

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

## **МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И АЛЮМИНИЯ: ОБЗОР ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ**

**И.В. РАФАЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук, **П.Е. ЛУЩИК**, канд. техн. наук  
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»,  
**Ф.И. РУДНИЦКИЙ**, канд. техн. наук  
Белорусский национальный технический университет

*Представлены результаты анализа процессов получения слоистых композитов с использованием листовых материалов на основе железа и алюминия. Показано, что известные способы получения слоистых композитов на основе железа и алюминия можно классифицировать на твердофазные (методы деформирования материалов, в том числе методы горячей и холодной прокатки, накопительной пакетной прокатки, сварки взрывом, диффузионной сварки) и жидкофазные процессы (методы литья, пайки). Наиболее широко используемыми процессами изготовления слоистых композитов, полученных с использованием материалов на основе железа и алюминия, являются твердофазные методы, включающие деформирование листовых материалов (CRB, ARB-процессы), а также сварка взрывом. Жидкофазные процессы для получения слоистых композитов на основе железа и алюминия до настоящего времени широкого применения не получили, что может быть обусловлено технологическими сложностями управления структурообразованием слоистых композитов в процессе затвердевания металлических расплавов. Состояние границы раздела материалов является одним из наиболее важных факторов, влияющих на свойства слоистого металлического композита, а изучение механизма формирования соединения на границе раздела материалов является актуальной задачей в области исследований слоистых композитов, полученных с использованием листовых материалов на основе железа и алюминия.*

**Ключевые слова:** слоистые композиты, металлические материалы, алюминиевые сплавы, сплавы на основе железа, процессы получения.

# IRON/ALUMINUM METAL-MATRIX LAYERED COMPOSITES: A REVIEW OF MANUFACTURING PROCESSES

**I.V. RAFALSKI**, Ph. D in Technical Sciences,  
**P.E. LUSHCHIK**, Ph. D in Technical Sciences  
Science and Technology Park of BNTU «Polytechnic»,  
**F.I. RUDNITSKI**, Ph. D in Technical Sciences  
Belarusian National Technical University

*The results of the analysis of layered composites manufacturing processes using iron and aluminum sheet materials are presented. It is shown that the known methods of producing layered composites based on iron and aluminum can be classified into solid-phase (methods of deformation of materials, including methods of hot and cold rolling, cumulative batch rolling, explosion welding, diffusion welding) and liquid-phase processes (methods of casting, brazing). The most widely used processes for the manufacture of layered composites obtained using materials based on iron and aluminum are solid-phase methods, including deformation of sheet materials (CRB, ARB processes), as well as explosion welding. Up to now, liquid-phase methods for the layered composites manufacturing have not received widespread use, which may be due to the technological difficulties in controlling the structure formation of layered composites during the solidification of metal melts. The state of the interface of materials is one of the most important factors affecting the properties of a layered metal composite, and the study of the mechanism of the formation of a joint at the interface of materials is an urgent task in the field of research of layered composites based on iron and aluminum.*

**Keywords:** layered composites, metallic materials, aluminum alloys, iron-based alloys, production processes.

**Введение.** Слоистые композиционные материалы, полученные с использованием листовых материалов, отличаются большим структурно-конструкционным разнообразием и могут включать разнообразные покрытия и защитные поверхности различной толщины, биметаллические материалы, плакированные листы, ламинаты, армированные волокном композиты из лент, тканей и другие материалы. Такие материалы, обладая уникальным сочетанием различных физико-механических свойств, широко востребованы в строительной, аэрокосмической, автомобильной, спортивной, микроэлектронной и

других отраслях промышленности, в том числе в качестве изделий конструкционного назначения с повышенной коррозионной стойкостью и износостойкостью при сохранении низкой стоимости, высокой прочности и небольшого веса. Другими важными характеристиками слоистых композиционных материалов являются их специальные, функциональные свойства (например, теплопроводность, коэффициент теплового расширения и др.), а также улучшенный внешний вид изделий [1].

В зависимости от функционального назначения при получении слоистых композиционных материалов может быть использована практически любая комбинация металлических, полимерных и керамических материалов. Конструктивно слоистые композиты, полученные с использованием металлических материалов, могут включать слои различных металлов и сплавов (слоистые металлические материалы – СММ), а также слои из дисперсно-упрочненного или армированного волокнами металлического композиционного материала (металломатричные композиционные материалы – МКМ). В СММ отдельные слои могут быть листами разнородных металлов и сплавов с различными физическими и функциональными свойствами, например, один металлический слой обеспечивает прочность, а другой – твердость или коррозионную стойкость. В качестве отдельных слоев при изготовлении слоистых композитов на основе МКМ могут быть использованы дисперсно-упрочненные металломатричные материалы, которые содержат частицы интерметаллических и неметаллических соединений (оксиды, карбиды, нитриды, бориды и др.) в металлической матрице, которые обеспечивают повышенную прочность и износостойкость, ударную вязкость и коррозионную стойкость. Армированные волокном МКМ обеспечивают улучшение прочности, жесткости, ударной вязкости, механических характеристик при высоких температурах [1, 2]. В целом, при рассмотрении процессов получения и структурообразования слоистые композиты, полученные на основе металлических материалов, целесообразно объединить в общий класс металломатричных слоистых композитов (МСК).

Сплавы на основе железа (преимущественно, стали) и алюминия являются в настоящее время наиболее распространенными и востребованными из всех современных промышленных материалов. Однако общей проблемой диффузионного соединения алюминия и

стали является формирование на границе раздела хрупких интерметаллических фаз, таких как  $Al_3Fe$  и  $Al_3Fe_2$  [3], существенно снижающих механические и эксплуатационные свойства композитов на основе системы Al–Fe. В связи с этим активно предпринимаются попытки разработать альтернативные способы соединения этих материалов, в том числе с использованием металлургических методов литья, обработки (сварки) под высоким давлением, сварки взрывом и др. Предполагается, что при получении оптимальной структуры слоистого композита материалы на основе железа и алюминия могут обеспечить сочетание высокой прочности, хорошей коррозионной стойкости и теплопроводности при относительно высокой конкурентоспособности по стоимости, что может найти применение в автомобильной и химической промышленности, электронике, авиакосмической промышленности, судостроении и других применениях [3, 4].

**Обзор процессов получения и их обсуждение.** Использование алюминиевых сплавов и сплавов на основе железа (преимущественно, сталей) в металлоконструкциях различного назначения является предпочтительным ввиду их очевидных сравнительных преимуществ перед другими сплавами, включая невысокую стоимость, высокие технологические и эксплуатационные свойства. Алюминиевые сплавы характеризуются хорошими механическими свойствами, коррозионной стойкостью, высокой теплопроводностью и низкой плотностью. Стали, имея высокие прочностные характеристики, обладают хорошей свариваемостью и обрабатываемостью. Как правило, оба упомянутых класса материалов имеют высокую пластичность. Поэтому их комбинация может быть использована для изготовления МСК с уникальными свойствами.

При проектировании МСК (выбор материалов, схемы укладки, толщины и количества чередующихся слоев) и определении процесса их получения используют большое многообразие методов, включая различные способы деформирования материалов, в том числе методы горячей и холодной прокатки, накопительной пакетной прокатки, сварки взрывом, диффузионной сварки, пайки и литья [1–13]. При этом основной задачей процесса получения МСК является формирование оптимальной структуры композита, обеспечивающей требуемый уровень его механических и эксплуатацион-

ных свойств, несмотря на существенные различия основных физико-химических свойств алюминия и железа (таблица 1).

Таблица 1 – Основные физико-химические свойства алюминия и железа

Свойства	Алюминий	Железо
Температура плавления, К	933,5	1812
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,6989	7,874
Удельная теплота плавления, кДж/моль	10,75	13,8
Теплопроводность (при 300 К), Вт/(м·К)	237	80,4
Молярная теплоемкость, Дж/(К·моль)	24,2–24,35	25,14

Одними из наиболее широко используемых процессов для изготовления композитов из металлических листов являются методы деформирования листовых металлических материалов горячей или холодной прокаткой. При этом давление, оказываемое вальцами, разрушает оксидную пленку на поверхности, обеспечивает контакт между атомами соединяемых поверхностей, позволяя двум поверхностям соединяться [1, 4–10].

Среди других твердофазных способов получения МСК можно выделить сварку взрывом [5]. При сварке взрывом заряд взрывчатого вещества обеспечивает давление, необходимое для соединения металлических поверхностей. Этот процесс особенно хорошо подходит для соединения больших листов, которые не подходят для прокатного стана.

Жидкофазные (литейные, металлургические) процессы получения СМК на основе железа и алюминия, представленные, например, способами пропитки расплавом алюминия стальных пакетов [10, 11], до настоящего времени широкого освещения в научных публикациях исследователей не получили, что, вероятно, связано с определенными сложностями управления структурообразованием слоистых материалов в процессе их получения и необходимости компенсации объемной усадки расплава алюминия при его затвердевании между стальными пластинами пакета.

В жидкофазных процессах получения слоистых композитов методом пайки металлические листы отделены небольшим зазором и нагреты выше температуры плавления припоя. Расплав припоя для пайки втягивается в указанный зазор между листами под действием капиллярных сил, фактически образуя при затвердевании дополнительный микрослой композита.

Промышленный метод соединения листовых металлических материалов методом плоской прокатки через пары роликов, находящихся под давлением, был разработан в Институте электросварки им. Е.О. Патона и получил название рулонной сварки (RB-процесс). Основанный на повторении операций деформирования одного и того же СМК, процесс накопительного (аккумулятивного) соединения листовых материалов (ARB-процесс) представлен как один из наиболее успешных методов тяжелой пластической деформации, конкурирующий с методами равноканального углового прессования (ЕСАР-процесс) и интенсивной пластической деформации кручением (НРТ-процесс) [4]. В последние годы СМК с высокими механическими свойствами, в том числе на основе алюминия и железа, были получены с использованием ARB-процесса [4, 5].

Так, в работе [4] были получены и исследованы композиты системы «Al/нержавеющая сталь/Al» с использованием ARB-процесса при 400 °С. Полученный листовой материал разрезали пополам, и процесс накопительной прокатки применяли семь раз при комнатной температуре. Результаты испытаний на растяжение показали, что полученный композит имеет существенно более высокие значения абсолютной и относительной (по отношению к весу) прочности по сравнению с исходным алюминиевым листом. Однако при этом пластические свойства композита были невысокими, что было связано с повышенным сопротивлением деформации компонентов и локальным утонением центрального листа из нержавеющей стали в процессе соединения листовых материалов. Также установлено, что в процессе проведения ARB центральный стальной слой разрушается и распределяется в матрице Al между различными слоями. Из-за разрушения слоя нержавеющей стали и его дефрагментации на множество мелких сегментов прочность композита снижается. Результаты исследования структуры образцов показали, что композит характеризуется сверхмелкозернистой микроструктурой со средним

размером зерна 400 нм в алюминиевой матрице, содержащей 71 % мартенсита в стальных сегментах.

Достаточно активно развиваются методы традиционной холодной прокатки (рулонной сварки, CRB-процесс) при получении композитов на основе системы Fe–Al. Как правило, CRB-процесс при получении слоистого металлического композита состоит из трех этапов: обработки поверхности, непосредственно холодной прокатки и термической обработки. Предварительная обработка поверхности листов является необходимым предварительным условием получения металлического композита с высоким уровнем соединения листовых материалов [3, 6, 7]. Установлено, что, чем больше шероховатость поверхности в определенном диапазоне, тем выше прочность соединения. Сравнивая продольные, поперечные и выполненные под углом  $45^\circ$  относительно направления прокатки текстуры шлифования, был сделан вывод, что текстура продольной поверхности была более предпочтительной для соединения алюминиевых и стальных листов [6]. В контексте исследования влияния способов подготовки поверхности алюминиевых и стальных листов было также установлено положительное влияние их предварительного нагрева и последующей термической обработки на прочность соединения композитов при испытаниях на сдвиг и обратный изгиб [3].

Состояние границы раздела материалов является одним из наиболее важных факторов, влияющих на свойства слоистого металлического композита, и изучение механизма формирования соединения на границе раздела материалов стало обсуждаемой темой в области исследований слоистых композитов с высокими эксплуатационными характеристиками [8–10]. Предложены различные теории и модели (диффузии, механической блокировки, пленок, дислокаций, энергии, рекристаллизации и другие) для объяснения отдельных аспектов процесса формирования соединений на границе раздела металлических материалов, в том числе с использованием численных методов решения задач [10]. Например, в работе [8] для анализа процесса холодной прокатки биметаллической полосы «алюминий-сталь» была предпринята попытка разработать математическую модель, основанную на теореме о верхней границе, решение которой было получено методом конечных элементов. Результаты моделирования показали, что прочность соединения листов увеличивается с уменьшением общей толщины биметаллической

заготовки. Тем не менее, несмотря на определенный объем выполненных экспериментальных и теоретических исследований, результаты системного анализа процессов получения и структурообразования МСК, полученных с использованием листовых материалов на основе железа и алюминия, в представленных публикациях практически отсутствуют [10].

В работе [9] сообщается о результатах исследования листовых композитов системы «Al / сталь / Al», полученных из алюминиевого сплава AA1050 и нержавеющей стали AISI 304L методом холодной прокатки (CRB-процесс), который проводился при температурах порядка 100 и 23 °С для получения аустенитной и аустенитно-мартенситной микроструктур в стали. Результаты испытаний показали, что прочность соединения листов материалов составляла 38 % от прочности алюминиевого сплава. Было установлено, что экструзия алюминия через поверхностные трещины стального листа 304L является основным механизмом соединения. Были исследованы границы раздела и поведение при растяжении трехслойных плакированных листов после выдержки при 200–600 °С в течение 1 ч, чтобы установить влияние отжига на формирование слоя интерметаллических соединений и полученные механические свойства. Методы полевой эмиссионной сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции и оптической микроскопии показали, что промежуточный слой, состоящий в основном из  $Al_{13}Fe_4$ , FeC и  $Al_8SiC_7$ , образуется во время отжига при температуре 500–600 °С. Было установлено, что образование указанного промежуточного слоя после термообработки ухудшает качество соединения и стимулирует процесс отслоения листовых материалов. Кроме того, отмечается, что наличие деформированного мартенсита в плакированных листах играет ключевую роль в повышении прочности композитов на растяжение.

Результаты исследования многослойных композитов, полученных из алюминиевого сплава 4A60 и низкоуглеродистой стали марки 08Al методом холодной прокатки (CRB-процесс), представлены в работе [10]. Процесс получения композитов включал следующие три этапа: предварительная обработка поверхности, холодная прокатка и термическая обработка (диффузионный отжиг). Установлено, что параметры прокатки и диффузионного отжига являлись основными факторами, влияющими на прочность соединения полу-

ченного композита. Указывается, что механизм соединения включает три этапа: 1) физический контакт: в начале прокатки высокое давление приводит к механическому перекрытию двух слоев компонентов, прочность соединения низкая; 2) металлическая связь: по мере протекания процессов взаимодействия и восстановления оксидный слой на поверхности металла разрушается, что обеспечивает полный контакт между двумя разнородными металлами, при этом, когда межатомное расстояние достигает некоторой определенной величины, обеспечиваются условия для химического взаимодействия и образования металлической связи, прочность соединения увеличивается; 3) металлургическое соединение: при последующей обработке диффузионным отжигом прочность соединения значительно увеличивается из-за диффузии между атомами металла на границе раздела.

Результаты исследования трехслойных композитов системы «алюминиевый сплав Al-6Mg / алюминиевый сплав AA1135 / сталь S32109», полученных сваркой взрывом, при испытаниях на растяжение при различных значениях толщины слоев композита, показали, что уменьшение значения относительной толщины внутренних слоев приводит к увеличению прочности на растяжение композита [13]. При этом пластическая деформация при испытаниях на растяжение локализуется в основном в промежуточном слое композита. Относительно образования хрупких фаз  $Fe_xAl_y$  и высоких термических напряжений в области границы раздела соединяемых материалов отмечается, что эти аспекты обусловлены, главным образом, значительными различиями в химических свойствах, коэффициентах линейного расширения, точках плавления, теплопроводности используемых материалов. Несмотря на то, что многослойные композиты на основе стали и алюминиевых сплавов могут обеспечить высокую прочность при нормальных условиях эксплуатации, при температуре выше 400 °C прочность композиционного материала снижается.

### **Заключение.**

1. Анализ процессов получения МСК с использованием листовых материалов на основе железа и алюминия показывал, что всю совокупность методов получения слоистых композитов на основе железа и алюминия можно классифицировать на две большие группы:

– твердофазные процессы, не предполагающие использования в жидком состоянии материалов для получения МСК (методы деформирования материалов, в том числе методы горячей и холодной прокатки, накопительной пакетной прокатки, сварки взрывом, диффузионной сварки);

– жидкофазные процессы, в которых хотя бы один из компонентов МСК используется в жидком состоянии (методы литья, пайки).

2. Наиболее широко используемыми процессами изготовления слоистых композитов, полученных с использованием материалов на основе железа и алюминия, являются твердофазные методы, включающие деформирование листовых материалов (CRB, ARB-процессы), а также сварка взрывом. Жидкофазные процессы для получения МСК на основе железа и алюминия до настоящего времени широкого применения не получили, что может быть обусловлено технологическими сложностями управления структурообразованием слоистых композитов в процессе затвердевания металлических расплавов.

3. Состояние границы раздела материалов является одним из наиболее важных факторов, влияющих на свойства слоистого металлического композита, а изучение механизма формирования соединения на границе раздела материалов является актуальной задачей в области исследований слоистых композитов, полученных с использованием листовых материалов на основе железа и алюминия.

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

## Список литературы

**1. Askeland, D.R.** The Science and Engineering of Materials. Sixth Edition // Donald R. Askeland, Emeritus Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright. – Cengage Learning, Inc. USA. – 2010. – 923 p.

**2. Kainer, K.U.** Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering / Karl U. Kainer // Wiley-VCH. – 2006. – 330 p.

**3. 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). – PP. 1279–1282.

**4. Accumulative** Roll Bonding of Aluminum/Stainless Steel Sheets / Mohammad Nejad Fard N. [et al.] // J. Ultrafine Grained Nanostruct. Mater. – 2017. – Vol. 50 (1). – PP. 1–5.

**5. Структура** и свойства слоистых металлических композиционных материалов, полученных методами пакетной прокатки и сварки взрывом / С.В. Гладковский [и др.] // «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» : XXIII Уральская школа металловедов-термистов, посвященная 100-летию со дня рождения проф. А.А.Попова (Тольятти, 2–6 февраля 2016 г.); «Физическое материаловедение» : VII Международная школа с элементами научной школы для молодежи (Тольятти, 31 января – 5 февраля 2016 г.) : сборник материалов / отв. ред. А.А. Викарчук, Д.Л. Мерсон. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. – С. 286–288.

**6. Surface** Treatment with the Cold Roll Bonding Process for an Aluminum Alloy and Mild Steel / C. Tang [et al.] // Strength of Materials. – 2015. – Vol. 47 (1). – PP. 150–155.

**7. 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 [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 652. – PP. 51–58.

**8. Analysis** of Bonding Behavior and Critical Reduction of Two-Layer Strips in Clad Cold Rolling Process / H. Maleki [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – Vol. 22 (4). – PP. 917–925.

**9. 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. – PP. 232–239.

**10. 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.

**11. Патент** РФ RU 2 435 671 C1 «Способ получения слоистых композиционных материалов сталь-алюминий» от 10.12.2011 / А.И. Ковтунов, Т.В. Чермашенцева, С.В. Мямин.

**12. Патент** РФ RU 2 437 770 С1 «Способ получения слоистых композиционных материалов сталь-алюминий» от 27.12.2011 / А.И. Ковтунов, Т.В. Чермашенцева, С.В. Мямин, Ю.Ю. Хохлов.

**13. Investigation** on the contact hardening of Al/Steel laminated composites with soft interlayers / L.Gurevich [ et al.] // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. – Volume 9, 2014 – PP. 275–281.

## References

**1. Askeland, D.R.** The Science and Engineering of Materials. Sixth Edition // Donald R. Askeland, Emeritus Pradeep P. Fulay, Wendelin J. Wright. – Cengage Learning, Inc. USA. – 2010. – 923 p.

**2. Kainer, K.U.** Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering / Karl U. Kainer // Wiley-VCH. – 2006. – 330 p.

**3. 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.

**4. Accumulative** Roll Bonding of Aluminum/Stainless Steel Sheets / Mohammad Nejad Fard N. [et al.] // J. Ultrafine Grained Nanostruct. Mater. – 2017. – Vol. 50 (1). – P. 1–5.

**5. Структура** и свойства слоистых металлических композиционных материалов, полученных методами пакетной прокатки и сварки взрывом [Structure and properties of laminated metal composite materials obtained by batch rolling and explosion welding] / S.V. Gladkovskij [et al.] // «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов»: XXIII Урал'ская школа металловедов-термистов, посвященная 100-летию со дня рождения проф. А.А.Попова (Тол'яatti, 2–6 февраля 2016 г.); «Физическое металловедение»: VII Международная школа с элементами научной школы для молодежи (Тол'яatti, 31 января–5 февраля 2016 г.) : сборник материалов / отв. ред. А.А. Викарчук, D.L. Merson = «Actual problems of physical metallurgy of steels and alloys» : XXIII Ural school of metallurgists-thermist, dedicated to the 100th anniversary of the birth of prof. A.A. Popova (Togliatti, February 2-6, 2016); «Physical materials science»: VII International school with elements of a scientific school for youth (Togliatti, January 31– February 5,

2016): *collection of materials / otv. ed. A.A. Vikarchuk, D.L. Merson.* – Tolyatti: TGU Publ., 2016. – P. 286–288.

**6. Surface** Treatment with the Cold Roll Bonding Process for an Aluminum Alloy and Mild Steel / C. Tang [et al.] // *Strength of Materials.* – 2015. – Vol. 47 (1). – P. 150–155.

**7. 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 [et al.] // *Materials Science and Engineering: A.* – 2016. – Vol. 652. – P. 51–58.

**8. Analysis** of Bonding Behavior and Critical Reduction of Two-Layer Strips in Clad Cold Rolling Process / H. Maleki [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2013. – Vol. 22 (4). – PP. 917–925.

**9. 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.

**10. 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. – P. 71–76.

**11. Kovtunov A.I.** [et al.]. *Sposob polucheniya sloistyh kompozitsionnykh materialov stal'-alyuminij* [Method for producing laminated steel-aluminum composite materials]. Patent No. 2435671 Rossiya.

**12. Kovtunov A.I.** [et al.]. *Sposob polucheniya sloistyh kompozitsionnykh materialov stal'-alyuminij* [Method for producing laminated steel-aluminum composite materials]. Patent No. 2437770 Rossiya.

**13. Investigation** on the contact hardening of Al/Steel laminated composites with soft interlayers / L.Gurevich [ et al.] // *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics.* – Volume 9, 2014 – P. 275–281.

*Послупила 05.08.2020*

*Received 05.08.2020*