

УДК 669.1.017:620.18; 669.1.017:620.17;
669.1-419:620.18; 669.1-419:620.17

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И АЛЮМИНИЯ

Ф.И. РУДНИЦКИЙ, канд. техн. наук
Белорусский национальный технический университет
И.В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, **П.Е. ЛУЩИК**, канд. техн. наук
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»
А.И. ПОКРОВСКИЙ, канд. техн. наук
ГНУ Физико-технический институт, НАН Беларуси

Представлены результаты исследования структурных характеристик многослойных композитов, полученных с использованием листовых материалов на основе железа и алюминия с применением различных методов холодного деформирования пакетов листовых материалов (гидроударная штамповка, прессование с последующей термообработкой) и методом погружения пакетов листовых материалов в расплав алюминия с последующим затвердеванием расплава (металлургический метод получения). Показано, что методы холодной гидроударной штамповки (при энергии удара до 905 Дж) и прессования (при давлении до 21,2 кг/м²) с последующей термообработкой (до 550 °С в течение 6 ч) материалов на основе железа (низкоуглеродистая сталь 08 кп) и алюминия (сплавы АМцМ, АМг2М) не позволяют обеспечить формирование прочной адгезионной связи между листовыми материалами на основе алюминия и железа. Установлено, что при использовании металлургической схемы получения слоистых композитов формируется плотное соединение между разнородными слоями на основе железа и алюминия. С использованием метода растровой (сканирующей) электронной микроскопии исследованы структурные характеристики и особенности строения границ раздела в слоистых материалах на основе системы Fe-Al, полученных металлургическим методом погружения пластин из листовой низкоуглеродистой стали в расплав алюминия с последующим его затвердеванием.

Ключевые слова: слоистые композиты, листовые материалы, сплавы на основе железа, алюминиевые сплавы, структура.

STUDY OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF IRON/ALUMINUM MULTILAYER LAMINATED COMPOSITES FABRICATED USING SHEET METAL MATERIALS

F.I. RUDNITSKI, Ph. D in Technical Sciences

Belarusian National Technical University

I.V. RAFALSKI, Ph. D in Technical Sciences, **P.E. LUSHCHIK**,

Ph. D in Technical Sciences

Science and Technology Park of BNTU «Polytechnic»

A.I. POKROVSKI, Ph. D in Technical Sciences

Institute of Physics and Technology of National Academy of Sciences
of Belarus

The paper presents the results of a study of the structural characteristics of multilayer composites fabricated using sheet iron and aluminum materials by various methods of cold deformation of the materials (hydropercussion stamping, pressing and heat treatment) and by immersing sheets into an aluminum melt with subsequent solidification of the melt (metallurgical method of fabrication). It is shown that the methods of cold hydropercussion stamping (with an impact energy of up to 905 J) and pressing (at a pressure of up to 21.2 kg/m²) followed by heat treatment (up to 550 °C for 6 hours) of sheet materials (low-carbon steel, aluminum alloys) do not allow the formation of strong adhesive bonds between aluminum and iron sheets. It was found that when using a metallurgical scheme for producing layered composites, a tight connection is formed between dissimilar iron and aluminum layers. Using the SEM, the structural characteristics and features of the interfaces in layered Fe-Al materials, fabricated by the metallurgical method have been investigated.

Keywords: laminated composites, sheet metals, aluminum alloys, iron-based alloys, structure.

Введение. Исследование процессов структурообразования многослойных композитов, полученных с использованием разнородных металломатричных материалов, является сложной фундаментальной проблемой, имеющей важное прикладное значение. Особый интерес представляют процессы структурообразования в зоне контакта взаимно-нерастворимых или малорастворимых металлов и сплавов на основе железа и алюминия, не склонных к образованию прочных соединений [1].

Структурообразование многослойных композитов из разнородных листовых материалов на основе железа и алюминия обусловлено процессами тепло- и массопереноса в зоне контакта с учетом состояния поверхности раздела. Особенности реализации методов соединения листовых материалов на основе железа и алюминия обусловлены существенным различием физико-химических свойств и особенностями системы Fe-Al: температура плавления железа (1538,9 °C) в 2,33 раза превышает температуру плавления алюминия (660 °C), плотность железа (7,874 г/см³) больше плотности алюминия (2,699 г/см³) в 2,92 раза, а предельная растворимость железа в твердом алюминии при эвтектической температуре в системе Al-Fe (655 °C) не превышает 0,03–0,05 % [2–4].

Анализ методов получения слоистых композиционных материалов на основе железа и алюминия показал, что традиционные способы их соединения сводятся к методам силового деформационного воздействия со значительными сдвиговыми деформациями поверхностных слоев [5–7]. Однако при этом в зоне контакта разнородных слоев неизбежно образуются хрупкие интерметаллические фазы (Al₃Fe, Al₃Fe₂ и др. [8]), существенно снижающие прочность соединения и не позволяющие обеспечить ожидаемый уровень эксплуатационных свойств слоистых композитов на основе системы Fe-Al. В связи с этим разработка новых эффективных процессов получения многослойных композитов на основе системы Fe-Al с использованием возможностей металлургических технологий и исследование особенностей их структурообразования представляет большой научный и практический интерес.

Материалы и методы получения слоистых композитов. Слоистые композиты получали с использованием различных методов холодного деформирования пакетов листовых материалов на основе железа и алюминия (гидроударная штамповка, прессование с последующей термообработкой) и методом погружения пакетов листовых материалов в расплав алюминия с последующим затверждением расплава (металлургический метод получения). Перечень и химический состав листовых материалов на основе железа и алюминия, использованных в работе для получения экспериментальных образцов слоистых композитов, представлен в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Перечень материалов, использованных в работе для получения экспериментальных образцов слоистых композитов

Наименование материала	Обозначение (марка)	ГОСТ
Лист алюминиевый	АМцМ, АМг2М	ГОСТ 21631-76, 4784-97
Лист стальной холоднойкатанный	Сталь 08кп	ГОСТ 19904-90

Таблица 2 – Химический состав стали для получения экспериментальных образцов металломатричных слоистых композитов (в соответствии с ГОСТ 4041-71, 9045-93)

Сплав	Содержание элементов, % мас.						
	C	Si	Cr	Mn	Ni	Cu	Fe
Сталь 08кп	0,10	≤0,03	≤0,1	0,25–0,5	≤0,15	≤0,2	ост.

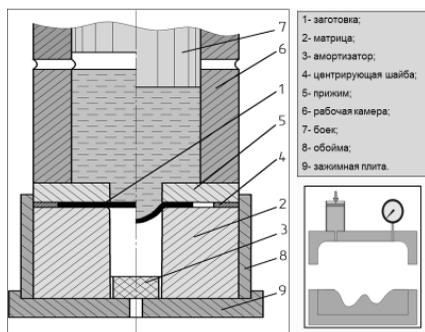
Таблица 3 – Химический состав алюминиевых сплавов для получения экспериментальных образцов слоистых композитов (в соответствии с ГОСТ 4784-97)

Сплав	Содержание элементов, % мас.								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	Прочие элементы
АМцМ	≤0,6	≤0,7	≤0,2	1,0–1,5	≤0,2	≤0,1	≤0,1	ост.	≤0,15
АМг2М	≤0,4	≤0,5	≤0,15	0,1–0,6	1,8–2,6	≤0,15	≤0,15	ост.	≤0,15

Образцы слоистых композитов получали методом холодной гидроударной штамповки (ударного гидроформинга) из тонколистовых материалов на основе алюминия толщиной от 0,5 до 0,77 мм и железа (стали) толщиной от 0,2 до 0,71 мм.

Эскизная схема и внешний вид оборудования для гидроударной штамповки представлены на рисунке 1.

Особенностью процесса гидроударной штамповки является деформирование листовых материалов мощным импульсом высокого давления, создаваемого в результате удара быстродвижущегося бойка по замкнутому объему жидкой (или эластичной) среды, заполняющей рабочую камеру пресса (время приложения нагрузки 300–600 мкс).



a



б

Рисунок 1 – Эскизная схема гидроударной штамповки (*a*) и внешний вид технологического оборудования (*б*) для получения слоистых композитов лаборатории высоких давлений и специальных сплавов ФТИ НАН Беларуси

Схема получения слоистых образцов из разнородных листовых материалов на основе железа и алюминия методом прессования с термообработкой включала следующие основные этапы: 1) подготовка поверхности листовых материалов (очистка, шлифование, обезжиривание 70%-м спиртовым раствором); 2) прессование пакета листовых материалов цилиндрической (диаметром 30 мм) и прямоугольной формы (25×58 мм), сложенных по схеме «стальной лист/листовой алюминий/стальной лист» (усилие прессования 15 т, площадь контактной поверхности до 707 мм²); 3) термическая обработка в электрической печи сопротивления (550 °С в течение 6 ч для пакетов с листовыми материалами с алюминиевыми и алюмооксидными покрытиями, 450 °С в течение 1 ч для пакетов с листовыми материалами с цинковым покрытием).

Процесс получения слоистых образцов методом погружения пакета стальных листовых материалов в расплав алюминия включал следующие основные этапы: 1) подготовка поверхности листовых материалов (очистка, шлифование, обезжиривание); 2) сборка пакета стальных листовых материалов с зазором между листами 1,3–2 мм; 3) погружение собранного пакета в расплав технически чистого алюминия при температуре до 700 °С с использованием разовых литейных форм, изготовленных из песчаной жидкостекольной смеси;

4) охлаждение формы с пакетом до полного затвердевания расплава алюминия и извлечение слоистого композита из формы.

Полученные результаты и их обсуждение. Исследование экспериментальных образцов, полученных деформацией пакетов листовых материалов, показало, что методы гидроударной штамповки и прессования листовых материалов на основе железа и алюминия не обеспечивают получение прочное соединение листовых материалов.

В процессе гидроударной штамповки пакетов листовых материалов на основе алюминия (сплав АМцМ) и железа (сталь 08кп) при энергии удара до 510–800 Дж для всех использованных комбинаций листов наблюдалось расслоение слоев. При энергии удара 905 Дж наблюдалось появление множественных трещин на стальном слое, гофрообразование и частичное разрушение образцов. Технологические параметры и результаты гидроударной штамповки, использованные для деформирования разнородных слоистых материалов на основе железа и алюминия и получения экспериментальных образцов методом гидроударной штамповки, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технологические параметры и результаты гидроударной штамповки, использованные для деформирования разнородных слоистых материалов на основе железа и алюминия (оборудование: ЛГУ-1, рабочая камера Ø 50 мм, $H = 40$ мм, боек $G = 774$ г)

№ образца	Рабочее давление P , атм.	Энергия удара E , Дж	Скорость бойка, м/с	Скорость деформации, c^{-1}	Номер слоя (от нижнего), его материал и толщина, мм	Результат
1	2	3	4	5	6	7
1	4,5	510	36,9	720	1 – сталь 08кп, толщина 0,71 мм 2 – АМцМ, толщина 0,77 мм	Вытяжка образца на глубину 13 мм
2	7	800	45,58	2000–2852	1 – АМцМ, толщина 0,77 мм 2 – сталь 08кп, толщина 0,71 мм	Вытяжка образца на глубину 15 мм, касание дна матрицы по диаметру 18 мм

1	2	3	4	5	6	7
3	8	905	48,5	2000–2852	1 – сталь 08кп, толщина 0,33 мм 2 – АМцМ, толщина 0,5 мм	Вытяжка образца на глубину 15 мм, касание дна матрицы по всей плоскости, гофрообразование, появление трещины на дне
4	8	905	48,5	2000–2852	1 – АМцМ, толщина 0,5 мм 2 – сталь 08кп, толщина 0,2 мм 3 – АМцМ, толщина 0,5 мм 4 – сталь 08кп, толщина 0,2 мм	Разрушение образца по плоскости касания дна матрицы, гофрообразование, появление трещин на стенках

Прессование пакетов тонколистовых материалов с последующей их термической обработкой (до 6 ч при температуре до 550 °С) также не обеспечивает формирование прочной адгезионной связи между разнородными листовыми материалами на основе железа и алюминия. Термическая обработка пакетов сопровождается во всех случаях сильным окислением поверхностей с последующим расслоением листовых материалов (рисунок 2). Несколько лучшие результаты соединения листовых материалов на основе железа и алюминия наблюдались при использовании листов оцинкованной стали, тем не менее, плотные соединения между слоистыми материалами не формировались, также наблюдалось расслоение листовых материалов после их обработки (рисунок 2, б, в).

Таким образом, применение схем холодной деформации при гидроударной штамповке и прессовании, не обеспечивающих разрушение оксидных пленок на поверхности алюминиевых листов и 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 даже в условиях использования высокоэнергетических методов деформирования с использованием импульсов высокого давления.



a



б



в

Рисунок 2 – Внешний вид листовых материалов, использованных для соединения листовых материалов (пластин) цилиндрической (*a*) и прямоугольной формы (*б*), сложенных по схеме «стальной лист/листовой алюминий/стальной лист», после их совместной пластической деформации методом прессования с последующей термической обработкой (*в*)

Результаты исследования образцов слоистых композитов системы Al-Fe, полученных металлургическим методом погружения пакетов листовых материалов в расплав алюминия с последующим его затвердеванием, показали, что соединение разнородных материалов реализуется с плотной, когерентной связью между разнородными материалами без дефектов расслоения (рисунки 3–6).

С целью получения информации о структурных характеристиках и состоянии границы раздела разнородных слоистых материалов использовали метод растровой (сканирующей) электронной микроскопии. Строение границы раздела в слоистых материалах, полученных методом погружения пластины листовой низкоуглеродистой стали с предварительно нанесенным алюмооксидным покрытием, представлено на рисунке 3.

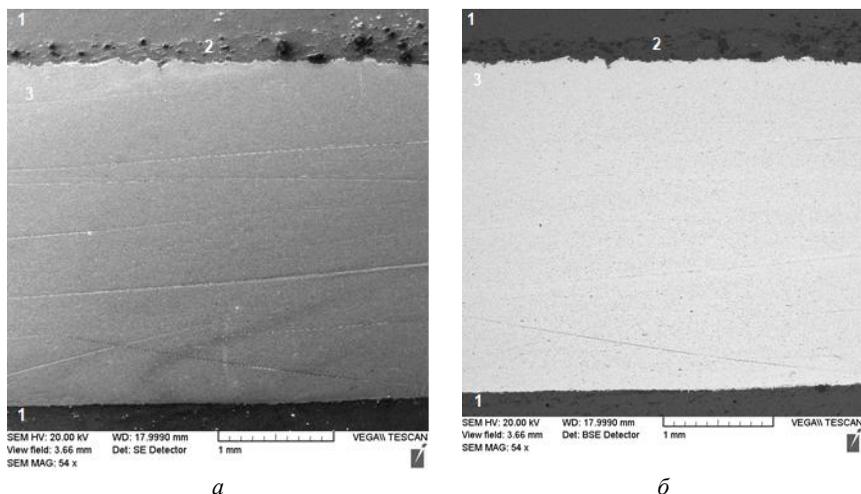


Рисунок 3 – Микроструктура участка поперечного среза металломатричного слоистого композита на основе системы Al-Fe: 1 – алюминий, 2 – алюмооксидный слой, 3 – стальной лист (*a* – изображение во вторичных электронах, *б* – изображение в отраженных электронах)

Микроструктура участка металломатричного композита с тремя разнородными слоями материалов «алюминий-алюмооксидный слой-сталь» представлена на рисунке 4.

Как видно из полученных данных, строение границ раздела «алюминий- алюмооксидный слой» и «алюминий-сталь», сформировавшихся после затвердевания расплава алюминия, характеризуется плотной когерентной связью разнородных слоев, отсутствием видимых дефектов расслоения, несплошностей и микротрещин.

Механизм соединения слоев разнородных материалов при металлургическом способе получения металломатричных композитов обеспечивается, во-первых, 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). Также в процессе реализации металлургической схемы получения многослойного композита погружением пакета листовых материалов на основе железа в расплав алюминия обеспечиваются условия, при которых предот-

вращается формирование прочной поверхностной пленки оксида алюминия со стороны алюминиевого слоя, поскольку после погружения пакета листовых материалов на основе железа в расплав алюминия предотвращается свободный доступ воздуха (кислорода) к границам раздела разнородных слоев материалов.

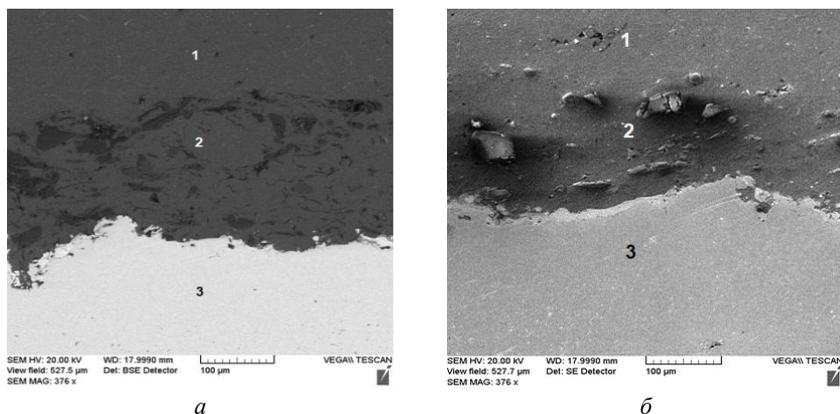


Рисунок 4 – Микроструктура участка металломатричного композита на основе системы Al-Fe с тремя разнородными слоями материалов (1 – алюминий, 2 – алюмооксидный слой, 3 – сталь): а – изображение в отраженных электронах, б – изображение во вторичных электронах

Микроструктура алюмооксидного слоя характеризуется достаточно равномерным распределением алюмооксидных фаз, имеющих размеры от 10–15 до 40–50 мкм, с плотным прилеганием без видимых дефектов к стальному слою.

На рисунке 5 представлено изображение микроструктуры участка металломатричного композита на основе системы Al-Fe с разнородными слоями материалов «алюминий-сталь».

Анализ микроструктуры границы раздела слоев «алюминий-сталь» (рисунок 5) показал, что, несмотря на сложный поверхностный рельеф стального листа, наблюдается плотное заполнение микронеровностей рельефа вдоль всей границы раздела материалом алюминия. Тем не менее, со стороны алюминия наблюдается некоторая переходная зона до 30 мкм, с повышенным количеством дефектов строения в виде несплошностей и микропустот.

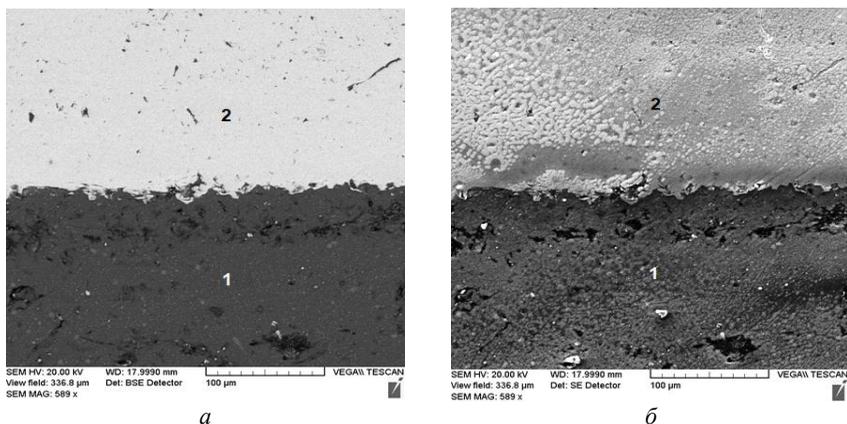


Рисунок 5 – Микроструктура участка металломатричного композита на основе системы Al-Fe с разнородными слоями материалов: 1 – алюминий, 2 – низкоуглеродистая сталь (*a* – изображение в отраженных электронах; *б* – изображение во вторичных электронах)

Формирование переходной зоны по границе раздела слоев «алюминий-сталь» с повышенным количеством несплошностей и микропустот со стороны алюминия может объясняться формированием дефектов усадочного происхождения из-за недостаточно высокой смачиваемости расплавом алюминия стальной пластины (листа) при температуре ее погружения в расплав (до 700 °С), и, как следствие, дефицитом питания металлической жидкости в «пристеночной» зоне при затвердевании расплава.

На рисунке 6 представлена микроструктура многослойного композита, полученного металлургическим методом погружения пакета пластин листовой низкоуглеродистой стали, установленных с малым конструкционным зазором между пластинами до 2 мм, в расплав алюминия с последующим его затвердеванием и охлаждением (две боковые пластины без покрытия, центральная пластина с алюминиевым покрытием).

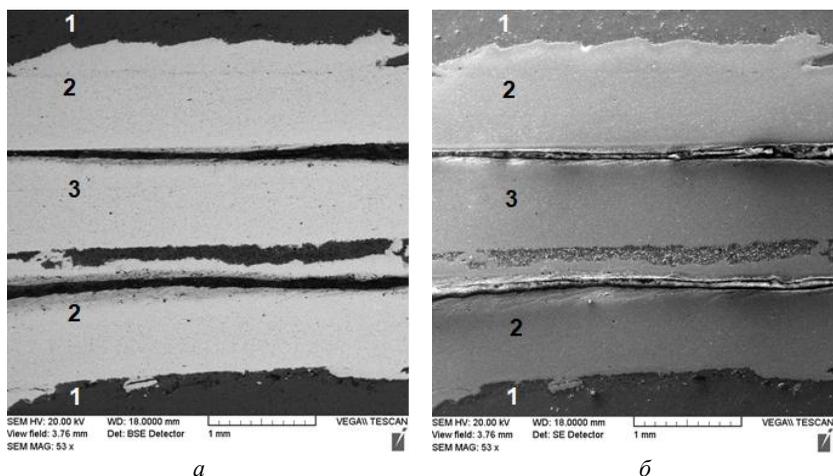


Рисунок 6 – Микроструктура слоистого композита, полученного металлургическим методом погружения пакета пластин листовой низкоуглеродистой стали, установленных с малым конструкционным зазором между пластинами до 2 мм, в расплав алюминия: 1 – алюминий, 2 – пластины листовой низкоуглеродистой стали, 3 – пластина листовой низкоуглеродистой стали с алюминиевым покрытием (а – изображение в отраженных электронах, б – изображение во вторичных электронах)

Исследование образцов многослойного композита, полученного металлургическим методом погружения пакета пластин листовой низкоуглеродистой стали, установленных с малым конструкционным зазором между пластинами до 2 мм, в расплав алюминия (при температуре около 700 °С) с последующим его затвердеванием и охлаждением, показало, что проникновение жидкого металла в установленные межпластинчатые зазоры при погружении в расплав пакета не обеспечивается. После затвердевания расплава алюминия и его охлаждения под воздействием объемной усадки алюминия вследствие сжимающих напряжений происходит деформация пакета пластин и уменьшение величины зазоров между пластинами до 0,1–0,2 мм. Однако на внешних боковых поверхностях стальных пластин (между слоями 1 и 2 на рисунке 6) по границе раздела «алюминий-сталь» формируется плотное соединение между разнородными слоями (рисунок 7).

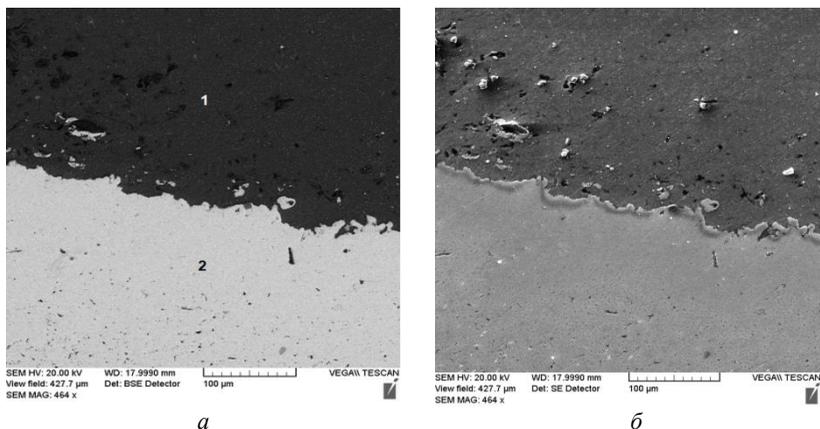


Рисунок 7 – Микроструктура металломатричного композита, полученного металлургическим способом при погружении пакета стальных пластин из листовой низкоуглеродистой стали без покрытия и с алюминиевым покрытием в расплав алюминия, на границе раздела разнородных слоев «алюминий-низкоуглеродистая сталь»: *а* – изображение в отраженных электронах, *б* – изображение во вторичных электронах

Заключение.

1. Исследованы процессы получения и структурные характеристики слоистых композитов из листовых материалов на основе железа и алюминия с использованием методов холодного деформирования материалов (гидроударной штамповки, прессования с последующей термической обработкой) и способа погружения пакетов стальных тонколистовых материалов в расплав алюминия с последующим затвердеванием расплава (металлургический метод получения). Установлено, что методы холодной гидроударной штамповки (при энергии удара до 905 Дж) и прессования (при давлении до 21,2 кг/м²) с последующей термообработкой (до 550 °С в течение 6 ч) материалов на основе железа (низкоуглеродистая сталь 08 кп) и алюминия (сплавы АМцМ, АМг2М) не позволяют обеспечить формирование прочной адгезионной связи между листовыми материалами на основе алюминия и железа. Термическая обработка пакетов листовых материалов сопровождается сильным окислением поверхностей, и, как следствие, последующим расслоением соединяемых листовых материалов.

2. Установлено, что при использовании металлургической схемы получения слоистых композитов формируется плотное соединение между разнородными слоями на основе железа и алюминия. С использованием метода растровой (сканирующей) электронной микроскопии исследованы структурные характеристики и особенности строения границ раздела в слоистых материалах на основе системы Fe-Al, полученных металлургическим методом погружения пластин из листовой низкоуглеродистой стали в расплав алюминия с последующим его затвердеванием. Установлено, что при соединении стальных пластин без поверхностного покрытия металлургическим методом получения слоистых композитов может наблюдаться формирование переходной зоны размером до 30 мкм вдоль границы раздела слоев «алюминий-сталь» с повышенной плотностью дефектов усадочного происхождения со стороны алюминия, образование которой объясняется недостаточно высокой смачиваемостью расплавом алюминия стальной пластины и дефицитом питания металлической жидкости в «пристеночной» зоне при затвердевании расплава.

3. Установлено, что при получении металлургическим методом погружения пакета пластин листовой низкоуглеродистой стали, выполненных с малым конструкционным зазором между пластинами до 2 мм, в расплав алюминия (при температуре около 700 °С) с последующим его затвердеванием и охлаждением проникновение жидкого металла в межпластинчатые зазоры не обеспечивается. После затвердевания расплава алюминия и его охлаждения под воздействием объемной усадки алюминия вследствие сжимающих напряжений происходит деформация пакета пластин и уменьшение величины зазоров между пластинами до 0,1–0,2 мм. Однако на внешних боковых поверхностях стальных пластин по границе раздела «алюминий-сталь» формируется плотное соединение между разнородными слоями

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Т20КИ-023 «Исследование структурных характеристик многослойных композитов в системе Fe-Al».

Список литературы

- 1. Рафальский, И.В.** Металломатричные слоистые композиты на основе железа и алюминия: обзор процессов получения / И.В. Рафальский, П.Е. Лушчик, Ф.И. Рудницкий // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.: в 2 ч.* – Минск: БНТУ, 2020. – Вып. 41, Ч. 2. – С. 28–40.
- 2. Мондольфо, Л.Ф.** Структура и свойства алюминиевых сплавов / Пер. с англ. под ред. Ф.И. Квасова [и др.]. – М: *Металлургия*, 1979. – 639 с.
- 3. Лякишев, Н.П.** Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 1 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: *Машиностроение*, 1996. – 992 с.
- 4. Лякишев, Н.П.** Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: *Машиностроение*, 1997. – 1024 с.
- 5. Mohammad Nejad Fard N.** Accumulative Roll Bonding of Aluminum/Stainless Steel Sheets / Mohammad Nejad Fard N., Mirzadeh H., Rezayat M., Cabrera J.M. // *J. Ultrafine Grained Nanostruct. Mater.* – 2017. – Vol. 50 (1). – P. 1–5.
- 6. 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.
- 7. Chunyang Wang.** 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.
- 8. Investigation** of different parameters on roll bonding quality of aluminium and steel sheets / M. Buchner [et al.] // *International Journal of Material Forming.* – 2008. – Vol. 1(1). – P. 1279–1282.

References

- 1. Rafalski, I.V.** *Metallomatrixnye sloistye kompozity na osnove zheleza i aliuminiya: obzor processov polucheniya* [Iron/aluminum metal-matrix layered composites: a review of manufacturing processes] / I.V. Rafalski, P.E. Lushchik, F.I. Rudnitsky / *Metallurgiya: respublikan-*

skij mezhdomestvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers. – Minsk: BNTU Publ., 2020. – Vyp. 41, Part 2. – P. 28–40.

2. Mondolfo, L.F. *Struktura i svojstva aluminiyevykh splavov* [Structure and properties of aluminum alloys] / Trans. from English ed. F.I. Kvasova [et al.]. – Moscow: Metallurgiya Publ., 1979. – 639 p.

3. Lyakishev, N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynnykh metallicheskih sistem: Spravochnik: V 3 tomah: T. 1* [State diagrams of double metal systems: Handbook: In 3 volumes: Vol. 1] / ed. N.P. Lyakishev. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1996. – 992 p.

4. Lyakishev, N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynnykh metallicheskih sistem: Spravochnik: V 3 tomah: T. 2* [State diagrams of double metal systems: Handbook: In 3 volumes: Vol. 2] / ed. N.P. Lyakishev. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1997. – 1024 p.

5. Mohammad Nejad Fard N. Accumulative Roll Bonding of Aluminum/Stainless Steel Sheets / Mohammad Nejad Fard N., Mirzadeh H., Rezayat M., Cabrera J.M. // *J. Ultrafine Grained Nanostruct. Mater.* – 2017. – Vol. 50 (1). – P. 1–5.

6. 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.

7. Chunyang Wang. 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.

8. Investigation of different parameters on roll bonding quality of aluminium and steel sheets / M. Buchner [et al.] // *International Journal of Material Forming.* – 2008. – Vol. 1(1). – P. 1279–1282.

Поступила 06.10.2021

Received 06.10.2021