

Материаловедение и технология материалов Materials science and materials technology

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 669; 621.791.13; 620.22

doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-71-78

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Максим Сергеевич Гуськов¹ ✉, Александр Владимирович Хорин², Виктор Михайлович Батрашов³, Дмитрий Борисович Крюков⁴, Алексей Олегович Кривенков⁵, Александр Сергеевич Хоменко⁶, Артем Сергеевич Федяшов⁷

¹⁻⁷ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия;

¹ Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

² alexkho154@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7164-7942>

³ shift150887@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

⁴ ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

⁵ krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

⁶ xomenko_alek27@mail.ru

⁷ Artem.fediashov@yandex.ru

Аннотация

Основной целью исследования является проведение сравнительного анализа влияния схемы армирования на показатель прочности у композиционных материалов с сопоставимой долей упрочняющей составляющей. Задачи, решению которых посвящена статья, заключаются в разработке 3-х основных схем армирования, компьютерном моделировании основных параметров для сварки взрывом, проведению статического растяжения для получения показателя прочности.

В качестве методов исследования применялся литературный обзор на этапе определения актуальности работы, компьютерное моделирование параметров сварки взрывом для получения композита и проведение испытаний на разрывной машине с целью получения значений прочности для последующего сравнительного анализа и формирования выводов.

Новизна работы заключается в построении эксперимента таким образом, чтобы в исследуемых образцах композиционных материалов доля упрочняющей составляющей незначительно отличалась, а основное различие заключалось во влиянии схемы армирования на прочность композита. Результаты анализа литературных данных показали, что

данное исследование актуально в области композитов; наиболее перспективным методом повышения прочности материала является армирование композиционного материала.

Результаты экспериментов показали, при сопоставимом объеме упрочняющих элементов в композиционном материале, наиболее высокую прочность показали образцы с направлением армирующей проволоки, совпадающим с направлением приложения нагрузки; при несовпадении этих направлений композиционный материал упрочняется незначительно, а также возникает склонность к разрушению по хрупкой интерметаллической прослойке; композиционный слоистый материал повышает свою прочность и это повышение хорошо коррелирует с теоретическим прогнозированием и правилом аддитивности; композит, полученный по 3 схеме обладает еще более высоким пределом прочности по сравнению с КМ по 2 схеме и это значение не меняется в зависимости от направления приложения нагрузки, как в случае с КМ, полученным по 1 схеме.

Ключевые слова: композит, прочность, сварка, моделирование, параметры.

Ссылка для цитирования:

Гуськов М.С. Влияние схемы армирования на прочность композиционного материала, полученного сваркой взрывом / М.С. Гуськов, А.В. Хорин, В.М. Батрашов, Д.Б. Крюков, А.О. Кривенков, А.С. Хоменко, А.С. Федяшов // *Транспортное машиностроение*. – 2024. - № 11. – С. 71-78. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-71-78.

THE EFFECT OF REINFORCEMENT SCHEME ON THE STRENGTH OF A COMPOSITE OBTAINED BY EXPLOSION WELDING

Maksim Sergeevich Guskov^{1✉}, Aleksandr Vladimirovich Khorin², Viktor Mikhailovich Batrashov³, Dmitry Borisovich Kryukov⁴, Aleksey Olegovich Krivenkov⁵, Aleksandr Sergeevich Khomenko⁶, Artyom Sergeevich Fedyashov⁷

¹⁻⁷ Penza State University, Penza, Russia;

¹ Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

² alexkho154@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7164-7942>

³ shift150887@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

⁴ ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

⁵ krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

⁶ xomenko_alek27@mail.ru

⁷ Artem.fediashov@yandex.ru

Abstract

The main study objective is to make a comparative analysis of the effect of reinforcement schemes on the strength index of composite materials with a comparable proportion of the reinforcing component. The tasks to which the paper is devoted are the development of 3 basic reinforcement schemes, computer modeling of the main parameters for explosion welding, static stretching to obtain a strength index.

The research methods used are a review of references at the stage of determining the work relevance, computer modeling of explosion welding parameters to obtain a composite and an experiment on a tensile-testing machine in order to obtain strength values for subsequent comparative analysis and drawing conclusions.

The novelty of the work is in testing composite samples with approximately the same proportion of the reinforcing component, so that the main difference should be in the influence of the reinforcement scheme on the strength of the composite. The results of analyzing references show that this study is relevant in the

field of composites; the most promising method of increasing the strength of a material is reinforcement of a composite.

The experimental results show that with a comparable amount of reinforcing elements in a composite material, the samples with the direction of the reinforcing wire coinciding with the direction of applying the load have the highest strength; when these directions do not fall, the composite material is reinforced slightly, and also tends to fracture along a brittle intermetallic layer; the composite laminated material increases its strength and this increase correlates well with theoretical prediction and the rule of additivity; the composite obtained according to scheme 3 has even higher tensile strength compared with the composite according to scheme 2, this value does not change depending on the direction of load application, as in the case of composite obtained according to scheme 1.

Keywords: composite, strength, welding, modeling, parameters.

Reference for citing:

Guskov MS, Khorin AV, Batrashov VM, Kryukov DB, Krivenkov AO, Khomenko AS, Fedyashov AS. The effect of reinforcement scheme on the strength of a composite obtained by explosion welding. *Transport Engineering*. 2024;11:71-78. doi: 10.30987/2782-5957-2024-11-71-78.

Введение

В настоящее время одним из способов повышения прочностных свойств металлических композиционных материалов является метод армирования. Схем армирования много [1], но наиболее распространены схемы армирования частицами, нитями, дискретными волокнами, листами. Исследованиями в данной области занимаются как зарубежные, так и российские научные школы. К числу таких исследователей относятся и ученые Пензенского

государственного университета, научный интерес которых заключается в поиске наиболее рационального способа армирования композиционного материала, приводящего к повышению прочностных свойств. Так как композиты после армирования приобретают уникальный набор свойств, то актуальной становится возможность их применение в качестве альтернативы традиционно используемым материалам.

Материалы, модели, эксперименты и методы

На протяжении нескольких десятилетия учеными кафедр «Сварочное, литейное производство и материаловедение» и «Контроль и испытания материалов» ведутся исследования и разработки наиболее оптимальной схемы армирования, которая обеспечит не только всестороннее повышение прочностных свойств, но и не снизит технологические свойства и не приведет к существенному удорожанию конечного продукта. В качестве первого базового способа армирования был опробован способ армирования проволокой расположенной вдоль направления проката листового материала. Материал армирования и материал матрицы постоянно варьировались в зависимости от области применения композита [2, 3, 4]. Полученный по данному способу армирования композит имеет повышенные прочностные значения по направлению армирования, но незначительно упрочняется в направлении исследования поперек армирования, что накладывает существенные ограничения на применение данного композита.

Следующим этапом поиска рациональной схемы упрочнения являлся способ послойного армирования [5]. Полученные результаты подтвердили предположение о повышении прочностных свойств в 2-х взаимно перпендикулярных направлениях, но также выявили и резкое снижение технологических свойств композита из-за выращенного упрочняющего сплошного слоя интерметаллидов на границе раздела 2-х

исходных металлов. Это обстоятельство также не позволяет использовать композит в качестве альтернативы моноmaterialу.

Наиболее целесообразным способом армирования с точки зрения сочетания повышенных прочностных свойств и удовлетворительных технологических свойств является использование послойного армирования с выполненными в армирующем слое перфорациями. Данная технологическая особенность позволяет создать неразъемное соединение таким образом, чтобы материал матрицы соединялся друг с другом через отверстия, выполненные в армирующем слое. Это позволяет гасить стремительное развитие трещин, которые зарождаются и распространяются в хрупком интерметаллическом слое [6, 7]. Количество, геометрия и расположение отверстий в упрочняющем слое оказывает влияние на качество межслойной границы, на численное значение параметров прочности, на характер разрушения при статической и динамической нагрузке. Наиболее выгодной оказалась форма перфораций с разнонаправленной конусностью при условии, что сами перфорации расположены в шахматном порядке [8, 9]. Характерной особенностью большинства проведенных исследований являлось отсутствие привязки полученных прочностных показателей к схеме армирования, учитывающей объем упрочняющей составляющей, что является важным критерием, влияющим на прочность.

Результаты

Для оценки степени влияния объема упрочняющей составляющей на прочностные свойства композита было предложено подобрать сочетания исходных материалов таким образом, чтобы доля упрочняющих элементов была приблизительно одинаковой во всех испытываемых схемах. Исходя из литературных источников [10], для того чтобы повысить прочность листового композиционного материала, объемная доля упрочняющих составляющих должна находиться в диапазоне от 5 до 80 % (рис. 1).

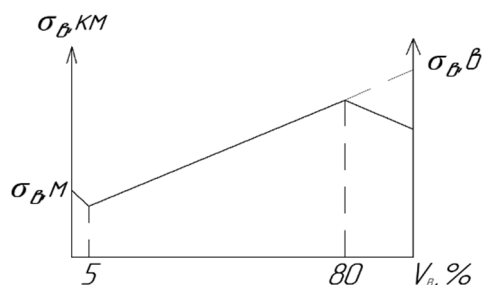


Рис. 1. Диапазон объема упрочняющей составляющей, в пределах которого происходит общее упрочнение композиционного материала [10]
Fig. 1. The range of the volume of the reinforcing component, within which the overall hardening of the composite material occurs [10]

С учетом объема упрочняющих элементов и с учетом особенностей формирования листового композиционного материала, были смоделированы следующие схемы для получения композита при помощи сварки взрывом:

— 1 схема – армирование титановой (BT1-0) проволокой алюминиевой (АМг5М) пластины. Метаемая алюминиевая пластина толщиной 1 мм, неподвижная алюминиевая пластина толщиной 10 мм (после получения композита эта пластина сошлифовывается до толщины 1 мм), диаметр проволоки 0,5 мм. Размер пластин композита 100×200 мм. При условии шага армирования в 1,5 мм по ширине неподвижной пластины и последующего перевода всей проволоки в интерметаллид при помощи термообработки, объем интерметаллида в общем объеме составит 6,5 %. Компьютерная модель схемы представлена на рис. 2а;

— 2 схема – слоистый композиционный материал из тех же марок исходных составляющих. Метаемая алюминиевая пластина толщиной 5 мм, метаема тита-

новая пластина толщиной 0,6 мм, неподвижная алюминиевая пластина толщиной 5 мм. Размер пластин композита 100×200 мм. При условии перевода всей титановой пластины в интерметаллид, объем интерметаллида в общем объеме составит 6,0 %. Компьютерная модель схемы представлена на рис. 2б;

— 3 схема – слоистый композиционный материал с перфорированным упрочняющим слоем из тех же марок исходных составляющих. Метаемая алюминиевая пластина толщиной 4 мм, метаемая перфорированная титановая пластина толщиной 0,5 мм, неподвижная алюминиевая пластина толщиной 4 мм. Размер пластин композита 100×200 мм. При условии, что диаметр одной перфорации в титановой пластине будет 5 мм, а шаг между центрами любых соседних отверстий 15 мм и перевода всей титановой пластины в интерметаллид, объем интерметаллида в общем объеме составит 5,8 %. Компьютерная модель схемы представлена на рис. 2, в.

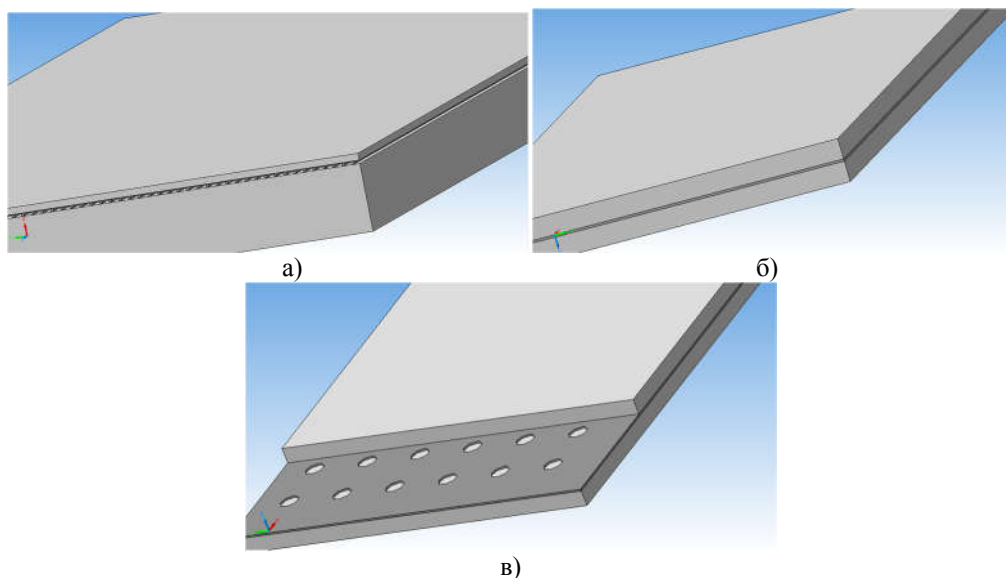


Рис. 2. Компьютерная модель
Fig. 2. Computer model

Моделирование проводилось в программном продукте «Исследователь», который позволяет рассчитать необходимые технологические параметры сварки взрывом, которые позволят получить качественное сварное соединение без расслоений на каждой границе раздела. На рис.

3, а, 3, б и 3, в представлены данные по исходным вводным, технологическим параметрам. В качестве обозначений принято: D – скорость детонации взрывчатого вещества; $H_{вв}$ – высота взрывчатого вещества; ρ – плотность взрывчатого вещества; h – толщина пластин и величина зазора между

пластинами; α – исходный угол наклона пластин; t – время до соприкосновения свариваемой пластины с неподвижной пластиной; V_k – скорость точки контакта свариваемых

пластин; V_c – скорость соударения свариваемых пластин; $\angle c$ – угол соударения.

Помощь Справка

Схема сварки

ПЛОСКАЯ УГЛОВАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ

Инертная вставка

Исходные данные и результаты расчета

Заряд ВВ	Характеристики слоев			Зазор		Уст. угол		Результаты расчета			
	№	Материал	h, мм	№	h, мм	№	α , град.	t, мкс	V_k , м/с	V_c , м/с	$\angle c$, град.
Новое D, м/с= 2850 HВВ, мм= 40 p, г/см3= 0,75	1	Сталь 10	2	1	0	1	0	20,1	2850,0	508,7	10,2
	2	АМг	1								
	3	АМг	10	2	2	2	0				

а)

Помощь Справка

Схема сварки

ПЛОСКАЯ УГЛОВАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ

Инертная вставка

Исходные данные и результаты расчета

Заряд ВВ	Характеристики слоев			Зазор		Уст. угол		Результаты расчета			
	№	Материал	h, мм	№	h, мм	№	α , град.	t, мкс	V_k , м/с	V_c , м/с	$\angle c$, град.
Новое D, м/с= 2850 HВВ, мм= 40 p, г/см3= 0,75	1	Сталь 10	1	1	0	1	0	20,6	2850,0	469,4	9,4
	2	АМг	5								
	3	Тит. ВТ 1-0	0,6	2	2	2	0				
	4	АМг	5	3	2	3	0				

б)

Помощь Справка

Схема сварки

ПЛОСКАЯ УГЛОВАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ

Инертная вставка

Исходные данные и результаты расчета

Заряд ВВ	Характеристики слоев			Зазор		Уст. угол		Результаты расчета			
	№	Материал	h, мм	№	h, мм	№	α , град.	t, мкс	V_k , м/с	V_c , м/с	$\angle c$, град.
Новое D, м/с= 2850 HВВ, мм= 40 p, г/см3= 0,75	1	Сталь 10	1,5	1	0	1	0	20,8	2850,0	455,6	9,2
	2	АМг	4								
	3	Тит. ВТ 1-0	0,5	2	2	2	0				
	4	АМг	4	3	2	3	0				

в)

Рис. 3. Расчет режимов сварки взрывом
Fig. 3. Calculation of explosion welding modes

Полученные сваркой взрывом, по вышеприведенным схемам, пластины композиционного материала были подвергнуты визуально-измерительному контролю на предмет выявления недопустимых дефектов, таких как: расслоения, трещины, поверхностные повреждения композита. Подобных недопустимых дефектов выявлено не было. Далее все пластины были подвергнуты стандартных технологических операциям

для подготовки к контролю разрушающими методами контроля: термической обработке для снятия внутренних напряжений, правке, обрезке кромок, клеймению, вырезке образцов для испытаний и термической обработке для формирования интерметаллидов. Образцы, на которых проводилось испытание с одноосным нагружением, представляли собой прямоугольные пластины без галтелей в захватной части и с размерами 150×30 мм и

переменной толщиной в зависимости от схемы испытания. В армированной проволокой схеме были проведены испытания по определению прочности как в направлении прилагаемой нагрузки вдоль волокон, так и в направлении поперек волокон (в этом случае размер образца был 95×30 мм). При вырезке образцов из схемы с перфорациями в упрочняющем слое, обязательным условием было попадание 2 целых перфораций в рабочую ширину образца. Минимальное коли-

чество образцов для каждого вида испытаний – 3 шт. Полученные результаты параметра предела прочности были сведены в таблицу, также в таблице приведены значения прочности исходных алюминиевых листов, из которых сваркой взрывом формировался композит. Термообработка для образования интерметаллического слоя проводилась по классическим методикам [11], при условии полного перевода титановой составляющей в интерметаллид.

Таблица

Результаты параметра предела прочности по сравнению с аналогичным показателем исходных материалов

Table

Results of the tensile strength parameter compared to the same index of starting materials

Исследуемые образцы	Значение параметра предела прочности (МПа), полученного по результатам испытания трех образцов
Исходные листы из АМг5М для получения композиционных материалов (КМ)	280...290
Образец из КМ, полученный по 1 схеме (направление нагрузки вдоль волокон)	352
Образец из КМ, полученный по 1 схеме (направление нагрузки поперек волокон)	308
Образец из КМ, полученный по 2 схеме	320
Образец из КМ, полученный по 3 схеме	343

Таким образом, исходя из полученных результатов испытаний, выявлены следующие закономерности: при сопоставимом объеме упрочняющих элементов в композиционном материале, наиболее высокую прочность показали образцы с направлением армирующей проволоки, совпадающим с направлением приложения нагрузки; при несовпадении этих направлений (прикладываемая нагрузка поперек волокон) композиционный материал упрочняется незначительно, а также возникает склонность к раз-

рушению по хрупкой интерметаллической прослойке; композиционный слоистый материал (2 схема) также повышает свою прочность вне зависимости от приложения растягивающей нагрузки; композит, полученный по 3 схеме обладает еще более высоким пределом прочности по сравнению с КМ по 2 схеме и это значение не меняется в зависимости от направления приложения нагрузки, как в случае с КМ, полученным по 1 схеме.

Заключение

1. В большинстве проведенных исследований отсутствует сравнительная характеристика между видом армирования (в схемах с сопоставимым объемом упрочняющей составляющей) и прочностными показателями.

3. При помощи компьютерного моделирования были рассчитаны режимы сварки взрывом и определены технологические па-

раметры, которые обеспечат получения качественного композиционного материала.

4. По результатам прочностных испытаний на вырезанных из полученных сваркой взрывом образцах, определено, что наиболее оптимальной (с учетом сопоставимой доли упрочняющих элементов) является схема с интерметаллическим перфорированным слоем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Композиционные материалы: Справочник / Под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985.
2. Армированный композиционный материал с интерметаллидным упрочнением, полученный сваркой взрывом / И. С. Лось, А. Е. Розен, А. В. Хорин [и др.] // Ползуновский альманах. 2007. № 1-2. С. 105-106.
3. Патент № 2407640 С2 Российская Федерация, МПК В32В 15/02, С22С 47/20, В23К 20/08. Способ получения композиционного материала : № 2008131359/02 : заявл. 29.07.2008 : опубл. 27.12.2010 / А. Е. Розен, И. С. Лось, Д. Б. Крюков [и др.] ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Федерального агентства по образованию Пензенский Государственный Университет, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения (ИСМАН) Российской Академии наук, Российская Федерация, от имени которой выступает государственный заказчик - Министерство Обороны Российской Федерации, Пензенский региональный научно-технический центр по сварочному производству и промышленной безопасности "СУРА".
4. Металлические композиционные материалы, армированные интерметаллическими упрочняющими элементами / Л. Б. Первухин, А. Е. Розен, Д. Б. Крюков [и др.] // *Металлург*. 2015. № 10. С. 74-77.
5. Крюков, Д. Б. Исследование влияния конфигурации упрочняющих элементов на прочностные свойства моделей композиционных материалов системы титан-алюминий / Д. Б. Крюков, А. В. Прыщак, М. С. Гуськов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2014. № 4(32). С. 112-119.
6. Гуськов, М. С. Создание высокопрочного композиционного материала титан-алюминий с перфорированным интерметаллическим слоем и оксидо-керамическим покрытием : специальность 05.16.09 "Материаловедение (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гуськов Максим Сергеевич, 2015. 151 с.
7. Крюков, Д. Б. Разработка модели нового композиционного армированного материала системы титан-алюминий в программе *SolidWorks* / Д. Б. Крюков, А. В. Прыщак, М. С. Гуськов // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами *CAD/CAM/CAE/PDM* : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 28–29 апреля 2014 года / Под редакцией В.З. Зверовщикова, И.И. Воячека, Д.В. Кочеткова. Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2014. С. 45-49.
8. Патент № 2522505 С1 Российская Федерация, МПК В32В 7/04, В32В 15/01, В23К 20/08. Способ получения композиционного материала : № 2013119389/02 : заявл. 26.04.2013 : опубл. 20.07.2014 / А. Е. Розен, Д. Б. Крюков, Е. М. Кирин [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-Технологический Центр "Сварка".
9. Патент № 2606134 С Российская Федерация, МПК В23К 20/08, В32В 7/04. Способ получения композиционного материала : № 2015134788 : заявл. 18.08.2015 : опубл. 10.01.2017 / Л. Б. Первухин, С. Н. Казанцев, Д. Б. Крюков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет" (ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет").
10. Гольдман А. Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. [Текст] / А. Я. Гольдман. Л. : Химия, 1988.
11. Амир Хусейн Ассари. Микроструктура и кинетика формирования интерметаллической фазы в условиях твердофазной диффузионной сварки в биметаллическом *Ti/Al* композите / Амир Хусейн Ассари, Бейаталла Эгхбали // *Физика металлов и материаловедение*. 2019. Т. 120, № 3. С. 280-290.

REFERENCES

1. Karpinos DM, editor. Composite materials: a reference book. Kiev: Naukova Dumka; 1985.
2. Los IS, Rosen AE, Khorin AV. Reinforced composite material with intermetallic hardening obtained by explosion welding. *Polzunovsky Almanakh*. 2007;1-2:105-106.
3. Rosen AE, Los IS, Kryukov DB. RF Patent No. 2407640 С2 МПК В32В 15/02, С22С 47/20, В23К 20/08. Method of obtaining composite material. 2010 Dec 27.
4. Pervukhin LB, Rosen AE, Kryukov DB. Metal composite materials reinforced with intermetallic strain-hardening elements. *Metallurg*. 2015;10:74-77.
5. Kryukov DB, Pryshchak AV, Guskov MS. Study of the influence of reinforcing elements configuration on the strength properties of composite materials in titanium-aluminum system. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*. 2014;4(32):112-119.
6. Guskov MS. Making a high-strength composite titanium-aluminum material with a perforated metal layer and an oxide-ceramic coating [dissertation]. [Russian Federation]: 2015.
7. Kryukov DB, Pryshchak AV, Guskov MS. Development of a new composite reinforced material of the titanium-aluminum system in *SolidWorks* program. *Collection of Papers of VIII International Scientific*

and Practical conference, April 28-29, 2014: Systems of Design, Modeling, Production Preparation and Project Management of *CAD/CAM/CAE/PDM*. Penza: Volga Dom Znaniy; 2014.

8. Rosen AE, Kryukov DB, Kirin EM. RF Patent No. 2522505 C1 МПК В32В 7/04, В32В 15/01, В23К 20/08. Method of obtaining composite material. 2014 Jul 20.
9. Pervukhin LB, Kazantsev SN, Kryukov DB. RF Patent No. 2606134 С МПК В23К 20/08, В32В 7/04. Method of obtaining composite material. 2017 Jan 10.

Информация об авторах:

Гуськов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры КиИМ, Пензенский государственный университет, тел. 8 960 329 49 29.

Хорин Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры КиИМ, Пензенский государственный университет, тел. 8 987 506 97 71.

Батрашов Виктор Михайлович – кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой КиИМ, Пензенский государственный университет, тел. 8 927 366 30 56.

Guskov Maksim Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Penza State University; phone: 8 960 329 49 29.

Khorin Aleksandr Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Penza State University; phone: 8 987 506 97 71.

Batrashov Viktor Mikhailovich - Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Department at Penza State University; phone: 8 927 366 30 56.

10. Goldman AYa. Prediction of deformation and strength properties of polymer and composite materials. Leningrad: Khimiya; 1988.

11. Amir Hussein Assari, Beyatalla Eghbali. Microstructure and kinetics of forming intermetallic phase under conditions of solid-phase diffusion welding in a bimetallic Ti/Al composite. *Physics of Metals and Metallography*. 2019;120(3):280-290.

Крюков Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры СЛПиМ, Пензенский государственный университет, тел. 8 903 324 97 34.

Кривенков Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры СЛПиМ, Пензенский государственный университет, тел. 8 905 365 23 42.

Хоменко Александр Сергеевич – магистрант кафедры СЛПиМ, Пензенский государственный университет, тел. 8 937 439 74 94.

Федяшов Артем Сергеевич – магистрант кафедры СЛПиМ, Пензенский государственный университет, тел. 8 927 287 87 82.

Kryukov Dmitry Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Penza State University; phone: 8 903 324 97 34.

Krivenkov Aleksey Olegovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Penza State University; phone: 8 905 365 23 42.

Khomenko Aleksandr Sergeevich – Student of master's degree at Penza State University; phone: 8 937 439 74 94.

Fedyashov Artyom Sergeevich – Student of master's degree at Penza State University; phone: 8 927 287 87 82.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 25.07.2024; одобрена после рецензирования 01.10.2024; принята к публикации 28.10.2024. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 25.07.2024; approved after review on 01.10.2024; accepted for publication on 28.10.2024. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.