

Петюкевич Мария Станиславовна

**ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНОГО МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ
ПЛАЗМЕННОГО И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Томск – 2018

Диссертационная работа выполнена в отделении материаловедения инженерной школы новых производственных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Научный руководитель: **Хасанов Олег Леонидович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Михайлов Михаил Михайлович**
Доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), заведующий лабораторией радиационного и космического материаловедения, г. Томск

Горшенков Михаил Владимирович
Кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт сталей и сплавов» (МИСиС), доцент кафедры физического материаловедения г. Москва

Ведущая организация: Акционерное общество «Композит», 141070, Россия, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, 4

Защита состоится: «5» декабря 2018 г. в 16:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.02 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 53, либо на интернет сайте <http://portal.tpu.ru:7777/council/909/worklist>

Автореферат разослан «4» октября 2018 г.

Учёный секретарь совета по
защите докторских и
кандидатских диссертаций
Д 212.269.02, доктор физико-
математических наук

Коровкин М.В.

Актуальность темы. Для повышения ресурса работы космических летательных аппаратов (КА) большую актуальность имеет обеспечение надёжности радиационной защиты их внешней бортовой электроники. Эта же задача актуальна и для защиты электроники, эксплуатируемой в радиационно-опасных условиях: в атомной энергетике, в ускорителях заряженных частиц, «ядерной медицине» и др. Федеральная космическая программа России на 2016-2025 годы, включающая подраздел «Космические средства для фундаментальных космических исследований», предполагает проведение комплексных мероприятий по созданию приборов для исследования и освоения Венеры, Марса и Фобоса. В связи с этим, необходимость улучшения качества и эффективности действия существующих и создание новых материалов защиты от ионизирующих излучений не вызывает сомнений. Основная задача исследовательских работ этой области заключается в создании новой комбинации материалов, способных при снижении массогабаритных характеристик обеспечить лучшие радиационно-защитные свойства, нежели у традиционно используемого алюминиевого аналога.

Используемые в настоящее время конструкционные сплавы, обладая удовлетворительными механическими свойствами, при эксплуатации в режиме высокодозного радиационного излучения подвержены разбуханию и структурным изменениям. Такие эффекты могут быть минимизированы применением металломатричных композитов (ММК) путём модифицирования матрицы из металлических сплавов керамическими, металлическими наполнителями со специфическими ядерно-физическими свойствами. Применение наноразмерных радиационно-поглощающих керамических материалов в качестве дисперсных наполнителей радиационно-защитных композитов с металлической матрицей обусловлено низкой адгезией металла и керамики, а применение частиц тяжёлых металлов обусловлено их высокими поглощающими свойствами гамма- и рентгеновского излучения.

Актуальной является задача разработки и описания теоретических основ и апробации новых экономических способов создания ММК, обладающих необходимыми радиационно-защитными свойствами, а также исследования формирования структуры и свойств получаемых материалов.

Объект исследования: порошковые системы на основе металлов и керамических соединений различной дисперсности, а также изготовленные из них композиционные материалы.

Предмет исследования: процессы уплотнения порошковых смесей ММК, в том числе, под внешним ультразвуковым и плазменным воздействием, а также их влияние на физические и структурные свойства композита.

Целью работы является оптимизация компонентного состава, условий и режимов консолидации лёгкого металломатричного композитного материала на основе порошков алюмо-магниевого сплава с добавлением карбида бора и наночастиц вольфрама для достижения беспористого состояния с сохранением требуемых радиационно-защитных свойств.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

- 1) разработать оптимальный состав металломатричного композита $AM_{26}-B_4C-W$, обеспечивающий близкую к абсолютной плотность, на основе теоретических оценок и комплексного исследования морфологических, дисперсных и структурных свойств исходного сырья;
- 2) установить закономерности влияния технологических режимов и параметров дополнительного воздействия на свойства ММК состава $AM_{26}-B_4C-W$ с различным содержанием компонентов;
- 3) исследовать фазовый состав и микроструктуру композита $AM_{26}-B_4C-W$, изготовленного в различных условиях и режимах консолидации;
- 4) провести модельную и экспериментальную оценку коэффициентов ослабления нейтронного и гамма-излучений ММК, изготовленных методом ИПС; провести моделирование ослабления гамма-, нейтронного и электронного излучений материалом ММК, на примере $AM_{26}-B_4C-W$;
- 5) провести модельную оптимизацию кинематической схемы уплотнения порошкового ММК в изделие – рамку радиационно-защитного корпуса
- 6) разработать практические рекомендации по оптимизации технологического процесса получения изделий сложной формы из радиационно-защитного ММК.

Научная новизна работы заключается в экспериментально подтверждённом модельном и теоретическом обосновании оптимального состава композиционной порошковой смеси, а также режимов ИПС (искровое плазменное спекание), обеспечивающих получение беспористого ММК в изделии требуемой формы и размеров; в применении теоретических положений, подходов и принципов механистической модели для описания и эффективной реализации рациональных приёмов прессования в изделия на основе порошковых смесей разнородных материалов (металл-керамика).

Практическая значимость работы. Обоснованы оптимальные режимы формования смеси порошков ММК заданного состава ультразвуковым прессованием (УЗП) и коллекторным прессованием (КП), которые при последующем спекании позволяют получать изделия заданных размеров и формы (рамки, пластины с требуемыми конструктивными элементами), без необходимости дальнейшей механообработки (токарной, фрезерной). Такой подход существенно повышает экономичность технологии и расширяет номенклатуру допустимых форм изделий по сравнению с применяемыми в настоящее время методами горячей экструзии и горячего прессования. Отличительной особенностью такого подхода является применение рациональных приёмов прессования (УЗ- и коллекторного), обеспечивающих равномерное распределение плотности по объёму ММК-изделий заданной геометрии и размеров. Показано, что ММК состава $AM_{26} (74 \%) + B_4C (6 \%) + W (20 \%)$ имеет коэффициенты ослабления тепловых нейтронов 3,03; надтепловых нейтронов –3,23; гамма-квантов с энергией до 137 кэВ – 1,34, которые превышают соответствующие коэффициенты ослабления

чистого сплава АМгб по тепловым и надтепловым нейтронам в 3 раза и по гамма-квантам – на 34 %. Практическая значимость найденных технических решений подтверждена патентом РФ RU2616315C1 «Способ получения алюмоматричного композитного материала».

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Разработанный состав ММК $AMg6$ (74 %)+ B_4C (6 %)+ W (20 %) является оптимальным для формирования в процессе компрессионной и термической консолидации пространственно-связанной (непрерывной) металлической матрицы, необходимой для формирования прочного каркаса изделия из ММК при сохранении требуемых радиационно-защитных свойств.
- 2) Оптимальные режимы ИПС-консолидации разработанного состава ММК при давлении подпрессовки 30 МПа и температуре от 440 до 490 °С обеспечивают получение беспористого композита с коэффициентами ослабления 3,34 для тепловых нейтронов; 3,26 для надтепловых нейтронов; 1,34 для гамма-квантов с энергией до 137 кэВ.
- 3) Оптимальные режимы УЗП разработанного состава ММК при давлении прессования 800 МПа и мощности УЗВ 2 кВт обеспечивают получение композита с плотностью не менее 95 % от теоретической без последующего спекания.
- 4) Сочетание УЗ-воздействия с коллекторной схемой прессования разработанного состава ММК обеспечивает равномерное распределение плотности по объёму изделия в форме рамки-корпуса.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: V Международный молодёжный форум «Инженерия для освоения космоса» (Томск, 2017), XIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2016), Международная конференция с элементами научной школы для молодёжи «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении» (Томск, 2015), научно-техническая конференция «Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники» (Москва, 2015).

Часть результатов, представленных в работе, использована в ходе выполнения ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме «Разработка технологии получения новых функциональных керамоматричных композиционных материалов, с улучшенными электрофизическими и термомеханическими свойствами для оборонной, электронной и авиакосмической промышленности» и пункта 2.14 «Разработка технологий функциональных и радиационно-защитных композитных и керамических наноструктурных материалов. Применение 3D печати в производстве изделий сложной формы для ракетно-космической техники на основе квазиизостатического прессования (КИП) тугоплавких порошков в эластичных оболочках» программы ВИУ ТПУ в САЕ «Космическое материаловедение».

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 36 работ, из них: 14 статей в журналах из перечня ВАК [1-14], 14 статей в зарубежных журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus [15-28], и 8 тезисов докладов по итогам конференций [29-36].

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректностью поставленных задач и обоснованностью подходов к их решению, использованием высокоточных аналитических методов исследования свойств материалов и современного технологичного оборудования для их переработки, современных методов обработки данных и модельного описания процессов, большим массивом обработанных данных и сопоставлением полученных результатов исследования с общепринятыми теоретическими представлениями.

Личный вклад автора состоит в выборе направления, участии в постановке цели и задач исследований. При непосредственном участии автора построены модели упаковок частиц ММК с различным содержанием компонентов, модели деформации порошковой смеси в различных условиях перемещения формообразующих элементов, исследована модель поведения разработанного композита при радиационном воздействии при изменении состава компонентов ММК. Автором проведён комплекс экспериментальных исследований в процессах подготовки порошковых смесей, их консолидации в модельные образцы, пробоподготовки, определения их структурных и реологических свойств методами рентгенофазового анализа, оптической, атомной силовой, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, термического анализа. С участием автора разработана конструкция графитового контейнера для экспериментальной оценки нейтронозащитных свойств изготовленных модельных образцов ММК. Представленные в работе эксперименты по прессованию и спеканию выполнены самим автором или проведены при непосредственном его участии. Автор обработал и систематизировал полученные экспериментальные результаты, сформулировал положения и выводы диссертационной работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, 68 рисунков, 27 Таблиц, 3 приложений, списка литературы из 148 наименований и изложена на 173 страницах.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы, сформулирована цель исследования.

В **первой главе** представлен анализ научно-технической литературы по основным типам и свойствам существующих композиционных материалов, методам их получения. Приведена классификация алюминиевых сплавов и выявлены наиболее перспективные сплавы для применения в качестве матриц композитов при различных методах получения. Рассмотрены особенности радиационной защиты в космическом пространстве и обосновано применение

нанопорошка вольфрама и ультрадисперсного порошка карбида бора в качестве радиационно-поглощающих наполнителей металломатричных композиционных материалов, применяемых для целей радиационной защиты.

На основе проведённых литературных исследований установлено, что одним из перспективных направлений дальнейшего развития технологии консолидации порошковых металломатричных композитов (ММК) для радиационной защиты, является использование полезного потенциала процессов их прерывного прессования (компрессионное воздействие) с одновременным или последующим спеканием (термическое воздействие), а также иными вариантами энергетического внешнего воздействия, позволяющего интенсифицировать процессы консолидации и улучшить качество конечных изделий. Показано, что в качестве таковых целесообразно рассмотреть приёмы ультразвукового прессования и искрового плазменного спекания.

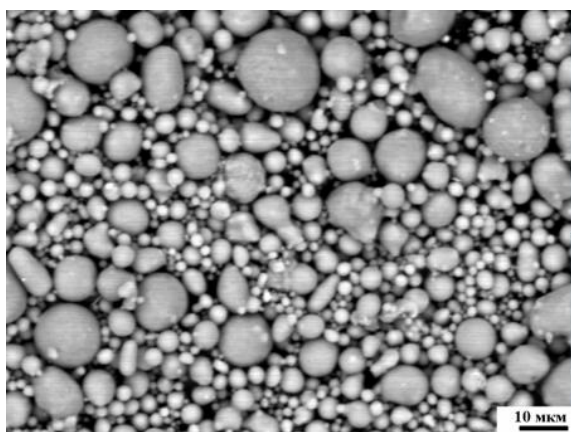
Во **второй главе** описаны методики исследования, исходные материалы и методы комплексной характеристики исходных порошковых компонентов, приготовления гомогенных смесей из них, ультразвуковое прессование (УЗП) с последующим свободным спеканием, искровое плазменное спекание (ИПС), а также модельные и экспериментальные методы оценки радиационно-защитных характеристик. Кроме того, были рассмотрены и выбраны для исследований методики модельной оптимизации процессов уплотнения порошковых смесей и методы моделирования радиационно-защитных свойств.

В **третьей главе** представлены результаты комплексного исследования исходных материалов. В качестве матричного сплава в работе был использован марочный сплав *АМгб* (Рисунок 1 а). Средний размер частиц порошка, определённый методом лазерной дифракции, составил 14,85 мкм.

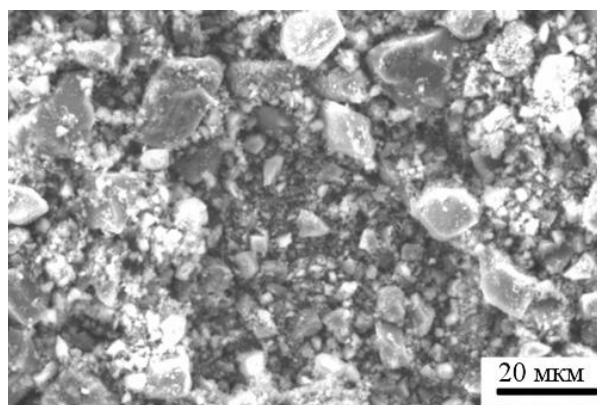
В качестве наполнителя, способного снизить или даже полностью исключить воздействие тепловых нейтронов на защищаемый объект, для производства композита был использован коммерческий микропорошок карбида бора производства ООО «ОКБ-БОР» (г. Дзержинск) (Рисунок 1 б). Анализ, проведённый методом лазерной дифракции, показал присутствие частиц от 9 мкм до субмикронного размера. Средний размер частиц порошка составляет 1,34 мкм.

Для ослабления потока гамма-излучения, в образцы на основе сплава *АМгб* и *В₄С* был добавлен нанопорошок вольфрама, полная удельная поверхность которого составляла $2,70 \pm 0,02 \text{ м}^2/\text{г}$, что соответствует среднему размеру частиц 0,12 мкм (Рисунок 1 в, г).

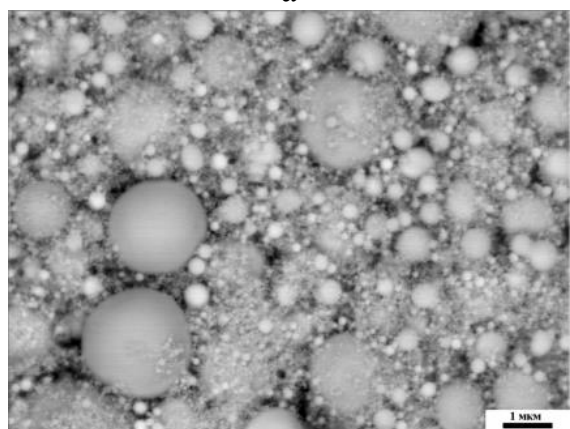
Все частицы имели близкую к сферической равноосную форму, что позволило построить дискретно-элементные модели их упаковки и оптимизировать соотношение компонентов смеси в модельных экспериментах по величинам среднего числа межчастичных контактов и плотности упаковки (Рисунок 2).



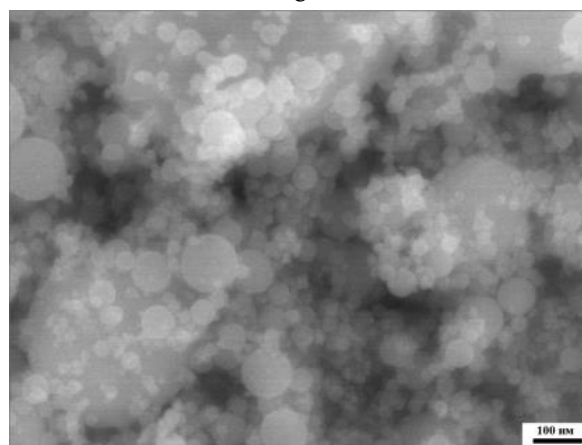
а



б



в



г

Рисунок 1 – РЭМ-изображение исходных порошков: а - $AMz6$; б – карбид бора; в, г - вольфрам

С учётом последующего прессования давлениями от 40 МПа до 800 МПа сравнительный анализ характеристик моделей упаковки компонентов описанных составов композита проводили также после имитации их уплотнения, обусловленного деформацией частиц матричного сплава и вольфрама; при этом частицы карбида бора считались недеформируемыми (Рисунок 2 б, з).

Последующий статистический анализ полученных упаковок по критерию максимальной плотности и обеспечения непрерывного контакта частиц алюминиевой матрицы показал, что минимальным по содержанию для образования непрерывной матрицы алюминиевого сплава при оптимальном для плотного заполнения частицами карбида бора и вольфрама соотношением компонентов является: 65% $AMz6$ -15% B_4C -20 % W (Смесь 2).

Однако для обеспечения достаточной несущей способности металлический каркас разрабатываемого композиционного материала после консолидации должен иметь более развитую (и максимально непрерывную) пространственную структуру межчастичных контактов. Таким образом, для изготовления разрабатываемого композиционного материала из исследуемых порошков, соотношение компонентов смеси, оптимальное по критерию максимума плотности упаковки всех частиц, имеет следующий состав: 74% $AMz6$ - 6% B_4C - 20% W (Смесь 3).

Для исследования прессуемости, в рамках механистической модели были исследованы смеси порошков $AMg6-B_4C-W$ с оптимальным (Смесь 3) и минимально допустимым (Смесь 2) по критерию плотности содержанием матричного сплава и дисперсных наполнителей. Для объективного сопоставления характеристик (в качестве контрольного) использовали аналогичный по компонентам состав композита, используемый в настоящее время для технологии горячей экструзии, имеющий следующее соотношение компонентов: 65% $AMg6$ - 15% B_4C - 20% W (Смесь 4).

Положение кривых уплотнения смесей с различным содержанием компонентов анализируемых в рамках механистической модели относительно этапов процесса прессования, носит промежуточный характер (Рисунок 3) и зависит от содержания наиболее пластичного компонента ($AMg6$).

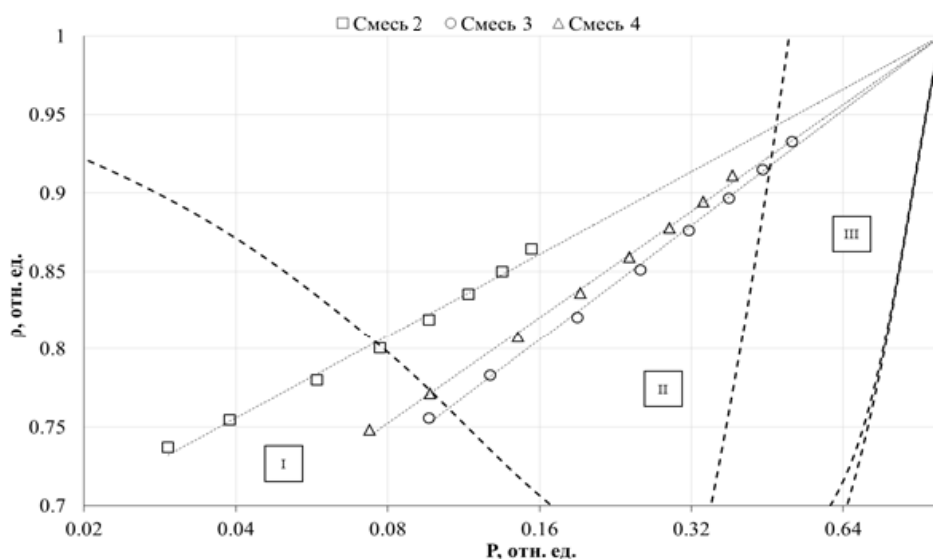


Рисунок 3 – Представление экспериментальных зависимостей относительной плотности исследуемых смесей по этапам их уплотнения

В качестве дополнительного фактора, способного улучшить прессуемость компонентов, использовали УЗ-колебания. В экспериментах по оценке влияния мощных ультразвуковых колебаний на исследуемый материал УЗ-воздействие осуществлялось на протяжении всего процесса его прессования. УЗВ на прессуемый порошковый материал, снижая предел текучести наиболее пластичного компонента смеси за счёт упругопластического эффекта, также приводит к изменению характеристик прессуемости и положения кривой уплотнения относительно этапов прессования. Для всех смесей под действием УЗ-колебаний наблюдается повышение плотности прессовок и смещение кривых уплотнения в сторону Этапа III (Рисунок 4). Очевидно, эти эффекты определяются дислокационной структурой наиболее пластичного компонента смеси ($AMg6$) и его относительным содержанием C_{pl} .

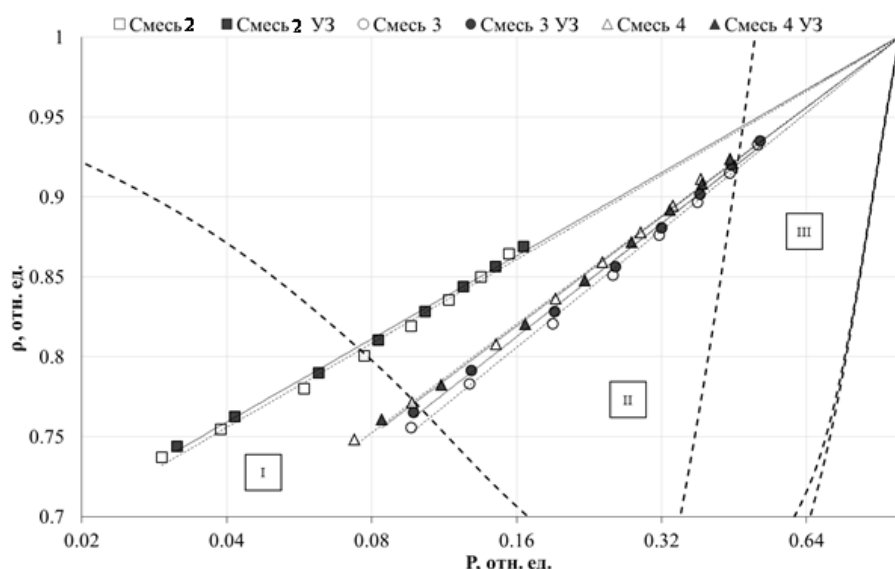


Рисунок 4 – Представление экспериментальных зависимостей относительной плотности исследуемых смесей по этапам их уплотнения

Для всех смесей под действием УЗ-колебаний наблюдается повышение плотности прессовок и смещение кривых уплотнения в сторону Этапа III.

Как видно из Таблицы 1, отдельные компоненты исследуемого композиционного состава демонстрируют существенные отличия характеристик прессуемости: значений давления и плотности наступления этапов прессования.

Таблица 1 – Основные характеристики прессуемости исследуемых порошков и смесей на их основе в условиях одноосного одностороннего прессования и УЗ-прессования

Материал	Этап 1		Этап 2		Этап 3	
	P , МПа	$\rho_{отн}$, ед.	P , МПа	$\rho_{отн}$, ед.	P , МПа	$\rho_{отн}$, ед.
B_4C	$22 \cdot 10^{-6}$	0,041	1505,9	0,870	17933,7	0,971
W	0,435	0,084	187,4	0,791	1038,6	0,936
АМг6	0,809	0,118	16,5	0,747	63,0	0,906
Смесь 2 ООП	0,026	0,076	38,5	0,804	239,6	0,943
Смесь 2 УЗП	0,021	0,075	35,6	0,806	224,0	0,944
Смесь 3 ООП	0,334	0,106	16,4	0,762	71,0	0,917
Смесь 3 УЗП	0,238	0,102	15,7	0,767	70,6	0,921
Смесь 4 ООП	0,204	0,098	19,9	0,772	93,8	0,924
Смесь 4 УЗП	0,190	0,099	17,4	0,771	81,6	0,924

Среди смесей, наименьшая величина критического давления и наибольшая прессуемость наблюдается при УЗ-прессовании Смеси 3. Эта же смесь демонстрирует наибольшее значение интенсивности уплотнения b и минимальное значение критического давления $P_{кр}$ при любом способе прессования, что подтверждает результаты дискретно-элементного моделирования, в котором по выбранным критериям был определён оптимальный состав этого композита (Смесь 3).

Анализ представленных на Рисунке 5 а графических зависимостей коэффициентов уравнения прессования для смесей от массового содержания C_{pl} наиболее пластичного компонента подтверждает выдвинутое предположение о наличии оптимального значения этого содержания, при котором наступает «насыщение» и превышение которого не приносит существенного выигрыша в приросте эффективности прессования заданным давлением.

Аналогичная зависимость прессуемости Π для этих смесей (Рисунок 5 б) в области значения C_{pl} для Смеси 3 демонстрирует «насыщение», характер которого близок к асимптотическому: величина прессуемости для этой смеси принимает максимальное значение, которое даже несколько превышает значение прессуемости чистого порошка $AMz6$.

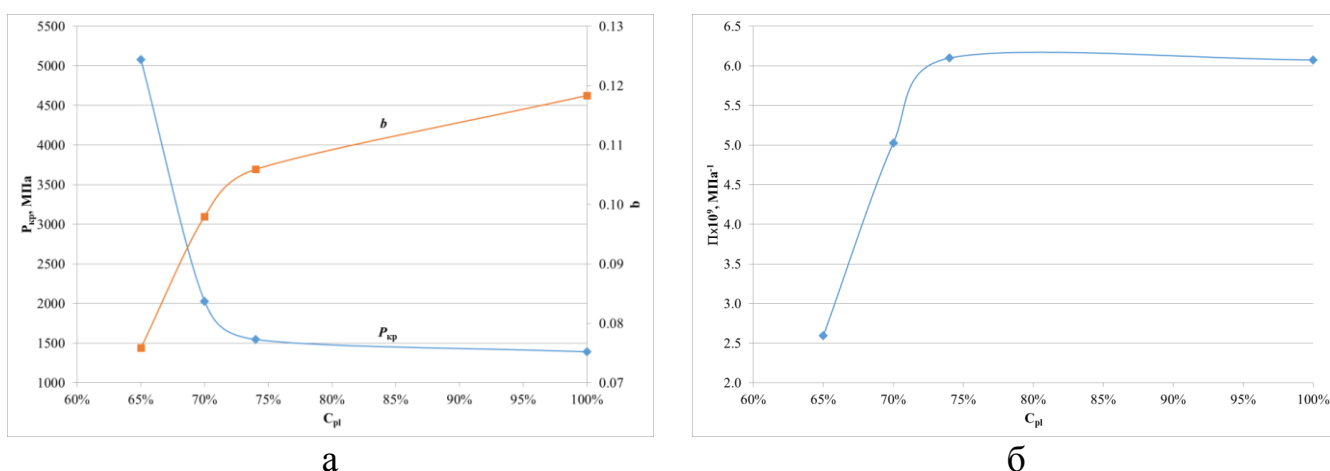


Рисунок 5 – Зависимости коэффициентов уравнения прессования (а) и прессуемости (б) для исследуемых смесей от содержания с них наиболее пластичного компонента

Представленные зависимости в совокупности с результатами дискретно-элементного моделирования позволяют сделать обоснованный вывод о правильном определении оптимального содержания наиболее пластичного матричного компонента исследуемого ММК.

Последующее вакуумное спекание полученных прессовок при температуре 590°C в течение 2 часов привело лишь к незначительному повышению плотности: до 93,4% для прессовок, прессовавшихся без УЗВ и до 96,8% для прессовок, прессовавшихся под УЗ-воздействием. Следует отметить, что значение плотности прессовок ММК после УЗ-компактирования при комнатной температуре (95,1%) сопоставимо со значением плотности ММК такого же состава, изготовленного методом горячей экструзии при температурах до 500°C (96%). Таким образом показано, что компрессионное воздействие является основным процессом эффективной консолидации исследуемого материала.

Альтернативным способом получения плотных изделий из разрабатываемого ММК, в которых путём использования термического воздействия можно снизить величину прикладываемого давления является метод ИПС. Для исследования влияния температуры на формирование плотности образца, были выбраны температуры спекания 360°C, 400°C, 440°C и 490°C.

Фотографии образцов ММК, полученных методом ИПС, представлены на Рисунке 6.

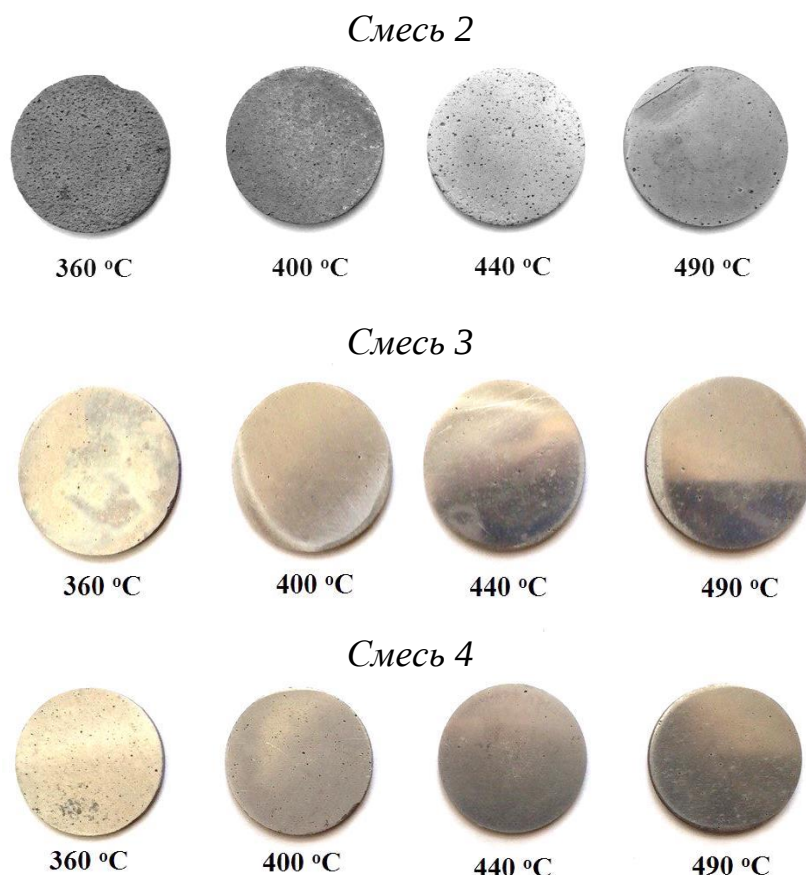


Рисунок 6 – Фотографии образцов, полученных из Смесей 2,3,4 при давлении прессования 30МПа и времени выдержки 5 мин

С помощью структурных и морфологических исследований полученных образцов выявлено, что абсолютное беспористое состояние достигнуто в образцах ММК, изготовленных методом ИПС из Смесей 3 и 4, при температурах воздействия 440 и 490 °C, давлении подпрессовки 30 МПа и времени выдержки 5 минут. Кроме того, в образцах ММК, полученных при этих режимах, отмечено образование интерметаллидной фазы $Al_{18}Mg_3W_2$ (Рисунок 7).

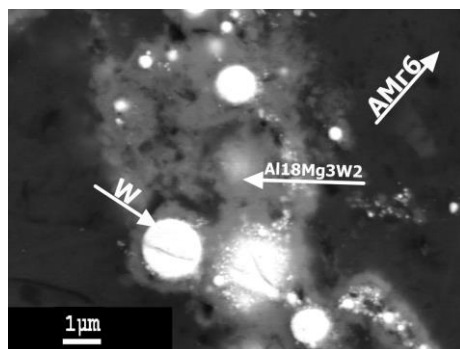


Рисунок 7 - РЭМ – изображение частиц фазы $Al_{18}Mg_3W_2$ в образце, полученном из Смеси 3 при температуре 490°C

Анализ результатов свободного спекания и ИПС исследуемых составов ММК показал, что термическое воздействие (в том числе, плазменное при ИПС)

следует рассматривать в качестве дополнительного фактора влияния на реологические характеристики матричного материала, снижающего предел его текучести. Аналогичное по масштабам и эффективности влияние, существенно снижающее предел текучести матричного компонента, оказывает ультразвуковое воздействие. Достигнутые значения плотности прессовок и конечных изделий подтверждают, что методы ультразвукового и плазменного воздействия на исследуемый ММК, являются конкурентоспособным по сравнению с применяемыми в промышленности методами консолидации материала аналогичного состава.

Основной проблемой в производстве изделий из порошковых материалов методами прессования является неравномерное распределение плотности по объёму прессуемого порошкового тела. Минимизация или исключение неравномерного распределения плотности по объёму изделия достигается уменьшением влияния эффектов пристенного трения: снижением сил пристенного трения или перераспределением направления их действия по внешней поверхности изделия при прессовании, что может быть достигнуто путем применения применением УЗ- воздействия и специальных схем прессования (коллекторное прессование).

Кроме снижения сил пристенного трения, УЗ-воздействие при прессовании порошков оказывает влияние на их реологические характеристики. В частности, под действием знакопеременных напряжений в прессуемом материале увеличивается плотность и подвижность дислокаций, что снижает уровень напряжений его пластического течения. Это способствует уплотнению порошкового материала.

Перераспределение направлений действия сил трения по поверхности изделия обеспечивает компенсацию их влияния на равномерность распределения плотности и достигается применением коллекторной схемы прессования (КП). При этом, для полного исключения перепадов плотности по высоте изделия, производство частей формообразующих периметров встречно движущихся элементов (ползунов) на величины развитых на этих частях сил трения должны быть равны. При производстве методом КП изделия в форме втулки (рамки) и при одинаковых значениях коэффициента трения на разнонаправленных частях периметров это условие выполнить нельзя, поскольку величины периметров внешней и внутренней частей втулки отличаются. В данном случае целесообразно совместное использование коллекторной схемы прессования и УЗ-воздействия, при котором коэффициент трения на внешней поверхности втулки может быть снижен под действием УЗ-колебаний на величину, пропорциональную отношению величин периметров внешней и внутренней поверхности.

Перечисленные рациональные приёмы повышения качества прессуемых изделий были оптимизированы методом конечно-элементного моделирования. Модель базовой конструкции пресс-формы, используемой для моделирования процессов уплотнения, представлена Рисунке 8.

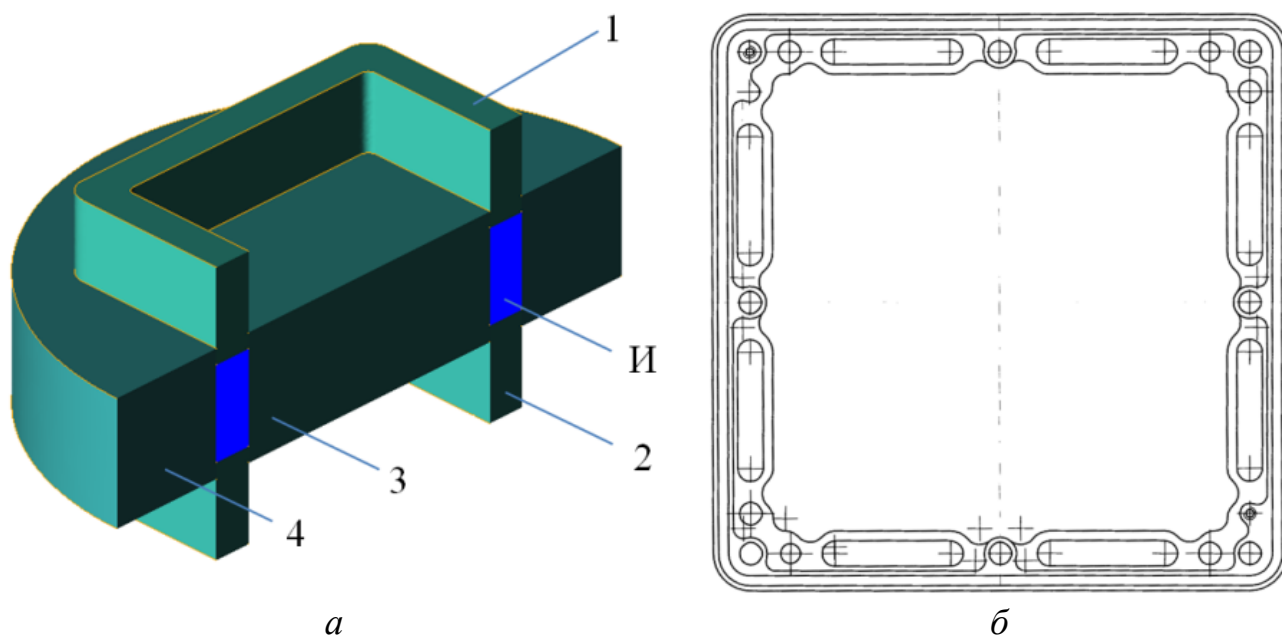


Рисунок 8 – Модель базовой конструкции пресс-формы (а), реализующей выбранные схемы прессования ММК состава 74% AM_{26} -6% B_4C -20% W (Смесь 3) в изделие в форме прямоугольной рамки (б)

Моделирование прессования ММК состава 74% AM_{26} -6% B_4C -20% W (Смесь 3) методом конечных элементов в различных условиях пристенного трения проводили:

- 1) для схемы ООП, в которой относительно матрицы и закладного элемента движется только верхний пуансон, а нижний пуансон 2 остаётся неподвижным;
- 2) для схемы КП, в которой верхний пуансон движется одновременно с закладным элементом, а нижний пуансон остаётся жёстко связанным с матрицей.

Результаты моделирования, представленные на Рисунках 9 и 10, показывают преимущество коллекторной схемы прессования, реализованной с одновременным УЗ-воздействием максимальной мощностью.

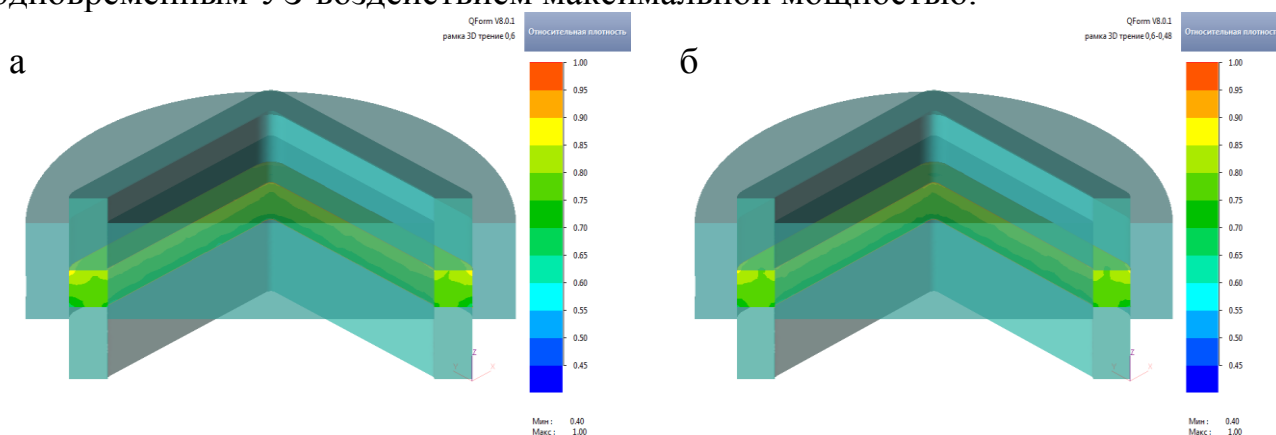


Рисунок 9 – Модели ООП рамки из ММК состава 74% AM_{26} - 6% B_4C - 20% W (Смесь 3) (разрез) с полями распределения плотности в поперечном сечении изделия: а – ООП, б – УЗП

ООП без внешнего воздействия (Рисунок 9 а) приводит к характерной для этого метода существенной неравномерности распределения плотности по высоте (до 20% относительно теоретической плотности) и в горизонтальном (до 10%) направлении. Использование УЗ-колебаний приводит к некоторому снижению разницы в полях плотности у внешней и у внутренней боковых поверхностей изделия (Рисунок 9 б), однако неравноплотность по высоте остаётся существенной при любых условиях снижения коэффициента пристенного трения у внешней боковой поверхности.

Применение КП (Рисунок 10 а) позволило в значительной мере решить проблему неравноплотности по высоте: усреднённая в горизонтальном сечении плотность практически одинакова на любой высоте изделия.

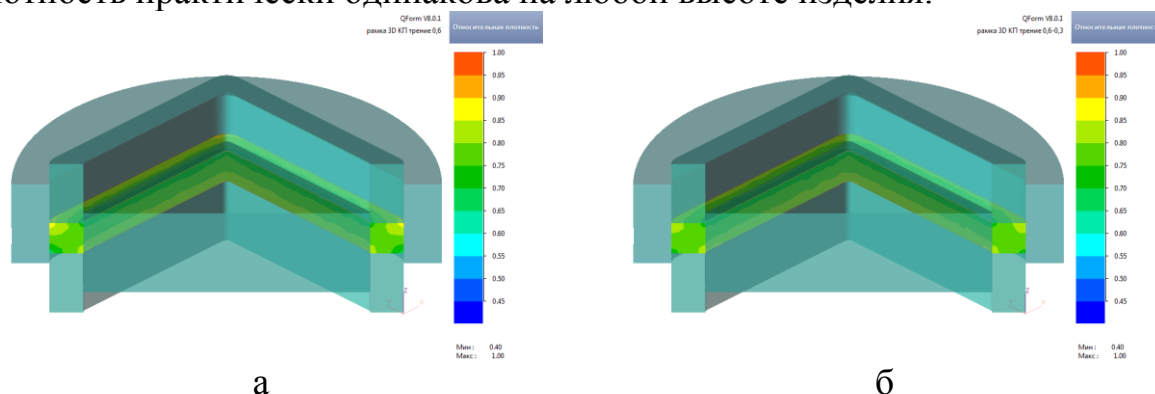


Рисунок 10 – Модели КП рамки ММК состава 74% АМг6-6% B_4C -20% W (Смесь 3) (разрез) с полями распределения плотности в поперечном сечении изделия в случае обычного (а) и УЗ-прессования (б)

Кардинальное улучшение наступает при коллекторной схеме прессования с одновременным УЗ-воздействием: снижение коэффициента пристенного трения у внешней боковой поверхности изделия с 0,6 до 0,48 приводит к заметному выравниванию характера распределения плотности у внешней и внутренней поверхности, а при дальнейшем уменьшении коэффициента трения (до 0,3) разница между характером распределения плотности у внешней и у внутренней поверхностей становится минимальной (Рисунок 10 б). Полученный результат позволяет выбрать схему КП с одновременным УЗ-воздействием в качестве основного технологического метода консолидации, и выработать практические рекомендации для проектирования прессовой оснастки и производства изделий в форме корпусного элемента (прямоугольной рамки) из оптимизированного по составу радиационно-защитного композиционного материала.

В четвертой главе представлены результаты оценки ослабления гамма- и нейтронного излучения образцами, изготовленными из исследуемых составов ММК, методом ИПС.

Источником гамма-излучения служили радиоизотопы ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{60}Co и канал исследовательского реактора ИРТ-Т; источником нейтронного излучения - коллимированный пучок нейтронов канала ГЭК-1 реактора ИРТ-Т с использованием специального графитового контейнера. Ослабляющая способность материалов была определена в сравнении с образцом чистого сплава АМг6.

В результате проведения измерений мощности дозы от гамма-излучения за исследуемым образцом установлено, что коэффициент ослабления для всех исследуемых материалов незначительно отличается от единицы и находятся в границах погрешности измерений при облучении гамма-квантами образующимися при работе реактора ИРТ-Т. При использовании гамма-квантов испускаемых при распаде изотопа ^{57}Co (14,4, 122,06, 136,47 кэВ), наблюдается заметное снижение интенсивности излучения (коэффициент ослабления для образца, изготовленного из Смеси 3 при 360°C, составил $1,34 \pm 0,1$).

Наибольший коэффициент ослабления нейтронного потока наблюдается для образца, изготовленного из Смеси 4 (3,34 для тепловых нейтронов, 3,26 для надтепловых). При оценке ослабляющей способности потока нейтронов образцами, изготовленных из Смеси 3 при температурах 360 и 490°C, наблюдаются значения коэффициента ослабления тепловых/надтепловых нейтронов 2,48/2,39 и 3,03/3,23, соответственно.

В работе приведены результаты моделирования прохождения гамма-излучения через материал ММК, оптимизированного состава.

В Таблице 2 представлены коэффициенты ослабления гамма-квантов образцом, изготовленным из исследуемых смесей, толщиной 1 см.

Таблица 2 – Коэффициенты ослабления гамма-квантов образцом, изготовленным из исследуемых смесей, толщиной 1 см

Состав	Коэффициент ослабления числа частиц	Коэффициент ослабления энергии	Коэффициент ослабления поглощенной дозы
Смесь 2	1,46	1,39	1,41
Смесь 3	1,38	1,33	1,34
Смесь 4	1,33	1,30	1,31
АМг6	1,28	1,27	1,28

Наилучшими ослабляющими гамма-излучение характеристиками обладает состав Смеси 2. Результаты реального эксперимента с результатом, полученным методом моделирования для Смесей 3 и 4, хорошо коррелируют между собой. Таким образом, результаты реального эксперимента частично можно заменить результатами моделирования, полученными в программе PCLAB.

Таким образом, результаты моделирования процессов ослабления гамма-, нейтронного и электронного излучений и экспериментальные результаты показали, что ММК оптимизированного состава $\text{AMg6}(74\%)\text{-B}_4\text{C}(6\%)\text{-W}(20\%)$ имеют коэффициенты ослабления потока тепловых нейтронов 3,03; надтепловых нейтронов 3,23; гамма-квантов с энергией до 137 кэВ 1,34, которые превышают соответствующие коэффициенты ослабления чистого сплава АМг6 в 2 раза (по тепловым и надтепловым нейтронам); на 34% (по гамма-квантам). Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения исследуемых материалов для целей радиационной защиты.

Заключение

В ходе диссертационных исследований проведена модельная и экспериментальная оптимизация компонентного состава, условий и режимов консолидации лёгкого металломатричного композитного материала на основе порошков алюмо-магниевого сплава с добавлением карбида бора и наночастиц вольфрама для достижения беспористого состояния с сохранением требуемых радиационно-защитных свойств. Поставленная цель была достигнута нижеследующим комплексом мероприятий.

На основе комплексной характеристики исходных компонентов, построена модель упаковки частиц порошкового материала, которая позволила выявить оптимальное по критерию максимальной плотности и минимально необходимое по содержанию матричного материала соотношение компонентов смеси.

Для подтверждения результатов, полученных методом моделирования, при изготовлении образцов ММК использовали рациональные приёмы прессования – коллекторное прессование, ультразвуковое и плазменное воздействие.

На основе выявленных закономерностей построена конечно-элементная модель процесса консолидации ММК для последующей оптимизации кинематической схемы прессования в изделия заданной формы в различных условиях внешнего воздействия.

Для оптимизации режимов компрессионной и термической консолидации, в том числе, в условиях ультразвукового и плазменного воздействия, использованы методы конечно-элементного моделирования.

По результатам моделирования подготовлены эскиз и прототип прессовой оснастки, реализующей оптимальную кинематическую схему перемещения формообразующих элементов пресс-формы, которая обеспечивает минимальные перепады плотности по объёму изделия заданной формы, что позволило сформулировать практические рекомендации для производства изделий из ММК.

Для характеристики радиационно-защитных свойств разрабатываемого состава ММК, в работе проведена расчётная и экспериментальная оценка ослабляющей способности гамма- и нейтронного излучения материалом.

Полученные результаты диссертационных исследований позволяют сделать следующие **основные выводы**.

1. Состав Смеси 2 (65% AM_{26} -15% B_4C -20 % W) обладает минимальным по содержанию для образования непрерывной матрицы алюминиевого сплава при оптимальном для плотного заполнения частицами карбида бора и вольфрама соотношением компонентов. Однако для изготовления, разрабатываемого ММК из исследуемых порошков, соотношение компонентов смеси, оптимальным по критерию максимума плотности упаковки всех частиц, а также для формирования в процессе компрессионной и термической консолидации пространственно-связанной (непрерывной) металлической матрицы, необходимой для формирования прочного каркаса изделия из ММК при сохранении требуемых радиационно-защитных свойств является состав 74% AM_{26} -6% B_4C -20% W.

2. Экспериментальная оценка коэффициентов прессуемости различных смесей, проведённая в рамках механистической модели прессования, подтвердила обоснованность выбора оптимального содержания компонентов смеси, сделанного на стадии дискретно-элементного моделирования.
3. Результаты конечно-элементного моделирования и модельной оптимизации показали преимущество коллекторной схемы прессования, реализованной с одновременным УЗ-воздействием максимальной мощности, для достижения максимально равномерного распределения плотности по объёму изделия сложной формы, в частности, для изделия в форме рамки-корпуса.
4. Представленные результаты исследования образцов ММК обнаружили оптимальный режим изготовления ММК методом ИПС ($T=440\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление 30 МПа при 5 минутах выдержки), обеспечивающий наибольшие значения плотности изделий.
5. Проведённая оценка влияния УЗ-колебаний на формирование конечной плотности изделия выявила, что образцы смеси оптимизированного состава порошков композита, прессуемые под УЗ-воздействием и без него, при давлении прессования 800 МПа, имели плотности прессовки композита 95,1 и 93,4 %, соответственно. Свободное вакуумное спекание обычных прессовок ММК исследованных составов при температурах, вплоть до температуры плавления матричного компонента, в целом, имеет низкую эффективность, поскольку приводит к незначительному (менее 1 %) повышению плотности. При этом прирост плотности прессовок, изготовленных с УЗ-воздействием, после спекания в таких же условиях несколько выше (с 95,1 до 96,8 %), что указывает на активационный характер УЗ-воздействия при компактировании исследованных ММК. В целом, выигрыш от применения УЗ-воздействия при прессовании составил 3,4 %, что на уровне остаточной пористости менее 4 % является существенным.
6. Зависимость прессуемости смесей от содержания компонентов демонстрирует «насыщение» (в области более 74 % матричного материала), характер которого близок к асимптотическому; превышение указанного содержания не приносит существенного выигрыша в приросте эффективности процесса прессования.
7. Компрессионное воздействие является основным процессом эффективной консолидации исследуемого материала, а термическое воздействие (в том числе, плазменное при ИПС) следует рассматривать в качестве дополнительного фактора влияния на реологические характеристики матричного материала, снижающего предел его текучести. Аналогичное по масштабам и эффективности влияние, существенно снижающее предел текучести матричного компонента, оказывает ультразвуковое воздействие.
8. Выбранные для консолидации ММК рациональные приёмы прессования являются конкурентоспособными по отношению к существующим методам производства изделий из материала аналогичного состава и назначения. В частности, значение плотности прессовок ММК после УЗ-прессования при комнатной температуре (95,1%) сопоставимо со значением плотности ММК

аналогичного состава, изготовленного методом горячей экструзии при температурах до 500 °С (96%). Кроме того, достигнутая при УЗ-прессовании в оптимальных режимах плотность ММК с оптимальным содержанием компонентов оказалась выше, чем плотность чистого сплава АМг6 при том же давлении, но без УЗ-воздействия, что указывает на высокую эффективность УЗ-прессования для производства ММК.

9. ММК оптимизированного состава $AMg6 (74\%) + B_4C (6\%) + W (20\%)$ имеет коэффициенты ослабления потока тепловых нейтронов 3,03; надтепловых нейтронов 3,23; гамма-квантов с энергией до 137 кэВ 1,34, которые превышают соответствующие коэффициенты ослабления чистого сплава АМг6 в 3 раза (по тепловым и надтепловым нейтронам); на 34 % (по гамма-квантам). Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения оптимизированного состава ММК для целей радиационной защиты.

Публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях ВАК

1. Петюкевич М.С. Влияние физических свойств порошка B_4C на прочностные свойства керамики, полученной SPS-спеканием / О.Л. Хасанов, Э.С. Двилис, З.Г. Бикбаева, В.В. Полисадова, А.О. Хасанов, **М.С. Петюкевич**, А.С. Братухина, Ю. Пан // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 9-3. – С. 252-256.
2. Петюкевич М.С. Структура бимодальных порошковых смесей карбида бора / **М.С. Петюкевич**, Ю.Ф. Иванов, О.Л. Хасанов, А.А. Качаев, Э.С. Двилис, А.О. Хасанов, А.С. Братухина // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 9-3. – С. 204-208.
3. Петюкевич М.С. Структура и свойства поверхностного слоя керамики B_4C , обработанной интенсивным электронным пучком / Ю.Ф. Иванов, О.Л. Хасанов, **М.С. Петюкевич**, Г.В. Смирнов, В.В. Полисадова, З.Г. Бикбаева, А.Д. Тересов, М.П. Калашников, О.С. Толкачев // Физика и химия обработки материалов. – 2017. – № 3. – С. 38-44.
4. Petyukevich M.S. Investigation of SiC ceramics, modified by intense electron beam / Yu.F. Ivanov, A.D. Teresov, M.P. Kalashnikov, O.L. Khasanov, M.S. Petyukevich, V.V. Polisadova, T.V. Milovanova, O.S. Tolkachev // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 9-3. – С. 199-202.
5. Петюкевич М.С. Моделирование тепловых процессов, структурно-фазовое состояние и свойства диоксида циркония, облучённого высокоинтенсивным импульсным электронным пучком / Ю.Ф. Иванов, О.С. Толкачев, А.Д. Тересов, М.С. Петюкевич, О.В. Иванова, И.А. Иконникова, А.С. Панина // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6-2. – С. 91-95.
6. Петюкевич М.С. Структура поверхности керамики на основе карбида бора, облучённой интенсивным электронным пучком / Ю.Ф. Иванов, О.Л. Хасанов, В.В. Полисадова, **М.С. Петюкевич**, З.Г. Бикбаева, М.П. Калашников, А.С. Братухина, О.С. Толкачев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6-2. – С. 96-100.
7. Petyukevich M.S. Modification of ceramics B_4C by high intensity electron beam / **M.S. Petyukevich**, Yu.F. Ivanov, O.L. Hasanov, A.D. Teresov, M.P. Kalashnikov, V.V.

- Polisadova, E.S. Dvilis, T.V. Milovanova // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 12-3. – С. 245-248.
8. Петюкевич М.С. Тепловые свойства магнитодиэлектрических композиционных составов на основе компаунда КП-34 и ультрадисперсного никель-цинкового порошка / О.Л. Хасанов, Г.В. Смирнов, В.В. Полисадова, Д.Г. Смирнов, **М.С. Петюкевич**, С.А. Пономарева // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6-2. – С. 291-295.
 9. Петюкевич М.С. Магнитодиэлектрический компаунд с добавками ультрадисперсного порошка Zn-Ni для улучшения свойств обмоток электротехнических изделий / О.Л. Хасанов, Г.В. Смирнов, В.В. Полисадова, Д.Г. Смирнов, **М.С. Петюкевич**, З.Г. Бикбаева // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6-2. – С. 296-300.
 10. Петюкевич М.С. Магнитодиэлектрический композиционный состав и его применение для ресурсосберегающей технологии пропитки обмоток электротехнических и радиотехнических изделий / Г.В. Смирнов, О.Л. Хасанов, Д.Г. Смирнов, В.В. Полисадова, **М.С. Петюкевич** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 106-117.
 11. Петюкевич М.С. Легирование алюминия медью в результате облучения системы "пленка (Cu)/(Al) подложка" интенсивным импульсным электронным пучком / Ю.Ф. Иванов, П.В. Москвин, Е.А. Петрикова, О.В. Крысина, О.В. Иванова, А.А. Клопотов, О.С. Толкачев, **М.С. Петюкевич**, Ю.А. Какушкин // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 114-122.
 12. Петюкевич М.С. Электрофоретический состав на основе лака пэ-939 и возможность его применения в ресурсосберегающей технологии эмалирования проводов / О.Л. Хасанов, Г.В. Смирнов, В.В. Полисадова, Д.Г. Смирнов, **М.С. Петюкевич** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 9-3. – С. 257-261.
 13. Petyukevich M.S. Interaction of lithium-titanium ceramics with air during sintering / S.A. Ghyngazov, E.N. Lisenko, **M.S. Petyukevich**, T.S. Frangulyan // Russian Physics Journal. – 2007. – Т. 50. – № 2. – С. 134-139.
 14. Петюкевич М.С. Взаимодействие литий-титановой ферритовой керамики с воздушной атмосферой в процессе её спекания / С.А. Гынгазов, Е.Н. Лысенко, **М.С. Петюкевич**, Т.С. Франгулян // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2007. – Т. 50. – № 2. – С. 35-40.

Публикации в зарубежных журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus

15. Petyukevich M.S. Metal-ceramic composite development based on its modelling results / E.S. Dvilis, O.L. Khasanov, A.O. Khasanov, **M.S. Petyukevich** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. V. 116(1). –012027. – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/18927>.
16. Petyukevich M.S. Modeling and comparative analysis of packing of the polyfractional mixture of B₄C powder / E.S. Dvilis, O.L. Khasanov, A.O. Khasanov, **M.S. Petyukevich**, D.K. Iazykov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 116(1). –012028. – Режим доступа: DOI: 10.1088/1757-899X/116/1/012028.
17. Petyukevich M.S. Spark plasma sintering of aluminum-magnesium-matrix composites with boron carbide and tungsten nano-powder inclusions: modeling and experimentation

- / E.S. Dvilis, O.L. Khasanov, V.N. Gulbin, M.S. Petyukevich, A.O. Khasanov, E.A. Olevsky // Journal of the Minerals Metals & Materials Society (JOM). – 2016. – V. 68. – No.3. – P. 908-919.
18. Petyukevich M.S. Structure and Properties of the Surface Layer of B₄C Ceramic Treated with an Intense Electron Beam / Y.F. Ivanov, O.L. Khasanov, **M.S. Petyukevich**, S.V. Smirnov, V.V. Polisadova, Z.G. Bikbaeva, A.D. Teresov, M.P. Kalashnikov, O.S. Tolkachov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – V. 9(3). – P. 437-441.
 19. Petyukevich M.S. Sintering of oxide and carbide ceramics by electron beam at forevacuum pressure / E. Dvilis, O. Tolkachev, V. Burdovitsin, A. Khasanov, M. Petyukevich // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 116(1). – 012029. – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/18929>.
 20. Petyukevich M.S. The structure and properties of boron carbide ceramics modified by high-current pulsed electron-beam / Y. Ivanov, O. Tolkachev, **M. Petyukevich**, A. Teresov, O. Ivanova, I. Ikonnikova, V. Polisadova // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1698. – 030008. – Режим доступа <https://doi.org/10.1063/1.4937830>.
 21. Petyukevich M.S. The structure and properties of yttrium-stabilized zirconium dioxide ceramics treated by electron beam / O. Tolkachev, Y. Ivanov, E.A. Petrikova, A.A. Panina, **M. Petyukevich** [et al.] // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 683. – P. 53-57.
 22. Petyukevich M.S. Thermal processes at electron-beam treatment of yttrium-stabilized zirconium dioxide ceramics / Y.F. Ivanov, O.S. Tolkachev, E.A. Petrikova, O.V. Ivanova, I.I. Ikonnikova, **M. Petyukevich** [et al.] // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 683. – P. 58-64.
 23. Petyukevich M.S. Structural and phase transformations in Ti-B₄C system formed when melting the composition film/substrate by an intense electron beam / Y.F. Ivanov, O.L. Khasanov, **M.S. Petyukevich**, V.V. Polisadova, T.V. Milovanova, O.S. Tolkachov, A.D. Teresov, M.P. Kalashnikov // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 712. – P. 76-80.
 24. Petyukevich M.S. Structural phase transformations of the surface layer of SiC ceramics irradiated by intense electron beam / Y.F. Ivanov, O.L. Khasanov, **M.S. Petyukevich**, V.V. Polisadova, T.V. Milovanova, O.S. Tolkachov, A.D. Teresov, M.P. Kalashnikov // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 712. – P. 81-86.
 25. Petyukevich M.S. The analysis of the mechanisms for plasticization of boron carbide ceramics irradiated by an intense electron beam / Y.F. Ivanov, O.L. Khasanov, V.V. Polisadova, **M.S. Petyukevich**, T.V. Milovanova, A.D. Teresov, Z.G. Bikbaeva, M.P. Kalashnikov, A.S. Bratukhina // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 685. – P. 700-704.
 26. Petyukevich M.S. Investigation of SiC ceramics, modified by intense electron beam / **M.S. Petyukevich**, M.P. Kalashnikov, Y.F. Ivanov, A.D. Teresov, O.L. Khasanov // Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2016): International Congress, October 2–7, 2016, Tomsk, Russia: abstracts. – Tomsk: TPU Publishing House, 2016. – P. 302.
 27. Petyukevich M.S. The application of magneto-dielectric composite mixture for alternative technology of winding impregnation in electrical and radio engineering products / G.V. Smirnov, O.L. Khasanov, D.G. Smirnov, V.V. Polisadova, **M.S. Petyukevich** // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2015. – V. 326(11). – P. 106-117.
 28. Petyukevich M.S. Synthesis of Al₂O₃-ZrO₂ powders from differently concentrated suspensions with a spray drying technique / G.V. Lyamina, A. Ilala, O.L. Khasanov, **M.**

Тезисы докладов по итогам конференций

29. Петюкевич М.С. Структура поверхности керамики на основе карбида бора, облученной интенсивным электронным пучком / А.С. Братухина, **М.С. Петюкевич**, В.В. Полисадова // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 21-24 апреля 2015 г.; ред. кол. И.А. Курзина; Г.А. Воронова; С.А. Поробова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 929-931.
30. Петюкевич М.С. Исследование микроструктуры керамики из карбида бора, полученной из порошков карбида бора с нанодобавками / А.С. Братухина, **М.С. Петюкевич**, А.А. Качаев // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XI Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 22-25 апреля 2014 г.; под ред. Е.А. Вайтулевич. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 918-920.
31. Петюкевич М.С. Исследование механических свойств и микроструктуры керамики B_4C , полученной из порошков субмикронной фракции с нанодобавками / **М.С. Петюкевич**, А.С. Братухина, А.О. Хасанов // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XI Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 22-25 апреля 2014 г.; под ред. Е.А. Вайтулевич. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 971-973
32. Петюкевич М.С. Легкий композиционный материал для космической техники / О.Л. Хасанов, Э.С. Двилис, А.О. Хасанов, **М.С. Петюкевич**, И.И. Ремизов // Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники: сборник докладов конференции, ФГУП ВИАМ, 2015. – С. 6.
33. Петюкевич М.С. Исследование и оптимизация составов алюмоматричного композитного материала с дисперсным наполнителем на основе порошков карбида бора и вольфрама для производства высокоплотных изделий / У. Досеке, Э.С. Двилис, **М.С. Петюкевич**, О.Л. Хасанов // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 2016; под ред. И. А. Курзиной, Г. А. Вороновой; Т. 2: Химия. – С. 145-147. – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/25869>.
34. Петюкевич М.С. Исследование влияния УЗ-компактирования на формирование структуры и плотности высоконаполненных алюмоматричных композитных материалов для радиационной защиты бортовой электроники КЛА / У.А. Досеке, **М.С. Петюкевич**, Э.С. Двилис, О.Л. Хасанов // Инженерия для освоения космоса: сборник научных трудов V Международного молодежного форума, г. Томск, 2017. – С. 72-75. – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/41262>.
35. Петюкевич М.С. Формирование структуры металломатричного композита $AMG6-B_4C-W$ методом искрового плазменного спекания / В.Д. Пайгин, А.О. Хасанов, **М.С. Петюкевич**, Э.С. Двилис // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении: сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, г. Томск, 2015. – С. 190-194. – Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/18267>.

36. Petyukevich M.S. Spark plasma sintering of metal-matrix composites with hard ceramic and refractory metal inclusions: modeling and experimentation / E. Dvilis, O. Khasanov, V. Gulbin, M. Petyukevich, A. Khasanov, E. Olevsky // 14th International Conference of European Ceramic Society, Toledo, June 21-25, 2015: Book of Abstracts. – Toledo: ECerS, 2015. – P. 2343.

Зарегистрированный патент

37. Петюкевич М.С. Способ получения алюмоматричного композитного материала: пат. 2616315 Рос. Федерация: МПК C22C 1/05, C22C 21/00, B22F 3/93 / Двилис Э.С., Толкачев О.С., Петюкевич М.С., Хасанов О.Л.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. - № 2015152345; заявл. 07.12.2015; опубл. 14.02.2017, Бюл. №11.