



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-97-105>
УДК 669.1.017:620.18; 669.1.017:620.17

Поступила 09.07.2021
Received 09.07.2021

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Fe–Al

Ф. И. РУДНИЦКИЙ, И. В. РАФАЛЬСКИЙ, П. Е. ЛУЩИК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. Тел. +375 29 628-38-55
А. И. ПОКРОВСКИЙ, В. В. ПЕТРЕНКО, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: arturu@tut.by

Представлены результаты экспериментальных исследований структурных характеристик слоистых композитов на основе системы Fe–Al, полученных с использованием различных твердофазных методов деформирования материалов (гидроударной штамповки, поперечно-клиновой прокатки) и жидкофазного (металлургического) способа получения многослойных композитов.

Ключевые слова. Слоистые композиты, система Fe–Al, структура, гидроударная штамповка, поперечно-клиновая прокатка, жидкофазные процессы, сплавы алюминия и железа.

Для цитирования. Рудницкий, Ф. И. Получение и исследование структурных характеристик слоистых композитов на основе системы Fe–Al / Ф. И. Рудницкий, И. В. Рафальский, П. Е. Луцки, А. И. Покровский, В. В. Петренко // *Литье и металлургия*. 2021. № 3. С. 97–105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-97-105>.

FABRICATION AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF Fe–Al–BASED LAMINATED COMPOSITES

F. I. RUDNITSKI, I. V. RAFALSKI, P. E. LUSHCHIK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. Tel. +375 29 628-38-55
A. I. POKROVSKI, V. V. PETRENKO, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevicha str. E-mail: arturu@tut.by

The paper presents the results of experimental studies of the structural characteristics of layered composites based on the Fe–Al system, obtained using various solid-phase methods of material deformation (hydropercussion stamping, cross-wedge rolling) and a liquid-phase (metallurgical) method for producing multilayer composites.

Keywords. Layered composites, Fe–Al system, structure, hydropercussion stamping, cross-wedge rolling, liquid-phase processes, aluminum and iron alloys.

For citation. Rudnitski F. I., Rafalski I. V., Lushchik P. E., Pokrovski A. I., Petrenko V. V. Fabrication and structural characterization of Fe–Al–based laminated composites. *Foundry production and metallurgy*, 2021, no. 3, pp. 97–105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-3-97-105>.

Введение

Исследование процессов структурообразования и разработка эффективных процессов получения многослойных композитов, изготовленных с использованием разнородных материалов на основе железа и алюминия, является сложной задачей, имеющей важное прикладное значение. Развитие фундаментальных научных знаний о межфазном взаимодействии и процессах формирования структурных особенностей границы раздела слоистых Fe–Al материалов может быть использовано для проектирования новых технологических процессов изготовления слоистых композиционных материалов конструкционного и функционального назначения, широко востребованных в таких отраслях промышленности, как строительная, аэрокосмическая, автомобильная, спортивная и др.

Одними из наиболее широко используемых процессов для изготовления слоистых композитов системы Fe–Al являются различные методы деформирования материалов, в том числе методы горячей и холодной прокатки, накопительной пакетной прокатки, сварки взрывом, диффузионной сварки, обеспечивающие разрушение оксидной пленки на поверхности материалов и твердофазное взаимодействие

между атомами соединяемых поверхностей [1–7]. Проблемой твердофазных способов соединения сплавов на основе алюминия и железа является формирование на границе раздела интерметаллических фаз (Al_3Fe , Al_3Fe_2 и др.), значительно снижающих механические и эксплуатационные свойства слоистых композитов [8, 9].

Известны альтернативные жидкофазные способы получения многослойных композитов из материалов на основе алюминия и железа, основанные на идее пропитки расплавом алюминия стальных пакетов с использованием активирующих флюсов [10], активирующих флюсов и легирующих добавок титана [11], покровных флюсов [12], которые предлагается применять для улучшения смачивания стали жидким алюминием и улучшения адгезионной связи по границе контакта разнородных материалов. Общий недостаток жидкофазных методов пропитки расплавом алюминия стальных пакетов – формирование промежуточных слоев из хрупких интерметаллических фаз железо–алюминий, образующихся на границе раздела разнородных материалов на основе железа и алюминия в процессе выдержки стального пакета в расплаве при температуре перегрева над линией ликвидус алюминиевого сплава на 50–100 °C и выше (до 850 °C) [10–12].

Таким образом, изучение структурных характеристик и механизмов формирования границы раздела разнородных материалов на основе железа и алюминия как одного из наиболее важных факторов, влияющих на свойства слоистого композита, является актуальной задачей для разработки эффективных процессов получения многослойных композитов системы Fe–Al.

Методика получения экспериментальных образцов слоистых композитов

Изготовление слоистых образцов из разнородных материалов на основе железа и алюминия осуществляли с использованием различных технологических схем: 1) методами деформации (гидроударной штамповки, поперечно-клиновой прокатки); 2) методом погружения пакетов стальных листовых материалов в расплав алюминия с последующим его затвердеванием (металлургическая схема получения).

Технология гидроударной штамповки представляет собой особую разновидность холодной листовой штамповки для получения изделий из листового металла (алюминия, углеродистой и нержавеющей стали, титана, латуни, меди, жаропрочных сплавов и др., в том числе редких: серебро, платина, ниобий) толщиной от 0,2 до 3,0 мм. Деформирование листовых материалов производится кратким мощным импульсом высокого давления, создаваемого в результате удара быстродвижущегося бойка по замкнутому объему жидкой (или эластичной) среды, заполняющей рабочую камеру пресса. Особенностью процесса является кратковременность приложения нагрузки (300–600 мкс) и отсутствие пуансона, роль которого выполняет передающая среда (жидкость или полиуретан). Источником энергии, запасаемой в аккумуляторе пресса, является сжатый воздух стандартной цеховой пневматической системы типового давления. Преимущества гидроударной штамповки, отличающие ее от традиционной штамповки: более высокая эффективность для труднодеформируемых материалов, возможность обработки материалов с пониженными характеристиками пластичности, высокое качество поверхности (отсутствуют риски, задиры). Для получения слоистых композитов из разнородных листовых материалов на основе железа и алюминия использовали различные комбинации листовых материалов на основе алюминия толщиной от 0,5 до 0,77 мм и стали толщиной от 0,2 до 0,71 мм. Изготовление образцов слоистых композитов осуществляли в виде вогнутых сэндвич-панелей диаметром 30 мм (рис. 1, а, б) с использованием пресса гидроударной штамповки ЛГУ-1 (параметры рабочей камеры: диаметр – 50 мм, высота – 40 мм, масса ударного бойка – 774 г).

Экспериментальные образцы слоистых композитов системы алюминий–сталь с использованием метода поперечно-клиновой прокатки изготавливали в виде трубчатых биметаллических сэндвичей (в выточную втулку из стали помещали свободной посадкой алюминиевый стержень), формообразование которых осуществляли путем перераспределения металла вдоль оси заготовки движущимся поперек оси плоским клиновым инструментом. Внешний вид полученных образцов представлен на рис. 1, в, г.

Кроме методов деформации, для получения слоистых композитов на основе железа и алюминия использовали технологическую схему погружения пакетов стальных листов (рис. 2) в расплав алюминия с последующим его затвердеванием.

Схема получения слоистых композитов из листовых материалов на основе железа и алюминия методом погружения пакета стальных листовых материалов в расплав алюминия с последующим его затвердеванием включала следующие основные этапы: 1) подготовка поверхности листовых



Рис. 1. Внешний вид (*а, в*) и поперечный разрез (*б, з*) экспериментальных образцов слоистых композитов, полученных с использованием различных схем деформации материалов на основе железа и алюминия: *а, б* – методом гидроударной штамповки; *в, з* – методом поперечно-клиновой прокатки

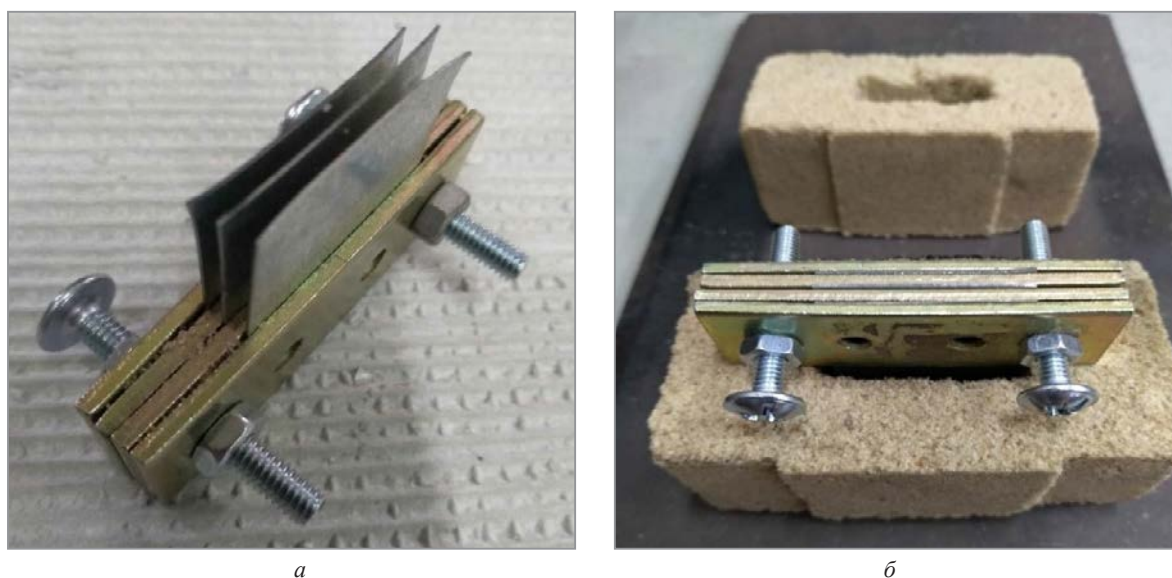


Рис. 2. Внешний вид пакета стальных листовых материалов с зазором между листами 1,3–2,0 мм (*а*) и разовых литейных форм из песчаной жидкостекольной смеси для изготовления слоистых композитов методом погружения пакета стальных листовых материалов в расплав алюминия (*б*)

материалов (очистка, шлифование, обезжиривание); 2) сборка пакета стальных листовых материалов с зазором между листами 1,3–2,0 мм (рис. 2, *а*); 3) погружение собранного пакета в расплав технически чистого алюминия при температуре 700 °С с использованием разовых литейных форм, изготовленных из песчаной смеси с жидкостекольным (3–5 мас. %) связующим (рис. 2, *б*); 4) охлаждение формы с пакетом до полного затвердевания расплава алюминия и извлечение слоистого композита из формы.

Полученные результаты и их обсуждение

Установлено, что в процессе гидроударной штамповки пакетов листовых материалов на основе алюминия (алюминиевый деформируемый сплав АМцМ) и железа (низкоуглеродистая сталь 08кп) при энергии удара УГФ от 510 до 905 Дж для всех использованных комбинаций листов наблюдалось полное или частичное расслоение слоев. При использовании высокоэнергетических параметров воздействия на деформируемые материалы (905 Дж) наблюдалось появление трещин на стальном слое, гофрообразование и частичное разрушение образцов. Таким образом, применение схем деформации при гидроударной штамповке, не предусматривающих возможность перераспределения материала соприкасающихся слоев деформируемой заготовки при воздействии сдвиговых нагрузок, не позволяет обеспечить формирование прочных соединений листовых материалов на основе алюминия и железа.

Исследование влияния эффекта перераспределения материала в зоне контакта разнородных металлов при совместной пластической деформации под воздействием сдвиговых нагрузок проводили с использованием образцов материалов системы алюминий-сталь в виде трубчатых биметаллических сэндвичей, полученных методом поперечно-клиновой прокатки. Установлено, что в экспериментальных образцах, полученных с использованием метода продольно-клиновой прокатки материалов на основе железа (сталь Ст45) и алюминия (алюминий технической чистоты, деформируемый сплав АК6), соединение разнородных материалов реализуется преимущественно без дефектов расслоения с четко выраженной границей раздела.

Металлографический анализ границы раздела слоев разнородных сплавов (рис. 3, 4) свидетельствует о наличии четко выраженной переходной зоны, имеющей структурные отличия как от материала стали,

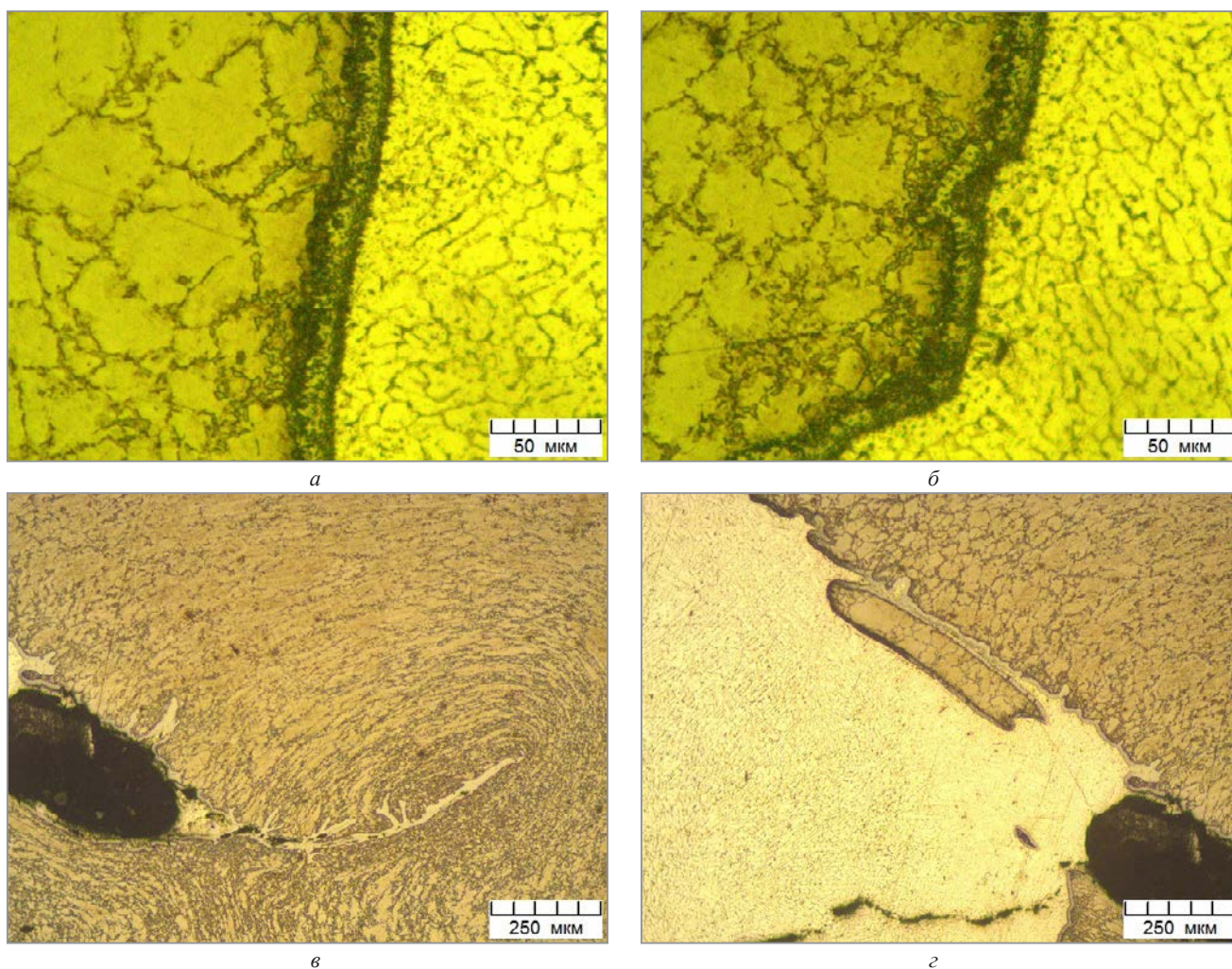


Рис. 3. Микроструктура переходной зоны (*а, б*) и дефекты «сварного шва» (*в, з*) на границе раздела разнородных материалов на основе железа и алюминия: *а* – центральная часть соединения; *б* – угловая часть соединения; *в* – пористость; *з* – замешивание разнородных материалов (поперечно-клиновая прокатка, температура деформации 450 °С)

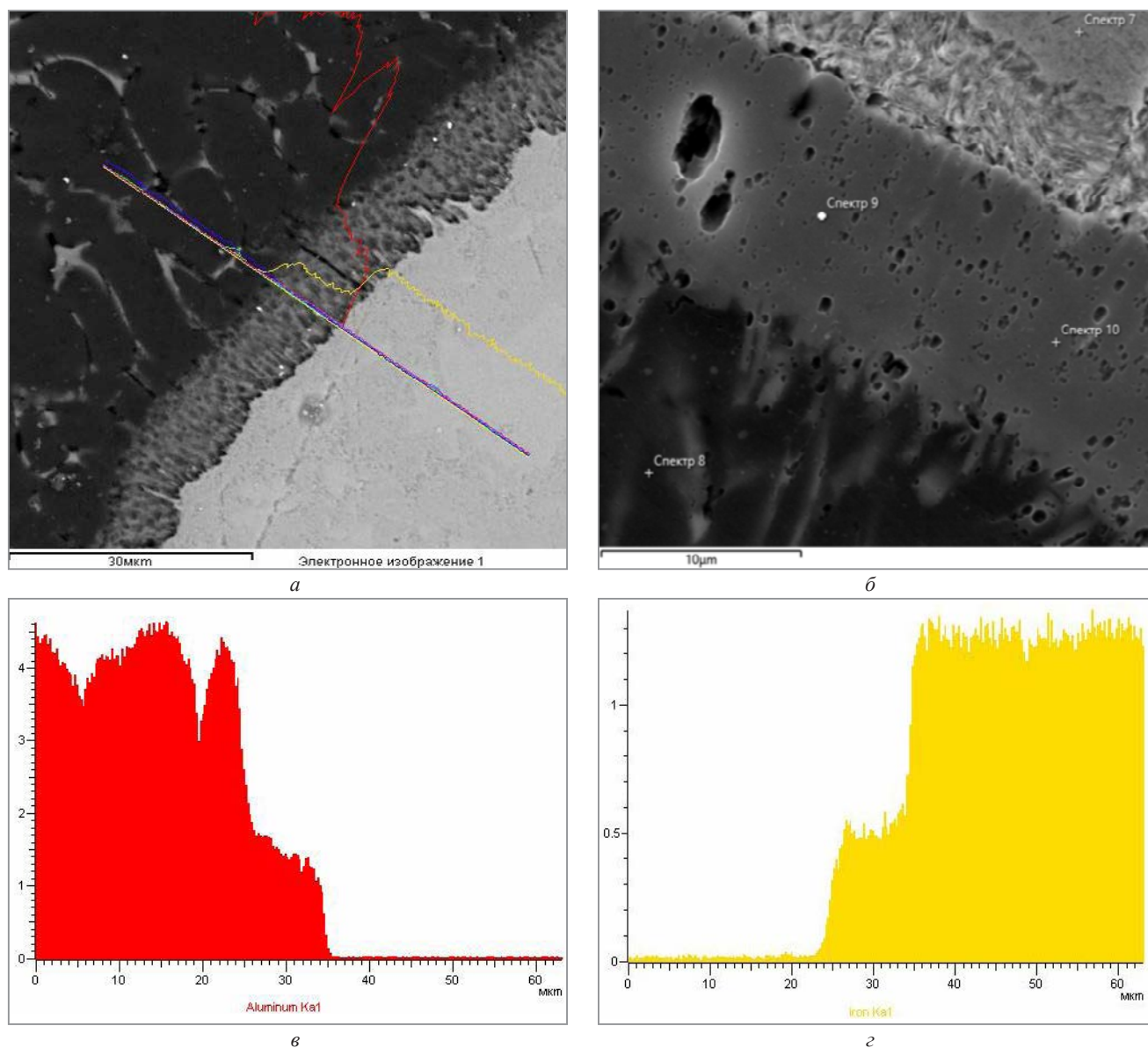


Рис. 4. Электронное изображение микроструктуры (*а, б*) и спектры рентгенофлуоресцентного излучения основных элементов (*в* – алюминия; *г* – железа) на границе раздела разнородных материалов (сталь Ст45, деформируемый сплав АК6) образцов композитов, полученных методом поперечно-клиновой прокатки

так и алюминия (алюминиевого сплава). В отдельных участках соединений на стороне материала алюминия наблюдалось скопление частиц инородного материала (стали, оксидов железа).

Результаты спектроскопического анализа слоистых композитов на основе железа и алюминия, полученных методом поперечно-клиновой прокатки, свидетельствуют о том, что дефекты расслоения разнородных материалов по границе материала могут формироваться путем агрегации на границе раздела оксидных включений, а также металлических примесей, таких, как висмут и свинец. Анализ полученных данных микроструктурного анализа исследованных образцов показал, что при совместной пластической деформации материалов на основе железа и алюминия, реализуемых при поперечно-клиновой прокатке, в зоне контакта разнородных металлов обеспечивается формирование переходной зоны соединения («сварного шва») материалов от 10 до 20 мкм, структура которой зависит от состояния поверхности соединяемых материалов и их состава. Содержание основных элементов химического состава переходной зоны границы раздела соответствует составу интерметаллических соединений типа Al_3Fe , Al_5Fe_2 .

Микроструктура слоистого композита, полученного металлургическим способом (методом погружения трехслойного пакета пластин из листовой низкоуглеродистой стали с цинковым покрытием с конструкционным зазором между пластинами 1,3 и 2,0 мм в расплав алюминия с последующим его затвердеванием и охлаждением), показана на рис. 5.

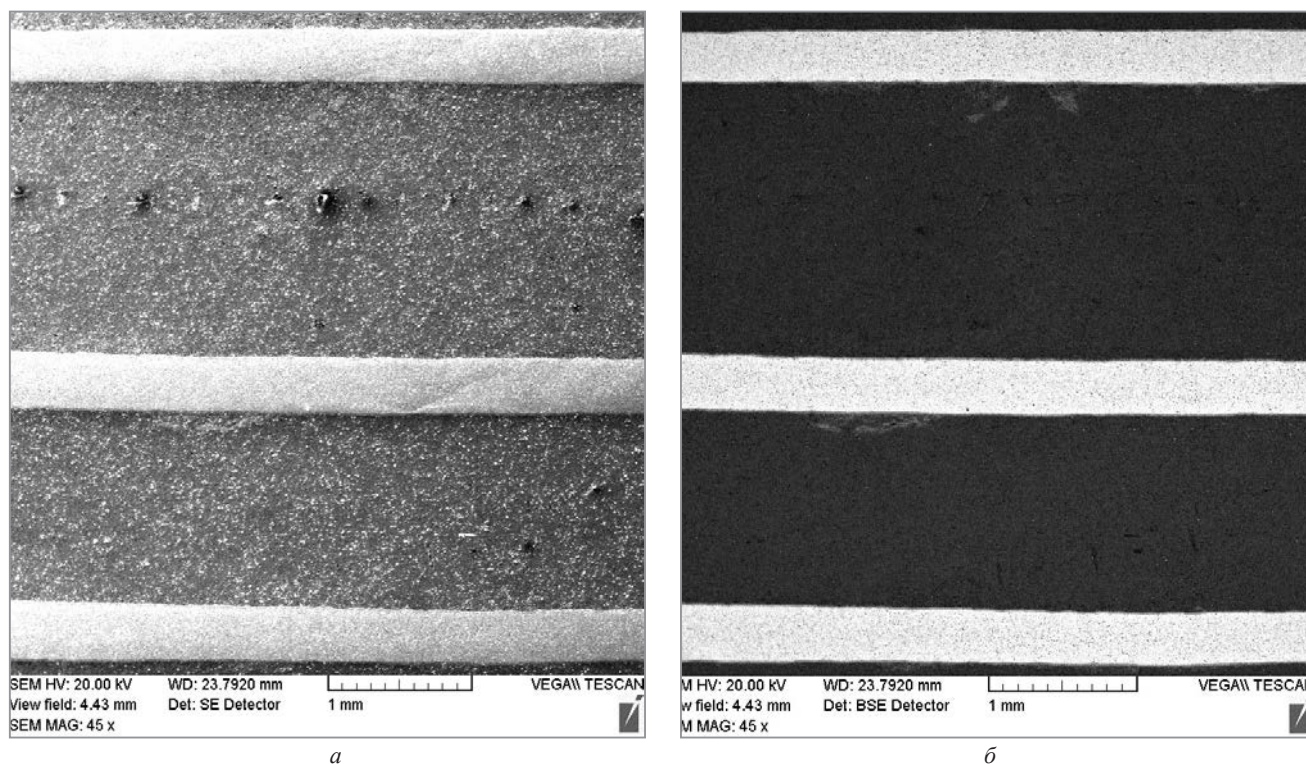


Рис. 5. Микроструктура слоистых композитов, полученных методом погружения пакетов пластин листовой низкоуглеродистой стали с цинковым покрытием в расплав алюминия с последующим его затвердеванием и охлаждением:
а – изображение во вторичных электронах; *б* – изображение в отраженных электронах

Как видно из рисунка, строение границ раздела материалов «алюминий-листовая оцинкованная сталь», сформировавшихся после затвердевания расплава алюминия, характеризуется очень плотной когерентной связью разнородных слоев для всех без исключения пластин, отсутствием дефектов расслоения, несплошностей, микротрещин по границам раздела слоев.

Формирование плотных соединений разнородных материалов может объясняться высокой смачиваемостью расплавом алюминия стальных пластин с цинковым покрытием (вырезанных из оцинкованного листа) при их погружении в расплав алюминия, что подтверждается полным заполнением межпластинчатых зазоров (промежутков между пластинами) расплавом. При этом в процессе затвердевания расплава и его дальнейшего охлаждения под действием объемной усадки при фазовом переходе расплава из жидкого в твердое состояние возникают значительные сжимающие напряжения по границам раздела слоев разнородных материалов, что обеспечивает прочную межатомную связь между контактирующими разнородными материалами («алюминий-листовая сталь»).

Особенности микроструктуры металлматричного композита, полученного металлургическим способом, на границах раздела слоев материалов системы «алюминий-оцинкованная сталь-алюминий» приведены на рис. 6.

Как видно из рисунка, на границе раздела «алюминий-оцинкованная сталь» после затвердевания расплава алюминия наблюдается остаточный слой цинкового покрытия толщиной 10–15 мкм, частично сохранившийся со стороны стальной пластины после непродолжительного взаимодействия с расплавом алюминия от момента погружения до начала затвердевания.

Результаты проведенных исследований показали, что металлургический способ получения многослойного металлматричного композита на основе системы Fe-Al с использованием листовых материалов с разнородными металлическими покрытиями может обеспечить возможность получения плотных соединений листовых материалов (пластин) без применения методов совместной пластической деформации. Соединение разнородных листовых материалов на основе железа и алюминия обеспечивается погружением листовых материалов на основе железа в расплав алюминия с последующим его затвердеванием, при котором благодаря эффекту объемной усадки расплава и возникновению сжимающих напряжений по границам раздела реализуется плотное соединение между слоями алюминия и листами (пластинами) на основе железа. В процессе получения многослойного композита таким способом начальный физический контакт листовых материалов на основе железа после погружения их в расплав

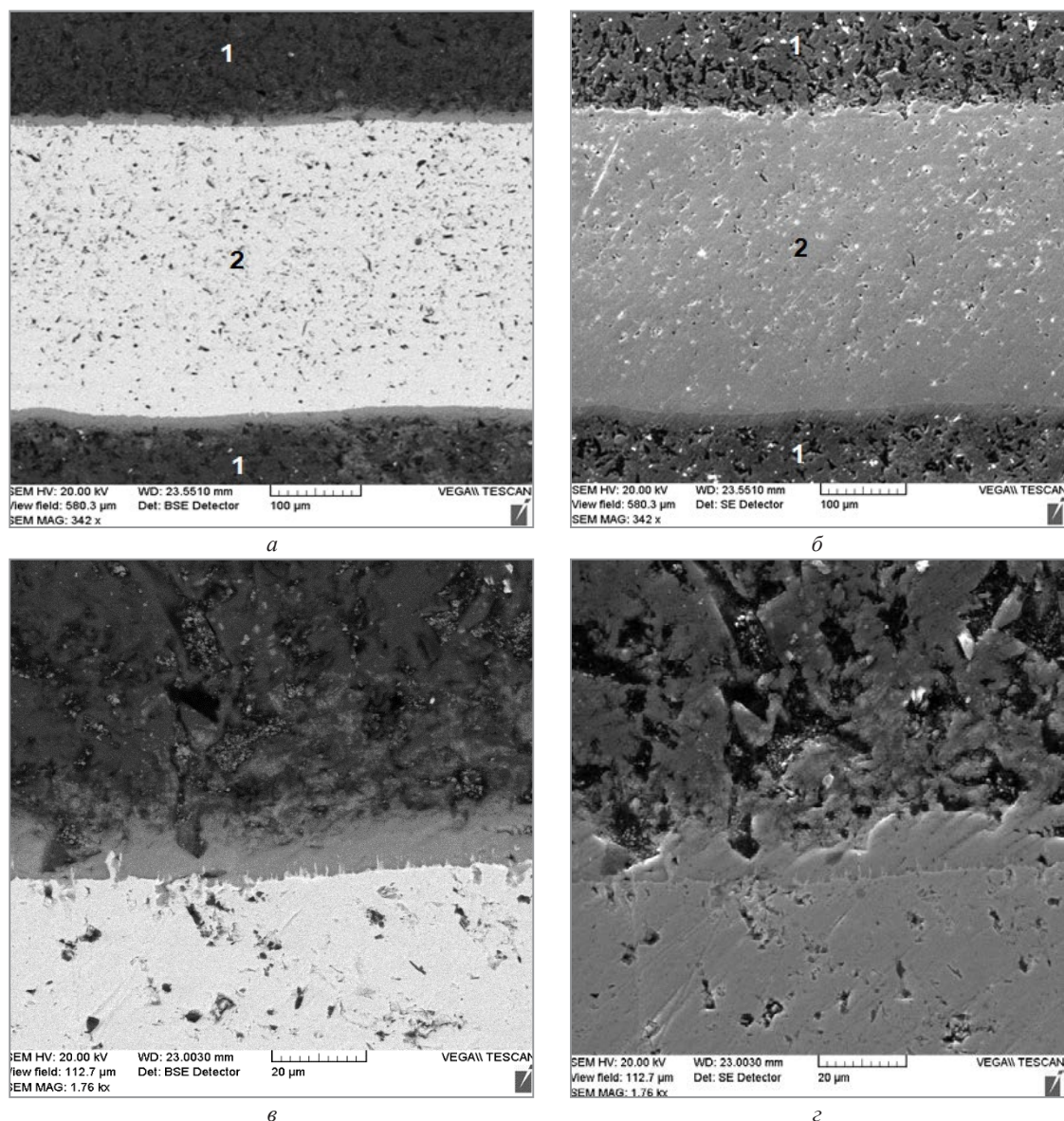


Рис. 6. Микроструктура металломатричного композита, полученного металлургическим способом, на границах раздела разнородных слоев: 1 – алюминий; 2 – оцинкованная сталь (а, в – изображение в отраженных электронах; б, г – изображение во вторичных электронах)

алюминия реализуется не с поверхностным алюмооксидным слоем, а непосредственно с алюминием, находящимся в жидком или жидко-твердофазном (гетерофазном) состоянии.

Таким образом, при реализации металлургической технологии получения многослойного композита на основе системы Fe-Al отсутствует необходимость силового разрушения оксидной пленки на поверхности алюминиевого материала (слой алюминия образуется непосредственно из расплава в условиях начального физического контакта расплава с листовым материалом на основе железа), не требуется интенсивное смешивание разнородных материалов в зоне контакта (с последующим образованием хрупких интерметаллических фаз). Указанные особенности получения многослойных композитов на основе железа и алюминия свидетельствуют о наличии очевидных преимуществ металлургической технологии.

Выводы

1. Изучены процессы получения металломатричных слоистых композитов на основе системы Al-Fe с использованием различных методов деформирования материалов на основе железа и алюминия. Установлено, что гидроударная штамповка листовых материалов на основе железа (низкоуглеродистая сталь) и алюминия (алюминиевый сплав АМцМ) независимо от режимов деформирования не обеспечивает формирование плотных соединений разнородных листовых материалов на основе железа и алюминия.

2. Установлено, что при совместной пластической деформации слоистых материалов на основе железа и алюминия, обеспечивающей возможность существенного перераспределения материала разнородных слоев деформируемой заготовки при воздействии сдвиговых нагрузок (поперечно-клиновое прокатка), в зоне контакта разнородных металлов формируется плотное соединение преимущественно без дефектов расслоения с четко выраженной переходной зоной («сварной шов») шириной от 10 до 20 мкм, структура которой зависит от состояния поверхности соединяемых материалов и их состава. Содержание основных элементов химического состава переходной зоны границы раздела соответствует составу интерметаллических соединений типа Al_3Fe , Al_5Fe_2 . Дефекты расслоения слоистых материалов на основе железа и алюминия по границе раздела разнородных слоев могут формироваться путем агрегации на границе раздела оксидных включений, а также некоторых металлических примесей, таких, как висмут и свинец.

3. Установлено, что при использовании металлургической схемы получения слоистых композитов методом погружения в расплав алюминия пакета пластин из листовой оцинкованной стали формируется плотное соединение между разнородными слоями. Механизм соединения слоев разнородных материалов на основе железа и алюминия при металлургическом методе получения металлломатричных композитов состоит в следующем: соединение разнородных листовых материалов обеспечивается эффектом объемной усадки при фазовом переходе расплава алюминия из жидкого состояния в твердое при его затвердевании и дальнейшем охлаждении и, как следствие, возникновением значительных сжимающих напряжений по границам раздела слоев разнородных материалов, при этом в процессе погружения пакета стальных листов в расплав алюминия обеспечиваются условия, при которых предотвращается формирование прочной поверхностной пленки оксида алюминия на поверхности алюминиевого слоя.

4. Установлены особенности строения границ раздела материалов «алюминий-листовая оцинкованная сталь», сформировавшихся после погружения в расплав алюминия с последующим его затвердеванием пакета пластин из листовой стали с цинковым покрытием с малым межпластинчатым зазором от 1,3 до 2,0 мм. Границы раздела материалов «алюминий-листовая оцинкованная сталь» характеризуются плотной связью разнородных слоев и отсутствием дефектов (усадочных, расслоения, несплошностей, микротрещин) в зоне контакта материалов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект T20КИ-023 «Исследование структурных характеристик многослойных композитов в системе Fe-Al».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mohammad Nejad Fard N.** Accumulative Roll Bonding of Aluminum/Stainless Steel Sheets / Nejad Fard N. Mohammad, H. Mirzadeh, M. Rezayat, J. M. Cabrera // J. Ultrafine Grained Nanostruct. Mater. 2017. Vol. 50 (1). P. 1–5.
2. **Tang, C.** Surface Treatment with the Cold Roll Bonding Process for an Aluminum Alloy and Mild Steel / C. Tang, Z. Liu, D. Zhou, S. Wu // Strength of Materials. 2015. Vol. 47 (1). P. 150–155.
3. **Wang Chunyang.** Effect of the steel sheet surface hardening state on interfacial bonding strength of embedded aluminum–steel composite sheet produced by cold roll bonding process / Chunyang Wang, Yanbin Jiang, Jianxin Xie [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 652. P. 51–58.
4. **Maleki, H.** Analysis of Bonding Behavior and Critical Reduction of Two-Layer Strips in Clad Cold Rolling Process / H. Maleki, S. Bagherzadeh, B. Mollaei-Dariani, K. Abrinia // Journal of Materials Engineering and Performance. 2013. Vol. 22 (4). – P. 917–925.
5. **Akramifard, H. R.** Cladding of aluminum on AISI 304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties / H. R. Akramifard, H. Mirzadeh, M. H. Parsa // Materials Science and Engineering: A. 2014. Vol. 613. P. 232–239.
6. **Yang, X.** Interfacial bonding mechanism of aluminium and steel composites / Xian Yang, Hao Weng, Chao-lan Tang // Advanced Composites Letters. – 2018. – Vol. 27, Iss. 2. – PP.71–76.
7. **Gurevich, L.** Investigation on the contact hardening of Al/Steel laminated composites with soft interlayers / L. Gurevich, Y. Trykov, D. Pronichev [et al.] // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2014. Vol. 9. P. 275–281.
8. **Рафальский, И. В.** Металломатричные слоистые композиты на основе железа и алюминия: обзор процессов получения / И. В. Рафальский, П. Е. Лущик, Ф. И. Рудницкий // Металлургия. Минск: БНТУ, 2020. Вып. 41. Ч. 2. С. 28–40.
9. **Buchner, M.** Investigation of different parameters on roll bonding quality of aluminium and steel sheets / M. Buchner, B. Buchner, B. Buchmayr [et al.] // International Journal of Material Forming. 2008. Vol. 1(1). P. 1279–1282.
10. **Рябов, В. Р.** Применение биметаллических и армированных сталеалюминиевых соединений. М.: Металлургия, 1975. 287 с.
11. Патент РФ 2435 671 С1. Способ получения слоистых композиционных материалов сталь-алюминий / А. И. Ковтунов, Т. В. Чермашенцева, С. В. Мямин, 2011.
12. Патент РФ 2437 770 С1. Способ получения слоистых композиционных материалов сталь-алюминий / А. И. Ковтунов, Т. В. Чермашенцева, С. В. Мямин, Ю. Ю. Хохлов, 2011.

REFERENCES

1. **Mohammad Nejad Fard N., Mirzadeh H., Rezayat M., Cabrera J.M.** Accumulative Roll Bonding of Aluminum/Stainless Steel Sheets. *J. Ultrafine Grained Nanostruct. Mater*, 201, vol. 50 (1), pp. 1–5.
2. **Tang C., Z. Liu, D. Zhou, S. Wu.** Surface Treatment with the Cold Roll Bonding Process for an Aluminum Alloy and Mild Steel. *Strength of Materials*, 2015, vol. 47 (1), pp. 150–155.
3. **Chunyang Wang, Yanbin Jiang, Jianxin Xie.** Effect of the steel sheet surface hardening state on interfacial bonding strength of embedded aluminum–steel composite sheet produced by cold roll bonding process. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 652, pp. 51–58.
4. **Maleki H., Bagherzadeh S., Mollaie-Dariani B., Abrinia K.** Analysis of Bonding Behavior and Critical Reduction of Two-Layer Strips in Clad Cold Rolling Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, vol. 22 (4), pp. 917–925.
5. **Akramifard H.R., Mirzadeh H., Parsa M.H.** Cladding of aluminum on AISI 304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, vol. 613, pp. 232–239.
6. **Yang X., Weng Hao, Tang Chao-lan.** Interfacial bonding mechanism of aluminium and steel composites. *Advanced Composites Letters*, 2018, Vol. 27, Iss. 2, pp. 71–76.
7. **Gurevich L., Trykov Y., Pronichev D.** Investigation on the contact hardening of Al/Steel laminated composites with soft interlayers. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 2014, vol. 9, pp. 275–281.
8. **Rafalski I.V., Lushchik P.E., Rudnitski F.I.** Metallomatrichnye sloistye kompozity na osnove zheleza i alyuminiya: obzor processov polucheniya [Metal-matrix layered iron-aluminum-based composites: an overview of production processes]. *Metallurgiya = Metallurgy*, Minsk, BNTU Publ., 2020, vyp. 41, pp. 28–40.
9. **Buchner M., Buchner B., Buchmayr B.** Investigation of different parameters on roll bonding quality of aluminium and steel sheets. *International Journal of Material Forming*, 2008, vol. 1(1), pp. 1279–1282.
10. **Ryabov V.R.** *Primenenie bimetallicheskih i armirovannyh stalealyuminiyevykh soedineniy* [Application of bimetallic and reinforced steel-aluminum joints]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975, 287 p.
11. **Kovtunov A.I., e. a.** *Sposob polucheniya sloistyh kompozitsyonykh materialov stal-alyuminiy* [Method for producing layered steel-aluminum composite materials]. Patent RU, no. 2435 671 C1, 2011.
12. **Kovtunov A.I., e. a.** *Sposob polucheniya sloistyh kompozitsyonykh materialov stal-alyuminiy* [Method for producing layered steel-aluminum composite materials]. Patent RU, no. 2437 770 C1, 2011.