



УДК 669.187.56.002.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИДОВ ЖЕЛЕЗА

А. А. Троянский, А. Д. Рябцев, Н. Н. Галян

Показана принципиальная возможность получения слитков алюминидов железа Fe_3Al и $FeAl$ с помощью камерного электрошлакового переплава составных расходоуемых электродов сталь-алюминий под кальцийсодержащими флюсами в контролируемой атмосфере. Качество и однородность полученного материала подтверждена химическим и металлографическим анализами.

The feasibility of producing ingots of iron aluminides Fe_3Al and $FeAl$ using a chamber electroslag remelting of steel-aluminium composite consumable electrodes under calcium-containing fluxes in controllable atmosphere is shown. Quality and homogeneity of the produced material were confirmed by chemical and metallographic analyses.

Ключевые слова: камерный электрошлаковый переплав; алюминиды железа; технология; кальцийсодержащий флюс

Создание новой техники, работающей в условиях высоких температур, агрессивных сред, эрозионных потоков, невозможно без использования новых материалов, какими являются интерметаллиды и, в частности, алюминиды железа. Интерметаллиды — это химические соединения металлов, занимающие промежуточное положение между металлами и керамикой как по типу химической связи, так и по свойствам. Одни из интерметаллических соединений имеют химические связи металлического типа, другие — ковалентного. Дальний порядок обеспечивает более сильную межатомную связь. Интерметаллиды лучше обрабатываются, чем керамики. Наряду с определенной пластичностью, они сохраняют свою структуру и прочность при высоких температурах, отличаются хорошими антикоррозионными и антифрикционными свойствами, в чем значительно превосходят обычные металлы.

Алуниниды железа — новый класс особо легких перспективных конструкционных материалов, предназначенных для работы при температурах 630... 680 °С, превышающих рабочие температуры эксплуатации титановых суперсплавов (< 600 °С). Содержание алюминия в соединении Fe_3Al находится в пределах 14... 17 % мас, в соеди-

нении $FeAl$ — 25... 32 % мас. Алюминиды легче, чем некоторые суперсплавы (плотность промышленных сплавов на основе никеля составляет 8,3... 8,9 г/см³, плотность Fe_3Al — 6,72 г/см³, плотность $FeAl$ — 5,56 г/см³) и практически не нуждаются в защите от окисления при рабочих температурах.

Сплавы на основе Fe_3Al применяются в автомобилестроении как заменители нержавеющей стали в системе выхлопа [1], как материал для дисков регенераторов автомобильных газотурбинных систем [2], перспективны для космической техники и производства отдельных узлов и дисков газовых турбин, работающих при температурах 630... 680 °С [3]. Сплавы на основе $FeAl$ могут использоваться в системах каталитического дожигания выхлопных газов, элементах для резистивного нагрева, также

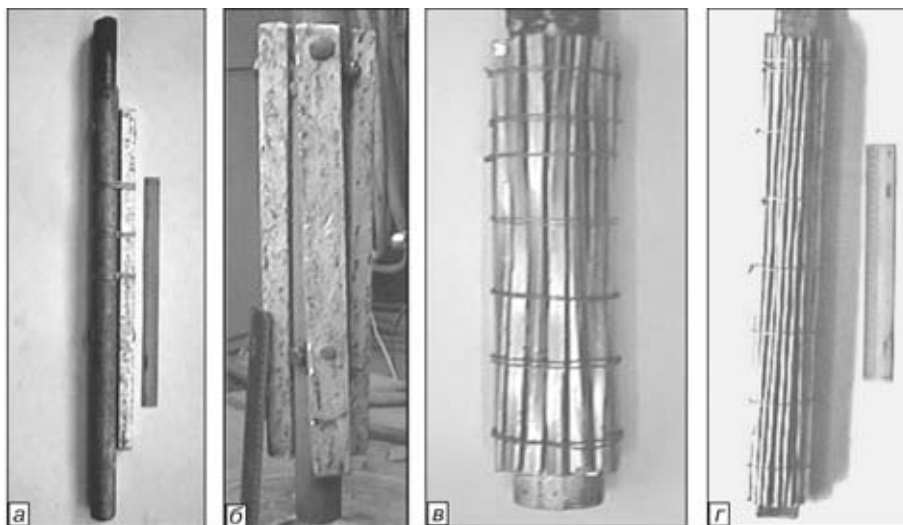


Рис. 1. Составные железо-алюминиевые расходоуемые электроды: а, в — массовая доля алюминиевой части 17 %; б, г — то же 32 %

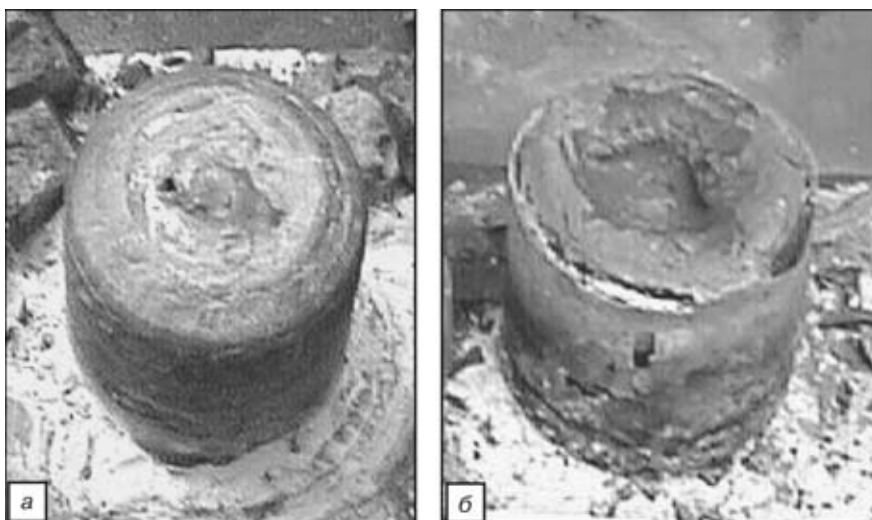


Рис. 2. Слитки алюминидов железа КЭШП: а — слиток Fe₃Al; б — слиток FeAl

они перспективны в качестве композиционных материалов для космической техники [4].

Производство алюминидов железа как конструкционного материала соответствующего уровня свойств для условий высокотемпературной эксплуатации не требует большого количества дефицитных легирующих элементов. Вместе с тем, оно все еще сдерживается отсутствием относительно простых и недорогих технологий, осложняющихся значительной разницей температур плавления, испарения и плотностей алюминия и железа. Именно из-за высокой упругости пара алюминия эти сплавы сложно выплавлять в вакуумных агрегатах.

Известны способы получения сплавов на основе алюминидов железа методами горячего и холодного прессования порошков [5, 6], в том числе и с механическим легированием [7], а также дуговым и плазменным распылением [8] и др. Технология их производства многостадийна и сложна, что приводит к удорожанию продукции и снижению эффективности ее применения.

В литературе имеются сведения и о получении алюминидов железа с применением методов спецэлектротехнологии. Так, в работе [9] предложен и опробован способ производства алюминидов желе-

за по двухстадийной схеме: выплавка расходных электродов состава Fe₃Al из стального скрапа и технически чистого алюминия в вакуумно-индукционной печи и получение из них методом классического электрошлакового переплава слитков с содержанием алюминия 16 % мас и углерода 0,014... 0,5 % мас. После нагрева до 1000 °С и часовой выдержки в печи слитки подвергли пластической деформации. При этом установлена хорошая обрабатываемость слитков с содержанием углерода более 0,14 % мас. Слитки же с содержанием углерода менее 0,06 % мас при дефор-

мации раскалывались. Авторы предположительно объясняют улучшение механических свойств алюминидов железа с [C] ≥ 0,14 % мас равномерным распределением в слитках включений Fe₃AlC и растворенного углерода.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности получения слитков алюминидов железа методами электрошлакового переплава составных расходных электродов под традиционным флюсом АНФ-6 в открытом агрегате и под флюсом системы CaF₂-Ca в камерной печи (КЭШП).

Основу расходных электродов составляли канатные пруты диаметром 45 мм из стали 50. К ним, для введения в слиток алюминия в стехиометрическом соотношении, крепили с помощью болтов и стальной проволоки алюминиевые бруски сечением 34×25 мм (рис. 1, а, б) или прутки сечением 70 и 27,4 мм² (рис. 1, в, г). Массовая доля алюминиевой части в электродах составляла 17 % (из расчета получения интерметаллида Fe₃Al, содержащего 25 % ат Al) и 32 % (из расчета получения интерметаллида FeAl, содержащего 50 % ат Al).

Электрошлаковый переплав электродов проводили на установке А-550, переоборудованной в камерную печь ЭШП, на воздухе и в контролируемой атмосфере аргона, в водоохлаждаемые кристаллизаторы диаметром 100 и 130 мм. В обоих вариантах для наведения шлака применяли технологию «твердого» старта на металлической стружке.

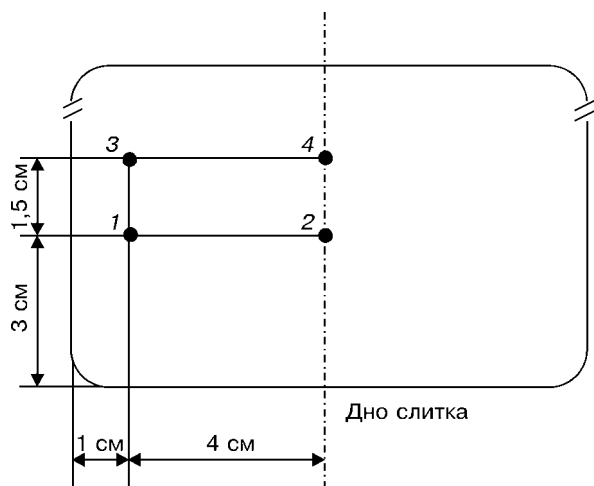


Рис. 3. Схема отбора проб из слитков КЭШП



Рис. 4. Макроструктура слитка Fe₃Al КЭШП



При КЭШП камеру печи предварительно вакуумировали, а затем заполняли аргоном, поддерживая по ходу плавки его избыточное давление 10^4 Па. Флюс для этого варианта составляли из фтористого кальция марки ОСЧ 5-2 (основа) и металлического кальция (4...7,4 % мас).

Под флюсом АНФ-6 по традиционной монофилярной схеме были выплавлены два слитка. Оба слитка имели хорошую гладкую поверхность.

Однако слиток с расчетным содержанием 25 % ат Al имел поперечные трещины, а с расчетным содержанием 50 % ат Al саморазрушался на воздухе. Связано это, вероятно, с изменениями по ходу плавки состава шлака из-за активного окисления алюминия, о чем свидетельствует бурное выделение из кристаллизатора белого дыма, и с возможным насыщением металла углеродом [10] из терморасщепляющегося графита, присаживаемого на поверхность шлака для его защиты.

Полученные результаты показали, что использование канонической схемы ЭШП для производства алюминидов железа без специальных мер защиты электродов и плавильного пространства нецелесообразно. Определенные перспективы в данном направлении открывает КЭШП, сочетающий возможности защиты электрода и плавильного пространства инертным газом и использование металло-содержащих шлаков, обеспечивающих глубоко раскисленную активно рафинирующую среду [11].

Для получения слитков интерметаллидов Fe_3Al и $FeAl$ из составных расходных электродов сталь-алюминий использовали КЭШП в атмосфере аргона под кальцийсодержащим флюсом. Выплавленные слитки диаметром 100 мм охлаждали в кристаллизаторе в течение 30 мин, после чего снимали камеру и их извлекали. Слитки имели гладкую поверхность (рис. 2, а, б), от которой хорошо отделялись шлаковая «шапка» и гарнисаж.

Слитки разрезали вдоль продольной оси, после чего одну половину использовали для химического анализа, а из средней части другой изготавливали поперечные темплеты для макро- и микроструктурного анализа, которые предварительно шлифовали и травили в 10 %-ном водном растворе HCl (на макроструктуру) и 10 %-ном водном растворе HNO_3 (на микроструктуру). Шлифы исследовали на оптическом микроскопе Neophot-2 и растровом электронном микроскопе JEOL JSM-T3000, определяя при этом и локаль-

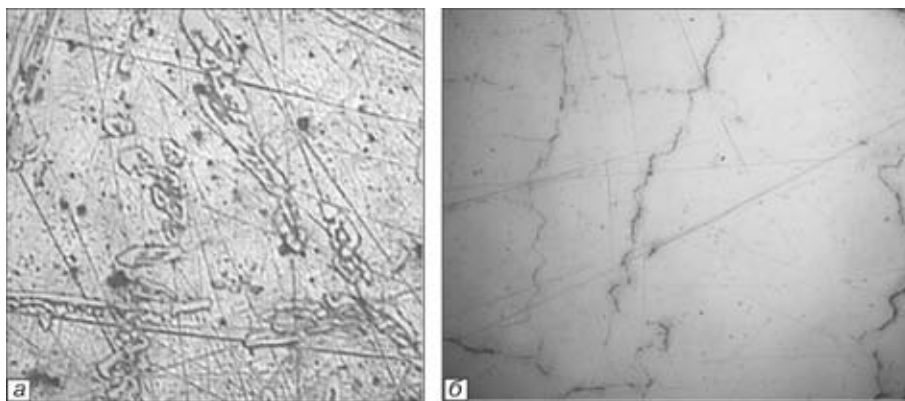


Рис. 5. Микроструктура слитков КЭШП: а — слиток Fe_3Al ($\times 250$); б — слиток $FeAl$ ($\times 150$)

ную химическую неоднородность с помощью рентгеноспектрального анализа.

Образцы фотографировали цифровой камерой QV-100 и оцифрованный файл анализировали с помощью программного пакета АСД. Микротвердость измеряли микротвердомером ПМТ-3 (15 измерений на точку), вдавливая алмазную пирамиду при разных нагрузках. Химический анализ стружки из различных точек слитка (рис. 3) проводили титриметрическим комплексонометрическим (комплексон III) методом.

Результаты химического анализа слитков КЭШП (табл. 1) свидетельствуют о достаточной их однородности. Макроструктура (рис. 4) имеет характерную для слитков ЭШП направленность, плотная, без видимых дефектов. Статистически средние значения микротвердости представлены в табл. 2. Приведенные значения микротвердости хорошо согласуются с опубликованными ранее данными [12].

Таблица 1

Точки отбора проб в слитке (рис. 3)	Содержание алюминия, %	
	Слиток Fe_3Al	Слиток $FeAl$
1	14,3	29,2
2	13,69	29,7
3	14,35	—
4	14,7	—

Микроструктурным анализом установлено, что слиток Fe_3Al , полученный методом КЭШП, имеет двухфазную структуру, которая состоит из матрицы и второй фазы в виде округлых ветвистых включе-

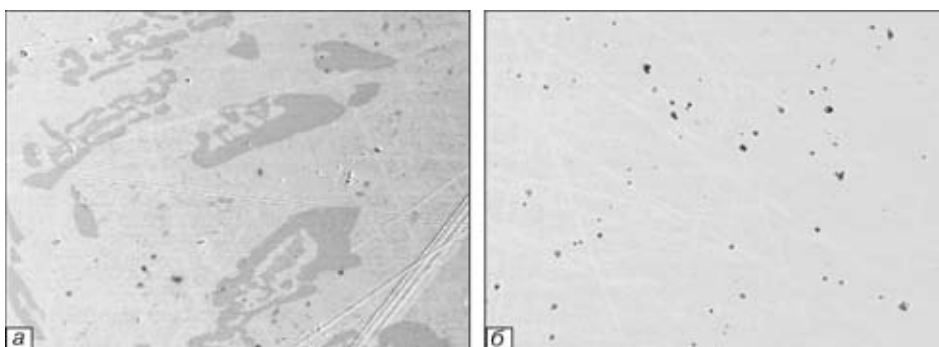


Рис. 6. Микроструктура слитков КЭШП, полученных растровой электронной микроскопией ($\times 500$): а — слиток Fe_3Al ; б — слиток $FeAl$

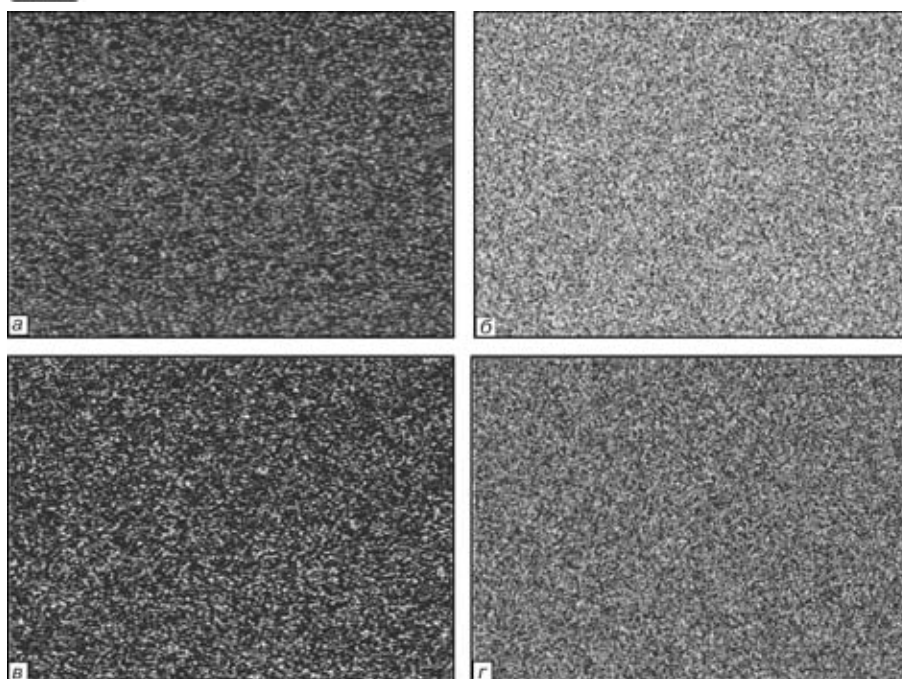


Рис. 7. Распределение алюминия и железа в слитках КЭШП ($\times 1500$): а, б — образец слитка Fe_3Al в характеристическом излучении Al-k и Fe-k соответственно; в, г — образец слитка FeAl в характеристическом излучении Al-k и Fe-k соответственно

Высокотемпературную стойкость опытного металла к окислению определяли на образцах, вырезанных из средних частей слитков Fe_3Al и FeAl. Образцы массой 1 г подвешивали на нихромовой проволоке к тензометрическому датчику и опускали в печь Таммана, разогретую до температуры 800 °С. После 2 ч пребывания образцов в печи доля прироста массы образцов составила соответственно 0,35 и 0,25 %. Это свидетельствует о высокой стойкости опытного металла в условиях высоких температур.

Таким образом, приведенные результаты исследований свидетельствуют о возможности получения слитков интерметаллидов системы железо-алюминий в камерных электрошлаковых печах.

Таблица 2

Слиток	Микротвердость, HRC (кгс/мм ²)	
	Матрица слитка	Включения второй фазы
Fe_3Al	33... 34 (320...327)	570 (51)
FeAl	50 (551)	—

ний, толщина их в среднем 50 мкм. Располагаются включения равномерно по всему слитку (рис. 5, а). Вторую фазу идентифицировали как перовскит Fe_3AlC . Слиток FeAl имеет однофазную дендритную структуру (рис. 5, б).

Микроструктуры, выявленные растровой электронной микроскопией, представлены на рис. 6. Наблюдаемый композиционный контраст возникает в ходе сканирования электронным зондом объектов с локальными изменениями химического состава при изменении коэффициентов вторичной эмиссии и отражения электронов. С увеличением атомного номера элемента коэффициент отражения электронов растет. Поэтому места, обогащенные более тяжелыми элементами, отражают больше электронов и выглядят на фотографии светлыми.

Темные участки (рис. 6, а) отвечают включениям второй фазы Fe_3AlC , обогащенной более легким элементом — углеродом. В слитке FeAl, содержащем около 29 % мас Al, включения второй фазы не наблюдаются (рис. 6, б), что может свидетельствовать о переходе углерода преимущественно в растворенное состояние.

Исследование металла на локальную химическую неоднородность в характеристическом излучении Al-k и Fe-k свидетельствует о равномерном распределении в слитке алюминия и железа (рис. 7).

1. Irvin R. R. Intermetallics offer potential for down-to-earth uses // Metalwork, News. — 1989. — P. 16.
2. Sikka V. K., Viswanathan S, McKamey C. G. Development and commercialization status of Fe_3Al -based alloys // Struct. Intermetallics: Champion, Pa. Sept. 26–30, 1993.
3. *Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок* / Под. ред. Ч. Т. Симса и др.: Пер. с англ. В 2-х кн. Кн. 2 // Под ред. Р. Е. Шалина. — М.: Металлургия, 1995. — 384 с.
4. Deevi S. C., Sastry D. H., Sikka V. K. Alloy development and industrial processing of iron aluminide sheets // 3rd International Symposium on Structural Intermetallics, Jackson Hole, Wyoming, April 28-May, 2002.
5. Заявка 438832 Японии. Способ изготовления выпускных и впускных клапанов двигателей внутреннего сгорания из алюминида / Кимуяга Масаки. — Заявл. 24.05.90. — Оpubл. 31.01.92.
6. Rawers J. S. Tensile fracture iron-iron aluminide foil composites // Scr. Met. et Mater. — 1994. — 30, N 6. — P. 701–706.
7. Solid state reactivity thermal stability and structural properties of Fe–Al nanostructured intermetallic compounds / E. Bonetti, G. Scipione, S. Enzo et al // NANO'94: 2nd Int. Conf. Nanostruct. Mater. Stuttgart., Oct. 3–7, Programme and Abstr. — 1994. — 149 p.
8. Lawrynowicz D. E., Lavernia E. J. Spray atomization and deposition of fiber reinforced intermetallic matrix composites // Scr. Met. et Mater. — 1994. — 31, N 9. — P. 1277–1281.
9. Effect of hot working on room temperature mechanical properties and stress-rupture behaviour of ESR processed Fe–16wt % Al intermetallic alloys / R. G. Baligidad, U. Prakash, A. Radhakrishna et al // ISIJ International. — 1996. — 36, N 9. — P. 1215–1221.
10. Бобро Ю. Г. Алюминиевые чугуны. — Харьков: ХГУ, 1964. — 195 с.
11. Исследование возможности получения титан-алюминиевого сплава методом электрошлакового переплава в инертной атмосфере под «активными» кальцийсодержащими флюсами / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, О. В. Тарлов и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000 — № 1. — С. 75–78.
12. Effect of carbon content on mechanical properties of electroslag remelted Fe_3Al based intermetallic alloys / R. G. Baligidad, U. Prakash, V. Ramakrishna Rao et al // ISIJ International. — 1996. — 36, N 12. — P. 1453–1458.

Донецкий национальный технический университет

Поступила 09.06.2004