

УДК В 621.763

РАЗРАБОТКА РАДИАЦИОННО-СТОЙКОГО ВОЛОКНИСТОГО МЕТАЛЛОКОМПОЗИТА

Р.Е. Хвостов, В.В. Чеверикин
НИТУ МИСИС, Москва
Khvosrovromka2@mail.ru

В настоящей работе описаны перспективы разработки радиационно-стойкого волокнистого композиционного материала, предназначенного для защиты чувствительных электронных компонентов в условиях радиационного излучения. Рассматриваются возможные сферы применения материала, а также предложен наиболее технологичный способ его получения. Получены образцы волокнистого композиционного материала и проведено исследование границ раздела входящих в него компонентов.

Ключевые слова: алюминий, волокна бора, волокнистый металлокомпозит, ионизирующее излучение, композиционный материал, радиационная стойкость.

DEVELOPMENT OF A RADIATION-RESISTANT FIBROUS METAL COMPOSITE

R.E. Khvostov, V.V. Cheverikin
NUST MISIS, Moscow

This work describes the prospects for developing a radiation-resistant fibrous metal composite material designed to protect sensitive electronic components under radiation conditions. Possible areas of application of the material are considered, and the most technologically advanced method for its production has been proposed. Samples of fibrous composite material have been obtained and the interfaces of its components have been studied.

Keywords: aluminum, boron fibers, fibrous metal composite, ionizing radiation, metal composite, radiation resistance.

Введение

Способность своевременно отвечать на вызовы, такие как природные и техногенные катастрофы, является показателем устойчивости развития государства, а также его научного и технического прогресса.

26 апреля 1986 года реактор 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС был полностью разрушен в результате взрыва. Последствия этого события привели к самому масштабному радиоактивному загрязнению окружающей среды на территориях СССР [1].

При ликвидации последствий катастрофы, для снижения вредного воздействия радиации на человека, была предпринята попытка применения в зараженной зоне робототехнических средств. Данное решение имело неоднозначные результаты. С одной стороны, большая часть роботов, применявшихся в зоне аварии, со своей задачей успешно справилась. В основном это были тяжелые роботы типа «Белоярец», ССТР-1, «Мобот Ч-ХФ», применявшиеся для разведки, подбора образцов и разгребания завалов. Однако робототехнические средства, предназначенные для более тонких задач или для работы в более специфичных условиях, оказались непригодны к использованию в зоне с настолько высокой радиацией. Например, радиоуправляемый гусеничный робот MF-2 «Джокер» производства ФРГ предполагался к применению в самой опасной зоне на крыше, вблизи 4 реактора, где уровень ионизирующего излучения составлял более 10 тысяч рентген в час. Из-за столь мощного радиационного фона манипулятор робота MF-2 быстро вышел из строя, электронные компоненты постоянно отказывали. MF-3, другая модель из Германии, изначально предназначалась для проведения работ в ядерной промышленности и других опасных средах и также оказалась непригодна, поскольку подвергала жизнь оператора опасности [2].

Опыт применения робототехнических средств в экстремальных условиях показал необходимость разработки и создания радиационно-стойкого материала для защиты электронных компонентов от высокого ионизирующего излучения, достаточно легкого для применения в конструкции высококомобильных и малогабаритных роботов без снижения их основных характеристик.

Применение существующих металлов и сплавов не может в полной мере решить подобную задачу, в связи с чем необходима разработка нового композиционного материала, сочетающего в себе весь комплекс необходимых свойств.

Композиционные материалы – это класс материалов, состоящих из двух и более разнородных компонентов, работающих совместно, без химического и физического взаимодействия друг с другом [3]. Строгой классификации композиционных материалов до сих пор не создано, однако, как правило, их разделяют по типу матрицы (металлическая, полимерная или керамическая) и по способу армирования (дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые). Металлические матрицы характеризуются высокой прочностью по сравнению с полимерными и керамическими [4, 5]. Волокнистые композиты характеризуются высокими физико-механическими свойствами и возможностью придания им квазиизотропности путем изменения угла укладки армирующих волокон [3, 6].

Наиболее широко распространенным материалом для применения в технике является алюминиевый сплав АМгб. Его стоимость, технологичность, удовлетворительная коррозионная стойкость и малая плотность сделали его основным материалом при производстве различной техники, в автомобилестроении и судостроении [7]. Поэтому его использование в качестве материала матрицы можно считать наиболее перспективным.

Бор является материалом с самым большим сечением захвата нейтронов, порядка 4000 барн ($4 \cdot 10^{-24}$ см²), что делает его одним из перспективных материалов для применения в качестве радиационно-стойкого наполнителя металлокомпозита. Борные волокна, помимо защитных радиационно-стойких свойств, отличаются высокой прочностью и высоким модулем упругости. Поэтому их применение в металлокомпозите не только повысит радиационно-стойкие характеристики, но и придаст композиту высокие прочностные свойства [8]. Волокна получают методом химического осаждения бора из газовой фазы в реакторе на тонкую нить-подложку, чаще всего из вольфрама, называемую керном [9].

Вольфрам – металл с одной из самых высоких плотностей (19,25 г/см³), высоким атомным номером и, следовательно, пригодный для защиты от ионизирующего излучения. Однако при этом взаимодействии следует учитывать возможное образование вторичных электронов [10].

Таким образом, композиционный материал с матрицей из алюминиевого сплава АМгб, армированной борными волокнами с вольфрамовым керном, является наиболее подходящим для защиты жизненноважных элементов научно-исследовательского оборудования в различных сферах: робототехнике, медицине, атомной промышленности, авиации, при проектировании и производстве контейнеров для радиоактивных отходов и пр.

Данная работа посвящена исследованию структуры и состава радиационно-стойкого металлического композита АМгб-В, полученного с использованием сложной схемы армирования.

Материалы и методы

Волокнистый композиционный материал АМгб-В изготавливался согласно типовой схеме осаждения-напыления газотермическим методом, при котором на непрерывное борное волокно с вольфрамовым керном, намотанное с заданным шагом на специальную цилиндрическую оснастку (барабан) при помощи плазменного напыления, наносится сплав АМгб.

Данный метод обладает важными преимуществами:

- незначительным разупрочнением армирующей фазы (поскольку волокно бора не подвергается высокому термическому воздействию и механическим нагрузкам);
- максимально равномерным распределением волокон в объеме матрицы.

Суть процесса плазменного напыления заключается в следующем: матричный материал в виде проволоки при помощи специального устройства подается к плазменной струе. Под воздействием высокой температуры плазменной струи (порядка 15000 К) проволока расплавляется и, захваченная потоком плазмообразующего газа (аргона), направляется на поверхность закрепленного на

оснастке армирующего волокна. При контакте частицы матричного материала надежно скрепляются с волокнами.

В результате плазменного напыления получается лента-полуфабрикат волокнистого композиционного материала. Она достаточно технологична и поддается обработке резанием. Нарезав ленту-полуфабрикат на необходимое количество отрезков и уложив в пакет (сборка, при которой ленты укладываются друг на друга), можно регулировать толщину итогового композиционного материала. Также в процессе сборки пакета ленту-полуфабрикат можно нарезать с заданным углом армирующего компонента, что позволяет получать композит со сложной схемой армирования. Конечным этапом получения волокнистого металлокомпозита является горячее прессование. [11] Схематичное изображение внешнего вида композита, изготовленного в соответствии с предложенной схемой армирования, представлено на рис. 1 на примере образца с укладкой $0/90^\circ$.

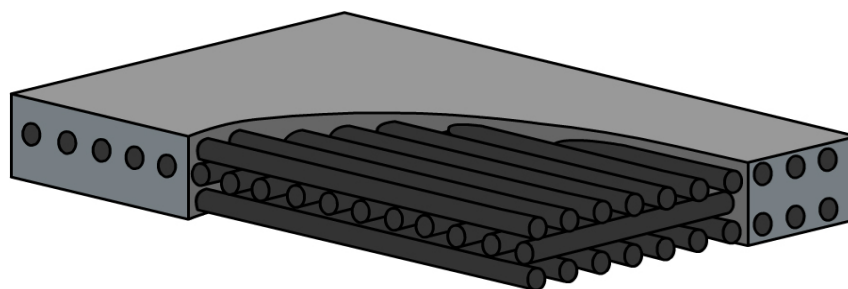


Рис. 1. Пример схемы армирования волокнистого металлокомпозита с укладкой $0/90^\circ$

В качестве матричного материала выбран алюминиевый сплав марки АМг6 в виде проволоки, изготовленной в соответствии с ГОСТ 7871-75. Обычно проволока из сплава этой марки применяется как расходный материал при сварке в производстве различных элементов в вагоностроении, кораблестроении, при изготовлении элементов лифтов. Химический состав и основные характеристики проволоки приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав сплава АМг6

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Примеси
до 0.4	до 0.4	0.5 – 0.8	0.02 – 0.1	91.1 – 93.68	до 0.1	0.0002 – 0.005	5.8 – 6.8	до 0.2	прочие, каждая 0.05; всего 0.1

Таблица 2

Основные характеристики проволоки из сплава АМг6

Предел прочности при растяжении, МПа	не менее 300
Средний диаметр, мм	1,5

Борное волокно с вольфрамовым керном часто применяется в качестве упрочняющего элемента в составе композитов. Крупные объемы волокон используются при получении различных лент-полуфабрикатов, например, с эпоксидной смолой в качестве матрицы для авиационной отрасли. Подобные ленты нашли применение в авиационной промышленности при производстве стабилизаторов, различных каркасов и крепежных элементов. Иное применение борных волокон – изготовление спортивного инвентаря [12]. Характеристики волокон приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные характеристики борного волокна

Предел прочности при растяжении, МПа	не менее 3300
Коэффициент вариации прочности, %	не более 20
Средний диаметр, мкм	135-145

Исследование границ раздела компонентов металлокомпозита проведено методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), который позволяет получать большое увеличение с сохранением высокого разрешения при прямом наблюдении. Анализ границ взаимодействия для всех 4-х образцов проводили методом СЭМ на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA LMN с использованием режимов отраженных и вторичных электронов и системы рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy. Шлифы для исследования готовили с использованием системы Struers Labopol 5.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В работе исследовано влияние различных схем армирования металлокомпозита, состоящего из алюминиевой матрицы и волокон бора с вольфрамовым керном. Были исследованы образцы с односторонним армированием; с армированием под углом 30 градусов; под углом 45 градусов; углом 90 градусов. Путем поворота и чередования ленты-полуфабриката при закладывании в заготовку достигалось наведение определенного угла при армировании композиционного материала. Таким образом, можно определить влияние сложноуглового армирования на радиационно-стойкие свойства композиционного материала [14].

Для получения образцов металлокомпозита с разными углами армирования: «0 градусов», «0/30 градусов», «0/45 градусов», «0/90 градусов» использовали следующие способы:

– «0 градусов» лента-полуфабрикат укладывалась в заготовку последовательно, без поворота;

– образцы металлокомпозитов «0/30 градусов», «0/45 градусов» и «0/90 градусов» ленты-полуфабрикаты укладывались в заготовку последовательно по следующей схеме – 2 ленты без поворота, затем 2 ленты с поворотом на заданный угол.

Таким образом, были изготовлены 4 образца толщиной ~2,3 мм. Все образцы композиционного материала получали с использованием одинаковых режимов горячего прессования. Объемная доля армирующих волокон по отношению к материалу матрицы составила 50/50%.

Для оценки возможного взаимодействия компонентов композиционного материала были проведены исследования границы раздела и определение глубины диффузии компонентов при нагреве (рис. 2).

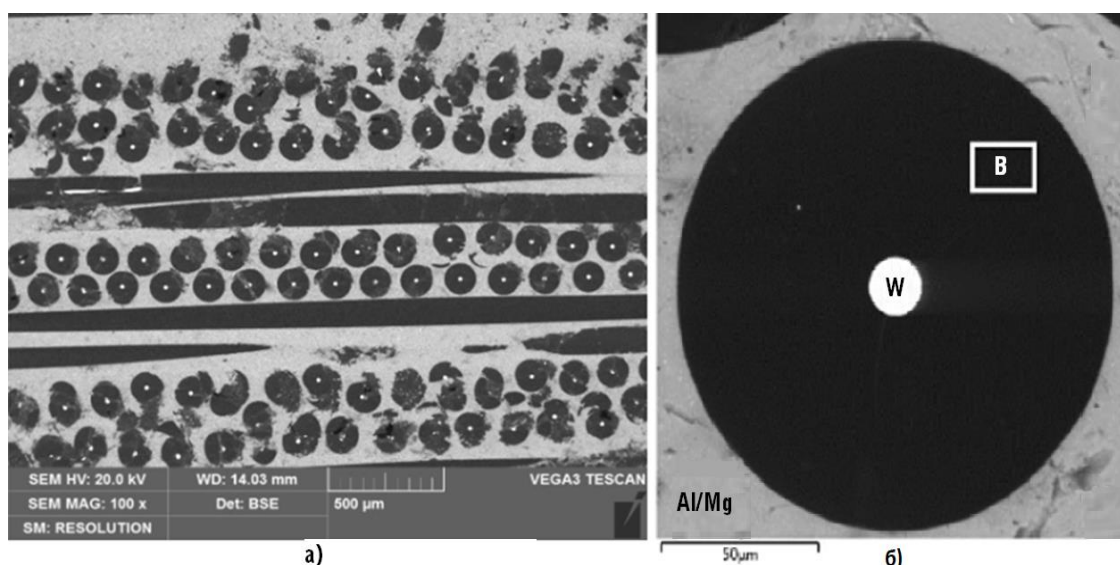


Рис. 2. Микроструктура полученных образцов: а) поперечное сечение образца; б) единичное волокно с вольфрамовым керном в алюмомагниевои матрице

Совместное использование СЭМ и спектрального анализа рентгеновского излучения, возбужденного электромагнитным потоком, позволило точно изучить химический состав образца. [13]. При этом отмечено, что схема армирования не оказывает влияния на диффузионное взаимодействие компонентов материала при выбранном режиме прессования. Поэтому детальное исследование проводили для образца с однонаправленной укладкой волокон (0°).

На первом этапе проводили СЭМ-анализ состава границы раздела бор-вольфрам. В результате было выявлено диффузионное взаимодействие между компонентами (рис. 3-4 и табл. 4).

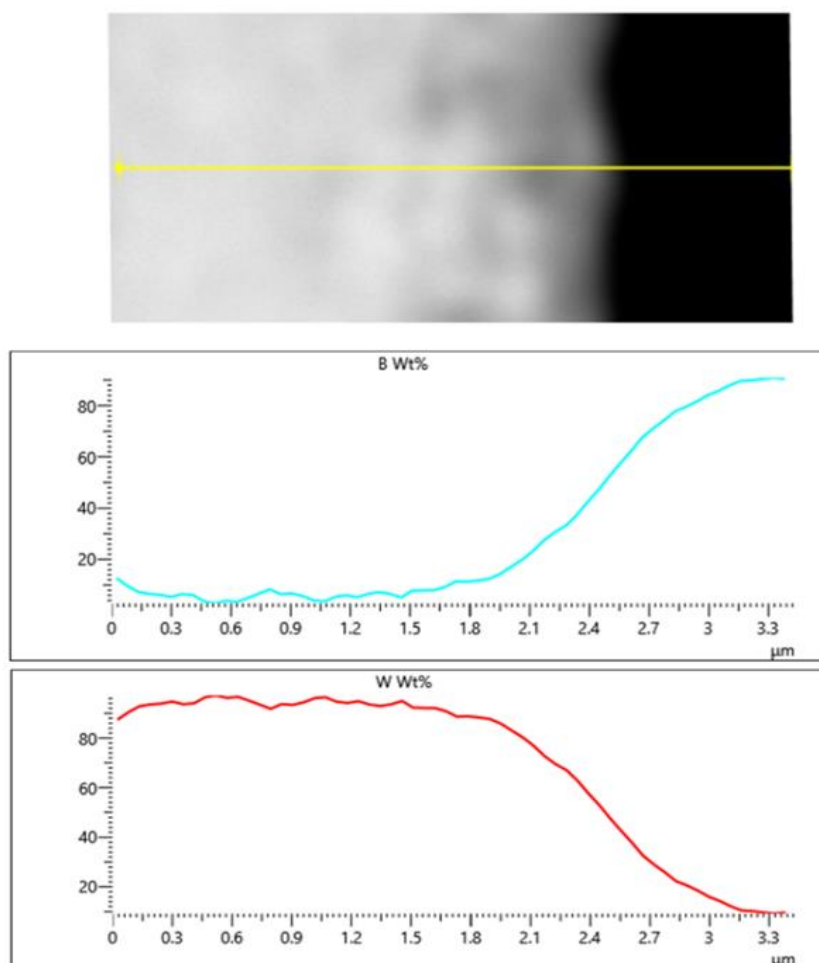


Рис. 3. Распределение химических элементов по профилю вольфрам-бор, СЭМ

Учитывая, что температура прессования была выше 500 °С, и сопоставив это с диаграммой состояния вольфрам-бор [15] (рис. 5), было сделано предположение, что взаимодействие происходит при более высокой температуре, а не при температуре горячего прессования. Скорее всего, это возможно при получении самого бор-вольфрамового волокна в процессе газозафазного осаждения при температуре примерно 1400 °С.

Таблица 4

Данные МСРА по спектрам рис. 3

Spectrum Label	B	W	Total
S1	71,06	28,94	100
S2	63,99	36,01	100
S3	65,51	34,49	100
S4	–	100	100
S5	72,38	27,62	100
S6	71,03	28,97	100
S7	100	–	100

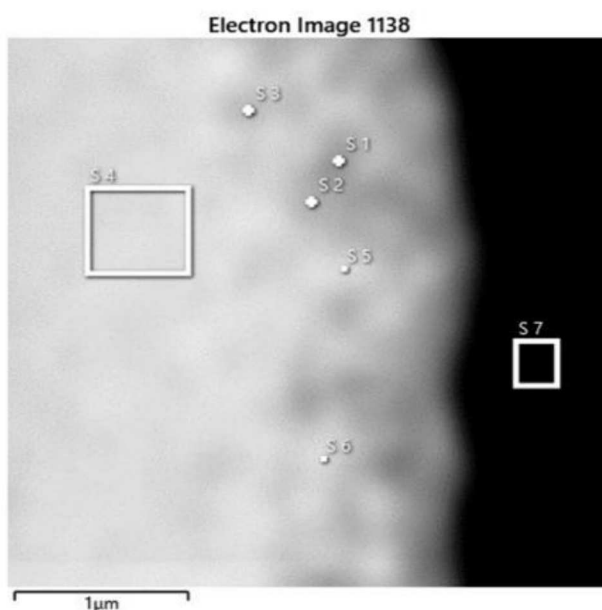


Рис. 4. Точки проведения анализа состава в области W-B

Анализ результатов, представленных на рис. 3-4 и в табл. 4, показал, что глубина зоны диффузионного взаимодействия составляет примерно 1 мкм. По-видимому, это не является критичным и не сможет оказывать существенного влияния как на механические свойства, так и на радиационную стойкость композиционного материала.

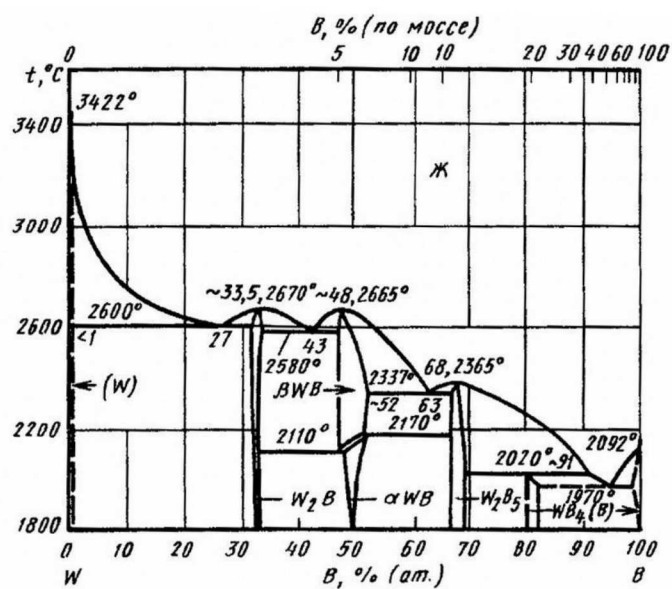


Рис. 5. Диаграмма состояния вольфрам – бор [15]

На втором этапе проводили исследование границы раздела между армирующим волокном бора и алюминиевым сплавом АМгб. Результаты представлены на рис. 6.

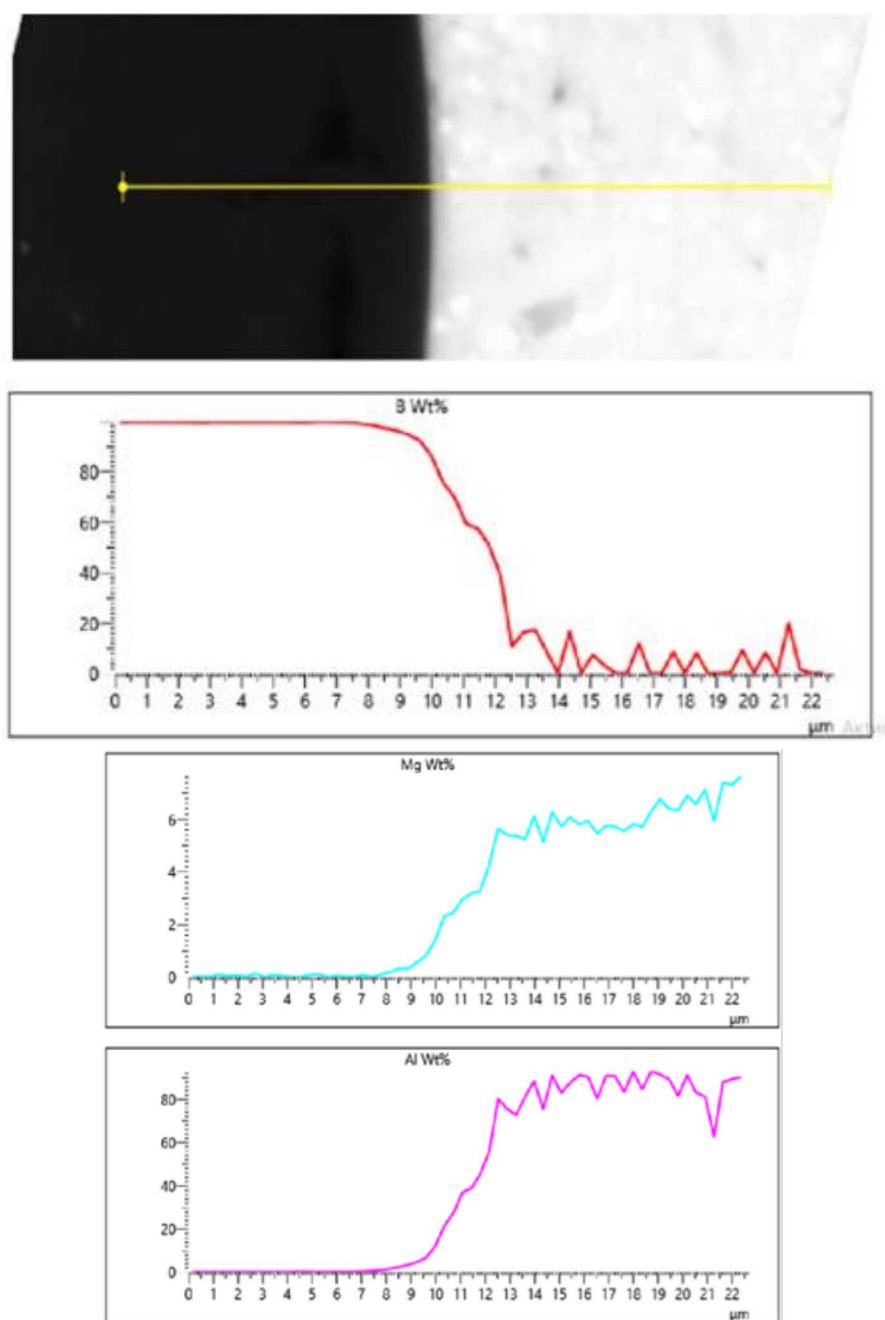


Рис. 6. Распределение химических элементов по профилю бор-АМгб, СЭМ

Анализ зависимости, представленной на рисунке 6, показал, что наблюдается диффузия бора как в магний, так и в алюминий, что, по-видимому, происходит при температуре прессования. При этом отмечено, что диффузия бора в магний идет гораздо интенсивнее, чем в алюминий, но, учитывая, что содержание магния составляет примерно 5-6 масс %, данное взаимодействие не должно оказывать значительного влияния на прочность и радиационную стойкость композиционного материала. Взаимодействие с алюминием менее интенсивное и глубина его диффузии составляет примерно 6 мкм, что согласуется с диаграммой состояния алюминий-бор [14], приведенной на рис. 7.

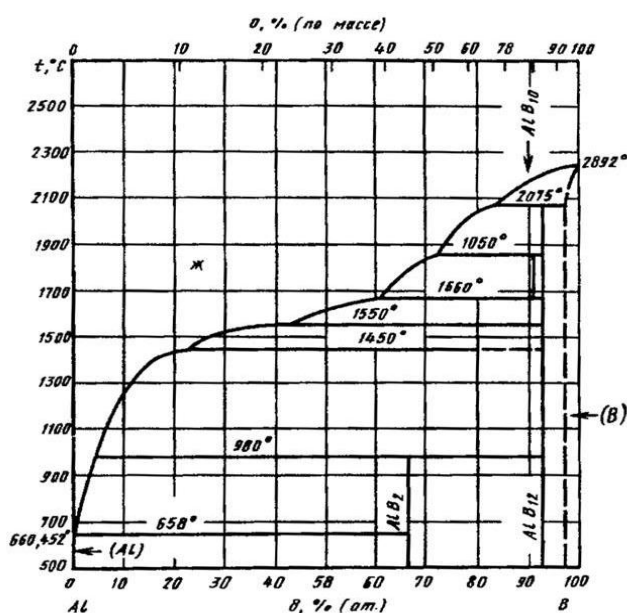


Рис. 7. Диаграмма состояния алюминий – бор [15]

Как видно из диаграммы, взаимодействие начинается уже при температуре примерно 500 °С и увеличивается с ее ростом.

Проведенные СЭМ-исследования показали, что при горячем прессовании композиционного материала при температуре до 500 °С не происходит взаимодействия на границе раздела бор-вольфрам, но при этом происходит образование боридов магния и алюминия на границе раздела бор/алюминий - магний. Однако следует отметить, что диффузионное взаимодействие незначительное и предположительно не должно оказывать влияния на прочностные и радиационные характеристики, зависящие преимущественно от свойств борного волокна.

Выводы

В рамках настоящего исследования получены и исследованы методами СЭМ образцы металлического волокнистого композиционного материала, армированного волокном В/В по специально разработанной схеме армирования с алюминиевой матрицей (АМг6):

- С односторонним армированием;
- С армированием под углом 30 градусов;
- С армированием под углом 45 градусов;
- С армированием под углом 90 градусов.

Установлено, что при выбранном режиме прессования происходит взаимодействие армирующего волокна с матричным материалом.

Данное исследование является предварительной стадией перед изучением характеристик радиационной стойкости композиционного материала, а именно

зависимости возможного изменения его структуры при облучении электронами от схемы армирования. А это, в свою очередь, влияет как на глубину проникновения радиационного излучения, так и на градиентную деградацию композиционного материала по толщине или на ее отсутствие.

В дальнейшем планируется проведение исследований прочностных свойств полученного материала, его теплопроводности и радиационной стойкости. Также будут проведены эксперименты для оценки коэффициента ослабления и определения других физико-механических свойств, включая исследования структуры.

Список литературы

1. Абагян А.А. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // *Атомная энергия*. – 1986. – Т. 61, Вып. 5. – С. 301-320
2. Овчинников В.В., Батанов А.Ф., Мингалеев С.Г. Роботы в Чернобыле // *Технологии гражданской безопасности*. 2019. №4 (62). С. 71-78.
3. Васильев В.В, Протасов В.Д., Болотин В.Д. и др. *Композиционные материалы: справочник*. – М. Машиностроение. – 1990. – 512 с.
4. Singh J., Chauhan A. Characterization of hybrid aluminum matrix composites for advanced applications – A review // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2016. – Vol. 5, Issue 2. – P. 159-169.
5. Irick V., Gordon B. *MetPregTM: Metallic prepregs for the composites industry* // *SAMPE Journal*. – 2004. – 40 (2). – P. 8-15.
6. Комаров В.А., Черняев А.В. Сравнительный анализ различных подходов к проектированию структур тонкостенных элементов из композиционных материалов // *Вестник СГАУ*. – 2009. – №1. – С. 171-179.
7. Сплав АМг6: характеристики // *Metalinox* URL: <https://metalinox.ru/marochnik-stali/alyuminiy-splav-alyuminiya/splav-amg6/> (дата обращения: 13.06.2024).
8. Олешко А. Ю. Управление качеством волокнистых металлокомполитов на основе процессноориентированных моделей регулирования технологических операций производства продукции: дис. канд. техн. наук: 05.02.23. - Королев, 2020. – 147 с.
9. *Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов* // *Волокна, борные* URL: <https://thesaurus.rusnano.com/wiki/article647> (дата обращения: 14.06.2024).
10. Shultis J.K., Faw R.E. *Radiation Shielding and Radiological Protection* // *Handbook of Nuclear Engineering*. Boston, MA: Springer US, 2010. P. 1313–1448.
11. Кулик В.И., Нилов А.С. *Композиционные материалы с металлической матрицей: учебное пособие*. - СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2020. – 69 с.
12. Нуми Борные // ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС» URL: <https://eos.su/ru/products-tech/38-products/191-razlichnaya-produktsiya.html> (дата обращения: 20.12.2023).
13. А.С.Илюшин, А.П.Орешко. *Введение в дифракционный структурный анализ*. – М.: физический факультет МГУ – 2008. – 335 с.
14. Alves de Sousa F.K., Ujike I., Kadota A. Effect of different fiber angles for composite material with fiberglass reinforced on mechanical properties // *International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering*. – 2016. – Vol. 4, Issue 1.
15. Лякишев Н.П. (ред.). *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3 т.* – Т. 1 – М.: Машиностроение. – 1996. – 992 с.