

В. А. Худякова, С. Г. Жилин, В. В. Предеин, Н. А. Богданова

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МИКРОТВЕРДОСТИ ЖЕЛЕЗОАЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ИСХОДНЫХ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ АЛЮМОТЕРМИТНОГО ПЕРЕПЛАВА

*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре,  
Россия*

**Аннотация.** В машиностроении, металлургии и электротехнике различные фазы интерметаллидных железоалюминиевых сплавов, ввиду высокой стойкости к коррозии и абразивному износу, находят применение в качестве покрытий элементов конструкций, эксплуатирующихся в условиях сложного нагружения и высоких температур. Относительно невысокая стоимость и распространенность компонентов таких сплавов определяет экономическую целесообразность их применения. Промышленное получение таких сплавов и покрытий на их основе, как правило, осуществляется в ходе значительного числа технологических операций, что затрудняет расширение номенклатуры изделий и определяет пути поиска альтернативных методов. Применение алюмотермитного перепада шихтовых материалов, состоящих из смеси фракций окислы и алюминий сплавов, позволяет свести процесс получения интерметаллидных сплавов на основе Fe-Al практически до одной стадии. Ввиду недостатка практических сведений о таком процессе, прогнозирование свойств итоговых сплавов в настоящее время представляется затруднительным. В ходе серии предварительных исследований удалось получить сплавы с содержанием Al, превышающим 50 %. В работе представлены результаты экспериментов по определению влияния дополнительного тепла, вносимого в исходные материалы, на ряд характеристик и значения микротвердости железоалюминиевых сплавов, получаемых экзотермическим перепадом термитных шихт.

**Ключевые слова:** термитная шихта, теплофизическое воздействие, алюминиды железа, прочность материала, твердость интерметаллидного сплава.

**Худякова Вилена Александровна**, аспирант; e-mail: ms.viliena@mail.ru; AuthorID: 1216752

**Жилин Сергей Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий; e-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0865-7109>; AuthorID: 177858

**Предеин Валерий Викторович**, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий; e-mail: predein3@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5808-2104>; AuthorID: 508510

**Богданова Нина Анатольевна**, младший научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий; e-mail: joyful289@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8769-8194>; AuthorID: 644043

**для цитирования:** Худякова В. А., Жилин С. Г., Предин В. В., Богданова Н. А. Экспериментальное определение зависимости микротвердости железоалюминиевых сплавов от предварительного нагрева исходных шихтовых материалов, предназначенных для алюмотермитного переплава // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2024. № 3(61). С. 18–31. DOI: 10.37972/chgru.2024.61.3.003 EDN: KKT SAM

Статья опубликована на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)*.

V. A. Khudyakova, S. G. Zhilin, V. V. Predein, N. A. Bogdanova

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF MICROHARDNESS OF IRON-ALUMINUM ALLOYS ON PRE-HEATING OF INITIAL CHARGE MATERIALS INTENDED FOR ALUMOTHERMITIC REMELTING

*Institute of Mechanical Science and Metallurgy Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russia*

**Abstract.** In mechanical engineering, metallurgy and electrical engineering, various phases of intermetallic iron-aluminum alloys, due to their high resistance to corrosion and abrasive wear, are used as coatings for structural elements operating under conditions of complex loading and high temperatures. The relatively low cost and prevalence of the components of such alloys determine the economic feasibility of their use. Industrial production of such alloys and coatings based on them, as a rule, is carried out in the course of a significant number of technological operations, which complicates the expansion of the product range and determines the paths to find alternative methods. The use of aluminothermic remelting of charge materials consisting of a mixture of scale fractions and aluminum alloys makes it possible to reduce the process of obtaining intermetallic alloys based on Fe-Al to practically one stage. Due to the lack of practical information on such a process, predicting the properties of the final alloys currently seems difficult. A series of preliminary studies made it possible to obtain alloys with an Al content exceeding 50%. The paper presents the results of experiments to determine the effect of additional heat introduced into the source materials on a number of characteristics and microhardness values of iron-aluminum alloys obtained by exothermic remelting of thermite batches.

**Keywords:** thermite charge, thermophysical effect, iron aluminides, material strength, hardness of intermetallic alloy

**Vilena A. Khudyakova**, graduate student; e-mail: ms.viliena@mail.ru;  
<https://orcid.org/0009-0001-5695-3447>; AuthorID: 1216752

**Sergey G. Zhilin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory for the Problems of Creation and Processing of Materials and Products; e-mail: mail1@mail.ru;  
<https://orcid.org/0000-0002-0865-7109>; AuthorID: 177858

**Valery V. Predein**, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Laboratory for the Problems of Creation and Processing of Materials and Products; e-mail: predein3@mail.ru;  
<https://orcid.org/0000-0002-5808-2104>; AuthorID: 508510

**Nina A. Bogdanova**, Junior Researcher, Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products; e-mail: joyful289@inbox.ru;  
<https://orcid.org/0000-0002-8769-8194>; AuthorID: 644043

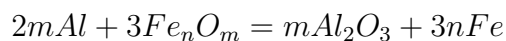
**to cite this article:** Khudyakova V. A., Zhilin S. G., Predein V. V., Bogdanova N. A. Experimental determination of the dependence of microhardness of iron-aluminum alloys on pre-heating of initial charge materials intended for aluminothermic remelting // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I. Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2024. No 3(61). p. 18–31. DOI: 10.37972/chgpu.2024.61.3.003 EDN: KKTSAM

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)*

**Введение.** Достижение конкурентоспособности предприятий машиностроения и металлургии в современных условиях определяется взаимоувязкой таких факторов, как эффективное использование материалов, энергии, времени и экологичности применяемых технологий [1, 2]. Мировая практика устойчивого функционирования предприятий, специализирующихся на выпуске и обработке металлопродукта, формируемого из черных и цветных сплавов сводится, преимущественно, к реализации рационального производства, базирующегося на вариациях рециклинга металлосодержащих материалов [3].

Так, например, в прокатной железной окалине, образующейся в результате технологических переделов в металлургии, содержание железа иногда превышает 70 % по массе [4]. Для извлечения железа из отходов промышленного производства применяют как традиционные (брикетирование, переплав), так и инновационные (например, обжиг с последующей магнитной сепарацией) методы [5–7]. Эффективность применения таких методов, определяется реализацией повторного вовлечения металлов в производственный цикл. Следует, однако, отметить, что процессы переработки, осуществляемые в ходе значительного числа технологических операций, представляются энергетически затратными.

Перспективу повышения эффективности переработки железосодержащего сырья представляют одностадийные окислительно-восстановительные процессы экзотермического переплава шихтовых материалов. Такие материалы состоят из различных комбинаций соотношения фракций окалины и сплавов на основе алюминия [8]. Процесс расплавления компонентов термитной шихты протекает по реакции:



В целом, для получения железосодержащего сплава, в термитной шихте должно быть 17-25 % активного алюминия (остальное окалина). По завершении реакции, ввиду разности плотностей, происходит произвольное разделение продуктов реакции: в нижней части слитка – железосодержащий сплав, в верхней – шлак (оксид алюминия  $Al_2O_3$ ).

Экзотермическая реакция в термитных шихтах такого состава протекает с выделением тепла, что обуславливает необходимость использования высокоогнеупорных материалов реактора и форм, пригодных для кратковременных условий эксплуатации при температуре более 2500 °С [9]. Для осуществления экспериментов, связанных с получением алюмотермитных железосодержащих расплавов в лабораторных условиях Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре) используется реактор, выполненный из графитированного электрода марки ЭГ15. Однако, в результате эксплуатации, ввиду увеличения числа теплосмен и активного воздействия расплава, элементы конструкции даже такого реактора разрушаются, что обуславливает поиск вариантов снижения негативного воздействия отмеченных выше факторов. Также, в результате ранее проведенных экспериментов, связанных с экзотермическим получением железоуглеродистых сплавов, установлена целесообразность предварительного подогрева термитных шихт, содержащих 20-24 % по

массе активного алюминия до температуры 400 °С, что позволяет более точно прогнозировать химический состав итоговых сплавов, а также повысить выход металлической фазы [10].

В ходе предварительных исследований вариацией соотношений исходных компонентов в термитных шихтах определена возможность применения алюмотермии для получения интерметаллидных железоалюминиевых соединений на основе Fe и Al с различным содержанием этих компонентов в итоговых сплавах [11]. Так, при алюмотермическом переплаве термитных шихт с содержанием активного алюминия 17,24-47,41 % удается получать железоалюминиевые сплавы с итоговым содержанием алюминия в них 0,009-47,9, а железа 99,4-48,2 % соответственно. Увеличение содержания Al в итоговом сплаве при обычных условиях формирования слитка оказывается затруднительным и обуславливает необходимость поиска альтернативных технологических вариантов, среди которых дополнительное внесение тепла в исходные материалы перед активацией алюмотермического процесса до настоящего времени не рассматривалось [12]. Новизна исследований определяется возможностью управления результатами процессов формирования Fe-Al сплавов в условиях кратковременного взаимодействия компонентов в образующихся расплавах, что пока представляется изученным в недостаточной мере.

В этой связи целью работы является определение влияния содержания алюминия в исходных термитных шихтах на характеристики интерметаллидных сплавов на основе Fe и Al, получаемых алюмотермией, а также значения их микротвердости. Результаты исследования направлены в том числе на реализацию возможности снижения влияния факторов теплофизического воздействия на материалы реактора для повышения срока его эксплуатации.

**1. Методы и подходы.** Экспериментальные железоалюминиевые сплавы различного состава получали путем алюмотермического переплава термитных шихт, компонентами которых являются равные по размерам частицы (фракции 0,2-1,5 мм) металлургической окалины и алюминиевого сплава [2], что позволяет снизить сепарацию разноплотностных компонентов термитных шихт. Переплав производили в реакторе, выполненном в виде полого глухонного цилиндра с толщиной стенки 10 мм, снабженного в верхней части крышкой с газоотводным патрубком, а в донной части сливным отверстием и втулкой. Внутренний объем реактора составляет 0,0008 м<sup>3</sup>, что позволяет гарантированно размещать в нем 1 кг термитных шихт вне зависимости от соотношения в них компонентов. Содержание активного Al в термитных шихтах изменялось в диапазоне 25-60 % по массе (остальное окалина). С целью удаления влаги из огнеупорных и шихтовых материалов, а также снижения разницы температур между началом процесса и его завершением, термитные шихты подвергали нагреву до температуры 400 °С и выдержке в течение 1 часа в термической печи SNOL 12/1300.

Реактор соосно устанавливали над литейной формой, конфигурация внутренней полости которой позволяет получать цилиндрическую отливку диаметром

28 мм и протяженностью до 150 мм (в зависимости от массового выхода металлической фазы). В термитной шихте, размещенной в реакторе, осуществляли окислительно-восстановительный процесс, по завершении которого железоалюминиевый расплав выпускали в литейную форму. В процессе выпуска осуществляли регистрацию температуры расплава посредством бесконтактного инфракрасного пирометра ASP Swift 350 PL. Образцы железоалюминиевых сплавов (металлическую фазу) взвешивали, и подвергали исследованиям:

- на химический состав (путем анализа образцов, выполненных, согласно ГОСТ 7565-81 «Чугун, сталь и сплавы. Метод отбора проб для определения химического состава» при помощи энергодисперсионного рентгеновского флуоресцентного спектрометра EDX-8000);
- микроструктуру (в ходе визуальной регистрации, осуществляемой при помощи цифровой камеры, совмещенной с металлографическим инструментальным микроскопом Axio Vert.A1 MAT, поверхности микрошлифов наиболее характерных экспериментальных образцов, обработанных реактивом Келлера [13]);
- микротвердость (согласно ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» при помощи цифрового стационарного микротвердомера HVS-1000).

**2. Основное содержание.** В ходе проведенных в настоящей работе экспериментов устанавливали особенности влияния дополнительного внесения тепла в исходные термитные шихты, размещенные в реакторе, на температуру струи расплава, образующегося в результате экзотермической реакции, массовый выход металлических фаз, структуру и содержание элементов в итоговых сплавах, а также значения микротвердости HV, характерные для ряда структурных составляющих образующихся железоалюминиевых фаз. Результаты эксперимента, представленные в графической части работы, отражают зависимости ряда рассмотренных выше параметров от содержания активного алюминия в исходных термитных шихтах.

На рис.1. представлены результаты эксперимента по определению влияния предварительного нагрева термитных шихт до 400 °С на температуру струи расплава, образующегося в ходе экзотермического переплава последних. Результаты представлены в виде сравнения степенных зависимостей температур, характерных для переплава «холодных» термитных шихт, активируемых без предварительного подогрева (кривая 1), и шихт с дополнительно внесенным теплом перед активацией процесса расплавления (кривая 2). На рис.1 и на рис.3 дополнительно представляются значения  $R^2$  величин достоверности аппроксимации для каждой из зависимостей и уравнения этих зависимостей.

На рис.1 в виде линейной зависимости 3 также представлены результаты термогравиметрического анализа (TGA) материала реактора, полученные при помощи термографического дифференциально-термического анализатора DTG-60H (Shimadzu, Япония). Линия 3 на рис.1 отображает температуру 630 °С,

при превышении которой материал реактора начинает окисляться со средней скоростью 0,023 %/с [2]. Очевидно, что чем выше значения температур расплавов, образующихся в ходе алюмотермического передела, тем с большей интенсивностью будет протекать процесс перехода материала в газовую фазу, что в конечном итоге будет определять время пригодности реактора к эксплуатации.

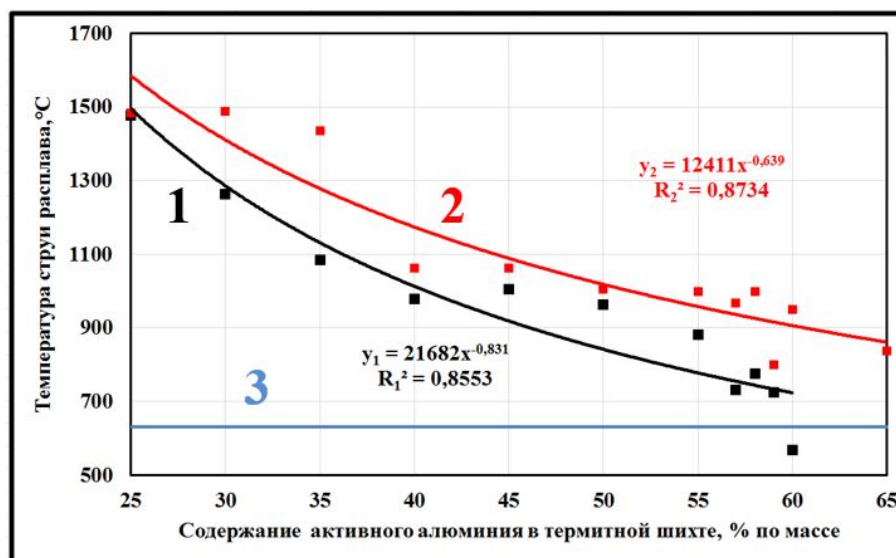


Рис. 1. Сравнение зависимостей экспериментальных температур от содержания активного алюминия в термитных шихтах: 1 – струи металла, полученного алюмотермитным переделом термитных шихт без нагрева; 2 – струи металла полученного алюмотермитным переделом термитных шихт после предварительного нагрева до 400 °C; 3 – температура окисления материала реактора.

Из рис.1 видно, что предварительный нагрев термитных шихт до 400 °C (зависимость 2) обуславливает рост температуры реакции, что в целом сказывается на повышении температуры струи железоалюминиевого расплава в среднем на 5-10 %, по сравнению с данными, характерными для зависимости 1. Установлено, что предварительный нагрев обеспечивает не только стабильное разделение металлической и шлаковой фаз, образующихся при экзотермическом переделе термитных шихт, содержащих активный алюминий в диапазоне значений 25-58 %, но и возможность реализации экзотермической реакции в термитных шихтах с содержанием до 65 % активного алюминия. Из анализа данных, представленных на рис. 1 становится очевидным, что такое содержание активного алюминия в термитных шихтах сказывается на итоговой температуре расплава и позволяет значительно сократить температурное и механическое воздействие на материал реактора.



Сравнительным анализом данных, полученных в ходе эксперимента, установлено, что 70 % массового выхода металлической фазы конечного интерметаллидного сплава удается достичь при экзотермическом переплаве предварительно нагреваемых термитных шихт, содержащих 50 % активного алюминия. При этом максимальный выход металлической фазы после переплава термитных шихт, не подвергающихся предварительному нагреву, не превышал 63 % по массе. Стоит, однако, отметить, что при таких высоких значениях массового выхода металлической фазы корректное определение Al в итоговых сплавах становится затруднительным, так как плотности металлической и шлаковой фаз сравниваются. Установлено, что при переплаве нагреваемых термитных шихт, располагающих 25-60 % активного алюминия в своем составе, содержание Al в итоговых сплавах соответствует диапазону значений 7,3-58,5 % по массе.

Содержание Al в исходных термитных шихтах и условия осуществления экзотермического процесса обуславливают соотношение элементов в итоговых железоалюминиевых сплавах, их микроструктуру, а также во многом определяют их механические характеристики, среди которых практический интерес представляет диапазон значений микротвердости HV, характерных для поверхностей поперечного среза протяженных образцов (использованных в настоящем эксперименте для определения микроструктур). На рис.2. представлено сравнение геометрии отпечатков, полученных при определении микротвердости HV в форме ромбических пирамид, характерных для экспериментальных железоалюминиевых сплавов. Отпечаток, сформированный ромбическим индентором в образцах с поверхностью, обладающей большей твердостью, имеет меньшую глубину проникновения. Из рис.2 видно, что наибольшей глубиной отпечатка обладают образцы железоалюминиевых сплавов, сформированные из термитных шихт с меньшим содержанием активного алюминия. Выявлено, например, что для образцов (рис.2,а) характерно значение микротвердости HV210 при глубине отпечатка 18,957 мкм; для образцов (рис.2,б) - HV943 при глубине отпечатка 8,955 мкм; далее, при увеличении содержания активного Al в термитных шихтах для образцов (рис.2,б) микротвердость составляет HV875 при глубине отпечатка 9,295 мкм.

На рис. 3 в полиномиальных кривых третьего порядка представлено сравнение значений микротвердости HV, характерных для экспериментальных образцов железоалюминиевых сплавов, полученных экзотермическим переплавом термитных шихт (без нагрева – 1 и нагреваемых до 400 °С – 2), в зависимости от содержания в них активного Al.

Анализ данных, представленных на рис.3, позволяет установить, что предварительный нагрев термитных шихт до 400 °С перед началом их экзотермического переплава позволяет несколько увеличить значения микротвердости HV в случаях, когда железоалюминиевый сплав формируется из термитных шихт с содержанием 55-60 % Al по массе. Для отмеченного диапазона содержания Al в шихте, характерно более стабильное разделение металлической и шлаковой фаз

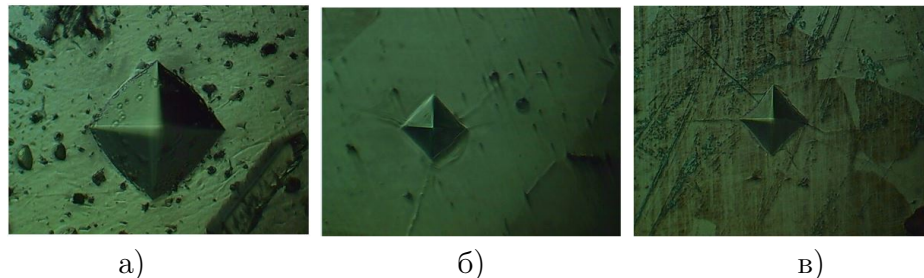


Рис. 2. Сравнение глубины отпечатка ромбического индентора, сформированного при определении микротвердости HV образцов железоалюминиевых сплавов, полученных из термитных шихт с различным содержанием Al (% по массе) при увеличении x100: а – 25; б – 57; в – 60.

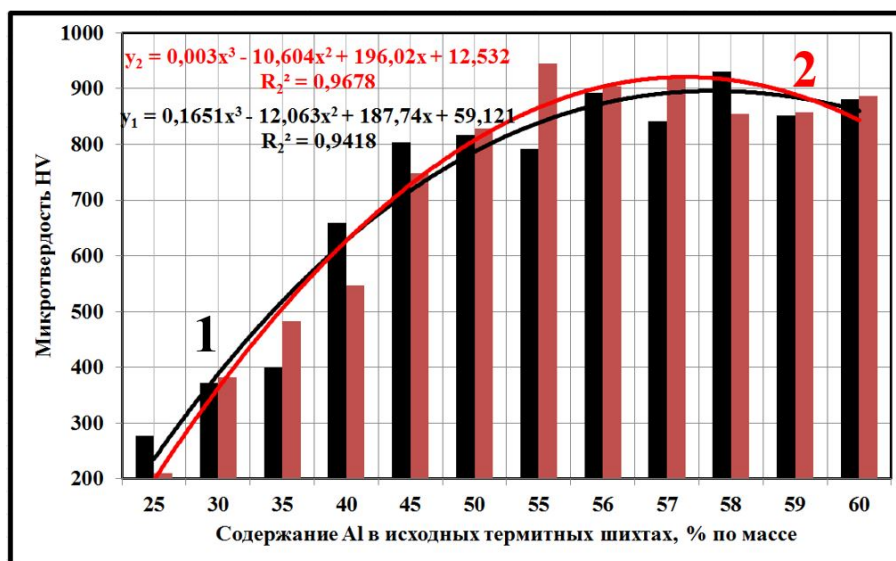


Рис. 3. Сравнение значений микротвердости HV от содержания активного алюминия в термитных шихтах: 1 - железоалюминиевых сплавов, полученных алюмотермитным переплавом термитных шихт без нагрева; 2 - после предварительного нагрева до 400 °С.

в продуктах реакции, а значения микротвердости HV соответствуют интервалу 850-950.

Технологически становятся доступными варианты получения сплавов из термитных шихт с большим содержанием в них алюминия, что обуславливает возможность экспериментального определения ряда их физико-механических параметров. Однако рост алюминия в исходных термитных шихтах (например, до 65 % по массе) приводит к снижению значений микротвердости HV до 716.

Согласно диаграмме состояния сплавов системы железо-алюминий [14–16] в указанном выше диапазоне содержания Al 7,3–58,5 % по массе в итоговых сплавах при различных температурах образуются интерметаллидные фазы следующих типов:  $Fe_3Al$ ,  $FeAl_2$ ,  $Fe_2Al_5$  и  $FeAl_3$ , каждую из которых характеризует свой набор физико-механических свойств. Как правило, сплавы такой системы отличаются повышенной хрупкостью, вследствие чего определение таких параметров, как временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$  или предел текучести  $\sigma_T$  по результатам измерения микротвердости HV вызывает ряд затруднений. Методы расчета указанных параметров по аналогии со стандартами, применяемыми к сталям, для интерметаллидных сплавов подходят не в полной мере и нуждаются в корректировке.

**3. Заключение** В ходе проведенных исследований установлено, что предварительный нагрев термитных шихт до 400 °С с последующей активацией экзотермической реакции, обеспечивает рост скорости их горения в интервале содержания Al 25–65 % по массе в исходных материалах, по сравнению с переплавными процессами, протекающими в ненагреваемых термитных шихтах.

Предварительный нагрев термитных шихт позволяет на 5–10 % увеличить температуру струи расплавов, образующихся в результате экзотермических реакции, и обеспечивает гарантированное разделение металлической и шлаковой частей продуктов реакции при содержании активного алюминия в исходных материалах до 60 %, а максимально возможный выход металлической фазы составил 70% по массе.

Максимальные значения микротвердости HV соответствующие диапазону 850–950 характерны для сплавов, полученных экзотермическим переплавом термитных шихт содержащих 55–60 % Al по массе.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** В. А. Худякова, В. В. Предеин подготовка и проведение экспериментальной части работы, согласование финальной версии рукописи. С. Г. Жилин, Н. А. Богданова обзор литературы, написание текста рукописи, согласование финальной версии рукописи, редактирование текста.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН.

### ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** V. A. Khudyakova, V. V. Predein preparation and implementation of the experimental part of the work, approval of the final version of the manuscript. S. G. Zhilin, N. A. Bogdanova literature review, writing the manuscript text, approval of the final version of the manuscript, editing the text.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding.** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center of the FEB RAS.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Xu M., Lin B. Energy efficiency gains from distortion mitigation: A perspective on the metallurgical industry // *Resources Policy*. 2022. Vol. 77. 102758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102758>
- [2] Худякова В. А., Жилин С. Г., Предеин В. В., Комаров О. Н. Повышение износостойкости графитового реактора, предназначенного для расплавления термитной шихты // *Металлург*. 2024. № 9. С. 70–77. EDN: DNZLMS. DOI: 10.52351/00260827 2024 9 70.
- [3] Di Maria A., Merchán M., Marchand M., Eguizabal D., De Cortázar M. G., Van Acker K. Evaluating energy and resource efficiency for recovery of metallurgical residues using environmental and economic analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 356. 131790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131790>
- [4] Аникин А. Е., Галевский Г. В., Руднева В. В. Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксиджелезосодержащих отходов металлургического производства // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 5. С. 335–343. EDN: BAVLIJ. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-335-343.
- [5] Ling J., Yang H., Tian G., Cheng ., Wang X., Yu X. Direct reduction of iron to facilitate net zero emissions in the steel industry: A review of research progress at different scales // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 441. 140933. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140933>.
- [6] El-Shiekh H., El-Fawakhry M. K., Mitwally M. E., Shash A. Y. Production of reduced iron from mill scale waste using tilting rotary furnace // *Results in Materials*. 2023. Vol. 19. 100429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100429>.
- [7] Cheng H., Zhuo R., Li G., Yan H., Ding K., Zhao G., Qiu T. Iron recovery from lead smelting water-quenching slag by “roasting–grinding–magnetic separation” method // *Powder Technology*. 2024. Vol. 439. 119708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119708>.
- [8] Komarov O. N., Zhilin S. G., Predein V. V., Popov A. V. Mechanisms for forming iron-containing intermetallics prepared by aluminothermy and the effect of special treatment methods on their properties // *Metallurgist*. 2020. Т. 64. № 7-8. С. 810–821. DOI: 10.1007/s11015-020-01058-w
- [9] Барсукова Н. В., Комаров О. Н., Жилин С. Г., Предеин В. В., Попов А. В., Худякова В. А. Управление свойствами железоуглеродистых сплавов, полученных алюмотермией, варьированием технологическими факторами // *Металлург*. 2023. № 8. С. 94–107. EDN: PNIVSY. DOI: 10.52351/00260827 2023 08 94.
- [10] Предеин В. В. Управление структурой и свойствами стальных отливок из термитных материалов при алюмотермии: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04: защищена 08.02.2018: - Комсомольск-на-Амуре., 2018. — 269 с.
- [11] Комаров О. Н., Предеин В. В., Жилин С. Г., Худякова В. А., Барсукова Н. В. Способ получения железоалюминиевого сплава // Патент на изобретение RU 2803881 C1, 21.09.2023. Заявка № 2023102640 от 07.02.2023.
- [12] Худякова В. А., Жилин С. Г., Предеин В. В., Богданова Н. А. Влияние предварительного нагрева термитной шихты и реактора на свойства получаемого железоалюминиевого сплава методом алюмотермии // Вычислительные технологии и прикладная математика: Материалы III научной конференции с международным участием (7–11 октября 2024 г., Комсомольск-на-Амуре) / ред.: Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, С. А. Гордин, И. В. Зайченко. – Комсомольск-на-Амуре: Изд.-во Комсомольского-на-Амуре гос. университета, 2024. – С. 404-406.

- [13] Атлас микроструктур черных и цветных металлов: учебное наглядное пособие / сост.: А. А. Андрушевич [и др.]. – Минск: БГАТУ. 2012. 100 с.
- [14] Дресвянников А. Ф., Колпаков М. Е. Синтез интерметаллида Fe<sub>3</sub>Al // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 5. С. 7-10. EDN: MOTXSN
- [15] Panda D., Kumar L., Alam S. N. Development of Al-Fe<sub>3</sub>Al Nanocomposite by Powder Metallurgy Route // Materialstoday: Proceedings. 2015. Vol. 2, Is. 4–5. P. 3565–3574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.070>
- [16] Cubero-Sesin J. M., Horita Z. Age Hardening in Ultrafine-Grained Al-2PctFe Alloy Processed by High-Pressure Torsion // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2015. Vol. 46. P. 2614–2624. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2876-6>

## REFERENCES

- [1] Xu M., Lin B. Energy efficiency gains from distortion mitigation: A perspective on the metallurgical industry // Resources Policy. 2022. Vol. 77. 102758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102758>
- [2] Khudyakova V. A., Zhilin S. G., Predein V. V., Komarov O. N. Increasing the wear resistance of a graphite reactor intended for melting thermite charge // Metallurg. 2024. № 9. P. 70–77. EDN: DNZLMS. DOI: 10.52351/00260827 2024 9 70. (in Russian).
- [3] Di Maria A., Merchán M., Marchand M., Eguizabal D., De Cortázar M. G., Van Acker K. Evaluating energy and resource efficiency for recovery of metallurgical residues using environmental and economic analysis // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 356. 131790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131790>
- [4] Anikin A. E., Galevsky G. V., Rudneva V. V. Research of technological modes of effective metallization of iron oxide-containing wastes of metallurgical production // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya. 2020. T. 63. № 5. P. 335–343. EDN: BAVLIJ. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-335-343. (in Russian).
- [5] Ling J., Yang H., Tian G., Cheng J., Wang X., Yu X. Direct reduction of iron to facilitate net zero emissions in the steel industry: A review of research progress at different scales // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 441. 140933. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140933>.
- [6] El-Shiekh H., El-Fawakhry M. K., Mitwally M. E., Shash A. Y. Production of reduced iron from mill scale waste using tilting rotary furnace // Results in Materials. 2023. Vol. 19. 100429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100429>.
- [7] Cheng H., Zhuo R., Li G., Yan H., Ding K., Zhao G., Qiu T. Iron recovery from lead smelting water-quenching slag by “roasting–grinding–magnetic separation” method // Powder Technology. 2024. Vol. 439. 119708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119708>.
- [8] Komarov O. N., Zhilin S. G., Predein V. V., Popov A. V. Mechanisms for forming iron-containing intermetallics prepared by aluminothermy and the effect of special treatment methods on their properties // Metallurgist. 2020. T. 64. № 7-8. С. 810–821. DOI: 10.1007/s11015-020-01058-w
- [9] Barsukova N. V., Komarov O. N., Zhilin S. G., Predein V. V., Popov A. V., Khudyakova V. A. Control of the properties of iron-carbon alloys obtained by aluminothermy, varying technological factors // Metallurg. 2023. No. 8. pp. 94–107. EDN: PNIVSY. DOI: 10.52351/00260827 2023 08 94. (in Russian)
- [10] Predein V. V. Control of the structure and properties of steel castings from thermite materials during aluminothermy: dis. ...cand. tech. Sciences: 16.05.04: protected 02.08.2018: - Komsomolsk-on-Amur., 2018. - 269 p.(in Russian)

- [11] Komarov O. N., Predein V. V., Zhilin S. G., Khudyakova V. A., Barsukova N. V. Method for producing iron-aluminum alloy // Patent for invention RU 2803881 C1, 09.21.2023. Application No. 2023102640 dated 02.07.2023. (in Russian)
- [12] Khudyakova V. A., Zhilin S. G., Predein V. V., Bogdanova N. A. Effect of preliminary heating of the thermite charge and reactor on the properties of the obtained iron-aluminum alloy by the aluminothermy method // Vychislitel'nyye tekhnologii i prikladnaya matematika: Materialy III nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem (October 7-11, 2024, Komsomolsk-on-Amur) / ed.: E. A. Dmitriev, A. I. Evstigneev, S. A. Gordin, I. V. Zaychenko. - Komsomolsk-on-Amur: Publishing house of Komsomolsk-on-Amur State University. 2024. - P. 404-406. (in Russian)
- [13] Atlas of microstructures of ferrous and non-ferrous metals: a teaching aid / compiled by: A. A. Andrushevich [et al.]. – Minsk: BGATU. 2012. 100 p. (in Russian)
- [14] Dresvyannikov A. F., Kolpakov M. E. Synthesis of intermetallic compound Fe<sub>3</sub>Al // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2010. № 5. P. 7-10. EDN: MOTXSN (in Russian)
- [15] Panda D., Kumar L., Alam S. N. Development of Al-Fe<sub>3</sub>Al Nanocomposite by Powder Metallurgy Route // Materialstoday: Proceedings. 2015. Vol. 2, Is. 4–5. P. 3565–3574. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.070>
- [16] Cubero-Sesin J. M., Horita Z. Age Hardening in Ultrafine-Grained Al-2PctFe Alloy Processed by High-Pressure Torsion // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2015. Vol. 46. P. 2614–2624. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2876-6>