Отношение предела текучести к пределу прочности при растяжении у термитного чугуна составляло 0,75…0,8 (для сравнения у промышленной стали 0,55…0,61). Относительное удлинение термитного высокопрочного чугуна в литом состоянии составляло 1,5...3,0%. При содержании в термитном чугуне фосфора более 0,15% образовывалась хрупкая фосфидная эвтектика с микротвердостью 11000...14100 МПа, которая уменьшала относительное удлинение.

Таблица 1. Механические свойства термитного высокопрочного чугуна[1]

| № п/п | Термитный чугун, аналог промышленного | $\sigma_в$ МПа | $\sigma_{0,2}$ МПа | б, % | $a_н$, МПа | НВ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ВЧ 45-0 | 470 | 380 | - | - | 210...250 |
| 2 | ВЧ 45-5 | 460 | 360 | 5 | 20 | 190...210 |
| 3 | ВЧ 50-1,5 | 510 | 370 | 1,5 | 15 | 220...240 |
| 4 | ВЧ 60-2 | 600 | 430 | 2 | 15 | 210...240 |

[1]Механические свойства чугуна определяли на образцах Ø10 мм, длиной 50 мм, вырезанных из трефовидных проб.

Твердость термитных чугунов изменялась в зависимости от структуры матрицы (для ферритной – 160…210 НВ, для перлитной – 190…260 НВ, для отбеленного термитного чугуна – 280…340 НВ), температуры и содержания углерода. Последующее исследование показало, что наибольшую ударную вязкость имел термитный чугун с ферритной структурой, при этом повышенное содержание кремния, марганца, фосфора и серы понижали ударную вязкость.

В результате исследований отмечалось, что железная окалина, используемая в металлотермическом синтезе, может ухудшать литейные свойства чугуна. Повышение содержания углерода в высокопрочном чугуне приводило даже к некоторому повышению механических свойств, в отличие от влияния углерода на основные механические свойства серого термитного чугуна. Учитывая оптимизацию свойств чугуна, содержание углерода должно находиться в пределах 3,1...3,6%. Уменьшение содержание углерода с 3,9% до 2,8% привело к повышению $\sigma_в$ и $\sigma_т$ – на 30 МПа, а твердости на ~10 НВ.

Кремний, являясь сильным графитизатором, приводил к уменьшению количества перлита в структуре термитного чугуна и, частично растворяясь в феррите, повышал его прочность. Увеличение содержания кремния в термитном чугуне с 2,1 до 3,9% приводило к возрастанию предела прочности при растяжении, а максимальная ударная вязкость устанавливалась при 2,1...3,6%. Уменьшение содержания кремния менее 2,1% приводило к появлению отбела и повышению твердости за счет образования значительного количества цементита. С уменьшением содержания кремния увеличивалось количество перлита в структуре термитного чугуна, а увеличение *Si* приводит к появлению значительного количества феррита и уменьшению прочности. Регулировать количество феррита в структуре чугуна можно изменяя содержание ферросилиция в металлотермической шихте. Увеличение содержания марганца уменьшало содержание феррита в матрице и увеличивало перлитную составляющую структуры, что приводило к росту прочности. Поэтому содержание марганца в термитном чугуне должно быть в пределах 0,4...1,3%. При этом содержание фосфора не должно превышать 0,12...0,15%, а серы – 0,03%. Комбинирование алюмино-

термии и магниетермии позволяло увеличить содержание магния в высокопрочном чугуне до 0,03...0,08%, что стабилизировало глобулярный графит. Превышение указанного содержания остаточного магния способствовало появлению в структуре цементита и как следствие существенно ухудшало механические свойства. Алюминий присутствовал в составе синтезированных алюминотермией сплавов виде следов (до 0,003%), как результат алюминотермического способа их получения. Выявлено, что увеличение содержания *Al* более чем 0,4% препятствует образованию шаровидного графита и уменьшает механические свойства высокопрочного чугуна, поэтому содержание *Al* в сплаве ограничивали 0,2...0,3%.

Продолжение работы было направлено на исследование технологических свойств термитного высокопрочного чугуна. Термитный высокопрочный чугун обладал высокой жидкотекучестью, что позволяло, несмотря на высокие температуры синтеза, получать отливки без усадочных и газовых раковин, усадочной пористости. Зависимость жидкотекучести высокопрочного термитного чугуна от температуры показана на рис. 1.

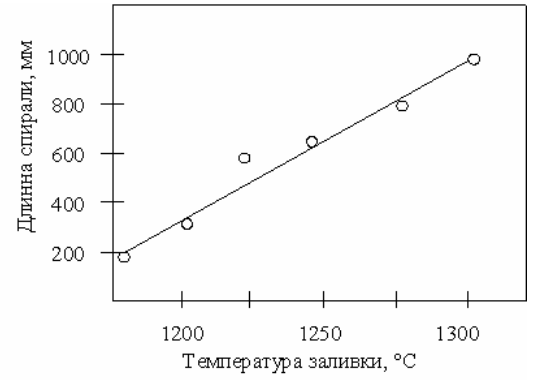


Рис. 1. Зависимость жидкотекучести термитного высокопрочного чугуна от температуры

Установлено, чем больше содержание углерода, тем выше жидкотекучесть чугуна. Она достигает максимума для термитного чугуна заэвтектического состава. У термитного чугуна эвтектического состава значителен объем усадочных раковин, а в чугуне доэвтектического состава наблюдалась усадочная пористость.

Характерной особенностью термитного высокопрочного чугуна являлось большое предусадочное расширение, что значительно уменьшало его склонность к образованию горячих трещин. В среднем линейная усадка высокопрочного чугуна составляла 0,7...1,2%.

Одновременно с исследованием технологических свойств рассматривалась возможность организации термитного сваривания высокопрочного чугуна. Установлено, что его свариваемость находилась на уровне свариваемости углеродистой стали. Это положительное свойство использовалось для сваривания термитным способом не только заготовок из высокопрочного, но и серого чугуна. Таким образом, удалось получить сварной шов со свойствами лучшими, чем у свариваемого материала. В проведенных экспериментах использовали термитный чугун с шаровидным графитом, полученный в результате горения термитной смеси следующего состава (% по массе): порошок графита – 3,5…6,3; лигатура железо-кремний-магний-редкоземельные металлы (церий) – 3,0…6,0; плавиковый шпат – 2,0…3,0; железоалюминиевый термит – остальное. Результаты этих испытаний показаны в табл. 2.

Синтезированный высокопрочный чугун позволял сваривать чугунные заготовки с получением сварного шва прочностью на растяжение ~550 МПа.

Термитная сварка чугуна этим способом у 2,5…4 раза дороже традиционной технологии сваривания чугунных деталей [6]. Экономический эффект достигается только в том случае, когда чугунные детали необходимо сваривать в условиях отсутствия стандартного сварочного оборудования, внешних источников электроэнергии и в сжатые сроки. В процессе сваривания получали высокое качество шва за счет отсутствия в нем зоны отбела, приобретения швом структуры и свойств высокопрочного чугуна.

Таблица 2. Свойства термитного сварного шва[1]

| № п/п | Сплав | Свойства зоны сваривания | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Количество шаровидного графита в структуре, % | Твердость, *НВ* | $\sigma_в$, МПа | $\sigma_{10}{}^1$, % |
| 1 | Серый чугун | 0 | 170 | 210 | 0 |
| 2 | Переходная зона[2] | 30–70 | – | – | – |
| 3 | Высокопрочный термитный чугун | 85–95 | 190 | 550 | 4,5 |

[1]Механические свойства определено на стандартных образцах диаметром 10 мм.
[2]Отбела нет.

Обрабатываемость чугуна зависела от его прочности и твердости. Термитный чугун с ферритной структурой имел невысокую прочность, твердость и наилучшую обрабатываемость. Стойкость резцов из быстрорежущих сталей при точении ферритного термитного высокопрочного чугуна почти в 2 раза выше, чем при точении перлитного, а усилие резания можно увеличивать на 50...60%. Для ферритного чугуна оптимальная скорость резания достигала 200...350 м/мин., т.е. на 20...25% больше, чем перлитного. Скорость резания для термитного высокопрочного чугуна показана в табл. 3.

Особенностью термитного высокопрочного чугуна являлось то, что его можно применять для изготовления как мелких, так и крупных деталей. Использование же металлотермической шихты для синтеза термитного высокопрочного чугуна в технологии изготовления отливок с термитными прибылями высокого температурного градиента позволяло экономить до 70% сплава прибыли. Питание прибыли перегретым высокопрочным чугуном того же химического состава, что и заливаемый в форму, приводило к устранению ликвации подприбыльной зоны. Кроме того, в сравнении со сталью этот материал имеет более высокие эксплуатационные свойства (износостойкость, жаростойкость, антикоррозионные и антифрикционные свойства).

Таблица 3. Скорость резания при обработке термитного высокопрочного чугуна

| Структура чугуна | Скорость резания[1], м/мин. | |
|---|---|---|
| | Инструмент из быстрорежущей стали Р6М5 | Инструмент из твердого сплава ВК8* |
| Ферритная | 45...70 | 90...180 |
| Феррито-перлитная | 35...45 | 60...100 |
| Перлитная | 35...45 | 60...90 |

[1]Обтачивание производилось пластинами тип 1 ГОСТ 19045-80.

Данные о стойкости и расходе промышленных прокатных высокопрочных валков изготовленных с применением технологии термитных прибылей указаны в табл. 4. Твердость рабочего слоя валков из отбеленного высокопрочного чугуна составляла 380…410 НВ.

Таблица 4. Стойкость и расход прокатных валов, изготовленных с использованием технологии металлотермических прибылей

| Вид проката | Продолжительность работы валков из термитного чугуна | Расход валков на 1 т проката, кг |
|---|---|---|
| Динамная сталь | 410 | 23,5 |
| Трансформаторная сталь | 560 | 12,7 |
| Жесть | 320 | 33,2 |

Таким образом, установлено, что термитный высокопрочный чугун обладал высокой прочностью на растяжении, сжатие и изгиб, достаточно высокой пластичностью и ударной вязкостью, удовлетворительными литейными свойствами (а именно хорошей жидкотекучестью и т.д.). Кроме этого он хорошо механически обрабатывался и сваривался.

**Выводы**

1. Теоретически и экспериментально доказана возможность использования термитного высокопрочного чугуна не только для получения отливок, но и для технологии термитного сваривания. 2. Установлены механические свойства термитного высокопрочного чугуна (прочность, твердость, относительное удлинение, ударная вязкость). 3. Установлены технологические свойства термитного чугуна, а именно жидкотекучесть и влияние на нее температуры, обрабатываемость и др. 4. Применение высокопрочного термитного чугуна в технологии изготовления прокатных валков позволяло экономить материал, который расходовался на прибыли, устранял ликвацию подприбыльной зоны, подпитывал и обогревал валок и положительно влиял на продолжительность работы валков при уменьшении их расхода.

**Список литературы:**

1. Жигуц Ю.Ю. Сплави, синтезовані металотермією і СВС-процесами: монографія / Ю.Ю Жигуц. − Ужгород: Ґражда, 2008. − 276 с.

2. Zhiguts Yu. Special thermite cast irons / Zhiguts Yu., Kurytnik I. // Archives of foundry engineering. Polish Academy of Sciences. − 2008. − N 2. − Vol. 8. − P. 162-166.

3. Жигуц Ю.Ю. Синтез термітних суднобудівних сталей / Ю.Ю. Жигуц, Д.Ф. Чернега, Е.Е. Левдар // Materiály VII mezinárodni védecko-praktická konference “Vědecky pokrok na prelomu tysyachalety”. – Dil 15. Technické vědy: – Praha: Publishing House “Education and Science” s.r.o. – 2011. – С. 43–45.

4. Металотермічний реактор: патент України на корисну модель № 9847 МПК: B22 C9/00 / Ю.Ю.Жигуц, Ю.Ю.Скиба, І.І.Крайняй. – опубл. 15.01.2007. − Бюл. №1.

5. Жигуц Ю. Методика розрахунку складу екзотермічних шихт на основі термохімічного аналізу / Ю. Жигуц, В. Широков // Машинознавство. − Львів. − 2005. − №4. − С. 48-50.

6. Жигуц Ю. Ресурсозберігаюча технологія термітного зварювання / Ю. Жигуц, В. Лазар // Вісник ТДТУ. − 2009. – Т. 14. − № 4. − С. 94-98.

Надійшла до редколегії 30.01.2012.

**Ю.Ю. Жигуц**

**ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО ТЕРМІТНОГО ЧАВУНУ**

*Одним з перспективних шляхів створення матеріалів є використання, запропонованої в цій роботі, технології виробництва високоміцних чавунів за допомогою високоекзотермічних реакцій. Вихідні порошкові матеріали – інгредієнти хімічної реакції вступають у металотермічну взаємодію. В результаті експериментальних термітних плавлень отримано фасонні виливки. Для них встановлювали хімічний склад, механічні і технологічні властивості. Проведене дослідження дозволило визначити склад шихти для синтезу термітного чавуну, розвинуло технологію отримання металотермічної шихти і синтезу сплаву.*

***Ключові слова**: металотермія, високоміцний термітний чавун, властивості.*

**Yu.Yu. Zhiguts**

**THE TECHNOLOGY OF SYNTHESIS HIGHSTRONG THERMITE CAST-IRON**

*One of such perspective ways is the usage, offered in this papers, of the method production of steels with the usage of high-exothermic reactions. The components of reactions take a place in metallothermic reactor. As a result of leadthrough of the experimental thermite melting were got the shaped founding’s. For them seated chemical composition, mechanical and technological properties. The conducted work allowed determining the composition of charge for the synthesis of highstrong thermite cast-iron, to develop the method of preparation of metallothermic mixture and synthesis of alloy.*

***Keywords:** metalotermic, highstrong thermit cast-iron, properties.*