



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Институт структурной макрокинетики РАН
CIRIMAT (Центр межуниверситетских исследований материалов,
г. Тулуза, Франция)**

**Международный центр материаловедения Карагандинского
государственного технического университета
Восточно-Казахстанский государственный технический университет
(г. Усть-Каменогорск)**

**Комитет по образованию и делам молодежи администрации
Алтайского края**

**Алтайское отделение Международной Академии наук высшей школы
Сибирское отделение Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова
УНПЦ «Композит» АлтГТУ**

**Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова**

**ТРУДЫ XVI МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ
«ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ И ПРИКЛАДНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»**

ISBN 978-5-7568-1315-9



**Изд-во АлтГТУ
Барнаул • 2019**

УДК 620.22-419.8

Труды XVI Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» [Электронный ресурс] / Под ред. В. Б. Маркина ; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 9,90 МБ). – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2019. – Режим доступа : https://journal.altstu.ru/konf_2019/2019_1/22/. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7568-1315-9

В сборнике представлены избранные статьи участников XVI Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение», прошедшей в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова в сентябре 2019 г. Выпуск сборника и его редакция проведены в соответствии с решением оргкомитета конференции.

Главный редактор сборника доктор технических наук, профессор В. Б. Маркин – председатель оргкомитета конференции.

Ответственный редактор сборника кандидат технических наук, доцент Е. А. Головина

ISBN 978-5-7568-1315-9

© Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, 2019

Уважаемые читатели!



В этом сборнике представлены труды XVI Международной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение», проводимой по плану Министерства образования и науки Российской Федерации в Алтайском государственном техническом университете имени И.И. Ползунова.

Одним из перспективных направлений науки и техники XXI в. по праву считается сфера высоких технологий, базирующаяся на современном материаловедении. Нельзя представить технический прогресс без расширения класса конструкционных материалов, которые, как правило, появляются в результате исследований, проводимых учеными-материаловедами на различных уровнях: макро-, микро-, мезо- и нано. Совокупность фундаментальных и прикладных исследований позволяет решать сложные материаловедческие проблемы, приводить их на уровень разработки и инновационного внедрения технологических решений. В последние годы интересы ученых направлены на передний край высокотехнологичных приоритетных направлений, к которым относятся развитие нанотехнологий и наноматериалов, формирование и развитие инфраструктуры nanoиндустрии. Результатом таких исследований можно считать новые рецептуры высококачественных сталей, новые технологии создания композиционных материалов и покрытий, успехи медицинской техники, электроники и компьютерной техники.

Этому направлению соответствует и деятельность научных школ Алтайского государственного технического университета, признанного центра материаловедения не только в нашей стране, но и за рубежом. Синтез фундаментальной и прикладной направленности материаловедения отражен в статьях, опубликованных в этом сборнике.

Хотелось, чтобы разработки, представленные молодыми и маститыми учеными на нашей конференции, прошли по пути от научной до «потребительской» реализации идеи, что особенно важно сейчас, когда решен вопрос о коммерциализации вузовской науки и страна ждет от всех нас инновационного развития при создании новых материалов, изделий и образцов современной техники.

Желаю творческих успехов руководителям научных школ и авторам представленных в сборнике публикаций.

**Доктор технических наук,
профессор**



В. Б. Маркин

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛЯННЫХ И БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН

В. Б. Маркин, Н. Н. Ниёзбеков

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

В разных сферах индустрии и техники, в т. ч. в таких, как ракетостроение, судостроение и авиация, все обширнее применяются высокопрочные композитные материалы. Эффективность их использование – передача нагрузки, интенсивное нагружение и наиболее полное применение свойств армирующих волокон возможны только при достаточно надежной взаимосвязи между элементами, обеспечиваемой только в случае необходимой адгезионной прочности в системе «волокно – матрица». В связи с этим вопросы адгезии матрицы к армирующим материалам, интенсификации и направленного изменения адгезионного взаимодействия имеют основное значение при формировании полимерных композиционных материалов. Регулирование данного взаимодействия и изучение его природы можно считать актуальной задачей, решение которой возможно при разработке способов физических влияний на межфазной границе волокно-матрица, которые способны улучшить одно из важнейших свойств, определяющих композит. Хорошо известно модифицирование свойств волокнистых наполнителей в среде так называемой «холодной» плазмы, к которой причисляют плазму тлеющего разряда пониженного давления и плазму атмосферного давления, иницируемую слаботоковыми поверхностно барьерным и коронными разрядами. Эти процессы достаточно давно применяются в различных отраслях исследований.

Ключевые слова: *волокнистые наполнители, базальтопластик, базальтовые волокна, стеклянные волокна, низкотемпературная плазма.*

В качестве объектов исследования были выбраны непрерывные стеклянные и базальтовые волокна (марки Rablon 1200 текс), т. к. пластики на их основе являются наиболее перспективными для применения в автомобилестроении и других отраслях промышленности [2].

Обработка предварительно отмытых от технологических примесей и загрязнений волокон проводилась в поле низкотемпературной высокочастотной плазмы в соответствии с разработанной методикой. В качестве прививаемых агентов были выбраны соединения, содержащие гидроксильную группу. Выбор агентов этого типа обусловлен тем, что величина равновесной адсорбции эпоксидных по-

лимеров на поверхности, содержащие, гидроксильные группы малоизвестны. Модификация волокон проводилась на лабораторной плазменной установке, в состав которой входит реакционный сосуд типа «колокол» (объем реактора равен $2.85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$), высокочастотный генератор, вакуумный насос (ротационный), емкость с прививаемым соединением [1].

Образцы для обработки помещались в реакционный сосуд, что обеспечивало обработку волокон в продуктах плазмы. С помощью форвакуумного насоса давление в реакционном сосуде откачивали до определенной величины. Разряд генерировался с помощью прибора УВЧ-66. Образцы обрабатывали в плазме пониженного

давления до 150 мин. Параметры процесса были подобраны из анализа литературных данных, которые были скорректированы в процессе экспериментальных исследований. Непосредственно после обработки были приготовлены образцы стеклопласти-

ков и базальтопластиков на основе эпоксидного связующего ЭДТ-10. Полученные образцы подвергались испытанию на растяжение на установке «Instron». Схема образца для испытания представлена на рисунке 1.

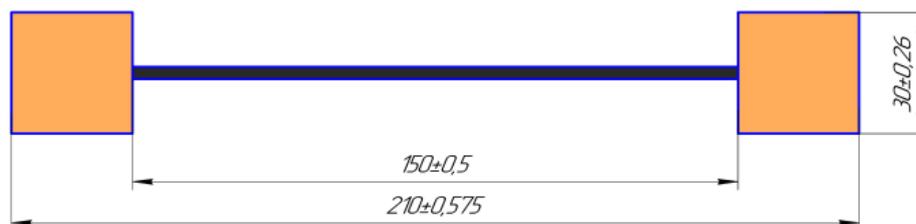


Рисунок 1 – Схема образца для испытания

Для проведения анализа структуры полученных армированных пластиков проведены оптические микро-

скопические исследования, результаты которых приведены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Фотографии армированного стекловолокном пластика:
а) до модификации; б) после модификации в течение 60 минут

На представленных микрофотографиях отчетливо видно, что после обработки в плазме стекловолокна произошло изменение окраски волокон. Данное явление связано с появлением центров окраски, которые являются точечными дефектами, имеющими лучшую способность к взаимодействию со связующим при пропитке.

На поверхности армирующих волокон заметны следы эрозии, что, возможно, приводит к дополнитель-

ному возрастанию адгезии за счет появляющейся «механической» адгезии.

Практически во всех работах, посвященных изучению влияния плазменного воздействия на армирующие материалы, уделяется особое внимание изменению прочностных свойств модифицированных материалов. Важность этой проблемы обусловлена тем, что, обрабатывая материал в режиме плазменного травления, неизбежно связанного с деструкцией поверхности волокна, можно вызвать

необоснованно высокое снижение прочности материала. Поэтому во всех исследованиях процессов плазменной модификации материалов в виде волокна, ровницы, пряжи или ткани обязательно проводится контроль прочностных характеристик обрабатываемых образцов. После испытания строились графики зависимости прочности и модуль упругости стеклянных и базальтовых волокон от времени (рисунки 3, 4). Длительное воздействие «холодной» высокочас-

тотной плазмы практически не оказывает влияния на прочностные и упругие характеристики армирующих минеральных волокон. В пределах погрешности можно считать, что стеклянные и базальтовые волокна слабо чувствительны к электронам и ионам плазмы невысокой энергии. Следовательно, необходимо выяснить роль плазмы в формировании поверхностных эффектов, способных повлиять на адгезионные процессы при контакте с полимерным связующим.

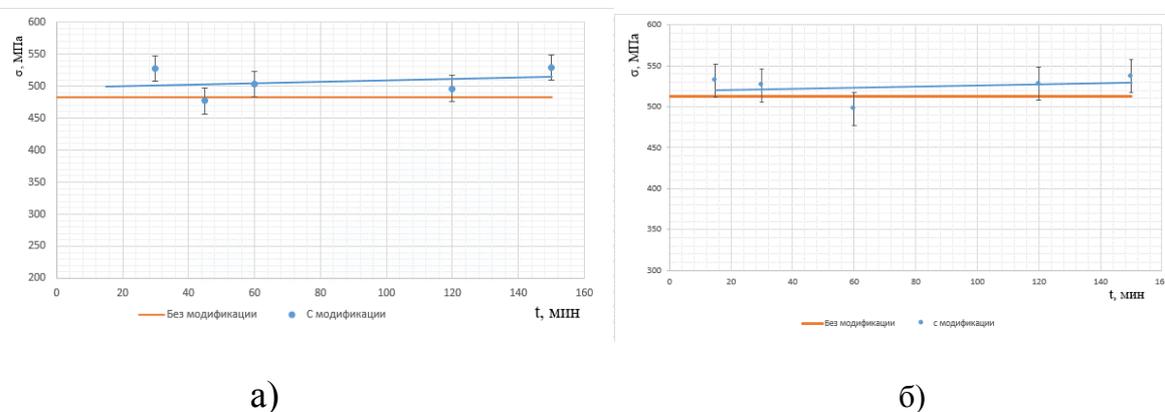


Рисунок 3 – График зависимости предела прочности волокон от времени выдержки в плазме воздуха, где а – стеклянное волокно; б – базальтовое волокно

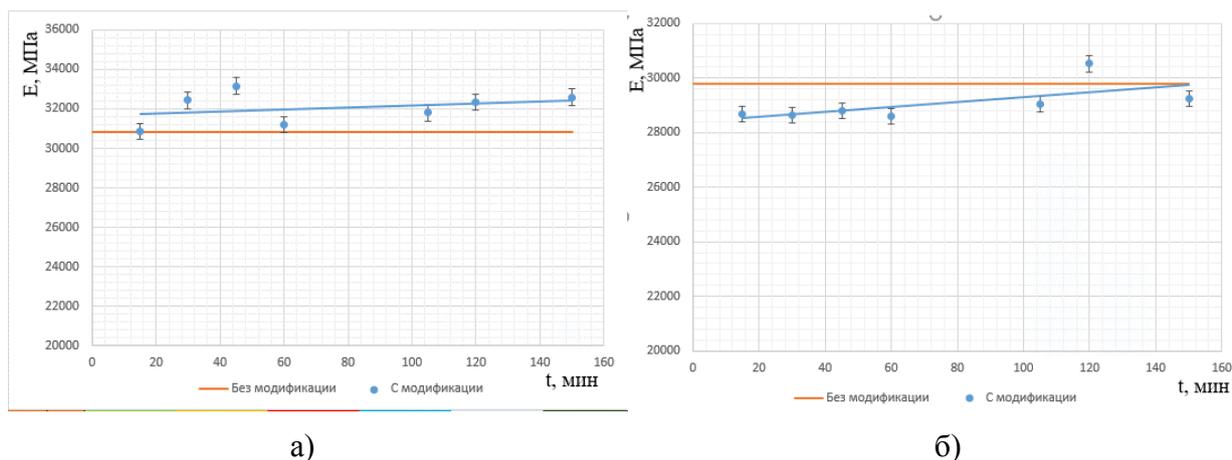


Рисунок 4 – График зависимости модуля упругости от времени выдержки в плазме, где а – стеклянное волокно; б – базальтовое волокно

Есть сведения в некоторых литературных источниках, что снижение

прочности после модификации может быть обусловлено попаданием элек-

трона в структуру обрабатываемого материала и в конечном итоге должно отслеживаться существенное снижение физико-химических характеристик материала. Так как этого не наблюдается, то наиболее возможными кажутся предположения, что модификация волокна проходит под воздействием ионов, активных молекул и атомов, или ультрафиолетового излучения, или всех частиц одновременно только в приповерхностном слое [4, 6].

Эффективность применения плазменной обработки доказана на примере обработки двух типов армирующих материалов, отличающихся друг от друга химическим составом и активностью поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлин, Ю. А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике / Ю. А. Михайлин. – Санкт-Петербург : Научные основы и технологии, 2013. – 720 с.

2. Технология склеивания изделий из композиционных материалов / Н. А. Алексеева [и др.] – Казань : КНИТУ, 2014. – 309 с.

3. Ананьева, Е. С. Плазмохимическая модификация поверхности / Е. С. Ананьева, С. В. Ананьин // Ползуновский вестник. – Барнаул : [б.н.], 2009 г.

4. Анаьин, С. В. Методы экспериментальной физики для исследования взаимодействия на межфазной границе в полимерных композиционных материалах [В Интернете] // <http://www.dissercat.com/content/metody-eksperimentalnoi-fiziki-dlya-issledovaniya-vzaimodeistviya-na-mezhfaznoi-granitse-v-p>. – 2001.

5. Бениг, Г. В. Ненасыщенные полиэферы / Г. В. Бениг. – Москва : Химия, 1968. – 250 с.

6. Маркин, В. Б. Радиационные процессы в технологии полимерных композиционных материалов / В. Б. Маркин. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2018. – 250 с.

7. Бобрышев, А. Н. Полимерные композиционные материалы / А. Н. Бобрышев, В. Т. Ерофеев, В. Н. Козомазов. – Москва : АСБ, 2013. – 480 с.

© Маркин В. Б., Ниёзбеков Н. Н.

УДК 666.193.2

СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛ – КОМПОЗИТ В СОВРЕМЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

В. Б. Маркин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Снижение металлоемкости и материалоемкости в конструкциях современной техники связано с возможностью применения полимерных композиционных материалов. Зачастую полная замена металлов на композиционные материалы связана с большими техническими и технологическими проблемами, поэтому актуальной является задача разработки стыковочных элементов, осуществляющих связь металлической и композитной частями изделия. Рассмотрены возможные способы соединения металлов и композитов в конструкциях, их особенности в передаче нагрузок. Для высоконагруженных конструкций целесообразно использование сплошных соединений, в которых важная роль отводится адгезионным свойствам контактирующих компонентов. На примере изделий, используемых в нефтедобывающей отрасли, показана возможность замены стальных штанг на стеклопластиковые однонаправленные стержни, получаемые методом пултрузии. Снижение веса изделий наряду с повышенными антикоррозионными характеристиками является результатом такой замены.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, пултрузия, металлоемкость конструкций, стыковочные элементы металл-композит, нефтедобывающая промышленность.

В настоящее время трудно найти такую отрасль машиностроения, которая не нуждалась бы в снижении материалоемкости и особенно металлоемкости изделий. Хорошо известно, что применение полимерных композиционных материалов приводит к существенному снижению металлоемкости и, как следствие, массы изделия. Это сопровождается повышением коррозионной стойкости конструкций, сокращением сроков на их ремонт, а также способствует уменьшению энергоемкости производства и снижению его экологической опасности, особенно если она связана с загрязнением атмосферы. Однако полная замена металлических, чаще всего стальных, элементов конструкций на композитные представляется довольно сложной задачей, связанной с тех-

нологическими аспектами изготовления стыковочных элементов. Поэтому разработка таких элементов для совершенствования изделий современной техники представляется важной и актуальной задачей.

Отмеченные выше моменты играют существенную роль в некоторых направлениях машиностроения.

1. Нефте- и газодобывающие отрасли. Металлоемкость производства и оборудования очень высока, что связано с необходимостью использовать металлические каркасы буровых сооружений, большое количество стальных труб, мощное насосное оборудование, особенно для погружных насосных систем и т. п.

2. Добывающие отрасли, использующие шахтные методы добычи полезных ископаемых и угля. Шахтные

крепи, поддерживающие боковые стены и потолок шахтных проемов, большое количество рельсовых коммуникаций, оборудование для подачи воздуха, удаления воды и т. д.

3. Производство металлообрабатывающих станков, станины которых, как и прочие агрегаты изготавливаются исключительно из металлов.

4. Судостроение и автомобилестроение потребляют в основном традиционные материалы, т. е. металлы и их сплавы.

Преимущества композиционных материалов над традиционными определяются, прежде всего, их сравнительно невысокой плотностью (стеклопластики и базальтопластики – 2400–2600 кг/м³, углепластики – 1400–1600 кг/м³, органоластики – 1200–1500 кг/м³). Высокие прочностные характеристики полимерных определяют удельные значения прочности и жесткости, которые на порядок выше показателей традиционных материалов.

Требования, предъявляемые к кон-

струкциям соединительного узла металл – композит, характер нагрузок, действующих на соединение, зависят, прежде всего, от назначения и условий эксплуатации изделия. В соответствии с характером передачи нагрузок соединения подразделяются на стыковочные и поддерживающие [1]. К первым относятся механические и комбинированные соединения металл-композит, являющиеся наиболее распространенными конструкциями. В этих конструкциях все нагрузки, приходящиеся на стык, воспринимаются металлическими элементами и передаются на корпус изделия через композиционный материал. Группу поддерживающих соединений представляют конструкции, основная особенность которых связана с передачей напряжений на стыке непосредственно адгезионными прослойками. На рисунке 1 представлены характерные конструкции, относящиеся к этим типам соединений.

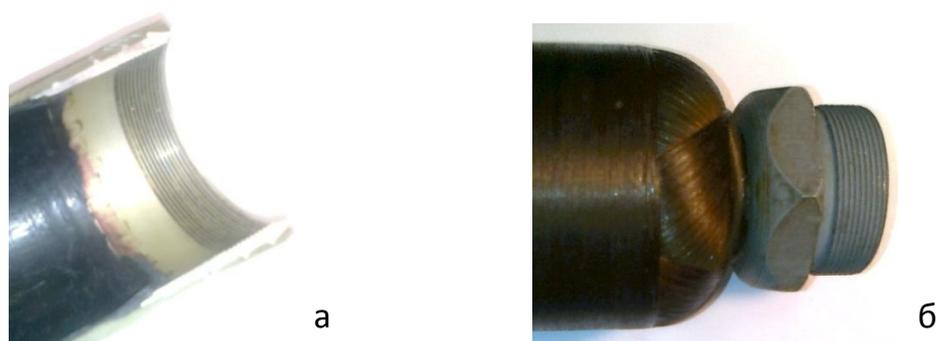


Рисунок 1 – Типы соединений металл-композит в конструкциях, где а – внутренний металлический резьбовой элемент в стеклопластиковом корпусе; б – металлический фланец композитного баллона давления

Рациональное проектирование соединительных элементов с целью снижения массы конструкции связа-

но, прежде всего, с анализом факторов, влияющих на их несущую способность [2].

Конструктивные факторы влияют на выбор класса соединения, геометрических параметров, материала крепежного элемента, подкрепления в зоне стыка и т. д. Наиболее важными конструктивными факторами для сплошных соединений являются длина адгезионной прослойки, толщины соединяемых элементов, жесткости адгезионной прослойки и соединяемых элементов.

Технологические факторы определяют структурные параметры композиционного материала, его физико-механические характеристики, остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления соединения.

Эксплуатационные факторы непосредственно зависят от уровня и спектра внешних нагрузок, времени и температуры эксплуатации, ресурса работы изделия и состояния среды (особенно наличия влаги, которая может влиять на клеевую прослойку и металлическую компоненту соединения).

Анализ конструкций, использующих композиты и металлы, показал, что для них предпочтение отдается сплошным соединениям, которые широко распространены во многих отраслях машиностроения благодаря созданию конструкционных клеев на основе синтетических полимеров, зачастую являющихся компонентами полимерного связующего, применяемого в композиционном материале. Клеевые соединения обладают рядом преимуществ:

- способны соединять самые разнообразные материалы, существенно

отличающиеся по своим характеристикам;

- не приводят к ослаблению соединяемых элементов конструкции;

- не подвержены коррозии, позволяют создавать герметичные узлы;

- превосходят по прочности другие соединения при работе на срез;

- способствуют снижению массы конструкции;

- позволяют технологично и быстро осуществлять сборку соединения.

Некоторые недостатки клеевых соединений, особенно малое сопротивление отдирающим нагрузкам и возможности ползучести, легко преодолимы за счет дополнительных технологических приемов [3].

В качестве примера использования адгезионного соединения металла и композита можно привести экономически обоснованную замену стальных штанг-толкателей погружного насоса, работающего в нефтяной скважине. Замена стальной штанги на однонаправленную стеклопластиковую, изготавливаемую методом пултрузии, и узлы соединения отдельных стеклопластиковых фрагментов между собой и к исполнительным механизмам изготавливаются различными способами (рисунок 2), предусматривающими увеличение площади адгезионного контакта стали и композита.

Свойства и характеристики штанг ШН-25 для погружных насосов нефтестроения приведены в таблице 1.

Полученные результаты показали, что весовое совершенство изделий из однонаправленного стеклопластика является достаточно весомым.



Рисунок 2 – Способы формирования адгезионного (клевого) соединения стали и однонаправленного стеклопластика в штангах погружного насоса, где а – общий вид элемента соединения; б – адгезионно-клеевое соединение, уплотняемое внешним клеевым составом; в – адгезионное соединение, уплотняемое резьбовой втулкой; г – прямое адгезионное соединение без стальной муфты

Кроме того, необходимо учитывать и увеличение срока службы таких изделий в условиях эксплуатации в средах с повышенным содержанием

корродирующих реагентов при высоких температурах [4].

Работы в направлении разработки таких конструкций ведутся как в России, так и за рубежом. Большая часть работ посвящена способам повышения адгезионной прочности в соединении композита и металла. Это может происходить по нескольким направлениям:

- подбор состава металла или его специальная подготовка (чаще всего, сплава) для усиления смачиваемости поверхности жидким связующим композита при формировании контакта;

- модификация связующего включением в его состав компонентов, обеспечивающих лучший эффект взаимодействия с поверхностью металла;

- модификация поверхности армирующих композит волокон с целью увеличения адгезии на границе раздела волокно – матрица.

Таблица 1 – Основные характеристики штанг погружных насосов в расчете на 100 метров длины

Материал штанги	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, МПа	Диаметр несущего стержня, мм	Масса штанги, кг	Весовое совершенство
Сталь высокопрочная	7800	1520	40	400	1
Однонаправленный стеклопластик	2100	1750	25	103	3,88

Поверхность металлического фрагмента необходимо очистить от технологических загрязнений и масел, а также провести поверхностную подготовку для достижения необходимой точности механической обработки и снижения оксидной пленки.

Модификация связующего может снизить напряжение на границе раздела металл-композит вследствие появления промежуточного слоя (рисунок 3). Модуль упругости металла E_f , модуль упругости связующего (матрицы) E_m , E_l – модуль упругости промежуточного слоя.

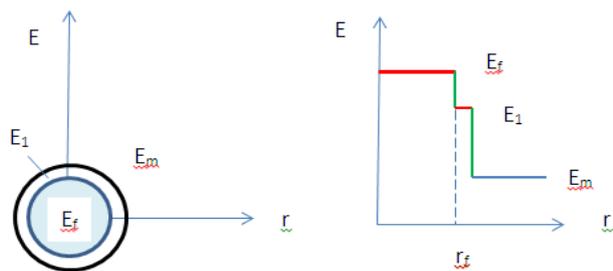


Рисунок 3 – Использование двухслойного связующего для снижения влияния границы раздела металл-связующее на свойства композиционного материала: а – схема нанесения барьерного слоя на поверхность металла; б – изменение модуля упругости от металла к матрице [5]

Модификация армирующих волокон подразумевает нанесение на их поверхность активных по отношению к связующему центров химическими или радиационно-химическими методами. Это позволяет увеличить адгезионную прочность на границе волокно – матрица до достижения оптимального взаимодействия.

С этой целью для армирующих волокон неорганического типа (стеклянные и базальтовые волокна) разработаны методики плазмохимической модификации поверхности, позволяющие варьировать взаимодействие на границе раздела «волокно – связующее» [6].

Указанные выше методы или их совокупность позволяют увеличить энергию взаимодействия компонентов, а следовательно, и адгезионную прочность границы металл – композит.

Таким образом, применение сплошных способов соединения элементов конструкций из металла и композиционного материала способствует выполнению основной задачи, связанной с высоконагруженными режимами

эксплуатации. По мнению автора, связь элементов в таких конструкциях можно варьировать за счет разработки и обоснования методов улучшения адгезии для конкретных материалов, образующих эти элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буланов, И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов : учеб. для вузов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

2. Воробей, В. В. Соединение конструкций из композиционных материалов / В. В. Воробей, О. С. Сироткин. – М. : Машиностроение, 1985. – 166 с.

3. Маркин, В. Б. Строительная механика композитных конструкций : учеб. пособие / В. Б. Маркин. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2004. – 180 с.

4. Воробей, В. В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций / В. В. Воробей, В. Б. Маркин. – Новосибирск : Наука, 2006. – 190 с.

5. Маркин, В. Б. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных материалов : учеб. пособие / В. Б. Маркин ; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016. – 144 с.

6. Маркин, В. Б. Радиационные процессы в технологии полимерных композиционных материалов / В. Б. Маркин. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2018. – 250 с.

© Маркин В. Б., 2019.

УДК 620.17: 669.24

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ДВУХСЛОЙНЫХ ЖАРОСТОЙКИХ И ЖАРОПРОЧНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Н. И. Афанасьев, О. К. Лепанова

Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН, г. Томск, Россия

Исследована эволюция структуры в двухслойных жаропрочных (Ni-12Al-5Cr или Ni-27,3Ta) и жаростойких (Ni-(19-23)- Cr, (9-11)Al- (0,15-0,4)Y) покрытиях и в поверхностных слоях сплава ЖС6У под покрытием в процессе высокотемпературных отжигов и ползучести. Нанесение дополнительного жаропрочного покрытия приводит к повышению сопротивления абляции и длительной прочности сплава.

Ключевые слова: структура, жаростойкость, жаропрочность, ползучесть

К основным проблемам материаловедения жаропрочных сплавов относится повышение их стойкости к воздействию окружающей среды. Один из путей решения этой проблемы заключается в применении защитных покрытий. Для защиты жаропрочных сплавов на основе никеля широкое применение получили покрытия на основе сплавов Ni(Co)-Cr-Al-(Y) [1]. Высокая жаростойкость этих покрытий в окислительной среде обусловлена образованием сплошной пленки стабильных окислов Al_2O_3 и Cr_2O_3 . Однако в процессе эксплуатации в результате взаимной диффузии компонентов сплава состав и структура покрытия изменяются, что приводит к снижению его защитных свойств. Изучение закономерностей деградации структуры покрытия имеет важное значение для разработки оптимальных систем защиты и методов их нанесения.

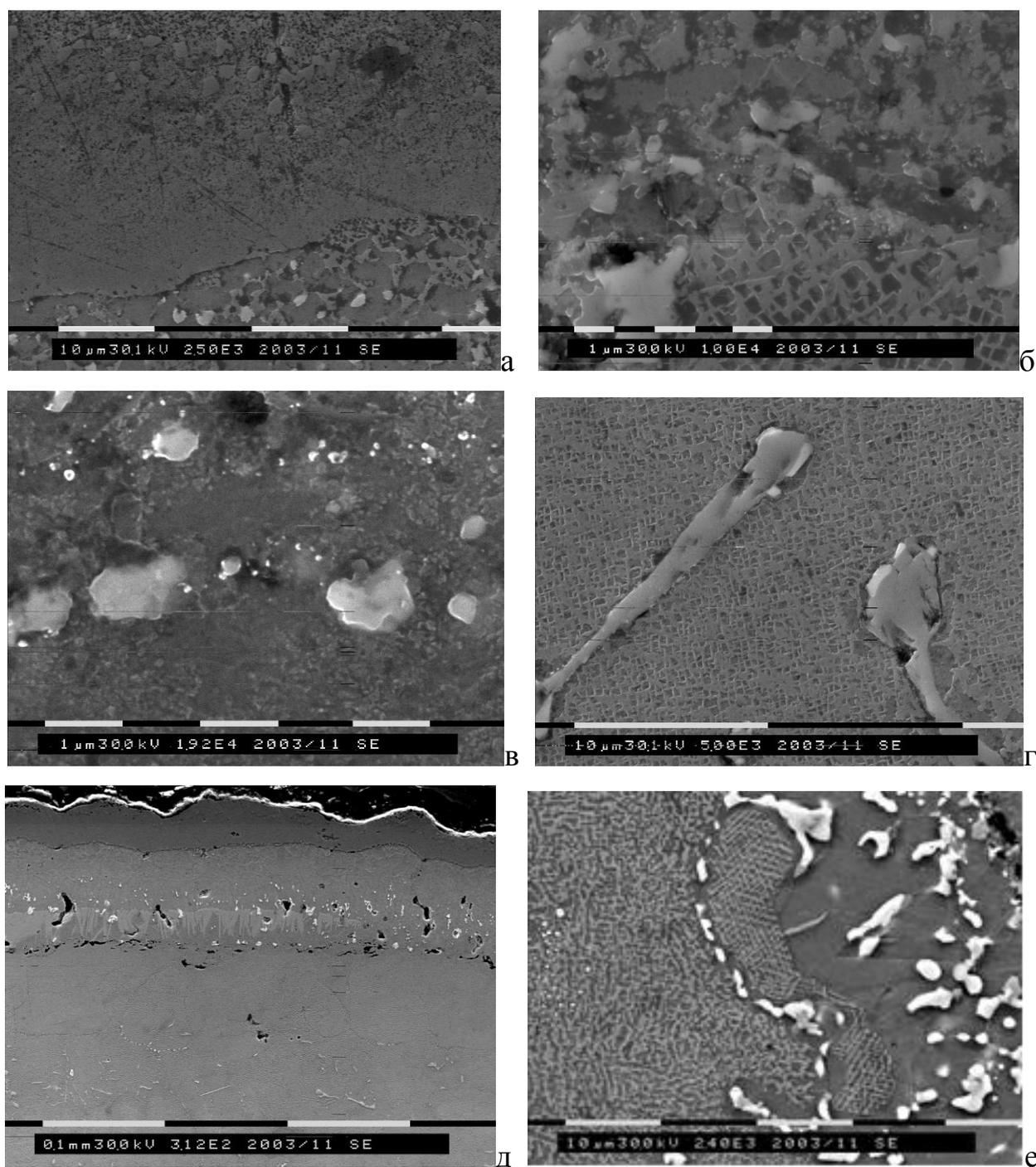
В работе [2] в сплаве ЖС6У под покрытием из сплава Ni-Cr-Al-Y после высокотемпературных отжигов и ползучести на воздухе наблюдали внутреннее окисление, что свидетель-

ствует о проникновении кислорода через жаростойкое покрытие в сплав. В настоящей работе для предотвращения внутреннего окисления и упрочнения поверхностного слоя перед нанесением жаростойкого покрытия СДП-2 (таблица 1) на сплав наносили жаропрочные покрытия различного состава методом вакуумной плазменной технологии.

Таблица 1 – Состав покрытий и сплава основы

Покрытие, сплав	Состав, вес. %
1	Ni-12Al- 5Cr
2	Ni-27,3Ta
СДП-2	Ni-(19-23)- Cr, (9-11)Al-(0,15-0,4)Y
ЖС6У	Ni-(8-9)Cr-2,4Ti-5,3Al-(9-10)Co-(1,2-2,4)Mo-10,5W-1,0Nb-0,02B-(0,18-0,2)C

Структура приповерхностных слоев сплава и покрытий приведена на рисунке 1. После нанесения покрытия имеют мелкозернистую структуру с размером зерен 0,2–0,5 мкм.



а – граница между жаростойким и жаропрочным покрытием 1; б – граница между покрытием 2 и сплавом; в – диффузионная зона между покрытием 2 и сплавом; г – структура сплава ЖС6У; д – общий вид двухслойного покрытия с диффузионной зоной на поверхности сплава; е – граница между диффузионной зоной и матрицей сплава после 20-часового отжига при 1273 К

Рисунок 1 – Микроструктура покрытий и сплава

После четырехчасового отжига при 1273К в покрытиях формируется микродуплексная структура с размером частиц 1–3 мкм (рисунок 1, а, б, в). Структура покрытия СДП-2 состоит из фаз γ (Ni_3Al) и γ (твердый раствор на основе никеля). В жаропрочном покрытии 1 основными являются фазы $\text{Ni}_3(\text{Al})$ и γ , а в покрытии 2- Ni_3Ta и γ . На границе между жаропрочным покрытием и матрицей и в диффузионной зоне между ними наблюдаются поры и микротрещины (рисунок 1, б, д). Количество пор в диффузионной зоне увеличивается со временем отжига и достигает максимума после 15–20 часов, когда ее рост практически прекращается (рисунок 1, д). Между покрытием СДП-2 и жаропрочными покрытиями количество пор существенно меньше, а диффузионная зона слабо выражена (рисунок 1, а, д). Наблюдается хорошо выраженная граница между покрытиями.

После длительных отжигов сплава с покрытием 2 между диффузионной зоной и сплавом образуется четкая граница, на которой наблюдается выделение более крупных частиц фазы $\text{Ni}_3(\text{AlTa})$ размером до 5–10 мкм. Образование резкой границы между сплавом и жаростойким покрытием, по-видимому, обусловлено наличием значительных термических и концентрационных напряжений в зоне диффузии, а также адсорбцией примесей.

В конце диффузионной зоны вследствие диффузии алюминия в жаропрочное покрытие 2 наблюдается выделение фазы $\text{Ni}_3(\text{AlTa})$ с ячеистой структурой (рисунок 1, е). Внутреннее окисление в сплаве под жаропрочными покрытиями не наблюдали.

В сплаве ЖС6У основными фазами являются γ (до 55 %) с размером частиц 1–2 мкм, γ и карбиды (рисунок 1, з, е). Последние имеют обычно форму пластин и стержней длиной до 20 мкм и диаметром до 5 мкм. При всех режимах термообработки топологические плотноупакованные фазы в сплаве не наблюдали.

Ширина диффузионной зоны между упрочняющим покрытием и сплавом в процессе отжига при 1273 К интенсивно растет в первые 20 часов, достигая величины 20 мкм (рисунок 2). При более длительных отжигах рост зоны практически прекращается. Кинетическая кривая роста зоны не соответствует параболической зависимости. Это может быть связано с исчерпанием легирующего элемента в покрытии, оттоком его в жаростойкое покрытие, а также с уменьшением коэффициента диффузии легирующего элемента в новой фазе по сравнению с исходной.

Это, в свою очередь, может быть обусловлено образованием пор и микротрещин в диффузионной зоне, затрудняющих массоперенос.

Скорость роста диффузионной зоны в процессе ползучести в 3–5 раз меньше, чем при отжиге без нагрузки при той же температуре (рисунок 1).

По-видимому, это связано со сжимающими напряжениями, возникающими в поперечном сечении образца в процессе ползучести. Кроме того, в процессе пластической деформации существенно изменяется состояние границ зерен [3], в частности, увеличивается их диффузионная проницаемость, что может приводить к

оттоку элементов из покрытия в сплав за счет зернограничной диффузии.

Нанесение подслоя из жаропрочных сплавов 203 и 202 повышает сопротивление ползучести сплава ЖС6У.

Сточасовая длительная прочность сплава ЖС6У с жаростойким покрытием СДП-2 при 1273 К составляет 170 МПа.

Жаропрочное покрытие 202 увеличивает время до разрушения при тех же условиях до 130 часов, а покрытие 203 до 120. Жаропрочные покрытия обладают более высокой стойкостью к абляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаропрочные сплавы для газовых турбин / Под редакцией Р. Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1981. – 480 с.

2. Структура и свойства жаростойких покрытий из сплава Ni-Cr-Al-Y / М. К. Бушнев [и др.] // Известия ВУЗов. Физика, 1986. – Т. 29. – № 12. С. 22–25.

3. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Под ред. Ю. Р. Колобов и Р. З. Валиев. – Новосибирск. : Наука, 2001. – 232 с.

© Афанасьев Н. И., Лепаква О. К., 2019.

ФОРМИРОВАНИЕ МАЛЫХ КЛАСТЕРОВ УГЛЕРОДА В ГЕЛИЕВОМ ПОТОКЕ

В. Е. Ефремов, А. В. Попов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Проведено компьютерное моделирование формирующихся в плазменном потоке гелия малых кластеров углерода. Показано, что атомы углерода устойчивые димеры и, вполне возможно, многоатомные кластеры, содержащие только углерод.

Ключевые слова: наноматериалы, кластерные пучки, компьютерное моделирование.

Нанотехнологии требуют создания устройств с атомарной точностью, что возможно только при наличии методов контролирования вещества на атомном уровне. В этой связи способность управлять процессами нуклеации приобретает ключевую роль в технологических процессах [1] и способствует бурному развитию различных методов синтеза новых наноматериалов [2]. При этом использование кластерных пучков обеспечивает высокую скорость генерации кластеров требуемой структуры и размеров [3], быструю их доставку к месту получения материала с заранее заданными свойствами. При этом цепь сложных неравновесных процессов сильно зависит от внешних условий и режимов генерации, для управления которыми часто используется инертный газ в качестве буферного [4, 5].

Настоящая работа посвящена проблеме описания процессов формирования наноструктур в неравновесных условиях, в частности образования устойчивых двух-, трех-, четырех- и других многоатомных кластеров углерода в процессе нахождения атомов углерода в плазменном потоке инертного гелия.

Уравнение Шредингера решалось с учетом орбитальных возбуждений [6]. В качестве базисных функций использовали функции гауссова типа [7], используя 18 функций в разложении по $l = 0$ и 12 функций – в разложении по $l = 1$. Оценки показали, что базис такой длины вполне пригоден при решении уравнения Шредингера методом Рутана для углерода и гелия, если $|x| < 0,08$ и $|y| < 0,5$, т. к. увеличение длины этого базиса не меняет требуемой точности всех значений, приведенных ниже для обсуждения.

Результаты самосогласованных вычислений, приведенные на рисунке 1, а, показывают, что действительная часть $\text{Re } \mathcal{E}$ полной энергии возбужденного атома может быть как выше, так и ниже энергии его основного состояния при $x = y = 0$. Мнимая часть $\text{Im } \mathcal{E}$ полной энергии атома как функция параметра y для тех же пяти значений параметра $x = 0, \pm 0,04, \pm 0,08$, изображенная на рисунке 1, б, указывает на существование неограниченно долго живущих состояний с $\text{Im } \mathcal{E} = 0$ при $y > 0,3$.

На рисунке 2 представлено поведение спектральных линий в возбужденном атоме углерода в зависимости от параметра возбуждения y

при $x = 0,08$. С увеличением параметра возбуждения y энергия

основного состояния $1s$ -симметрии растет (рисунок 2, а).

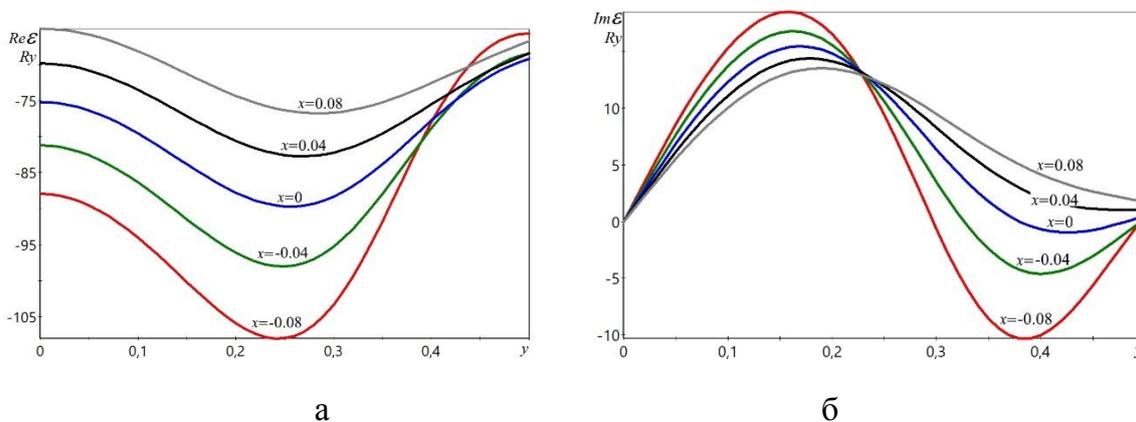


Рисунок 1 – Зависимости действительной части полной энергии $Re \mathcal{E}$ (а) и мнимой части полной энергии $Im \mathcal{E}$ (б) атома углерода от параметра возбуждения y при $x = 0, \pm 0,04, \pm 0,08$

Положение прочих энергетических уровней $2s$ -, $2p$ -, $3s$ -, $3p$ -симметрии и других, не изображенных на рисунке 2, а, чтобы не загромождать рисунок, остается почти неизменным с ростом параметра возбуждения y . Мнимые части Γ_n спектральных линий для атома углерода как функции параметра возбуждения y при $x = 0,08$, приведенные на рисунке 2, б, показывают, что состояния электронов $1s$ -, $2s$ -, $2p$ -симметрии являются долгоживущими, в то же время состояния $3s$ -, $3p$ -симметрии и другие, не изображенные на рисунке 2, б, чтобы не загромождать рисунок, затухают тем быстрее, чем мощнее возбуждение. Причем, затухание возбужденных состояний $3p$ -симметрии, расположенных выше на рисунке 2, б, происходит заметно быстрее, чем затухание возбужденных состояний $3s$ -симметрии. В целом же можно утверждать, что в углероде, в принципе, возможно

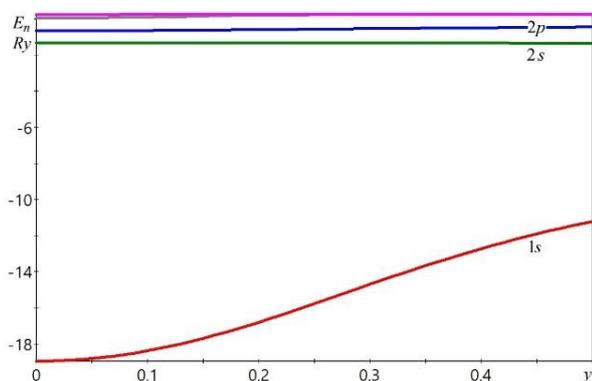
существование неограниченно долго живущих возбуждений в интервале значений параметра $y > 0,3$. Столь мощное воздействие на атом при значениях параметра $y > 0,3$, сравнимое с воздействием поля внутри атома, можно оказать, например, в результате столкновения с каким-либо атомом. В качестве такого выберем другой атом углерода.

На рисунке 3, а приведена зависимость действительной части полной энергии $Re \mathcal{E}$ от расстояния d (в боровских радиусах) между двумя атомами углерода при параметрах возбуждения $x = 0$ и $y = 0, \pm 4 \cdot 10^{-6}, \pm 8 \cdot 10^{-6}, \pm 12 \cdot 10^{-6}, \pm 16 \cdot 10^{-6}$.

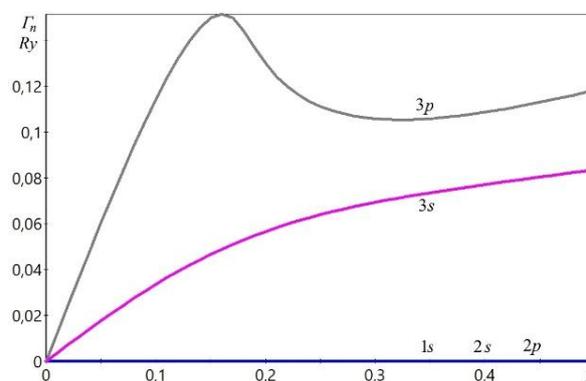
В основном состоянии при $x = y = 0$ обнаружена стабильная двухатомная система C_2 с расстоянием между атомами углерода $d = 2,48$ боровских радиуса, значение которого находится в пределах разброса данных других работ [8]. Наличие четырех менее глубоких минимумов вблизи расстояний d , равных 14,1, 25,4, 32,1, 34,7 боров-

ских радиусов между двумя атомами с $\text{Im } \mathcal{E}$ близкими к нулю (рисунок 3, а),

указывает на существование устойчивых возбуждений в C_2 .



а

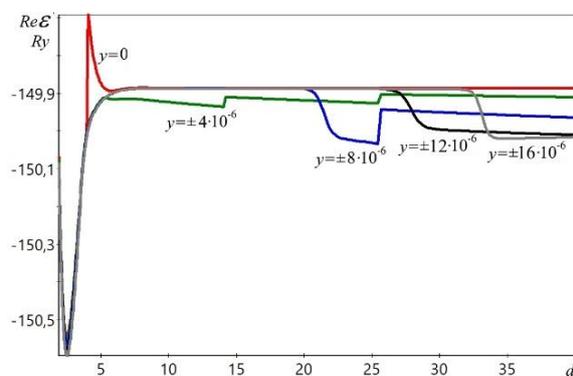


б

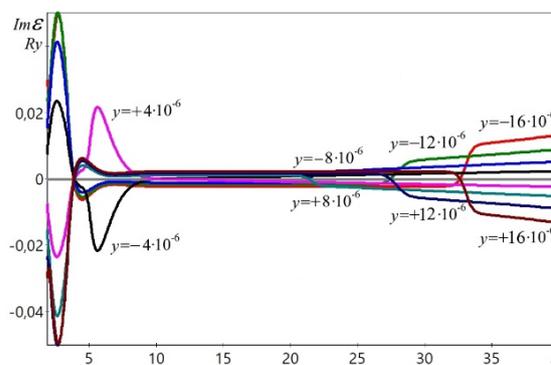
Рисунок 2 – Зависимости действительных частей E_n (а) и мнимых частей Γ_n (б) спектральных линий для атома углерода от параметра возбуждения y при $x = 0,08$

Полная энергия системы Не-С в зависимости от расстояния d между атомами гелия и углерода (в боровских радиусах) при параметрах возбуждения при $x = 0$ и $y = 0, \pm 4 \cdot 10^{-5}, \pm 8 \cdot 10^{-5}, \pm 12 \cdot 10^{-5}, \pm 16 \cdot 10^{-5}$ приведена

на рисунке 4. Поскольку $\text{Im } \mathcal{E} \neq 0$ (рисунок 4, б) в точках минимума действительной части полной энергии $\text{Re } \mathcal{E}$ (рисунок 4, а), можно утверждать, что Не-С быстро распадается в условиях внешних возбуждений.



а



б

Рисунок 3 – Зависимости действительной части полной энергии $\text{Re } \mathcal{E}$ (а) и мнимой части полной энергии $\text{Im } \mathcal{E}$ (б) от расстояния d между двумя атомами углерода (в боровских радиусах) при параметрах возбуждения при $x = 0$ и $y = 0, \pm 4 \cdot 10^{-6}, \pm 8 \cdot 10^{-6}, \pm 12 \cdot 10^{-6}, \pm 16 \cdot 10^{-6}$

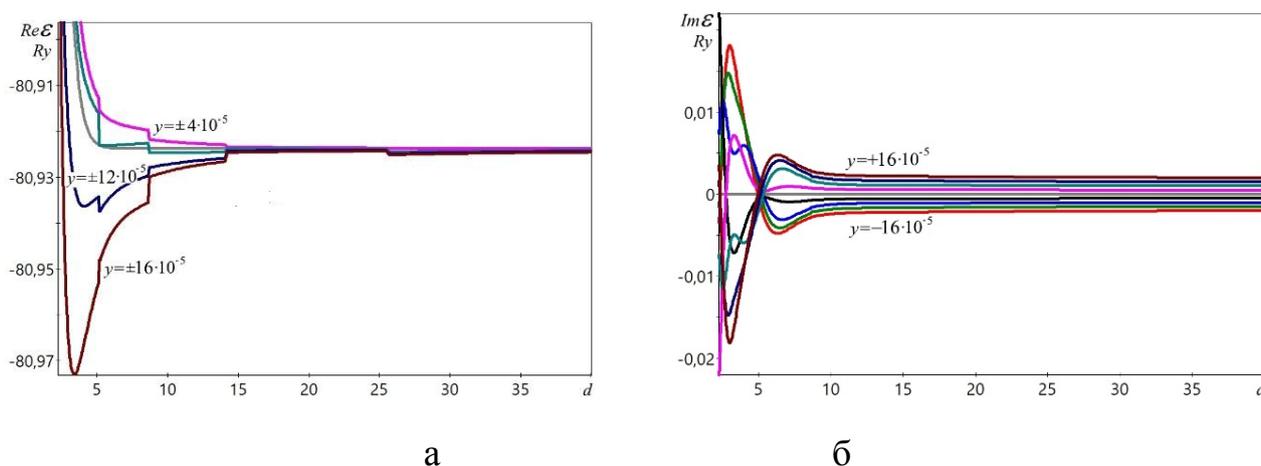


Рисунок 4 – Зависимости действительной части полной энергии $Re \mathcal{E}$ (а) и мнимой части полной энергии $Im \mathcal{E}$ (б) от расстояния d между атомами гелия и углерода (в боровских радиусах) при параметрах возбуждения при $x = 0$ и $y = 0, \pm 4 \cdot 10^{-5}, \pm 8 \cdot 10^{-5}, \pm 12 \cdot 10^{-5}, \pm 16 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, показано, что атомы углерода в плазменном потоке гелия образуют устойчивые димеры и, вполне возможно, многоатомные кластеры. Через образование таких малых кластеров происходит формирование фуллеренов, углеродных нанотрубок и других аллотропных состояний углерода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ruckenstein E. Kinetic Theory of Nucleation / E. Ruckenstein, G. Berim.– CRC Press, 2016.
2. Samarth, N. Quantum materials discovery from a synthesis perspective / N. Samarth // Nature Materials. – 2019. – V. 16. – № 11. – P. 1068–1076.
3. Смирнов, Б. М. Генерация кластерных пучков / Б. М. Смирнов // Успехи физических наук. – 2003. – № 173. – С. 609–648.
4. Попов, А. В. Нуклеация натрия в плазменном потоке с неоном / А. В. Попов, Н. В. Мельникова //

Известия высших учебных заведений. Физика. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 145–152.

5. Попов, А. В. Генерация кластеров лития в плазменном потоке гелия / А. В. Попов, В. А. Попов // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – № 8. – С. 1176–1181.

6. Popov, A. V. Computer simulation of electronic excitations in beryllium / A. V. Popov // Mathematical Modelling and Geometry. – 2019. – V. 3 – P. 29–59.

7. Huzinaga, S. Gaussian Type Functions for Polyatomic Systems. I / S. Huzinaga // The Journal of Chemical Physics. – 1965. – V. 42. – № 4. – P. 1293–1302.

8. Varandas A.J.C. C_n ($n = 2 - 4$): current status / Varandas A.J.C., Rocha C.M.R. // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2018. – V. 376. – № 2115. – P. 20190145.

© Ефремов В. Е., Попов А. В., 2019.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ УГЛЕРОДА С КРАЕВЫМИ ДИСЛОКАЦИЯМИ В АЛЮМИНИИ

Р. М. Джумаев, Г. М. Полетаев

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Настоящая работа посвящена определению с помощью молекулярно-динамического моделирования энергии связи примесного атома углерода с краевыми дислокациями в алюминии.

Ключевые слова: атмосфера Коттрела, компьютерное моделирование.

Примесные атомы углерода даже при небольших концентрациях существенно влияют на механические свойства металлов, что в первую очередь обусловлено их взаимодействием с дислокациями. Из-за положительной энергии связи с дислокациями примесные атомы имеют тенденцию закрепляться на дислокациях, образуя, так называемую, атмосферу Коттрела [1, 2]. Образование подобных атмосфер Коттрела приводит к существенному повышению барьера Пайерлса-Набарро, т. е. сопротивлению решетки скольжению дислокации. Возрастает энергия, которую необходимо затратить на сдвиг дислокации с места и освобождение ее от атмосферы Коттрела. Подобный эффект ведет к повышению прочности и хрупкости металла, к потере пластичности [1, 2]. Кроме того, формирование атмосфер Коттрела является причиной старения металлических изделий, содержащих примеси легких элементов, в основном сталей, находящихся в условиях продолжительной статической деформации [3].

На тенденцию к образованию атмосфер Коттрела влияют несколько факторов, основными из которых являются энергия связи примесного

атома с дислокацией, энергия активации диффузии примесного атома в решетке металла и концентрация и эффективность других «ловушек» для примесных атомов (их иногда вводят специально, чтобы предотвратить старение; ими, например, могут служить примесные атомы других элементов: Mn, Cr и др. [3]).

Настоящая работа посвящена определению с помощью молекулярно-динамического моделирования энергии связи примесного атома углерода с краевыми дислокациями в алюминии.

В ГЦК кристаллах преимущественной является система скольжения $\{111\}\langle 110\rangle$ [2]. Плоскости $\{111\}$ – наиболее плотноупакованные, в этих же плоскостях образуются дефекты упаковки. Вектор Бюргерса полной дислокации в этом случае $1/2\langle 110\rangle$. Однако такая дислокация, как правило, расщепляется на две частичные дислокации с векторами Бюргерса $1/6\langle 112\rangle$, между которыми формируется дефект упаковки.

В настоящей работе для моделирования краевой дислокации в ГЦК металлах использовался расчетный блок, имеющий форму вытянутого параллелепипеда (рисунок 1). Плос-

кость скольжения дислокаций располагалась посередине блока и совпадала с плоскостью XY. Граничные условия вдоль осей X и Y задавались периодическими, т. е. имитировалось бесконечное повторение структуры расчетного блока вдоль данных направлений. Сверху и снизу расчетного блока вдоль оси Z приграничные атомы были жестко зафиксированы (жесткие граничные условия) – на рисунке 1 области с зафиксированными атомами выделены серым цветом. Плоскость XY в модели, т. е. плоскость скольжения, соответствовала плоскости {111}. Дислокация вводилась путем сжатия верхней части расчетного блока (1 на рисунке 1) и растяжения нижней (2 на рисунке 1) вдоль оси Y на одинаковую величину – на одно межатомное расстояние. Размер расчетного блока вдоль оси Y подби-

рался достаточно большим, чтобы деформация верхней и нижней частей блока не вызывали появление избыточных внутренних напряжений при последующем моделировании. При этом введение одной пары частичных дислокаций недостаточно, как было выяснено, необходимо введение одновременно двух пар частичных дислокаций. Действительно «полной» дислокацией в ГЦК кристаллической решетке, которая до и после своего движения «оставляет» идеальный кристалл, является комплекс из двух пар частичных дислокаций, как тот, который изображен на рисунке 1. Все четыре частичные дислокации располагаются в одной и той же плоскости скольжения {111}. Такая система дислокаций является очень подвижной.

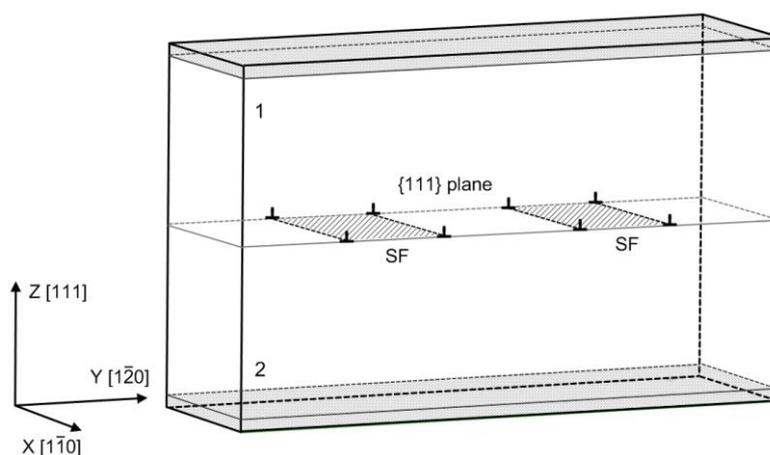


Рисунок 1 – Модель комплекса из двух пар частичных дислокаций (SF – дефект упаковки)

Еще одним типом дислокаций, которые играют важную роль в ГЦК кристаллах, являются вершинные дислокации. Примером вершинной дислокации служит ребро тетраэдра дефектов упаковки – в этом случае в

ядре дислокации обрываются сразу две полуплоскости, расположенные друг относительно друга под углом 60° [4]. Другим примером служат геометрически необходимые краевые дислокации на границах зерен на-

клонного типа и дислокации несоответствия на границе раздела двух металлов с ГЦК кристаллической решеткой.

В молекулярно-динамической модели вершинные дислокации можно создать двумя способами. Первый уже был описан выше – путем сжатия одной части расчетного блока и растяжения другой на расстояние, соответствующее введению только одной полной дислокации. Вторым способом несколько грубее – в этом случае удаляется атомная полуплоскость, лежащая в плоскости X.

В течение структурной релаксации в расчетном блоке формируются два дефекта упаковки, ограниченные частичными дислокациями, и расположенные в параллельных плоскостях, угол между которыми равен

120° (рисунок 2). На линии пересечения дефектов упаковки образуется вершинная дислокация, представляющая собой объединенную пару частичных дислокаций, расположенных в разных плоскостях скольжения, угол между которыми составляет 60° .

В процессах диффузии и деформации с участием границ раздела, межзеренных и межфазных, важную роль играют не только дислокации сами по себе, но и пороги на них [2, 4]. Пороги на вершинных дислокациях в настоящей работе создавались путем создания моноатомных ступенек на краю атомной полуплоскости, получающейся в результате удаления второй ее части. После этого проводилась структурная релаксация с последующим охлаждением.

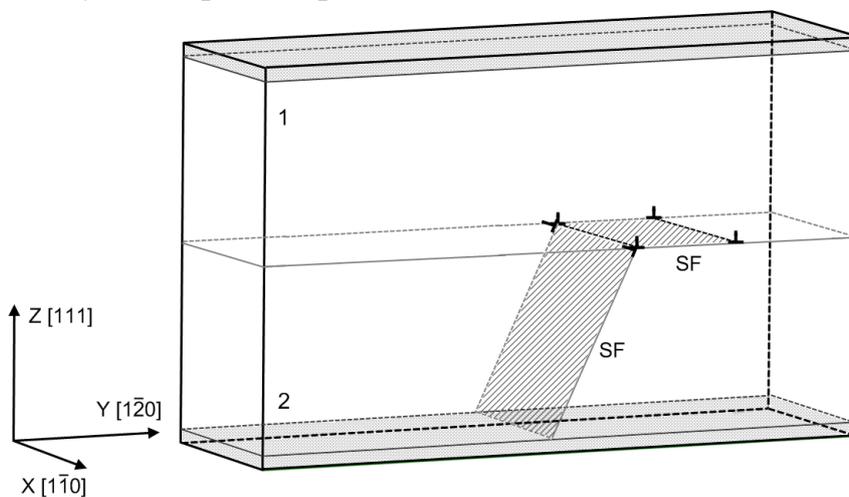


Рисунок 2 – Создание вершинной дислокации в модели (SF – дефект упаковки)

Моделирование проводилось с помощью метода молекулярной динамики. Расчетный блок (рисунки 1, 2) содержал около 25000 атомов. Взаимодействия атомов металла друг с другом и с атомами углерода описывались потенциалами Морзе [5].

Энергия связи примесного атома углерода с дислокацией в настоящей работе рассчитывалась как разность потенциальной энергии расчетного блока, содержащего дислокацию и атом примеси в октаэдрической поре на таком расстоянии друг от друга,

которое исключает взаимодействие дислокации и примесного атома, и потенциальной энергии расчетного блока, содержащего атом примеси в ядре дислокации. В обоих случаях перед расчетом энергии расчетного блока проводилась релаксация структуры, после которой расчетный блок охлаждался до 0 К. Позиция примесного атома в ядре дислокации подбиралась такой, при которой энергия связи получалась наибольшей, т. е. выбиралась энергетически наиболее выгодная позиция примеси в дислокации. Были получены следующие значения: 0,26 эВ с частичной дислокацией, 1,34 эВ – с вершинной и 0,72 эВ – с порогом на дислокации.

Таким образом, вершинные дислокации обладают существенно более высокой сорбционной способностью по отношению к примесным атомам, чем частичные. Порог, как оказалось, обладает меньшей сорбционной способностью по отношению к атомам углерода, чем «чистое» ядро вершинной дислокации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldschmidt, H. J. Interstitial Alloys / H. J. Goldschmidt. – London : Butterworths, 1967. – 640 p.
2. Фридель, Ж. Дислокации / Ж. Фридель. – М. : Мир, 1967. – 660 с.
3. Dislocation interaction with C in α -Fe: A comparison between atomic simulations and elasticity theory / E. Clouet [и др.] // Acta Materialia. – 2008. – P. 3450–3460.
4. Хирт, Дж. Теория дислокаций / Дж. Хирт, И. Лоте. – М. : Атомиздат, 1972. – 600 с.
5. Зоря, И. В. Примесные атомы легких элементов в кристаллах металлов : молекулярно-динамическое моделирование / И. В. Зоря, Г. М. Полетаев, М. Д. Старостенков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 526–532.

© Джумаев Р. М., Полетаев Г. М., 2019.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ УГЛЕРОДА С СОБСТВЕННЫМИ МЕЖУЗЕЛЬНЫМИ АТОМАМИ В АЛЮМИНИИ

Е. В. Коваленко, Г. М. Полетаев

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Настоящая работа посвящена исследованию с помощью молекулярно-динамического моделирования взаимодействия примесных атомов углерода с собственными межузельными атомами в алюминии. Моделирование проводилось с помощью метода молекулярной динамики. Расчетный блок кристалла имел форму параллелепипеда и содержал 8400 атомов. Граничные условия использовались периодические. Взаимодействия атомов металла друг с другом описывались потенциалами Морзе.

Ключевые слова: наноматериалы, потенциал Морзе, ГЦК решетка, компьютерное моделирование.

Взаимодействие примесных атомов с металлами представляет собой значительный научный и технологический интерес, который имеет широкий диапазон применений в материаловедении. Являясь эффективными стопорами вакансий, дислокаций, границ зерен, примеси легких элементов значительно повышают прочность, твердость, фрикционные свойства одновременно, как правило, с хрупкостью [1]. Несмотря на важность понимания механизмов и процессов, лежащих в основе влияния легирования примесями легких элементов на свойства металлов, в настоящее время остается много вопросов, касающихся поведения примесей на атомном уровне в металлической матрице. В частности, остаются недостаточно изученными вопросы, связанные с механизмом и характеристиками диффузии примесных атомов в кристаллической решетке металлов с участием и без различных дефектов. В этом случае эффективным инструментом исследований является компьютерное моделирование.

Настоящая работа посвящена исследованию с помощью молекулярно-динамического моделирования взаимодействия примесных атомов углерода с собственными межузельными атомами в алюминии. Моделирование проводилось с помощью метода молекулярной динамики. Расчетный блок кристалла имел форму параллелепипеда и содержал 8400 атомов. Граничные условия использовались периодические. Взаимодействия атомов металла друг с другом описывались потенциалами Морзе [2].

При введении в модели примесного атома углерода в область собственного межузельного атома, оба дефекта, как правило, образовывали конфигурацию, изображенную на рисунке 1. Гантель из атомов металла, ориентированная вдоль направления $\langle 100 \rangle$, являясь наиболее энергетически выгодной конфигурацией межузельного атома [3], оставалась на месте, а примесной атом смещался в центр ближайшей октаэдрической поры.

Энергия связи атома углерода с межузельным атомом рассчитывалась как разность потенциальной энергии

расчетного блока, содержащего межузельный атом и атом примеси на таком расстоянии друг от друга, которое исключает взаимодействие дефекта и примесного атома, и потенциальной энергии расчетного блока, содержащего атом примеси вблизи межузельного атома в конфигурации, как на рисунке 1.

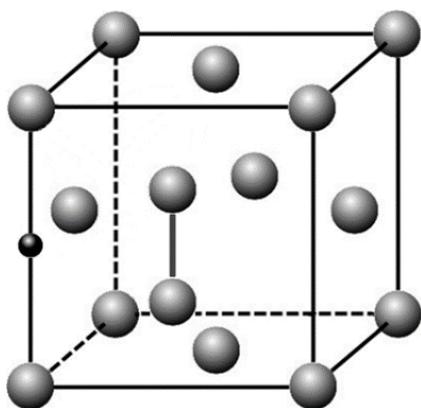


Рисунок 1 – Позиция примесного атома вблизи собственного межузельного атома (в виде гантели вдоль направления $\langle 001 \rangle$) в ГЦК решетке. Положения атомов приведены без учета релаксации структуры

В обоих случаях перед расчетом энергии расчетного блока проводилась релаксация структуры, после которой расчетный блок охлаждался до 0 К. В настоящей работе было получено значение 0,86 эВ, что говорит о высокой сорбционной способности межузельных атомов по отношению к примесным атомам углерода.

Для сравнения, в [4] приводится значение энергии связи атома углерода с межузельным атомом в γ -Fe (ГЦК решетка) – 0,58 эВ, полученное с помощью расчетов из первых принципов.

Для анализа влияния примесей на диффузионную подвижность межузельных атомов в настоящей работе

были рассчитаны значения энергии активации миграции межузельного атома в чистом алюминии и содержащем 10 % примесных атомов углерода. Для определения энергии миграции использовался динамический метод, который заключается в нахождении зависимости коэффициента диффузии от температуры $D(T)$ при введении в расчетный блок определенного количества дефектов рассматриваемого типа. В связи с наличием, как минимум, двух механизмов миграции межузельного атома, гантельного и краудионного, а также сложностью механизма миграции в случае присутствия в кристалле примесей, энергия активации диффузии, определяемая по наклону зависимости $\ln D \cdot T^{-1}$, является в данном случае усредненной. Были получены следующие значения: для чистого Al – 0,05 эВ; для Al, содержащего 10 % атомов углерода, – 0,22 эВ.

Таким образом, подвижность межузельных атомов существенно снижается из-за наличия примесей в металле. При концентрации примесных атомов углерода 10 % энергия активации собственных межузельных атомов в алюминии увеличивается в несколько раз. При этом меняется и вклад краудионного механизма – он становится заметно меньше, что хорошо видно, например, по уменьшению числа прямолинейных участков на траектории миграции межузельных атомов (рисунок 2). Снижение вклада краудионного механизма, по всей видимости, обусловлено искажениями кристаллической решетки, вызванными примесными атомами.

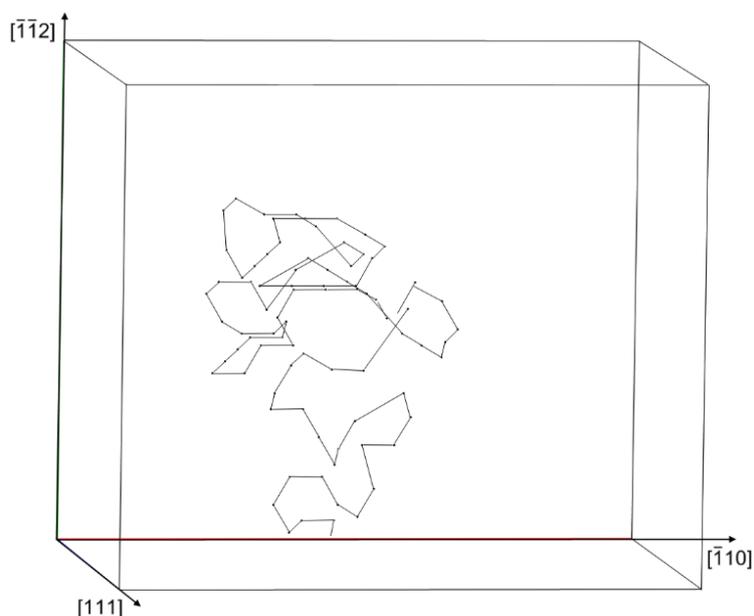


Рисунок 2 – Траектории смещений атомов в результате миграции межузельного атома в Ni, содержащем 10 % атомов кислорода, при температуре 1700 К в течение 100 пс

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldschmidt, H. J. Interstitial Alloys / H. J. Goldschmidt. – London : Butterworths, 1967. – 640 p.

2. Зоря, И. В. Примесные атомы легких элементов в кристаллах металлов: молекулярно-динамическое моделирование / И. В. Зоря, Г. М. Полетаев, М. Д. Старостенков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 526–532.

3. Волленбергер, Г. Й. Точечные

дефекты / В кн. : Физическое материаловедение. Т. 3. Физико-механические свойства металлов и сплавов / Под ред. Р. Кана. - М. : Мир, 1987. - С. 5–74.

4. Lee, B.-J. A modified embedded-atom method interatomic potential for the Fe–C system / B.-J. Lee // Acta Materialia. – 2006. – V. 54. – P. 701–711.

© Коваленко Е. В., Полетаев Г. М., 2019.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ОБЛУЧЕННОЙ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Д. Г. Ваттимури, А. Г. Никифоров

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

В работе проведено исследование структуры магнитного поля, облученной электронным пучком, стали X18H10T. Индукция магнитного поля измерялась датчиком Холла с чувствительностью 0,01мТл, энергия электронов в пучке составляла 2Мэв.

Ключевые слова: сталь X18H10T, ферромагнитная фаза, компьютерное моделирование.

Нержавеющая сталь используется во многих отраслях промышленности: атомной, химической и нефтяной. Для изготовления конструкций из нержавеющей стали широко применяемым методом является сварка [1]. В последнее время интенсивно разрабатываются методы лазерной и электронно-лучевой сварки, которые обеспечивают высокую скорость, глубокое проплавление и низкий уровень напряжений [2]. Для широкого применения электронно-лучевой сварки необходимо исследование структуры и свойств в зоне воздействия электронного пучка. Электронно-лучевое воздействие приводит к изменению магнитных свойств материала [3].

В работе проведено исследование структуры магнитного поля, облученной электронным пучком, стали X18H10T. Индукция магнитного поля измерялась датчиком Холла с чувствительностью 0,01мТл, энергия электронов в пучке составляла 2Мэв. Образцы получены на установке для электронно-лучевой сварки ИЯФ СО РАН [4]. Методика подготовки и измерения индукции магнитного поля облученных образцов приведена в работе [5]. Поверхность образца после облучения, для которой проводилось измерение магнитной индукции, представлена на рисунке 1, а.

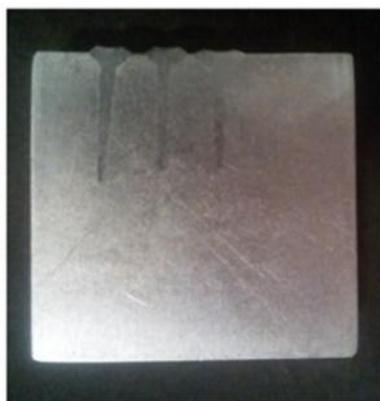


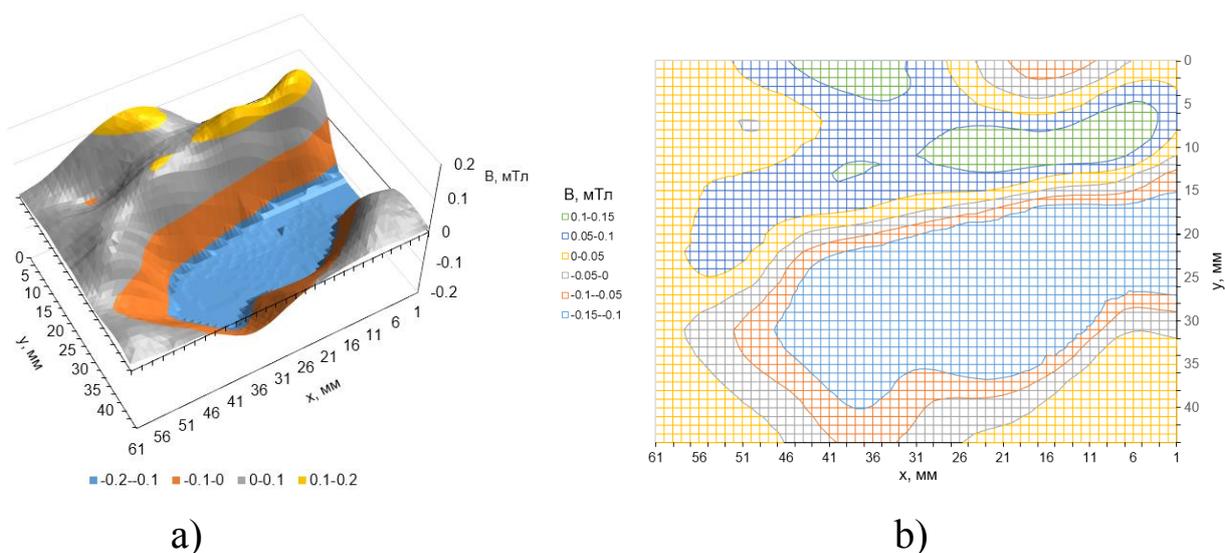
Рис. 1 а) области расплава



б) вид сверху

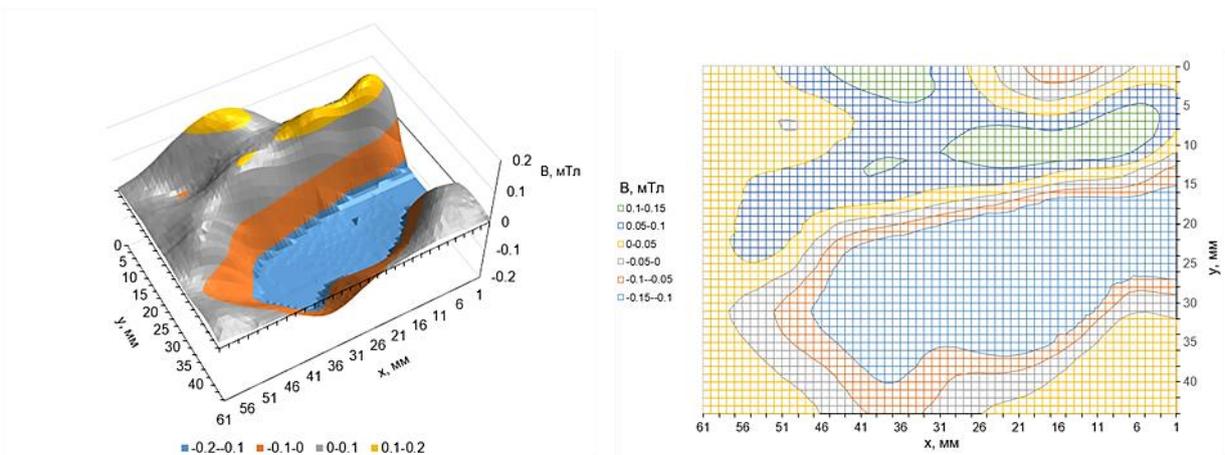
Значение индукции магнитного поля изменялось от + 0,2 до – 0,15 мТл. Положительные значения индукции наблюдались в области зоны проплавления. Вне зоны проплавления значения индукции были отрицательными. Структура магнитного поля облученного образца показывает наличие двух максимумов положительных значений индукции, расположенных вдоль зоны

расплава (рисунок 2, *a*). Ориентация области положительных значений индукции обусловлена различием глубины областей проплавления (рисунок 2, *b*). Магнитное поле нижней плоскости образца инвертировано по отношению к полю верхней плоскости (рисунок 3, *a*). Однако структура поля сохраняется (рисунок 3, *b*).



a) структура магнитного поля верхней плоскости облученного образца;
b) проекция магнитного поля на плоскость образца

Рисунок 2



a) структура магнитного поля нижней плоскости образца;
b) проекция магнитного поля на плоскость образца

Рисунок 3

В работе проведено измерение индукции магнитного поля стали X18H10T после воздействия пучком электронов с энергией 2 МэВ. Результаты измерения показывают наличие остаточной намагниченности в области расплава. Установлена структура магнитного поля. Наличие остаточной намагниченности облученного образца могут быть обусловлены изменением структурного состояния изначально слабомагнитной стали, нарушением химического состава и, как следствие этого, образованием ферромагнитной фазы и процессами ее сегрегации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саломатова, Е. С. Исследование влияния осцилляции электронного пучка на химический состав металла сварного шва при электронно-лучевой сварке стали X18H10T / Е. С. Саломатова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Вып. 4. – Т. 14. – С 7–14.

2. Стеллинг, К. Поведение аустенитных сталей при кристаллизации и их свариваемость лазерной и гибри-

ной сваркой / К. Стеллинг, Т. Михайель, Г. Шобберт // Сварка и резка 2008. – № 1. – С. 49–53.

3. Влияние параметров аустенизации на физико-механические свойства необлученной и облученной нейтронами стали X18H10T, деформированной в интервале температур 15...100 °С / О. П. Максимкин [и др.] // ВАНТ. 2012. – Т. 81. – № 5. – С. 69–74.

4. Медведев, А. М. Управление оборудованием установки электронно-лучевой сварки / А. М. Медведев // Материалы 53-й Международной научной студенческой конференции: МНСК-2019 : Инструментальные методы и техника экспериментальной физики, 11–17 апреля 2019 г. – Новосибирск : НГУ, 2019. – С. 27.

5. Ваттимури, Д. Магнитное поле стали X18H10T после электронно-лучевой обработки / Д. Ваттимури, А. Г. Никифоров // Новые материалы и технологии: сборник научных статей VI Российско-Казахстанской молодежной научно-технической конференции. Барнаул, 13 декабря 2018 г. – Барнаул : Изд-во Алт. гос. ун-та, 2018. – С. 131–135.

© Ваттимури Д. Г., Никифоров А. Г., 2019.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ СОБСТВЕННОГО МЕЖУЗЕЛЬНОГО АТОМА В ГЦК МЕТАЛЛАХ

С. О. Кузнецов, Г. М. Полетаев

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Настоящая работа посвящена исследованию с помощью метода молекулярной динамики ведущих механизмов диффузии собственного межузельного атома в Ni, Ag, Al и определении энергии активации его миграции. Расчетный блок кристалла имел форму параллелепипеда и содержал 8400 атомов. Граничные условия использовались периодические. Взаимодействия атомов металла друг с другом описывались потенциалами Морзе.

Ключевые слова: механизмы диффузии, потенциал Морзе, краудион, компьютерное моделирование.

Собственные межузельные атомы в кристаллической решетке могут иметь различные позиции. Например, в ГЦК кристаллах рассматривают до шести таких позиций [1]: в октаэдрической и тетраэдрической порах, в виде гантели (двух атомов в одном узле) вдоль разных направлений ($\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$) и в виде краудиона (лишнего атома в плотноупакованном атомном ряду). Наиболее энергетически выгодной в ГЦК кристалле, согласно многочисленным исследованиям, является гантельная конфигурация с осью вдоль направления $\langle 100 \rangle$ [1–3] (рисунок 1, а). Вместе с тем компьютерное моделирование дает, как правило, небольшие отличия энергий образования различных конфигураций межузельного атома [1, 3], что говорит в пользу возможных трансформаций из одной конфигурации в другую, вероятность которых растет с повышением температуры. В связи с неоднозначностью конфигурации собственного межузельного атома при средних и, тем более, при высоких температурах, атомный механизм его миграции

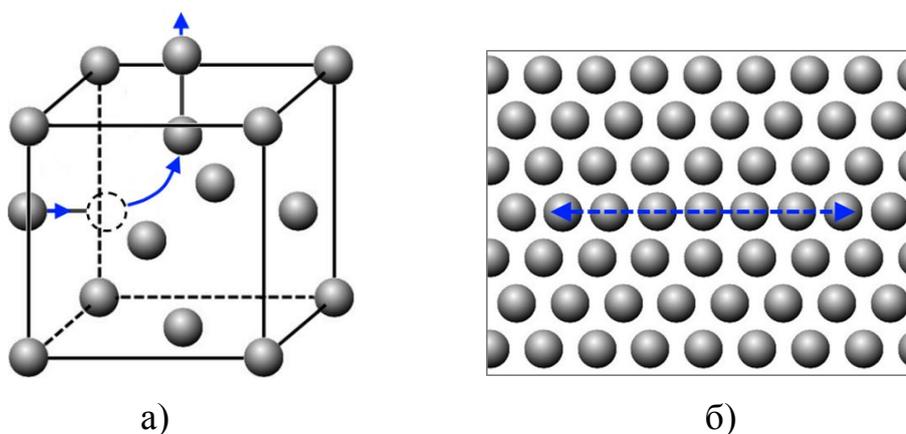
включает несколько возможных вариантов. Например, в случае миграции межузельного атома в виде гантели один из атомов пары перемещается к узлу решетки, а другой уходит и образует новую гантельную пару с третьим атомом, выталкивая его из своего узла [4]. Механизм миграции межузельного атома, находящегося в конфигурации гантели $\langle 100 \rangle$, представляет собой, по мнению большинства авторов, трансляционное смещение «центра тяжести» гантели на одно межатомное расстояние и вращательное движение ее оси на 90° (рисунок 1, а).

Другой механизм, называемый краудионным [5], представляет собой эстафетное перемещение области сжатия вдоль плотноупакованного атомного ряда, возникшей в результате наличия в этом ряду лишнего атома (рисунок 1, б). Диффузия происходит благодаря небольшим смещениям каждого из атомов краудиона вдоль плотноупакованного ряда, так что скорость перемещения велика, а энергия активации миграции мала. В этом случае предполагается, что исходной

конфигурацией межузельного атома является метастабильная краудионная конфигурация, энергетически менее выгодная, чем гантель $\langle 100 \rangle$. Данный механизм часто рассматривается при исследовании процессов, происходящих при радиационном повреждении материалов [5].

Настоящая работа посвящена исследованию с помощью метода молекулярной динамики ведущих меха-

низмов диффузии собственного межузельного атома в Ni, Ag, Al и определении энергии активации его миграции. Расчетный блок кристалла имел форму параллелепипеда и содержал 8400 атомов. Граничные условия использовались периодические. Взаимодействия атомов металла друг с другом описывались потенциалами Морзе.



а) смещение и поворот гантели $\langle 100 \rangle$; б) краудионный механизм
Рисунок 1 – Механизмы миграции межузельного атома в ГЦК кристалле

Вьяснить механизм миграции межузельного атома можно с помощью анализа траекторий смещений атомов, которые в каждом случае имеют характерные особенности. Действительно, для гантельной конфигурации смещение гантели равновероятно по всем двенадцати направлениям типа $\langle 110 \rangle$, тогда как для краудионного механизма есть только два вероятных направления миграции межузельного атома – в обе стороны вдоль краудиона. То есть вероятность того, что межузельный атом совершит два последовательных скачка в одном и том же направлении, для «гантельного» механизма приблизительно

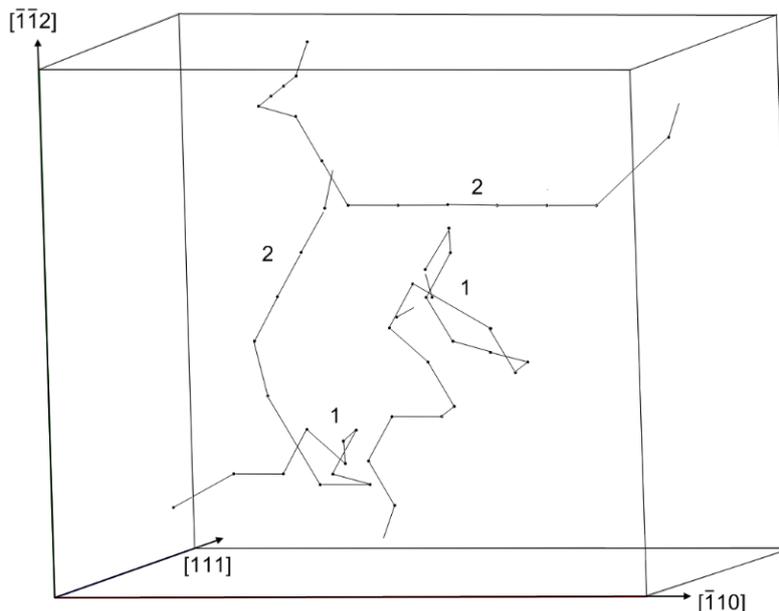
равна $1/12$, для краудионного – $1/2$. Для трех последовательных скачков соответственно: $1/144$ и $1/4$. Таким образом, характерная особенность краудионного механизма – прямые траектории смещения атомов, для механизма смещения и поворота гантелей $\langle 100 \rangle$ – ломаные траектории.

На рисунке 2 изображен пример траекторий смещений атомов в результате миграции межузельного атома в чистом Ni при температуре, близкой к температуре плавления.

Как видно, траектории содержат как ломаные участки, так и прямолинейные вдоль плотноупакованных направлений $\langle 110 \rangle$, которые свиде-

тельствуют в пользу реализации краудионного механизма. Таким образом, собственный межузельный атом в чистых ГЦК кристаллах миг-

рирует посредством не одного, а, как минимум, двух вышерассмотренных механизмов.



1 – механизм смещения и поворота гантели $\langle 100 \rangle$; 2 – краудионный механизм

Рисунок 2 – Траектории смещений атомов в результате миграции межузельного атома в Ni при температуре 1700 К в течение 50 пс

Следует заметить, что после охлаждения молекулярно-динамических моделей и релаксации структуры во всех случаях межузельные атомы принимали гантельную конфигурацию с осью вдоль $\langle 100 \rangle$. Такая конфигурация, как уже говорилось выше, является энергетически наиболее выгодной, тогда как краудионная конфигурация, по всей видимости, является динамической, т. е. временной, и имеет некоторое время жизни, зависящее от температуры.

Для определения энергии миграции использовался динамический метод [3], который заключается в нахождении зависимости коэффициента диффузии от температуры $D(T)$ при введении в расчетный блок опреде-

ленного количества дефектов рассматриваемого типа. В связи с наличием, как минимум, двух механизмов миграции межузельного атома, гантельного и краудионного, энергия активации диффузии, определяемая по наклону зависимости $\ln D \propto T^{-1}$, является в данном случае усредненной. Для рассматриваемых металлов были получены следующие значения: Ni – 0,09 эВ, Ag – 0,07 эВ, Al – 0,05 эВ.

Энергия миграции собственных межузельных атомов в чистых металлах очень низкая по сравнению, например, с вакансиями, что обуславливает их высокую диффузионную подвижность. Для сравнения, в [1, 6] приводятся следующие данные, полученные преимущественно с помощью

компьютерного моделирования: 0,04–0,15 эВ в Ni, 0,05–0,12 эВ в Ag и 0,03–0,1 эВ в Al.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волленбергер, Г. Й. Точечные дефекты / В кн. : Физическое материаловедение. Т.3. Физико-механические свойства металлов и сплавов / Под ред. Р. Кана. - М. : Мир, 1987. - С. 5–74.

2. Zhao, P. Molecular dynamics calculations of properties of the self-interstitials in copper and nickel / P. Zhao, Y. Shimomura // Computational Materials Science. - 1999. – V. 14. - P. 84–90.

3. Poletaev, G. M. Contributions of different mechanisms of self-diffusion in face-centered cubic metals under equilibrium conditions / G. M. Poletaev,

M. D. Starostenkov // Physics of the Solid State. – 2010. – V. 52. – № 6. – P. 1146–1154.

4. Кирсанов, В. В. Атомные механизмы диффузии и дефекты кристаллов / В. В. Кирсанов // Соросовский образовательный журнал. - 2001. - Т. 7. – № 9. - С.103–108.

5. Stepanov, V. A. Radiation-stimulated diffusion in solids / V. A. Stepanov // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 1998. – V. 43. – №.8. – P. 938–942.

6. Орлов, А. Н. Энергии точечных дефектов в металлах / А. Н. Орлов, Ю. В. Трушин. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 80 с.

© Кузнецов С. О., Полетаев Г. М., 2019.

ОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТИЦ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАВЛЕНИИ МЕДИ

В. С. Герцен, Б. Ф. Демьянов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Целью настоящей работы является исследование особенностей явления гетерогенного плавления поверхности массивного материала на примере меди.

Ключевые слова: медь марки М1, сферические частицы, плавление.

В настоящее время явление понижения температуры плавления нанокристаллических объектов при уменьшении их размеров не вызывает сомнений. Менее изученным является плавление поверхности в массивных материалах, хотя механизм плавления такой же, как и в низкоразмерных объектах. Плавление поверхности кристалла может происходить при температуре, значение которой ниже, чем для массивного материала. Целью настоящей работы является исследование особенностей явления гетерогенного плавления поверхности массивного материала на примере меди.

Медь марки М1 в исходном состоянии представляла прокатанный лист. Из листа вырезался образец в виде пластинки размером 10 x 10 мм. Одна из поверхностей пластинки механически полировалась непосредственно перед нагревом. При этом удалялась оксидная пленка. Нагрев осуществлялся в вакууме при $T = 950$ °С, что на 133 ° ниже температуры плавления ($T_{пл} = 1083$ °С) массивного материала меди. При нагреве обеспечивался вакуум 10^{-2} мм. Время выдержки при температуре 950 °С составляло 8 часов. Охлаждение проводилось с печью путем естественного самопроизвольного охлаждения с сохранением вакуума.

Оптическая микроскопия поверхности образца после нагрева показала присутствие большого количества частиц, имеющих равноосную форму близкую к сферической. Подсчет частиц показал, что плотность частиц составляет $\rho = 0,014$ мкм⁻². Средний размер частиц равен 5 мкм. Исследования позволили предложить механизм образования частиц.

Образование сферических частиц на поверхности меди может быть связано с поверхностным плавлением. Превращения на поверхности при нагреве схематически показаны на рисунке 1.

Поверхность поликристаллического металла состоит из участков с различной кристаллографической ориентацией. На рисунке 1, *a* показана поверхность до нагрева, это плоская поверхность, состоящая из поверхностей зерна 1 и зерна 2. При нагреве поверхность одного из зерен будет плавиться при более низкой температуре. На рисунке 1, *b* показано начало поверхностного плавления, плавятся зерна с самой высокой поверхностной энергией. При увеличении температуры плавление происходит по всей поверхности (рисунок 1, *c*), однако, толщина расплавленного слоя будет варьировать от зерна к зерну. При длительной выдержке слой расплава станет однородным по всей поверхно-

сти образца (рисунок 1, *d*). Охлаждение образца приводит к кристаллизации капель. В результате форма ка-

пель может приобрести огранку (рисунок 1, *f*).

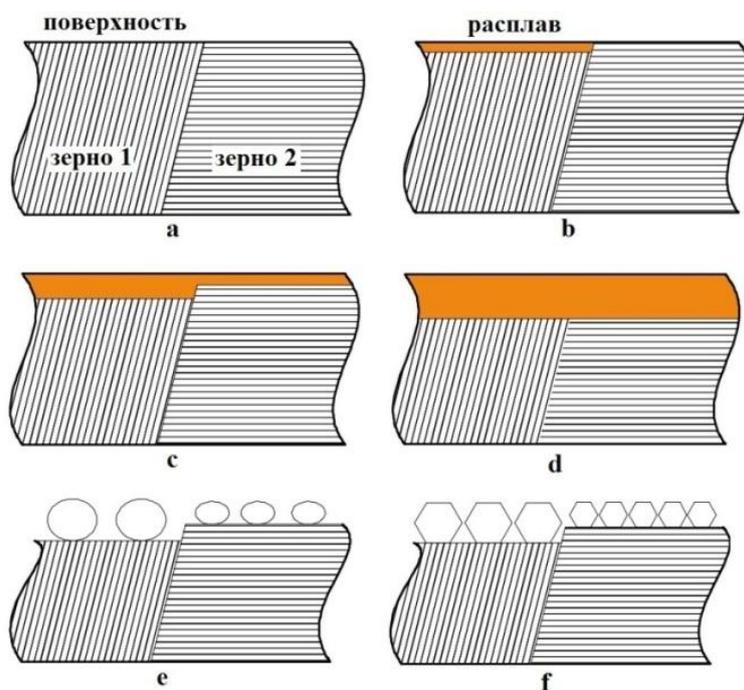


Рисунок 1 – Стадии образования частиц при поверхностном плавлении

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nanowhisker structures of copper oxide under conditions of exposure to temperature fields and corrosive media / N. N. Gryzunova [et al.] // *Letters on Materials*. – 2018. – V. 8. – № 3. – P. 294–298.

2. Комник, Ю. Ф. Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты / Ю. Ф. Комник. Атомиздат. – М. – 1979. – 264 с.

3. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы / А. И. Гусев, А. А. Ремпель // *Физматлит*. – М. – 2001. – 224 с.

4. Кинетика процесса плавления-диспергирования тонких пленок меди / Д. Г. Громов [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2007. – Т. 49. – В. 1. – С. 172–178.

© Герцен В. С., Демьянов Б. Ф., 2019.

ПЛАВЛЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОКИСНЫХ ПЛЕНОК МЕДИ

П. Д. Рыжков, Б. Ф. Демьянов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Целью настоящей работы является исследование закономерностей поведения тонкопленочных систем нанометрового диапазона размеров при воздействии на них термического нагрева на примере окисной пленки Cu_2O на поверхности меди. Объектом исследования являлись тонкие пленки Cu_2O , сформированные на поверхности меди в течение 1 года и 20 лет.

Ключевые слова: Cu_2O , тонкопленочные системы.

Медь является основным материалом для электроники и электротехники из-за низкого сопротивления, однако она имеет существенный недостаток – низкую стойкость к окислению. Присутствие оксидной пленки, а также ее неконтролируемый рост может оказывать негативное влияние на работу элементов электроники [1]. Образующаяся оксидная пленка может рассматриваться как низкоразмерная система. Уменьшение размеров кристаллов и переход в нанометровый диапазон сопровождается, в частности, понижением температуры плавления [2, 3]. Целью настоящей работы является исследование закономерностей поведения тонкопленочных систем нанометрового диапазона размеров при воздействии на них термического нагрева на примере окисной пленки Cu_2O на поверхности меди. Объектом исследования являлись тонкие пленки Cu_2O , сформированные на поверхности меди в течение 1 года и 20 лет.

Для исследований использовалась медь марки М1. Оксидная пленка разной толщины была получена путем естественного роста на образцах меди в воздухе при нормальных условиях. Использовались три образца. Исходный, эталонный образец, имел меха-

нически полированную поверхность, подготовленную непосредственно перед термообработкой. Образовавшаяся за непродолжительное время оксидная пленка не превышала нескольких нанометров. Два других образца имели оксидную пленку разной толщины. Образец, обозначенный как Cu_2O -I, выдерживался в течение 1 года, образец Cu_2O -II имел выдержку более 20 лет. Образцы подвергались изотермическому нагреву при температуре 950 °С в течение 8 часов. Термообработка проводилась в вакууме при давлении 0,5 Па. После термообработки образцы охлаждались с печью с сохранением вакуума. Поверхность образцов исследовалась под оптическим микроскопом Люмам-8Р.

Исследование эталонного образца не обнаружило на поверхности кристаллов Cu_2O . Микроструктура поверхности образцов Cu_2O -I и Cu_2O -II содержит кристаллы оксида меди Cu_2O . Кристаллы имеют огранку, что соответствует ковалентному типу связей в решетке Cu_2O . Количество кристаллов в образце Cu_2O -II с толстой пленкой значительно больше, чем в образце Cu_2O -I с тонкой пленкой.

Исследование структуры поверхности образцов позволило предложить механизм образования кристал-

лов оксида меди при повышенных температурах. Образование кристаллов на поверхности меди произошло в

результате плавления оксидной пленки при нагреве.

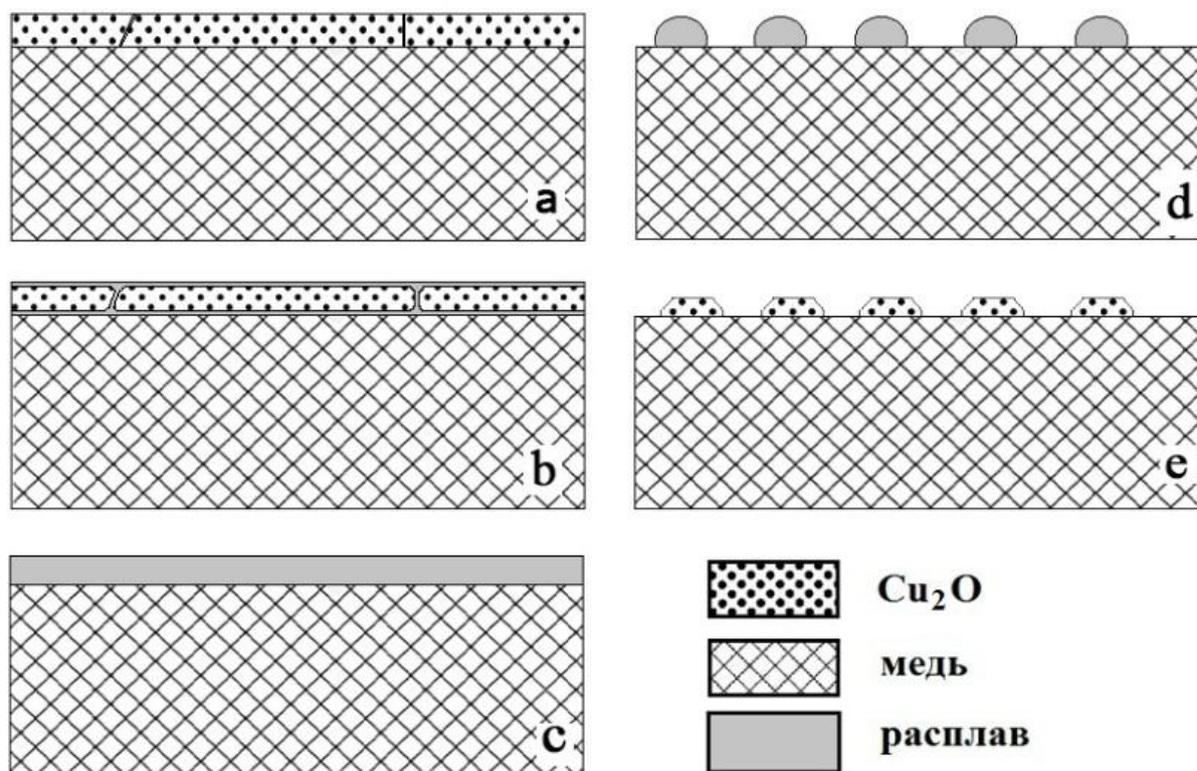


Рисунок 1 – Стадии образования кристаллов Cu_2O

Процесс образования кристаллов Cu_2O схематически показан на рисунке 1. В исходном состоянии оксидная пленка может иметь поликристаллическую структуру (рисунок 1, *a*). При достижении некоторой температуры начинается поверхностное плавление. Образуется тонкий слой жидкости на свободной поверхности. Также происходит образование жидкой прослойки по границам зерен и по границе раздела медь-оксид меди (рисунок 1, *b*).

При достижении температуры $950\text{ }^\circ\text{C}$ пленка Cu_2O переходит в жидкое состояние (рисунок 1, *c*). Плавление тонких пленок происходит при температуре существенно ниже температуры плавления массивного материала [4]. Табличная температура

плавления оксида Cu_2O составляет $1242\text{ }^\circ\text{C}$. В наших экспериментах температура плавления тонкой пленки на 292 градуса ниже табличного значения. На следующем этапе слой жидкости разбивается на капли (рисунок 1, *d*). При охлаждении происходит кристаллизация капель, они, в целом сохраняя полусферическую форму, приобретают огранку (рисунок 1, *e*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nanowhisker structures of copper oxide under conditions of exposure to temperature fields and corrosive media / N. N. Gryzunova [et al.] // Letters on Materials. – 2018. – V. 8. – № 3. – P. 294 – 298.

2. Комник, Ю. Ф. Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты / Ю. Ф. Комник. – М., Атомиздат. – 1979. – 264 с.

3. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы / А. И. Гусев, А. А. Ремпель. – М., Физматлит. – 2001. – 224 с.

4. Кинетика процесса плавления-диспергирования тонких пленок меди / Д. Г. Громов [и др.] // Физика твердого тела. – 2007. – Т. 49. – В. 1. – С. 172–178.

© Рыжков П. Д., Демьянов Б. Ф., 2019.

СТРУКТУРА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕДИ

Н. Д. Тихонский, А. Г. Никифоров

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Одним из наиболее эффективных методов изучения структуры поверхности твердых тел на атомном уровне является атомно-силовая микроскопия. В работе проведено изучение свободной поверхности тонких пленок меди, полученных осаждением в вакууме.

Ключевые слова: поверхность тонких металлооксидных пленок, метод атомно-силовой микроскопии, медь марки М1.

Структура поверхности твердых тел влияет на протекание самых разнообразных процессов [1–3]. Так, наличие развитого рельефа поверхности полупроводников, приводит к увеличению фактической площади контакта, влияет на его электрические параметры и на характеристики приборов. Свойства поверхности тонких металлооксидных пленок определяет газочувствительность адсорбционных сенсоров. Важной характеристикой, определяющей каталитическую активность, является удельная поверхность гетерогенных катализаторов. Качество соединений материалов при сварке взрывом определяется наличием развитой поверхности, улучшающей сцепление.

Одним из наиболее эффективных методов изучения структуры поверхности твердых тел на атомном уровне является атомно-силовая микроскопия. В работе проведено изучение свободной поверхности тонких пленок меди, полученных осаждением в вакууме.

Образцы были получены осаждением атомов меди на подложку в виде тонкой пленки. Медь марки М1 помещалась в тигель и термически испарялась путем нагрева. Осаждение

проводилось на стеклянную подложку. Толщина осажденного слоя составляла около 0,5 мкм. В процессе изготовления образцов вакуум был не ниже 10^{-4} мм рт. ст.

Исследование свободной поверхности меди проводилось методом атомно-силовой микроскопии. Реконструкция поверхности по данным АСМ осуществлялась в среде Blender 3d на языке программирования Python 3.x.

На рисунке 1 показана структура поверхности, представленная в двумерной и трехмерной проекции. Поверхность меди может быть хорошо описана в модели изломов-уступов-террас. Поверхность меди не является атомно гладкой, основным элементом структуры являются террасы в форме пирамиды. Террасы ориентированы вдоль некоторого направления (рисунок 1, а) и имеют острые вершины. Трехмерный вид поверхности меди показан на рисунке 1, б. Хорошо видна структура пирамид, они имеют различную высоту и размеры, также видна их правильная огранка. Требование минимума поверхностной энергии позволяет предположить, что грани пирамид представляют собой кристаллографические плоскости с малыми индексами.

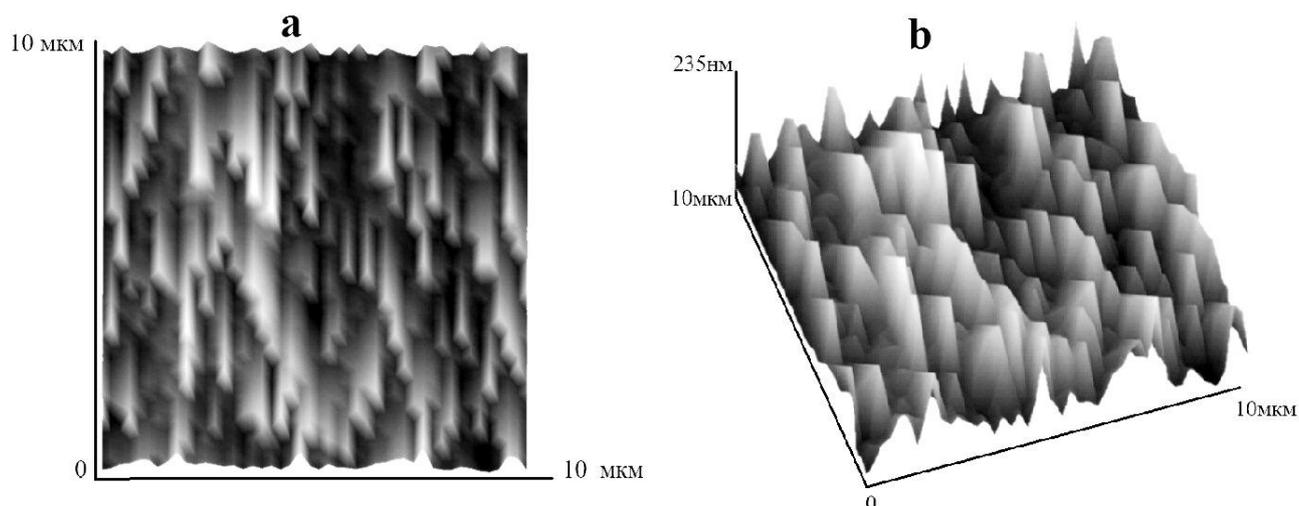


Рисунок 1 – Поверхность меди, полученная в атомно-силовом микроскопе: двумерная (а) и трехмерная (b) проекции

Рельеф поверхности оказывает существенное влияние на многие процессы: каталитическую активность поверхности, ее эмиссионные свойства, адсорбцию, поверхностную диффузию и другие. Поэтому важное

значение имеют особенности конкретного рельефа. Рассмотрим элементы рельефа более подробно. На рисунке 2 приведены сечения пирамид на поверхности меди.

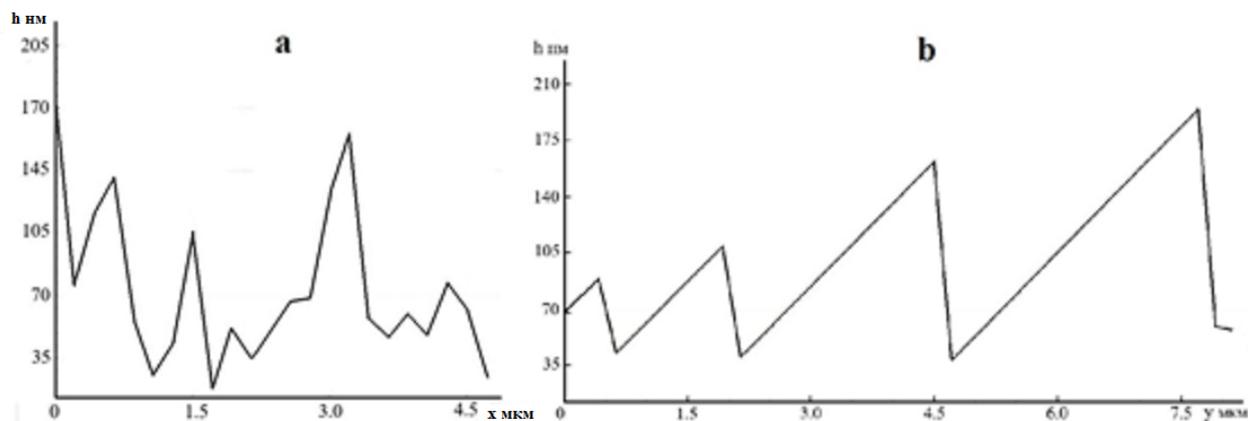


Рисунок 2 – Сечения рельефа поверхности меди: поперечное сечение (а) и продольное сечение (b)

Видно, что наиболее распространенными являются остроконечные пирамиды. Иногда встречаются пирамиды со срезанной вершиной. На рисунках 2, а и 2, b показаны поперечное и продольное сечение рельефа, приведенного на рисунке 1, а. Резуль-

таты измерений показали, что основные значения углов между гранями пирамид составляют $\alpha = 110$, $\beta = 145$. В гцк-решетке угол 110 присутствует между кристаллографическими плоскостями (111), а угол 145 между плоскостями (111) и (110).

Рассмотренные элементы рельефа могут характеризовать свойства поверхности. Например, точки вершин пирамид обладают повышенной каталитической активностью и их плотность может оказывать существенное влияние на каталитические свойства поверхности. То же самое относится и к эмиссионным свойствам поверхности, игольчатые элементы увеличивают эмиссию электронов с поверхности катода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального n-GaAs в локальном пределе /

Н. А. Торхов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. Т. – 43. В. 1. – С. 38–47.

2. Синтез и характеристика наноструктурированных слоев оксида цинка для сенсорики / Л. К. Крастева [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – В. 4. – С. 564–579.

3. Fractal approach to surface roughness of TiO₂/WO₃ coatings formed by plasma electrolytic oxidation process / L. J. Rožić [et. al.] // Thin Solid Films, 2013. – V. 539. – P. 112–116.

© Тихонский Н. Д., Никифоров А. Г., 2019.

КИНЕТИКА РОСТА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА МЕДЬ – ЖИДКОЕ ОЛОВО

А. А. Бондарь, Б. Ф. Демьянов

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Технология пайки широко применяется для создания соединения различных элементов микроэлектроники. Медь и олово являются наиболее распространенной парой в электрических контактах. Преимущественно соединения осуществляют между медной пластиной (подложкой) и медным проводом.

Механизм образования интерметаллического слоя на границе раздела имеет сложный характер и в настоящее время недостаточно исследован.

Проведенные исследования позволяют уточнить некоторые особенности образования и роста кристаллов интерметаллида.

Ключевые слова: *технология пайки, интерметаллид, центров кристаллизации фазы.*

Технология пайки широко применяется для создания соединения различных элементов микроэлектроники. Медь и олово являются наиболее распространенной парой в электрических контактах. Преимущественно соединения осуществляют между медной пластиной (подложкой) и медным проводом. Наиболее часто в настоящее время для пайки применяются сплавы олово–серебро (Sn–Ag), олово–серебро–медь (Sn–Ag–Cu), олово–медь (Sn–Cu), а также чистое олово [1].

Однако использование припоев Cu–Sn и чистого Sn привело к возникновению дополнительных проблем. Выяснилось, что между припоем и спаиваемыми медными элементами идет интенсивная реакция между Cu и Sn, которая раньше сдерживалась присутствием в припое свинца. Это приводит к образованию на границе контакта припой–медь интерметаллида Cu_6Sn_5 , физические и механические свойства которого существенно отличаются от свойств припоя в целом. Высокая хрупкость интерметаллических фаз снижает механиче-

скую надежность соединения электронных элементов [2–5]. Количество интерметаллической фазы зависит от ряда факторов, главным из которых является температура работы элементов электроники, действие этих факторов еще плохо изучено. В настоящей работе исследуется процесс жидкофазного синтеза интерметаллической фазы Cu_6Sn_5 в системе Cu–Sn, ее ориентированного роста и образования микрокристаллической столбчатой структуры.

Для приготовления образцов использовались пластины прокатанной меди толщиной 1 мм. Для удаления окисла с поверхности медных пластин все образцы поочередно протравили азотной кислотой HNO_3 , промыли их дистиллированной водой для удаления кислоты и продуктов реакции, а далее обработали спиртом. Затем подготовленные медные подложки на 5 секунд погрузили в тигель с расплавленным оловом. При этом на поверхности подложки образуется тонкий слой олова, препятствующий образованию оксидной пленки. На вто-

ром этапе на поверхность образцов наплавлялся слой олова толщиной 1–2 мм. Подготовленные таким образом биметаллические образцы помещались в печь и выдерживались при температуре 300 °С в течение заданного времени. Температура обработки выбиралась таким образом, чтобы она была выше температуры плавления

Sn (232 °С) но ниже температуры плавления Cu_6Sn_5 (415 °С). После завершения термообработки образцы остывали естественным путем. Время выдержки в печи составляло 1 и 60 мин. Исследование микроструктуры проводилось методом оптической микроскопии.

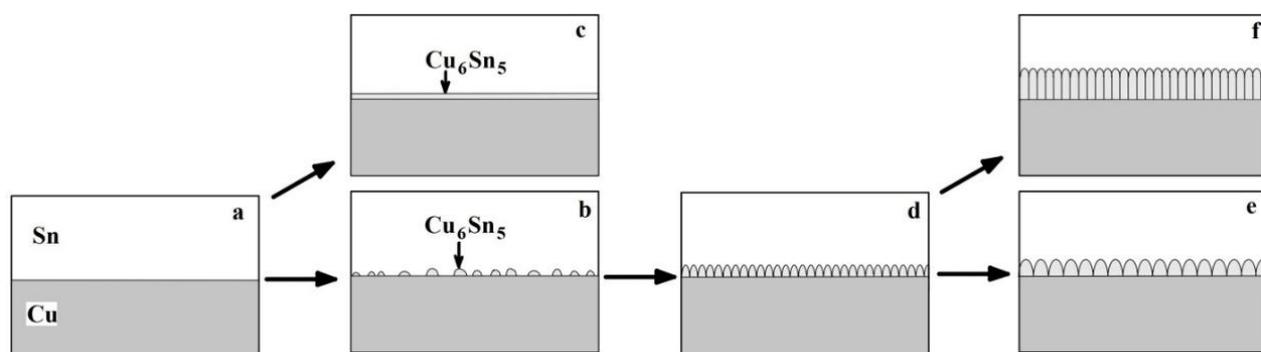


Рисунок 1 – Стадии роста интерметаллических кристаллов

Механизм образования интерметаллического слоя на границе раздела имеет сложный характер и в настоящее время недостаточно исследован. Проведенные исследования позволяют уточнить некоторые особенности образования и роста кристаллов интерметаллида. Исходная граница раздела Cu/Sn была плоской (рисунок 1, *a*), диффузия меди в олово в каждой точке происходила в одинаковых условиях и, в соответствии с теоретическими представлениями, интерметаллический слой должен представлять тонкий слой с плоской границей, как показано на рисунке 1, *c*. Исследования структуры показали, что начальная стадия роста представляет собой зарождение центров кристаллизации фазы Cu_6Sn_5 и ее рост до соприкосновения с другими зернами. Фронт кристаллизации при этом не

является плоским, на границе раздела происходит образование зародышей интерметаллида Cu_6Sn_5 (рисунок 1, *b*). Зародыши образуются в случайных местах, затем происходит их рост до тех пор, пока они не придут в соприкосновение. На этом этапе на границе раздела образуется так называемая «гребешковая структура», состоящая из полусферических зерен интерметаллида Cu_6Sn_5 , плотно примыкающих друг к другу (рисунок 1, *d*).

На втором этапе рост может идти за счет поглощения (коалесценции) мелких соседних зерен (рисунок 1, *e*). Появляются крупные зерна, также идет их рост в направлении нормальной границе раздела. Возможен механизм столбчатого роста, при котором диаметр зерен остается постоянным, а рост идет за счет увеличения высоты кристаллов (рисунок 1, *f*). Результаты

проведенных исследований показывают, что происходит боковой рост кристаллов Cu_6Sn_5 с образованием крупнокристаллического толстого слоя (рисунок 1, *e*) уже после выдержки в течение 60 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Готра, З. Ю. Технология микроэлектронных устройств / З. Ю. Готра. – М. : Изд-во «Радио и связь». – 1991. – 526 с.
2. Effect of intermetallic compound thickness on shear strength of 25 μ m diameter Cu-pillars / J. Bertheau [et.al.] // *Intermetallics*. – 2014. – V. 51. – P. 37–47.
3. Yoon, J.-W. Reliability Investigation and Interfacial Reaction of Ball-Grid-

Array Packages Using the Lead-Free Sn – Cu Solder / J.-W. Yoon, S.-W. Kim, J.-M. Koo // *Journal of Electronic Materials*. – 2004. – Vol. 33. – № 10. – P. 1190–1199.

4. Influence of interfacial intermetallic compound on fracture behavior of solder joints / H.-T. Lee [et.al.] // *Materials and Engineering*. – 2003. – V. 358. – P. 134–141.

5. Hsuan, T.-C. Effects of aging treatment on mechanical properties and microstructure of Sn-8.5Zn-0.5Ag-0.01Al-0.1Ga Solder / T.-C. Hsuan, K.-L. Lin // *Materials Science and Engineering*. – 2007. – V. 456. – P. 202–209.

© Бондарь А. А., Демьянов Б. Ф., 2019.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. О. Трусов, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Процесс изготовления – один из наиболее существенных факторов, от которых зависит успешное применение улучшенных композиционных материалов в изделиях различных типов. Особая значимость процесса изготовления определяется следующими причинами: необходимостью изготовления основного конструкционного материала из исходных однонаправленных или тканых полотен до или одновременно с получением самих изделий; сложностями, которые вызываются увеличением количества технологических параметров, характерных для переработки гетерогенных многокомпонентных материалов; трудностями при переработке некоторых компонентов; чрезвычайной важностью строгого контроля процесса для достижения монолитности и постоянства свойств продукции; высокими требованиями к соединяемым или контактирующим поверхностям.

В работе анализируются технологические процессы (контактное формование и вакуумная инфузия), способные обеспечить получение полезных, удобных в эксплуатации, поддающихся ремонту, экономически эффективных, конкурентоспособных изделий. Анализ должен дать достаточный объем информации для принятия обоснованных решений при выборе конкурирующих технологий, основываясь не только на их технических достоинствах, но и учитывая такие сравнительные показатели, как легкость и стоимость изготовления, возможность эффективного контроля и экономической эксплуатации.

Ключевые слова: *ручная выкладка, вакуумная инфузия.*

Ручная выкладка (рисунок 1) – при этом методе стекло-армирующий материал вручную пропитывается смолой при помощи шпателей или валиков. При данном процессе формования предварительно раскроенный армирующий материал укладывается в оснастку, обработанную разделительным агентом для того что бы готовую деталь было удобно снять из матрицы и покрытую гелькоутом для создания защитного слоя конечного изделия. где он прикатывается прикаточными валиками или выкладывается при помощи шпателей и фена, но температура фена не должна превышать 50 °С, при данной температуре препрег проще продавливать, т. к он становится более податливым и не нарушает целостность стекломате-

риала. Прикатка осуществляется с целью удаления из препрега воздушных включений и равномерного распределения смолы по всему объему. Отверждение препрега происходит при обычной комнатной температуре (если это холодная выкладка или же в печи при 230 °С) после чего изделие извлекается из оснастки и подвергается мехобработке (обрезка обля, высверливание отверстий, склейке деталей, устранение погрешностей, если таковые имеются и т. д.).

Основные преимущества данного метода

Простота процесса:

1. Дешевизна используемых инструментов, если используются смолы, отверждаемые при комнатной температуре;

2. Разнообразие в материалах и компаний кто их поставляет;

3. Более высокое содержание стеклянного наполнителя и более длинные волокна по сравнению с методом напыления, рубленного роввинга.

Основные недостатки:

1. Качество смеси смолы и катализатора, качество препрега, содержание стеклообразующего в препреге очень зависят от квалификации рабочих.

2. Высокий шанс образования дефектов в готовом изделии (расслоение, непрожимы).

3. Малая производительность метода.

4. Вредные условия труда.



Рисунок 1 – Ручная выкладка

Вакуумная инфузия

Вакуумная инфузия в данное время является самым перспективным методом получения композитов. Использование вакуумной инфузии, как процесса для получения изделий из композиционных материалов обусловлено рядом причин:

1. Получение композита с высоким содержанием армирующего материала.

2. Низкая пористость.

3. Отсутствие материалов с коротким сроком годности (препрегов), нет

ограничений по времени подготовки и сборки вакуумного пакета.

4. Отсутствие необходимости в дорогих автоклавах, прессах.

5. Возможность изготовления больших деталей целиком без разделения на составные части.

Вышеперечисленные факты способствовали ускоренному развитию технологии вакуумной инфузии и подтверждают превосходство над методом ручной выкладки.

Процесс вакуумной инфузии заключается в заполнении жидким связующим пор в предварительно отвакуумированном армирующем материале (рисунок 2).

Не маловажным является место ввода смолы. Возможны два варианта (рисунок 3). Первый предполагает ввод смолы в центр изделия. Второй – с периферийной его части. Для получения качественного изделия используют второй метод. Это позволяет смоле лучше войти в материал и течь по нему.

Соотношение волокна и смолы, достигнутое в процессе вакуумной инфузии, лучшее, чем результаты типичной ручной пропитки, комбинированной с последующим вакуумным откачиванием, производимым после нанесения смолы. Сама по себе смола очень хрупкая, поэтому любой избыток смолы значительно ослабляет деталь. Результат откачивания зависит от разных переменных, включая давление, тип смолы и продолжительность процесса.

После пропитки происходит отверждение жидкой смолы с образованием жесткой полимерной матрицы,

обусловливающей равномерное распределение нагрузки в композитном изделии. Наиболее частными материалами применяемыми являются стеклоткань и углеродная ткань. В ка-

честве связующего могут применяться различные смолы, такие как эпоксидные, полиэфирные, эпоксиполиэфирные и др.

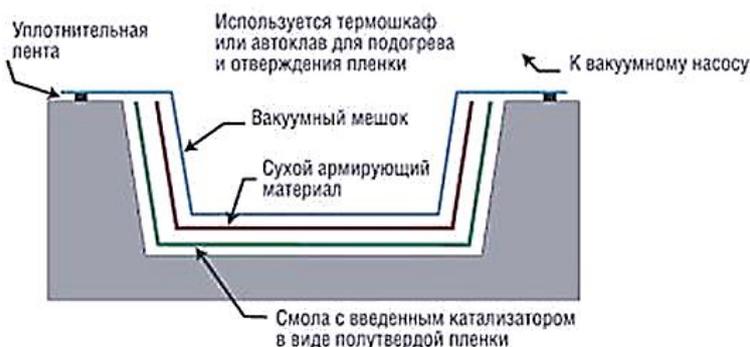


Рисунок 2 – Схема создания ПКМ методом инфузионного формования

При выборе связующего необходимо знать при каком уровне вакуума связующее может закипеть. Например, стирол, содержащийся во всех полиэфирных связующих, закипает при комнатной температуре, если давление в вакуумном пакете составляет менее 50 мм рт. ст. тогда как эпоксидные связующие не закипят даже при 1 мм рт. ст. Также необходимо убедиться, что связующее не содержит растворители, которые также будут закипать в процессе инфузии, способствовать образованию пор и понижению прочности изделия.

Ключевыми технологическими факторами, влияющими на качество конечного изделия, являются:

- герметичность пакета

При наличии даже мельчайшего отверстия или неплотного прилегания жгута композит будет пористым, иметь плохую поверхность, а также процесс инфузии может не пройти до конца.

- Уровень вакуума

При недостаточном вакууме (более 100 мм рт. ст.) армирующий материал сжимается недостаточно плотно и содержание связующего в изделии может быть завышенным, также может возрастать пористость.

- Вязкость смолы

Высоковязкая смола (с вязкостью выше 500–600 мПа*с) пропитывает материал медленно, тем самым могут образовываться пустоты/поры, как внутри композита так и на его поверхности

- Правильное распределение смолы с помощью проводящих сеток

При расположении проводящих связующее материалов желательнее чтобы от окончания проводящей сетки до вывода вакуума во всех точках было примерно равное расстояние 2–5 см. длина сетки без подвода связующего не более 1 метра. Существует несколько стандартных стратегий для крупногабаритных изделий по распределению подводящих трубок к

пропитываемой форме, такие как, рыбий скелет или параллельные последовательно открываемые вводы. Также для крупногабаритных изделий часто применяют моделирование пропитки.

- Аккуратная выкладка слоев ткани и вспомогательных материалов

При получении композита методом вакуумной инфузии большое внимание следует уделять выкладыванию слоев углеродной ткани, вспомогательных материалов и сборке вакуумного мешка.

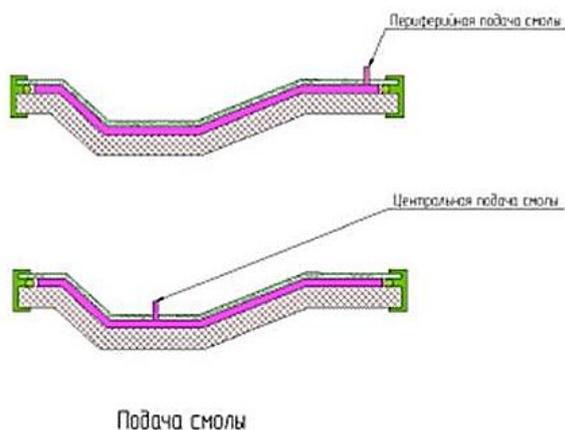


Рисунок 3 – Регулирование системы подачи смолы

Углеродная ткань должна быть плотно прилегать к оснастке или гелькоуту. При необходимости лучше произвести подклейку ткани к оснастке при помощи клея (спрея) или липкой ленты. Необходимо избегать возникновения натянутостей или точек неполного прилегания ткани к оснастке или гелькоуту, т. к. это может вызывать изменение геометрических размеров внутренней части изделия, а также приводит к увеличению веса конечного изделия в связи с образованием областей с повышенным содержанием связующего.

Во время закрепления дренажной сетки, которая распределяет связующее нужно помнить, что если использовать тонкий вакуумным мешок, она его может проткнуть.

После сборки вакуумного мешка необходимо убедиться в его герметичности, для этого нужно на некоторое время отключить насос и следить за тем, чтобы за 1 минуту вакуум не упал более чем на 8 мм рт. ст.

Предполагают, что смола, заполняющая пространство армирующего материала, подчиняется закону Дарси (течение жидкости в пористой среде).

Течение смолы через армирующий наполнитель моделируется законом Дарси, который устанавливает линейное отношение между скоростью потока и градиентом прикладываемого давления. С учетом гравитационных сил, которые необходимо учитывать при моделировании вакуумной инфузии крупногабаритных изделий, закон Дарси записывается следующим образом

$$\vec{w}_x = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \rho_{св} \vec{g} \right),$$

где k – эффективная проницаемость наполнителя; m^2 , μ – динамическая вязкость связующего; Па·с; ρ – плотность связующего, $кг/м^3$; \vec{g} – вектор ускорения свободного падения, м/с; w_x – вектор скорости движения связующего в пористой среде, м/с; P – давление, Па.

В уравнение движения, описывающее течение связующего сквозь армирующий наполнитель, входит вязкость связующего μ , которая в процессе термического отверждения композитов на основе термореактив-

ных связующих может быть представлена уравнением в виде температурной зависимости Аррениуса. Она в значительной мере зависит от температуры и степени отверждения и содержит реологические характеристики системы связующее–наполнитель: энергию активации вязкого течения $E_{\mu}(\beta)$, эффективную или структурную составляющую вязкости связующего при отверждении $\mu(\beta)$, а также коэффициент проницаемости наполнителя k_{TK} или впитывающего материала k_{BC} , которые можно определить экспериментально.

Из приведенных характеристик $\mu(\beta)$ и $E_{\mu}(\beta)$ являются функциями степени отверждения, две других – k_{TK} , k_{BC} – константами.

В результате вводится только минимальное количество смолы, необходимое на пропитку изделия. Это снижает вес, повышает прочность и улучшает соотношение волокон и смолы.

Данная технология широко применяется на практике не только в формостроении, но и при изготовлении непосредственно конечных изделий в кораблестроении, ветроэнергетике, автомобилестроении, в частности при тюнинге.

Несмотря на то, что время подготовки не ограничено, она достаточно сложная. Необходимо сделать подвод вакуума и входы смолы, а также разведение смолы по изделию. Размещение вакуумных и смоляных линий на разных деталях производится по-разному, и нет единой методики по их установке. Эти решения должны быть приняты до выкладки армирующего

вещества в оснастку. Неверные расчеты могут привести к порче изделия.

В заключении приведены примеры полученных нами изделий методом вакуумной инфузии (рисунки 4, 5).



Рисунок 4 – Изделие, полученное путём инфузии

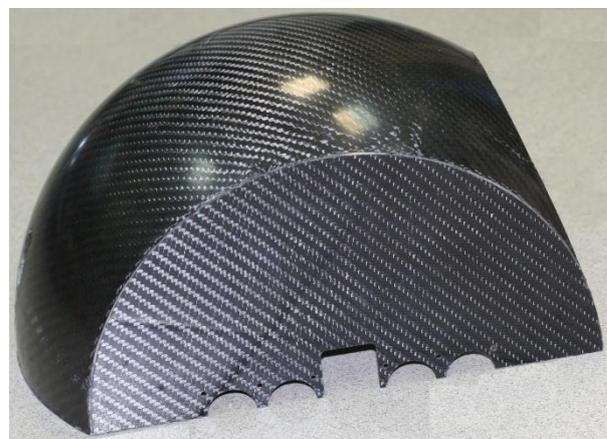


Рисунок 5 – Изделие, полученное путём инфузии

Подводя итог сравнения двух методов можно быть уверенным превосходством вакуумной инфузии над ручной выкладкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев, А. А. Измерение диэлектрической проницаемости стеклопластов : учеб.-метод. пособие / А. А. Беляев. – М. : Просвещение. – 2010. – 7 с.

2. Клеевые препреги [Электронный ресурс] // КМ. Режим доступа : <http://www.okleyah.ru/o-kleyah/kleevie-prepregi.php>.

3. Справочник по композиционным материалам [Электронный ресурс] // Студопедия. Режим доступа : http://studopedia.ru/3_75116_lektsiya-

obshchie-svedeniya-i-konstruktsii-raschet-vala-na-vibroustoychivost.htm.

4. Вакуумная инфузия [Электронный ресурс] // ИНУМиТ. Режим доступа: <http://www.inumit.ru/rus/biblioteka/vakuumnaya-infuziya/>.

5. Технология производства изделий из ПКМ [Электронный ресурс] // Уральский федеральный университет. Режим доступа: http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/3568/12/1358540_lectures_ch_2.pdf.

© Трусов Н. О., Головина Е. А., 2019.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БРОНЕСТЕКЛА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

О. О. Бойко, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Бронированное стекло представляет собой многослойное стекло, слои которого склеены между собой полимерными плёнками или заливаются специальным фотоотверждаемым полимером. Толщина бронированного стекла (составляющая от 10 до 80 мм и более) определяет степень защиты. Большая толщина стекла придаёт ему характерную зелёную непрозрачность. Изготовление любых защитных стекол регламентируется ГОСТ Р 51136–2008.

Ключевые слова: *бронестекло, прозрачная броня, ситалл, ПВБ пленка, трещиностойкость, технология, закаленное стекло.*

В СССР работы по созданию прозрачной брони на основе органического стекла проводились Всесоюзным институтом авиационных материалов ВИАМ. Бронированное стекло может также изготавливаться из стекла с применением химических добавок (просветлённое стекло. При этом, несмотря на толщину бронированного стекла оно остаётся прозрачным и практически неотличимым от обычного. Применение бронестекол началось в конце 1930-х годов и было вызвано развитием военной авиации. Появляется необходимость защиты лётчика от пулемётного огня самолётов противника.

В наше время бронестекла используются повсеместно, большое количество бронезащиты идет для военных нужд (авиация, бронезилеты, бронев автомобили, бронестекла для сооружений), или защиты первых лиц государства. В банковской сфере так же часто применяют бронестекла, для безопасности кассиров или инкассаторов (окна для касс, окна инкасса-

торских автомобилей), так же, многие богатые люди и политики специально бронируют свои автомобили, окна в домах, чтобы максимально обезопасить себя и своих близких.

На рисунке 1 представлены последствия механического повреждения двух видов стекол: закаленное, (часто применяющееся как основа для бронестекол) и незакаленное.

1. Конструктивно-технологические требования, предъявляемые к бронестеклу.

Технические требования. Стекло представляет собой композицию из нескольких силикатных стекол, склеенных между собой полимерными или другими склеивающими материалами. Изготовление любых защитных стекол регламентируется ГОСТ Р 51136–2008.

В зависимости от защитных требований допускается в сочетании с силикатными стеклами использование органических стекол, поликарбоната, противоосколочных пленок и других полимерных материалов.

Стекла должны изготавливаться в соответствии с требованиями настоящего стандарта и технических условий (ТУ) на конкретные стекла по

нормативным документам и чертежам предприятия-изготовителя, утвержденным в установленном порядке.



Рисунок 1 – Закаленное и незакаленное стекла после механических повреждений

Основные размеры. Размеры и предельные отклонения размеров должны соответствовать требованиям нормативных документов на конкретные стекла и не превышать значений, указанных в ГОСТ Р 51136–2008.

Номинальная толщина, число слоев и композиционный состав стекла должны обеспечивать защиту от заданного уровня воздействия и соответствовать нормативным документам на конкретное стекло.

Характеристики. Пороки внешнего вида стекол при использовании листового стекла марок М1, М2, М3 по ГОСТ 111, определяемые визуально, должны соответствовать нормам, если они не оговорены особо в нормативных документах на конкретное стекло.

Пулестойкое стекло в зависимости от классов защиты должно противостоять сквозному пробитию пулями или их фрагментами при обстреле из оружия.

Ударостойкое стекло должно противостоять воздействию ударов в зависимости от классов защиты.

Устойчивое к пробиванию стекло должно противостоять воздействию определенного числа ударов рубящим инструментом в зависимости от классов защиты.

Требования к материалам. Материалы, применяемые для изготовления стекол, должны соответствовать требованиям нормативных документов на конкретные стекла. Допускается использование силикатных бесцветных, окрашенных в массу, тонированных с различной степенью пропускания света, армированных и узорчатых стекол в соответствии с требованиями потребителя.

2. Методы изготовления бронестекла

Существует не так много методов, с помощью которых можно изготовить бронестекло, самый распространенным является метод много-

слоистого стекла, когда из некоего количества стекол и пленок между ними, делают единую конструкцию.

Метод многослойного стекла (сэндвич пакет). Для производства такого стекла, как правило, используют автоклавную технологию для того, чтобы соединить полимерной пленкой или жидкостью для ламинирования стекла. Триплекс стекло, изготовление которого происходит при высокотемпературном режиме, производится только с помощью специального оборудования.

Стоит отметить, что изготовление триплекса с применением автоклава – довольно опасный технологический процесс. При ошибке изготовление может повлечь за собой взрыв стекла.

Изготовление триплекса вторым способом – более безопасная технология. Такой метод называется вакуумное ламинирование. Суть технологии заключается в том, что производство безопасного стекла начинается с обработки поверхности и кромки стекла.

Далее производитель приступает к укладке пленки. После проделанных действий материал помещается в профессиональную вакуумную установку.

В агрегате производство проходит в несколько этапов:

- Выдержка материала.
- Охлаждение стекла.
- Холодный вакуум.
- Термическая обработка поверхности.

3. Проектирование слоистого материала для изготовления бронестекла.

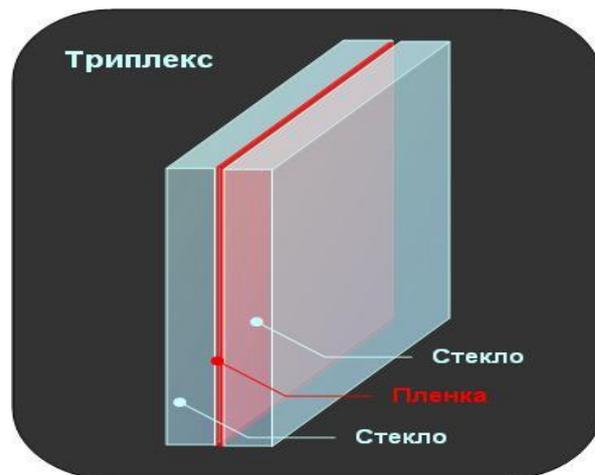


Рисунок 2 – Схема строения триплекса

Для удовлетворения комплекса прочностных и производственных требований при изготовлении качественного бронестекла используют определенные марки закаленных стекол, полимерные пленки (или жидкие связующие). Ниже представлены необходимые компоненты для создания будущего бронестекла.

Силикатное стекло. Силикатное или известково-натриевое стекло – примерно на 70 % состоит из кремния (диоксида кремния), на 15 % из соды (оксида натрия) и на 9 % из извести (оксида кальция) с добавлением в небольших количествах других компонентов, используемых в качестве осветлителей или красителей. Данное стекло характеризуется прозрачностью, прочностью, невысокой себестоимостью, *варят* данное стекло при температуре 1460–1470 °С. Плотность = 2500–2600 кг/м³. Температура плавления находится в диапазоне 400–600 °С.

Поливинилбутиральная пленка PVB. Используется при изготовлении триплексного стекла, которое в свою

очередь применяется при остеклении транспортных средств (автомобилей, железнодорожных вагонов, самолётов, судов и т. п.), окон и фасадов зданий, бронировании стекла и других современных технологиях.



Рисунок 3 – Автомобильное бронестекло

Данная пленка обеспечивает три главных свойства:

1. Повышает ударную прочность стекла.
2. Удерживает осколки в случае разбития стекла.
3. Подвергается пластической деформации при ударе и при статических нагрузках после удара, что особенно важно, например, при аварии или обстреле из огнестрельного оружия.

Ситалл. Ситалл представляет собой стеклокристаллические материалы, полученные объёмной кристаллизацией стекол, и состоящие из одной или нескольких кристаллических фаз, равномерно распределённых в стекловидной фазе.

Ситаллы обладают малой плотностью (они легче алюминия), высокой

механической прочностью, твёрдостью, жаропрочностью, термической стойкостью, химической устойчивостью и другими ценными свойствами. Ситаллы имеют большинство положительных свойств, которые есть у стекла, в т. ч. и технологичность. Существуют ситаллы со специальными свойствами: прозрачные, магнитные, полупроводниковые, радиопрозрачные и другие. Твёрдость большинства ситаллов 6,5–7 единиц по Моосу, предел прочности на изгиб до 250 МПа, термостойкость до 1000 °С.

4. Технологический процесс изготовления бронестекла

Перед непосредственным процессом изготовления защитного стекла необходимо провести подготовку всех необходимых инструментов и принадлежностей, а также провести входной контроль всех компонентов будущей конструкции

Входной контроль материалов. Целью входного контроля является проверка соответствия свойств исходного сырья сертификату на продукт.

Устройство и процесс вытягивания стекла. Для изготовления сверхтонкого стекла применяется устройство для вытягивания, которое представляет собою стол с подогревом, на котором закреплены две планки: подвижная и не подвижная. Заготовка из стекла закрепляется на обеих планках одновременно, после прогрева заготовки до температуры размягчения. Подвижная планка начинает плавно растягивать заготовку до определенной толщины. После этого готовое стекло остывает при температуре, которая гарантирует отсутствие внутренних напряжений в готовом стекле.



Рисунок 4 – Схема технологического процесса изготовления бронестекла

Лазерная резка стекла. Подразумевает собой плавление материала при помощи лазерного луча. С ее помощью можно существенно повысить качество готовой продукции и снизить время на ее изготовление. Каждый разрезанный лист стекла практически не нуждается в последующей обработке его кромки. Обусловлено это тем, что края детали притупляются во время их оплавления и не несут опасности при прикосновении к ним.

Закалка и отжиг стекла. Заготовка нагревается до температуры, необходимой для закалки в специальных печах. Это управление процессом закаливания при помощи прогрессивных компьютерных технологий. И по

завершении процесса стекло остужают. После закалки стекло проходит процесс отжига. Все операции производятся в специальном помещении, где есть необходимые условия для данного процесса.

Сборка и обработка готового пакета в вакуумной камере. Для того чтобы дегазировать пакет из стекол, помещаем ее в вакуумную камеру и откачиваем воздух. Предназначена для изготовления многослойного стекла (триплекс) методом вакуумного ламинирования.

Выходной контроль. Все готовые бронестекла должны проходить контроль качества, для этого их очень внимательно при хорошем освещении

осматривают для того, чтобы понять, не повредилось ли стекло (трещины, сколы) или пленка при сборке, нет ли внутри пакета пузырьков воздуха.

Вывод. Технология изготовления и разработка технологического процесса, подбора материала, представляет собой многоэтапный процесс. Так же, представлен оптимальный вариант, в котором сразу описан необходимый инструмент, установки и печи, описаны допустимые температуры и время выдержки на каждом этапе «сэндвич пакета» для создания стекла специального назначения. Данная технология позволяет изготавливать высококачественную продукцию, себестоимость которой будет сравнима с аналогичной, предлагаемой другими производителями, однако при этом она будет обеспечивать нужные характеристики и даже превышать аналоги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников, И. В. Стекло и его свойства. Сырьевые материалы для стекловарения. Приготовление шихты [Текст] : учеб. пособие / И. В. Мельников, И. А. Печенежская, 2013. – 687 с.
2. Казьмина, О. В. Химические технологии стекла и ситаллов [Текст] : / Э. Н. Беломестнова, А. А. Дитц. – 2011. – 346 с.
3. Клиндт, Л. Стекло в строительстве. Свойства, применение, расчеты [Текст] / Л. Клиндт, В. Клейн. – 1973. – 200 с. – С. 6–16.
4. Казьмина, О. В. Химические технологии стекла и ситаллов [Текст] / О. В. Казьмина Э. Н. Беломестнова, А. А. Дитц. – 2011. – 284 с.
5. Поливинилбутиральная пленка [Электронный ресурс]. – URL <http://vsplast.ru/pvb>.
6. Оборудование для триплекса [Электронный ресурс] URL <https://clemar.ru/equipment/triplex/20x3/>.

© Бойко О. О., Головина Е. А., 2019.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЛЬЦА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

И. Е. Семенчук, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

В настоящее время во всем мире наблюдается повышенный интерес к использованию в различных отраслях экономики нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Ведется бурная дискуссия о выборе путей развития энергетики. Ветроэнергетика является одним из основных фаворитов. Это связано, прежде всего, с растущей необходимостью охраны окружающей среды и истощением ископаемых природных ресурсов

Ключевые слова: *кольцо ветрогенератора, стекловолокно, эпоксидная смола, намотка.*

Ветроэнергетика – отрасль энергетики, специализирующаяся на преобразовании кинетической энергии воздушных масс в атмосфере в электрическую, механическую, тепловую или в любую другую форму энергии.

Ветрогенератор – это устройство для преобразования кинетической энергии в механическую с последующим её преобразованием в электрическую энергию.

Ветрогенераторы делятся на два основных типа:

- вертикальный – турбина расположена вертикально по отношению к плоскости земли. Начинает работать при небольшом ветре;
- горизонтальный – ось ротора вращается параллельно земной поверхности. Имеет большую мощность преобразования энергии ветра в переменный и постоянный ток.

Более подробно хотелось бы остановиться на ветрогенераторах с вертикальной осью вращения. Такие ветрогенераторы могут работать с ветром, скорость которого может быть 2 м/с. При этом все составные части ветрогенератора должны иметь не-

значительный вес, антикоррозионные свойства и достаточную прочность.

Для хорошего развития в области ветроэнергетики необходимо постоянное совершенствование уже существующих и разработка новых материалов при изготовлении деталей, которые бы удовлетворяли определённым характеристикам, таким как: надёжность, долговечность, простота технологического процесса. Так же необходимо оптимальное сочетание технологичности материалов в производстве и применение с эксплуатационными характеристиками и низкой стоимостью. Поэтому в настоящее время все больше перспективное развитие в ветроэнергетики находят полимерные материалы.

Обеспечить надёжность и большой период эксплуатации ветряной турбины можно, используя, в частности, материалы для лопастей, которые обладают очень высокой жесткостью, прочностью, сопротивляемостью к усталостному повреждению и к воздействию внешних факторов, а также низким весом. Для этого переловые композиционные материалы должны быть разработаны, усовер-

шенствованы и использованы в ветровых турбинах

Анализ условий работы и конструктивно-технологические требования, предъявляемые к кольцу ветрогенератора

Задачей кольца ветрогенератора является поддержка лопастей. Условия эксплуатации напрямую зависят от климатических факторов.

Кольцо ветрогенератора должно отвечать следующим основным требованиям:

- высокое сопротивление коррозии;
- высокая прочность;
- малый вес.

К кольцу ветрогенератора предъявляются высокие требования. Выполнение этих требований обеспечивается соответствующим выбором форм кольца, материала, соответствующие основным требованиям к кольцу, место расположения ветрогенератора.

Так как ветрогенераторы с вертикальной осью вращения не требуют расположения непосредственно по движению потока воздуха, они быстрее набирают обороты при усилении ветра, чем крыльчатые конструкции, сами реагируют на смену направления и надолго сохраняют скорость вращения.

Условия эксплуатации:

- лопасти должны крепиться к кольцу ветрогенератора, обеспечивая неподвижность (опционально – вращение вокруг вала контурного стыка под действием центробежных сил);
- максимальная скорость ветра 50 м/с;

- температура окружающей среды от минус 40 до плюс 60 °С;

- влажности до 98 % при температуре 25 °С.

Анализируя рабочие характеристики ветрогенератора, его возможности, можно сделать вывод, что в процессе работы ветряка на него будет действовать центробежная сила и сила ветра.

Для того, чтобы рассчитать нагрузки, действующие на ветрогенератор, необходимо знать место его расположения. В зависимости от природных условий идет расчет нагрузок.

Кольца ветрогенератора – это ответственные детали ветрогенератора, между которыми располагаются лопасти. Кольцо ветрогенератора всегда выполняется в виде обода (рисунок 1).

Эффективность работы ветряка зависит от скорости ветра, веса деталей ветряка, площади лопасти.

Материалы для изготовления кольца ветрогенератора и методики исследования материала

Среди наиболее важных требований, предъявляемых к конструкции кольца ветрогенератора, можно назвать: минимальную массу, максимальную износостойкость, прочность, максимальный ресурс работы конструкции в условиях эксплуатации, долговечность. В значительной мере перечисленные требования к конструкции обеспечиваются выбором материала и совершенством технологии изготовления конструкции из данного материала.

В данном проекте в качестве используемого материала было выбрано

стекловолокно, в роли оправки используется пенопласт.

Одним из компонентов для изготовления кольца ветрогенератора была выбрана эпоксидная смола ЭДТ-69Н, т. к. она объединяет в себе оптимальные свойства для данного изделия.

Ткань Т-10-14 имеет оптимальную толщину с точки зрения технологич-

ности и сатиновое плетение: одна нить основы перекрыта семью нитями утка сверху и одной нитью снизу с образованием нерегулярного рисунка. Ткань такого плетения очень гибкая, удобна для различных выкладок тканей, имеет высокую плотность по утку и основе, обладает максимальной изотропной прочностью в композите.

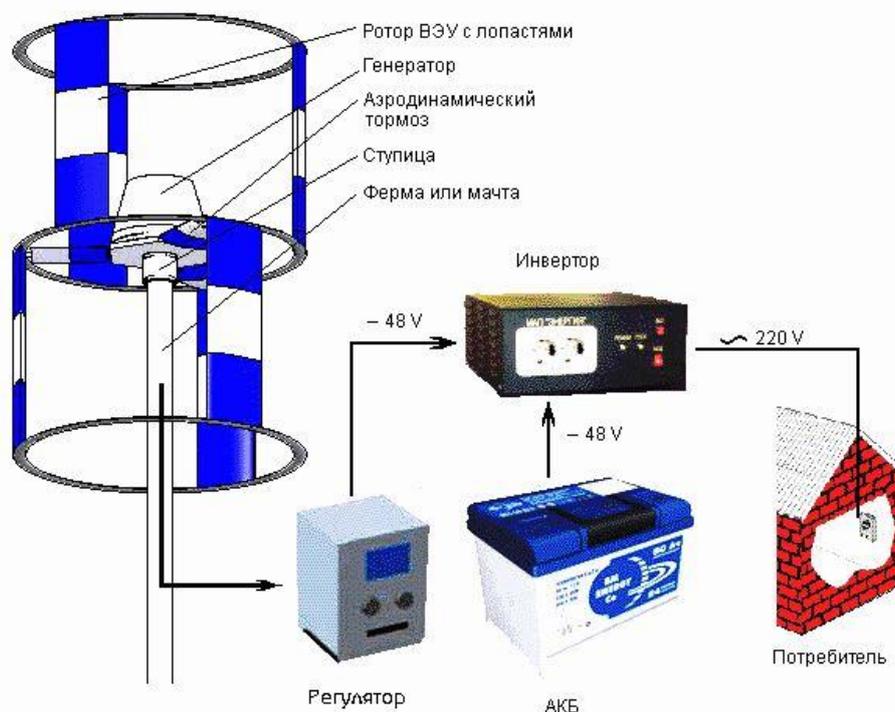


Рисунок 1 – Схема ветряной электростанции [1]

Технологический процесс изготовления кольца ветрогенератора

Для производства кольца ветрогенератора был выбран метод сухой намотки [4].

Способ сухой намотки (рисунок 2) заключается в том, что намотка производится с помощью полуфабрикатов, являющихся предварительно пропитанными связующими и подсушенными жгутами или лентами. Перед укладкой препреги проходят че-

рез горячие валки либо через нагревательную камеру и в размягченном виде укладываются на оправку.

Из двух видов намотки, каждый из которых имеет свои недостатки и преимущества, чаще всего используется сухая намотка. Она обеспечивает не только более качественную пропитку, но и требуемое равномерное содержание связующего в препреге.

Обязательная стадия процесса - отверждение намотанной на оправку

заготовки. При этом заготовка может быть дополнительно уплотнена с помощью вакуумного или надувного мешков.

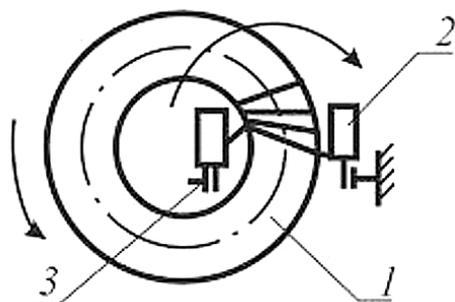


Рисунок 2 – Кинематические схемы спиральной намотки оболочек двойной кривизны: 1 – оправка; 2 – раскладчик; 3 – планшайба. Вращение раскладчика на планшайбе вокруг кольцевой оси торцевой оправки

Термообработка связующего может проводиться как в специальных

камерах, так и за счет нагревателей, размещенных на самой оправке.

Высокая прочность изделий, полученных намоткой, достигается за счет ориентированной укладки наполнителя, его высокого содержания в материале изделия. При однонаправленной укладки объемное содержание стекложгута может достигать 90 %, а разрушающее напряжение при растяжении стеклопластика 300 кН, в то время как для стеклохолста – 50 % при показателе прочности стеклопластика не выше 50–70 кН (разрушающее напряжение при растяжении стеклопластиков с неориентированной структурой наполнителя, полученных методом напыления, составляет только 10–15 кН).

Технологическая схема процесса изготовления кольца ветрогенератора представлена на рисунке 3.

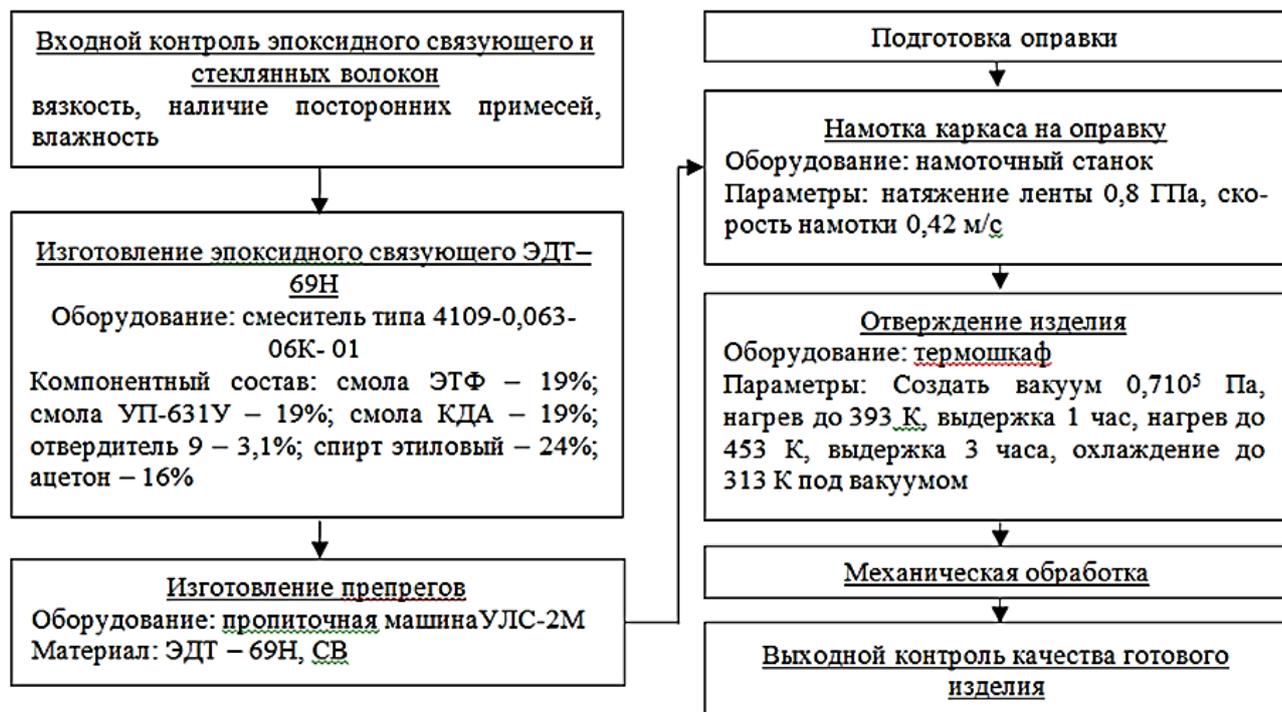


Рисунок 3 – Технологическая схема процесса изготовления кольца ветрогенератора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешов, Е. В. Магнитоэлектрический синхронный генератор на базе асинхронной машины для автономной ветроэлектрической установки / Диссертация. – Владивосток. – 2001. – 160 с.
2. Композиционные материалы в ветроэнергетике: [Электронный ресурс]. URL : <http://basalt.today/ru/2016/08/6783/>.
3. Воробей, В. В. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей / учебник [Текст] / В. В. Воробей, В. Б. Маркин. – Н. : Наука, 2003. – 164 с.
4. Техническое задание на изготовление кольца ветрогенератора.

© Семенчук И. Е., Головина Е. А., 2019.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ ОБШИВКИ САМОЛЕТА

С. Г. Коваль, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Технология контактного формования разработана для изготовления многих деталей и конструкций. Этим методом легко получать изделия сложной формы, в т. ч. и с двойным очертанием, а также сравнительно крупные детали. Процесс, в принципе, может быть использован и в тех случаях, когда нельзя применять высоких давлений формования.

Ключевые слова: препреги, метод контактного формования.

Контактное формование заключается в том, что на форму (шаблон), изготовленную из дерева, гипса, алюминия, бетона, стеклопластика или из других материалов, наносят заготовки стекловолоконистого армирующего наполнителя и покрывают их связующим – смолой, содержащей отверждающие и другие добавки.

Форма может быть монолитной или состоять из нескольких съемных частей. Стекловолоконистый наполнитель может быть применен в

виде матов, жгутов, тканей и других материалов.

Метод контактного формования применяется для изготовления строительных конструкций, корпусов лодок, кузовов автомобилей, для футеровки химических аппаратов, различных емкостей.

В производстве изделий связующее наносят вручную при помощи кисти или распылительного пистолета.

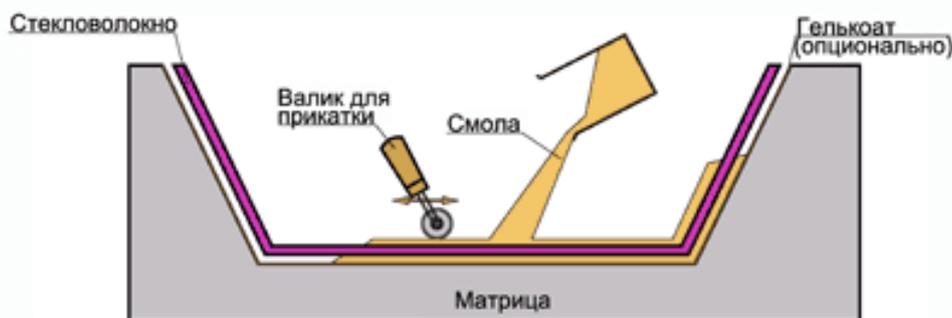


Рисунок 1 – Схема контактного формования

Армирующий стекловолоконистый наполнитель и связующее накладываются на форму послойно, а для уплотнения композиции и выдавливания из нее воздуха осуществляется прикатывания материала рифленым вали-

ком. Так как связующее обладает повышенной адгезией к форме, то ее предварительно смазывают антиадгезионным разделительным слоем, в качестве которого применяют кремнийорганические смолы, ПВС, полиизо-

бутилен, воск и др. После уплотнения пластика изделие можно покрыть пленкой и дополнительно его прикапывают гладким валиком. Это необходимо, чтобы разгладить неровности и удалить избыток связующего. Отверждение связующего может осуществляться при повышенной температуре с применением ИК-нагревателей или горячего воздуха. Отверждение может осуществляться и при обычных условиях. При контактном методе находят применение негативные, позитивные, универсальные формы.

Основные преимущества:

1. Простота процесса.

2. Недорогие используемые инструменты, если используются смолы, отверждаемые при комнатной температуре.

3. Широкий выбор поставщиков и материалов.

4. Более высокое содержание стеклянного наполнителя и более длинные волокна по сравнению с методом напыления рубленого ровинга.

Основные недостатки:

1. Качество смеси смолы и катализатора, качество ламината, содержание стеклообразующего в ламинате очень зависят от квалификации рабочих.

2. Высокая вероятность воздушных включений в ламинате.

3. Малая производительность метода.

4. Вредные условия труда.

5. Колебание соотношения «стекловолокно-связующее» в изделии.

Формование препрегом

Препреги – это композиционные

материалы-полуфабрикаты. Их получают путем пропитки армирующей волокнистой основы равномерно распределенными полимерными связующими. Пропитка осуществляется таким образом, чтобы максимально реализовать физико-химические свойства армирующего материала. Препреговая технология позволяет получить монолитные изделия сложной формы при минимальной инструментальной обработке.

Используемые материалы:

1. Оснастка (стойкая к температуре).

2. Препрег (армирующий материал, пропитанный «горячим» связующим на специальном оборудовании).

3. Жертвенный слой.

4. Перфорированная плёнка.

5. Впитывающий слой.

6. Вакуумная пленка.

7. Автоклав.

Схема формования препрегом представлена на рисунке 2.

Основные преимущества:

1. Низкая сложность укладки ламината.

2. Чистый процесс.

3. Высокое качество композита.

Основные недостатки:

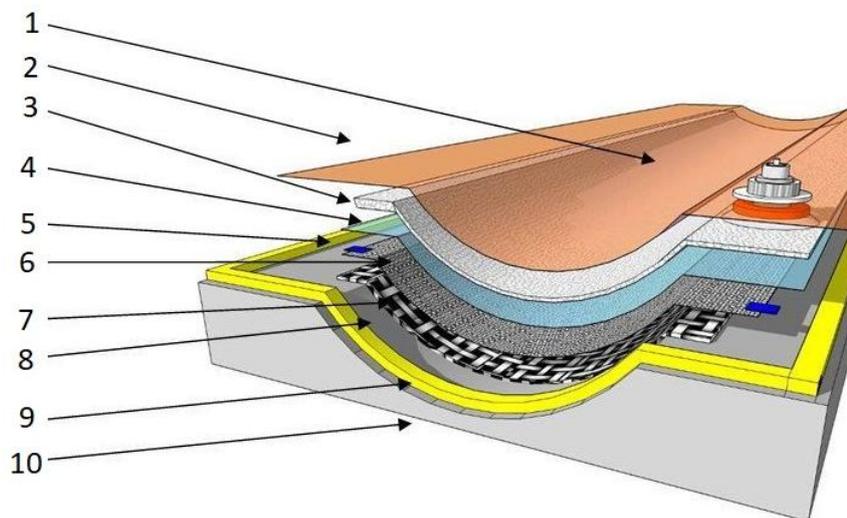
1. Повышенные требования к оснастке и вспомогательным материалам (высокая температура полимеризации).

В конечном итоге выявляется превосходство формования препрегом над контактном формованием. Формование препрегом позволяет получить высокого качества композиты с однородным соотношением «стекловолокно-связующее», более низкий

вес изделия (до 20 %), высокую производительность труда.

Формирование препрегом целесообразно применять для крупносерий-

ных деталей. Для мелкосерийных деталей лучше подойдет контактное формование, т. к. не требует дорогостоящей оснастки.



1 – вакуумный штуцер; 2- вакуумная пленка; 3 – впитывающий слой;
4 – перфорированная пленка; 5 – липкая лента; 6 – жертвенный слой;
7 – препрег; 8 – разделитель; 9 – перлен; 10 – оснастка

Рисунок 2 – Схема формования препрегом

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нелюб, В. А. Технологии получения препрегов / В. А. Нелюб. – М., 2013.

2. ГОСТ 32794-2014 Композиты полимерные. Термины и определения.

3. Клеевые препреги и композици-

онные материалы на их основе (КМКС, КМКУ) : свойства, производство и применение ; материалы семинара в ЦДЗ / Л. А. Дементьева [и др.]. – М., 2010.

© Коваль С. Г., Головина Е. А., 2019.

ИСПЫТАНИЕ СПРОЕКТИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЫЛА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. А. Павлов, С. В. Морозов

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Объектами исследования в работе являются материал и технология изготовления автомобильного крыла.

Цель работы: проектирование материала для изготовления крыла легкового автомобиля и технологического процесса для его получения, который должен соответствовать эксплуатационным требованиям.

В результате работы был спроектирован материал для изготовления крыла легкового автомобиля, который соответствует эксплуатационным требованиям, а также разработана технология для его изготовления.

Ключевые слова: *стеклопластик, полиэфирное связующее, автомобильные крылья.*

Автомобильный транспорт сегодня стал реальным и неотъемлемым социальным фактором, который органично вписывается в нашу современную жизнь. Без него в настоящее время невозможно представить современный мир.

Крыло – важная деталь в автомобиле, которая защищает водителя и других участников дорожного движения от выброса из-под колёс грязи, камней и снега. Традиционно крылья бывают металлическими и пластиковыми. И современным автомобилям они кроме защитной функции дают еще и элемент эстетики, т. к. делают формы кузова автомобиля более плавными, изящными и аэродинамичными.

Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ), могут быть не менее прочными, чем сталь. При этом ПКМ легче, долговечнее и проще поддается обработке. Это открывает широкие горизонты использования этих элементов в автомобильной промышленности.

Основными факторами, обуславливающими значительное внедрение полимеров в конструкцию автомобилей, являются:

- уменьшение веса автомобиля, что приводит к снижению расхода топлива;

- применение пластиков помогает не только отказаться от дорогостоящих цветных металлов и нержавеющей сталей, но и сократить энерго- и трудозатраты в процессе производства, а значит, снизить стоимость автомобиля;

- повышение долговечности и эксплуатационных характеристик автомобиля.

В статье проектирование материала для изготовления крыла легкового автомобиля из композиционных материалов, был выбран стеклопластик на основе стеклоткани Т-11 и связующего ПН-1. Также была проведена проверка по теории монолитности подобранных компонентов.

Определение физико-механиче-

ских характеристик и толщины изделия. Для определения физико-механических характеристик спроектированного материала воспользуемся правилом смеси.

По правилу смеси рассчитаем физико-механические свойства спроектированного материала.

Развитие методов расчета прочности изделий и конструкций из КМ основывается на использовании следующих трех принципов:

1) расчетная модель и созданные на ее основе методы расчета должны исходить из форм исчерпания несущей способности изделия и должны быть подтверждены экспериментально;

2) упрощающая гипотеза о свойствах материала, конструкции и эксплуатационных нагрузках должна обеспечивать некоторый запас прочности, однако без излишнего увеличения массы или преждевременного разрушения;

3) методы расчета должны допускать определенное варьирование свойств и структуры материала с тем, чтобы можно было оптимизировать конструкцию, прежде всего по основному критерию – минимуму массы.

Сложность строения КМ и существенные отличия в их поведении при деформировании и разрушении по сравнению с традиционными конструкционными материалами приводит к необходимости использования методов математического моделирования с помощью ЭВМ. В связи с этим при оптимизации конструкций из КМ получили применение частные критерии: равнопрочность волокон, безмо-

ментное состояние, максимум критических нагрузок, минимум отклонения спектра собственных частот колебаний от заданных и др. [1].

В связи с этим в настоящее время расчеты на прочность изделий из КМ с учетом их оптимизации при проектировании разработаны лишь для простых видов нагружения.

Так как свойства КМ определяются свойствами составляющих его матрицы и арматуры, то необходимо установить зависимость свойств КМ от концентрации (количества) этих составляющих [1].

$$X_{\text{KM}} = X_{\text{B}} \cdot V_{\text{B}} + X_{\text{M}}(1 - V_{\text{B}}), \quad (1)$$

где X_{KM} – свойство композиционного материала; X_{B} – свойство волокна; V_{B} – объемная доля наполнителя; X_{M} – свойство матрицы.

Правило смеси подходит для расчёта свойств композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами.

$$\rho_{\text{KM}} = \rho_{\text{B}} \cdot V_{\text{B}} + \rho_{\text{M}}(1 - V_{\text{B}}), \quad (2)$$

где ρ_{KM} – плотность композиционного материала; ρ_{B} – плотность волокна; V_{B} – объемная доля наполнителя; ρ_{M} – плотность матрицы. Подставим в уравнение 2 следующие данные $V_{\text{B}} = 0,6$, $\rho_{\text{B}} = 2,5$ МПа, $\rho_{\text{M}} = 1,3$ МПа. Получаем $\rho_{\text{KM}} = 2,02$ кг/м³.

$$G_{\text{KM}} = G_{\text{B}} \cdot V_{\text{B}} + G_{\text{M}}(1 - V_{\text{B}}), \quad (3)$$

где G_{KM} – прочность композиционного материала; G_{B} – прочность волокна, V_{B} – объемная доля наполнителя; G_{M} – прочность матрицы. Подставим в уравнение 3 следующие данные $V_{\text{B}} = 0,6$, $G_{\text{B}} = 3500$ МПа, $G_{\text{M}} = 63$ МПа. Получаем $G_{\text{KM}} = 2125,2$ МПа.

$$E_{\text{KM}} = E_{\text{B}} \cdot V_{\text{B}} + E_{\text{M}} (1 - V_{\text{B}}), \quad (4)$$

где E_{KM} – модуль упругости композиционного материала; E_{B} – модуль упругости волокна; V_{B} – объемная доля наполнителя; E_{M} – модуль упругости матрицы. Подставим в уравнение 4 следующие данные $V_{\text{B}} = 0,6$, $E_{\text{B}} = 145$ ГПа, $E_{\text{M}} = 2,12$ ГПа. Получаем $E_{\text{KM}} = 87,85$ ГПа.

Толщина слоя равна сумме толщины наполнителя и матрицы.

Толщина стеклоткани 0,3 мм – 60 %, толщина матрицы x – 40 %.

$X = (0,3 \text{ мм}/0,6) \cdot 0,4 = 0,2$ мм. Толщина слоя равна 0,3 мм + 0,2 мм =

= 0,5 мм. Для обеспечения требуемых механических характеристик крыла легкового автомобиля, наносим 4 слоя. Толщина готового изделия составит 2 мм.

Результаты спроектированного материала занесём в таблицу 1.

Имитационное моделирование крыла легкового автомобиля

Проведем испытания в SolidWorks крыла легкового автомобиля, сделанного из спроектированного материала, исходные данные материала для испытания возьмем из таблицы 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства проектируемого материала

Свойства	Значение
Стеклоткань Т-11, %	60
Полиэфирная смола ПН-1, %	40
Плотность ρ_{KM} , кг/м ³	2,02
Предел прочности на растяжение σ_{KM} , МПа	2125,2
Модуль упругости E_{KM} , ГПа	87,85
Толщина слоя, мм	0,5

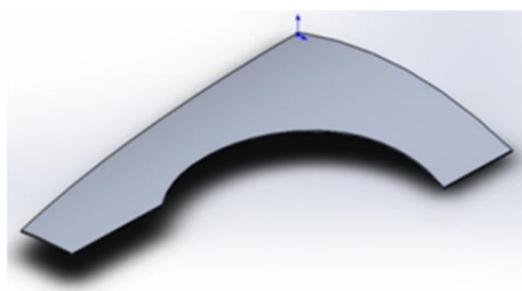


Рисунок 1 – Виртуальная модель переднего крыла легкового автомобиля в программе Solid Works

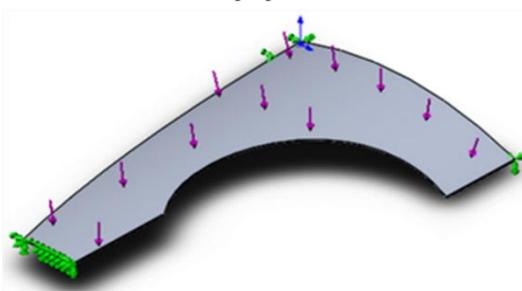


Рисунок 2 – Закрепление и нагружение модели крыла

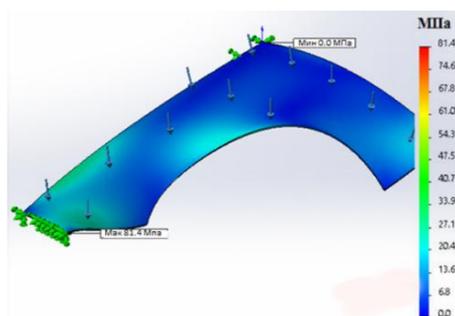


Рисунок 3 – Распределение напряжений от удара

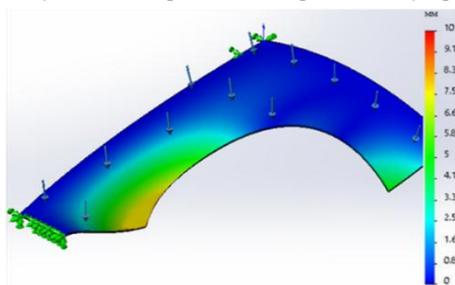


Рисунок 4 – Деформация крыла

По правилу смеси были проведены расчеты физико-механических свойств проектируемого композиционного материала: плотность 2,02 кг/м³; предел прочности 2125,2 МПа; модуль упругости 87,85 ГПа; толщина слоя 0,5 мм; 4 слоёв; толщина готового изделия 2 мм.

Из вышеприведенных результатов (рисунки 3, 4) расчетов виртуальной модели крыла автомобиля, произведенных в программе SolidWorks следует, что максимальные напряжения и деформации возникают в изделии в результате удара не превышают предела прочности материала. Следовательно, материал для изготовления крыла легкового автомобиля подобран верно. Проведя испытания видно, что значения, рассчитанные по правилу смеси, соизмеримы с данными программы SolidWorks.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что, ра-

ботая на сопротивление удару, данная конструкция удовлетворяет предъявляемым требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, Б. А. Проектирование элементов автомобиля из полимерных композиционных материалов ; под ред. Б. А. Афанасьева. – М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
2. Головкин, Г. С. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов : учебник для вузов / Г. С. Головкин. – М. : Химия, КолосС, 2007. – 399 с.
3. Барашков, Н. Н. Полимерные композиты : получение, свойства, применение / Н. Н. Барашков ; отв. ред. Я. М. Колотыркин, Ю. К. Годовский. – М. : Наука, 1984. – 127 с.

© Павлов Н. А., Морозов С. В., 2019.

ТРЕНАЖЕР ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ЛЕТНОГО ЭКИПАЖА НА ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЕ

С. С. Тимощенко, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Тренажер является важным средством подготовки летчиков с целью безопасности полетов, так как позволяет проводить подготовку летного состава по пилотированию, навигации в любых погодных условиях, нестандартных случаях полета

Ключевые слова: *тренажер, купольный экран, сэндвич-панели.*

Тренажер является важным средством подготовки летчиков с целью безопасности полетов, т. к. позволяет проводить подготовку летного состава по пилотированию, навигации в любых погодных условиях, нестандартных случаях полета и т. п.

Тренажер, оснащенный системой подвижности, дает возможность экипажу отрабатывать задачи обучения и, помимо этого, получить ощущения, присущие реальному полету. Общий вид, обустройство модели представлены на рисунках 1, 2.

Данный тренажер является составным и содержит в себе такие элементы как секционный купольный экран, платформы для крепления составных частей тренажера на механизм подвижности, переходные узлы крепления сферического экрана к подвижной платформе, элементы крепления проекторов, тренажера к платформе, дверной проем, элементы аварийной эвакуации и элементы системы вентиляции.

Купольный экран предназначен для проецирования внешней обстановки при работе тренажера. Геометрические характеристики экрана должны обеспечивать следующие углы обзора при расположении точки

визирования на плоскости экватора сферы экрана:

- по вертикали: $-20/+150$ градусов;
- по горизонтали: ± 150 градусов.

Исходными данными для расчета на прочность является максимальная перегрузка в любом направлении 2,5 g. Деформации рабочей поверхности купольного экрана, закрепленной в конструкции платформы подвижного основания при максимальной эксплуатационной перегрузке в 1,0 g не должны превышать 15 мм.

Платформа предназначена для крепления купольного экрана, кабины и других элементов тренажера к механизму подвижности и должна обеспечивать прочность крепления к нему.

Платформа предназначена для крепления купольного экрана, кабины и других элементов тренажера к механизму подвижности.

Дверной проем и дверь для входа в купольный экран предназначена для обеспечения входа персонала в купол тренажера и должна иметь размеры не менее 700×2000 мм. Дверь должна закрываться на защелку, обеспечивающей ее закрытое состояние при действии перегрузок согласно. Для обеспечения безопасности перед две-

рью должно быть защитное ограничительное ограждение.

Как видно из рисунков 1, 2, конструкция тренажера представляет собой сферу.

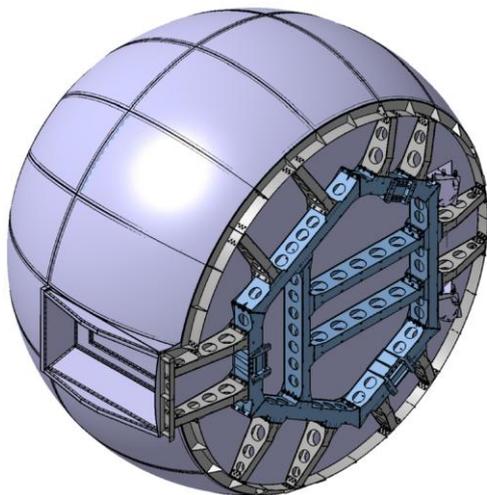


Рисунок 1 – Общий вид модели тренажера (вид снизу)

Конструкция сферы состоит из опоры, выполненной в виде сварной конструкции кольцевой формы из листовой стали 20 переменной толщины. Поверх которой уложен настил из алюминиевого листа, толщиной 10 мм.

На опорную конструкцию установлен сборный экран. Внешняя несущая часть экрана выполнена из панелей из композитного материала – на основе ткани Т10-14 и сотового наполнителя, усиленного по кромкам профилем таврового сечения.

На полку профиля монтируются внутренние сэндвич-панели, выполненные из композитного материала и сотового наполнителя (рисунок 3). В качестве композитного материала используется препрег на основе стеклоткани Т-10-14 (92) с наполнителем ЭДТ-69НМ

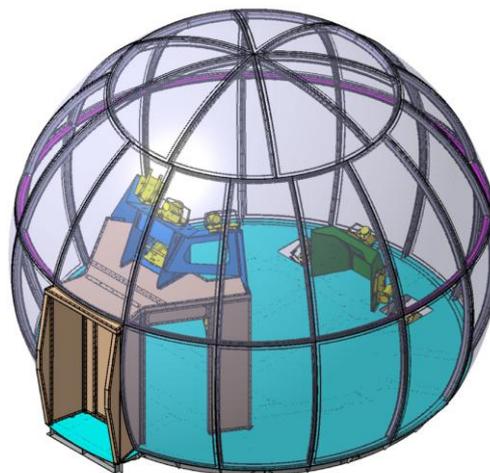


Рисунок 2 – Внутренние элементы конструкции



Рисунок 3 – Наружные композитные сэндвич-панели

На настил опоры устанавливаются опорные конструкции, предназначенные для установки проекционного оборудования массой 27 кг. Опорные конструкции выполнены в виде алюминиевых сэндвич-панелей, облицованных по кромке алюминиевым профилем, и соединяемых между собой посредством крепежа. Механические характеристики используемых материалов представлены в таблице 1.

Наружные и внутренние сэндвич-панели изготавливают методом термовакуумного формования [2].

На рисунке 4 представлена схема технологического процесса.

Таблица 1 – Характеристики материалов [1]

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{вр}$, МПа	E, МПа	δ , %	ρ , кг/м ³
Сплав АМг6	315	155	70800	15	2780
Сплав Д16Т	290	440	70800	10	2780
Сталь 20	250	420	210000	15	7800
Ткань Т10-14		$\sigma_{1вр}$, МПа	30000/19000	1/2	1900
		$\sigma_{2вр}$, МПа			
		630/-550			
		325/-358			



Рисунок 4 – Схема технологического процесса изготовления композитных сэндвич-панелей

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анурьев, В. И. Справочник конструктора машиностроителя / В. И. Анурьев. – 2001. – Т.1.
2. Справочник по композиционным материалам [Текст] : в 2-х кн. / Под ред. Дж. Любина ; пер. с англ.

А. Б. Геллера и др. / Под ред. Б. Э. Геллера. – М. : Машиностроение, 1988. – 584 с.

© Тимощенко С. С., Головина Е. А., 2019.

АЛЮМИНИЕВЫЕ ОГНЕСТОЙКИЕ КОМПОЗИТНЫЕ ПАНЕЛИ

Н. П. Черезов, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Объектами исследования в работе являются материал и технология изготовления композитной панели из алюминия и полиэтилена.

Цель работы: разработка материала для изготовления композитной панели и технологического процесса для ее изготовления, которая должна соответствовать требованиям прочности, эксплуатационным требованиям, требованиям пожарной безопасности.

В результате работы был спроектирован материал для изготовления композитной панели, который соответствует эксплуатационным требованиям и может быть использован в облицовки жилых зданий, а также разработана технология для его изготовления.

Ключевые слова: алюминий, полиэтилен, фасадная панель, композитный материал, размер конструкции, огнестойкость, проектируемый материал, технологический процесс, каландрование, нагрузки.

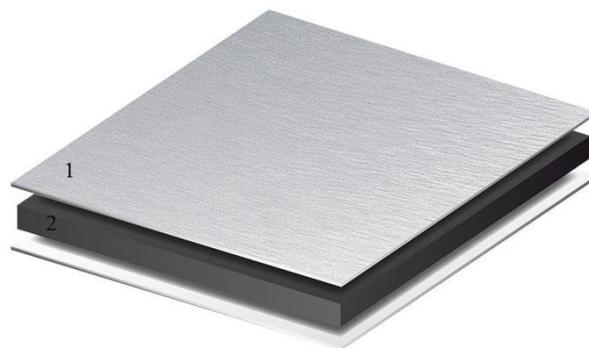
Алюминиевые композитные панели – строительный облицовочный композитный материал. Панели состоят из двух предварительно окрашенных алюминиевых листов толщиной до 0,5 мм, между которыми располагается средний слой – полимерная композиция на основе полиолефинов [1].

Интегрируясь в единую структуру, исходные материалы позволяют получить готовую панель, обладающую принципиально иными свойствами, чем свойства исходных компонентов в отдельности. Алюминиевая композитная панель, в силу особых свойств, может служить как отделочным, так и конструктивным материалом [2].

Сердцевина, полиэтиленовая или минеральная, прочно соединена с алюминиевыми листами с помощью адгезивных материалов, которые вводятся в процессе изготовления панели.

Алюминиевые композитные панели не являются теплоизолирующими материалами. Напротив, параметры

внутреннего полимерного листа подобраны так, чтобы обеспечить достаточно эффективный теплообмен, выравнивающий температуры и внутреннего алюминия (в противном случае при нагреве на солнце возможна деформация пластин) [4].



1 – алюминиевый лист;
2 – полимерная сердцевина

Рисунок 1 – Схематическое изображение композитной панели [1]

Преимущества алюминиевых композитных панелей

Наибольшую популярность приобрели композитные панели из алюминия, в связи с тем, что обладают следующими преимуществами:

- легкость, вес m^2 в зависимости от толщины материала весит от 3 до 8 кг;

- жесткость и прочность, позволяет изготавливать крупногабаритные кассеты для навесных фасадов и обеспечить монтаж в минимальные сроки;

- легкость обработки;

- структурная прочность;

- коррозионная стойкость;

- вибро- и звукоизоляция;

- устойчивость к воздействию агрессивной внешней среды и УФ-излучению;

- термоустойчивость;

- гибкость, способность алюминиевого композита к трансформации из плоского листа в любую криволинейную форму с острыми и закругленными углами.

- высокая степень огнестойкости;

- широкая цветовая гамма. Множество вариантов окраски позволяет оформить самые разнообразные архитектурные элементы в различной цветовой гамме.

- устойчивость к загрязнению. Покрытие панелей полиэфирным лаком и PVDF дает гарантию, что фасад не выгорит на солнце, не изменит цвет под воздействием атмосферной пыли, соединений серы и солевых взвесей, материал легко очищается от осевшей на него пыли и агрессивных налетов обычной водой.

- долговечность, гарантийный срок использования для вентилируемых фасадов составляет 25 лет [1].

Способы повышения огнестойкости композитных панелей

Выбор способа огнезащиты металлических конструкций на стадии

проектирования для конкретного объекта производится на основе технико-экономического анализа с учетом характеристик объекта:

- величины требуемого предела огнестойкости конструкции;

- сложности конфигурации конструкции;

- ограничений по весу огнезащитного покрытия;

- температурно-влажностных условий эксплуатации и производства строительно-монтажных работ;

- степени агрессивности окружающей среды по отношению к огнезащите и материалу конструкции;

- требуемых сроков проведения работ;

- эстетических требований к конструкции [3].

Использование различного по уровню пожароопасности композиционного материала влияет на пожарную опасность панели в целом, а сами алюминиевые листы с нанесенным тонкослойным покрытием имеют наименее опасные параметры пожарной опасности по группе горючести, воспламеняемости, дымообразующей способности и токсичности продуктов горения (соответственно, Г1, В1, Д1, Т1). Однако следует учитывать, что алюминиевое покрытие при пожаре может плавиться, а «плав» загорается с образованием горящих капель [3].

Полимерный наполнитель относится к классу горючести Г4 (горит под пламенем горелки, выделяя опасный дым и капая, и горит, когда пламя уже убрали).

Основная часть композитных панелей, представленных на российском

рынке, имеет сердцевину из вспененного полиэтилена [3].

Следовательно, для повышения огнестойкости композитной панели целом необходимо модифицировать полимерный наполнитель [3].

Антипирен – компонент, добавляемый в материалы органического происхождения с целью обеспечения огнезащиты.

Антипирены замедляют воспламенение и горение в связи с тем, что содержат замедлители горения (фосфаты аммония, бора, хлорид аммония), синергисты (вещества, усиливающие действие основного замедлителя) и стабилизаторы, ограничивающие расход замедлителя [3].

Способ введения антипиренов зависит от типа защищаемого материала. Так, древесину пропитывают раствором антипирена или наносят на её поверхность краску, содержащую антипирен. В синтетические полимеры антипирены могут быть введены на стадии их получения, при последующей переработке или в готовое изделие.

Антипирен чаще всего встречается в виде водного раствора или порошка. Они начинают действовать при достижении температуры в 170–200 °С.

Действие антипиренов основано на изоляции одного из источников пламени – тепла, горючего или кислорода [3].

Для защиты изделий из пластмасс обычно используются комбинации антипиреновразного типа действия, обладающие синергическим эффек-

том. Опыт показывает, что самое опасное при пожаре – это густой дым и токсичные продукты горения, поэтому в последнее время разработки в области антипиренов направлены именно на предотвращение образования дыма и токсичных газов [3].

Антипирены должны удовлетворять следующим требованиям: совмещаться с материалом и не мигрировать на его поверхность, не ухудшать механических и других физических характеристик материала, не разлагаться при переработке материала и эксплуатации изделия, быть нетоксичными, не выделять при горении токсичных продуктов и уменьшать дымообразование. Желательно также, чтобы антипирены были бесцветны, атмосферостойкими, обладали высокими диэлектрическими показателями [3].

Наиболее подходящим модификатором, повышающим огнеупорные свойства композита, является гидроксид алюминия. За счет низкой температуры плавления образуется тонкий защитный слой, который не позволяет кислороду получить доступ к горючиму полимерам. Так же он затрудняет воспламенение благодаря разложению при нагревании и выделению инертных паров или газов. И обладает дымоподавлением, что снижает риск опасности для людей из-за отравления дымом. В отличие от других видов антипиренов, гидроксид алюминия экологически безопасен и не имеет в составе галогенов [3].

Чтобы максимально повысить огнеупорные свойства полимера, требуется высокая степень наполненности гидроксидом алюминия с размерами частиц 1–100 мкм в количестве 75 % от общего объема.

Вывод

Алюминиевые композитные панели являются оптимальным вариантом для отделки фасад зданий, но для того, чтобы они соответствовали требованиям пожарной безопасности, необходимо модификация наиболее горючего среднего слоя. Благодаря добавлению в процессе создания полимера частиц гидроксида алюминия, мы повышаем огнеупорные свойства композита, до необходимых значений, что гарантирует длительную эксплуатацию изделия, без необходимости в ремонте, а также безопасность для человека и окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алюминиевые композитные панели : [сайт]. <http://www.aluminstroy.ru/products/steel-composite-panels/index.php>.
2. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. – М. : Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко, 2004. – 264 с.
3. Требования пожарной безопасности к наружной облицовке навесных фасадов : [сайт]. – URL : <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/322.html>.
4. Гальченко, А. Что скрывает композит / А. Гальченко, М. Сапрыкин // Вывески Реклама OUTDOOR. – № 11. - 2004.

© Черезов Н. П., Головина Е. А., 2019.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ РАДИАЦИОННО- И ТЕРМОСТОЙКОГО МАТЕРИАЛА

Л. А. Матюхина, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Объектами исследования в работе являются материалы и технология изготовления радиационно-термической защиты/костюма с использованием свинца и полиэтилена.

Цель работы: разработка материала для изготовления радиационно-термической защиты/костюма и технологического процесса для его получения, которая должна соответствовать требованиям прочности, условиям эксплуатации и требованиям техники безопасности, требованиям минимальной массы.

В результате работы была разработана радиационно-термический костюм, удовлетворяющий условиям эксплуатации, а также подобрана оптимальная технология производства.

Ключевые слова: полиэтилен, свинец, радиация, радиационно-термическая защита, модификация, технология.

Современный мир полон фактических и потенциальных очагов радиационной угрозы. Вопросы защиты человека от радиации регулируются на международном и национальном уровнях. Каждое государство руководствуется соответствующими законами и радиационными нормативами, в том числе при возникновении радиационной аварии. Основным нормативным документом в Российской Федерации, устанавливающим предельные уровни и суммарные дозы воздействия ионизирующих излучений всех видов, а также другие требования, ограничивающие облучение человека, являются санитарные правила «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009).

В настоящее время существуют и активно используются костюмы для работы пожарных в условиях повышенной температуры, так же имеются костюмы для работы при радиационном излучении. Стоит задача проектирования многослойного материала,

способного стать альтернативой существующим вариантам защиты, совмещающего в себе устойчивость одновременно к повышенной температуре и облучению радиации. Необходимо разработать технологию изготовления радиационно-термической защиты, подобрать оптимальные параметры процесса, обеспечивающие стабильность свойств и качества изделия.

Для проектирования материала необходимо определить условия работы костюма, изготовленного из данного материала и требования к данному костюму.

Требования к конструкции СИЗ от радиоактивных веществ согласно ГОСТ 12.4.217-2001 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства индивидуальной защиты от радиоактивных веществ и ионизирующих излучений. Требования и методы испытаний»:

1) СИЗ должны легко сниматься и надеваться;

2) СИЗ должны иметь минимальное количество швов, карманов, застежек и других мест скопления загрязнений;

3) конструкция СИЗ и распределение массы не должны сокращать амплитуду движений работающего более чем на 30 % относительно соответствующих движений работающего без использования СИЗ;

4) СИЗ могут состоять из одного или нескольких предметов. Они могут применяться как по отдельности, так и в комплекте;

5) масса полного комплекта СИЗ должна быть не более 25 кг.

Повышенное облучение при аварии допускается только для мужчин, при условии их добровольного согласия в эффективной дозе до 100 мЗв в год, облучение дозой свыше 200 мЗв в год должно рассматриваться как потенциально опасное.

Защитные материалы должны обеспечивать:

- максимально возможную плотность; это свойство обеспечивает максимальное ослабление первичного и вторичного гамма-излучения и замедление быстрых нейтронов;

- постоянную плотность и однородность всей защиты или ее значительной части;

- достаточно высокое содержание водорода в защите для эффективного замедления промежуточных и низкоэнергетических нейтронов;

- минимальное образование и минимальную энергию вторичных излучений;

- низкую наведенную радиоактивность в защите, т. е. обеспечивать ми-

нимальное накопление долгоживущих радионуклидов в материале защиты при воздействии излучений.

Материалы, используемые для спецодежды от радиоактивного загрязнения, должны соответствовать требованиям таблицы 1.

В связи со спецификой ядерных реакторов, при их работе, а также в случае поломки выделяются электроны, протоны, альфа-частицы, осколки деления, мезоны, нейтроны и гамма-кванты. Наибольшую опасность представляют нейтроны и гамма-кванты, в связи с этих защитные меры направлены, в первую очередь, на поглощение этих видов излучения.

В качестве поглотителей нейтронного излучения используют водородосодержащие вещества. Для поглощения гамма-квантов вещества с большим атомным номером и высокой плотностью. Высокоэффективные радиационно-защитные композиции получают при оптимальном сочетании свойств металлов и неметаллических материалов.

При взаимодействии нейтронов с веществами возникает вторичное гамма-излучение, поэтому есть необходимость в поглощении этого излучения.

В настоящее время применим метод создания многослойной системы для защиты от ионизирующего излучения и повышенных температур, а также от воздействия неблагоприятных климатических условий и проникновения влаги.

Проектируемый многослойный материал для изготовления радиаци-

онно-термической защиты должен содержать в себе следующие слои:

1 слой – огнестойкий материал, дополнительно обработанный антипиренами для придания большей огнестойкости;

2 слой – композиционный материал, обеспечивающий основную защиту от воздействия излучений;

3 слой – водонепроницаемый;
4 слой – хлопковый подклад, непосредственно соприкасающийся с носителем, для исключения факта негативных реакций кожных покровов.

Таблица 1 – Требования к рабочим характеристикам материалов специальной одежды для защиты от радиоактивных загрязнений

Наименование показателя	Тип изделия	
	Костюмы краткосрочного и одноразового применения	Костюмы многократного применения
Стойкость к истиранию (для текстильных материалов), количество циклов	> 100	> 1500
Сопротивление проколу, Н	> 10	> 100
Разрывная нагрузка (при ширине образца 50 мм), Н:		
- в продольном направлении	> 120	> 150
- в поперечном направлении	> 45	> 90
Сопротивление раздиру, Н	> 20	> 40
Сопротивление слипанию	Должно отсутствовать	
Проницаемость изолирующих материалов по отношению к агрессивным жидкостям (капельное нанесение жидкости для текстильных материалов и объемное – материалов с изолирующим покрытием), мин	> 30	> 360
Стойкость к действию агрессивных сред: показатель стойкости к воздействию агрессивных сред (коэффициент), %	> 75	> 90
Дезактивируемость	Не нормируется	> 20
Стойкость к воспламенению	Не поддерживает горение	

В качестве материала верха была выбрана арамидная ткань Армос из-за ее высоких показателей прочности, стойкости к температурным воздействиям, к воздействию химических реагентов и ионизирующему излучению. Благодаря высокому кислородному индексу (37 %) арамидная ткань не горит и не плавится, а разлагается при сравнительно высоких температурах (430–480 °С). Стойкость арамидных

тканей к ионизирующему излучению обеспечивается наличием в них ароматичности. Высокая стойкость ароматических соединений обуславливается высокой энергией связи, а энергия облучения для таких структур абсорбируется и, рассеивается. Диссипация объясняется наличием большого числа энергетических уровней в ядрах этих соединений, что обеспечивает рассеивание в короткие сроки и

без проявления нежелательных эффектов в виде деструкции. Помимо этого, энергия облучения не сосредотачивается на отдельных связях в полимере, а распределяется по всей системе.

Помимо «врожденной» термической стойкости арамидных тканей можно придать им дополнительную стойкость путем нанесения на материал верха антипиренов, т. е. добавок, затрудняющих воспламенение и снижающих скорость распространения пламени. Выбранный антипирен состоит из борной кислоты и кальцинированной соды. Механизм действия заключается в разложении продуктов с получением углекислого газа и воды:



Так как реакция является эндотермической, то ее протекание приводит к охлаждению горящего полимера.

На слой, содержащий в себе композиционный материал, приходится основная нагрузка по созданию барьера для ионизирующего излучения. Можно сделать выбор в пользу полиэтилена, который обладает низкой плотностью и высоким показанием сечения выведения. Целесообразнее применить полиэтилен высокого давления, который обладает самой низкой плотностью из всех представленных видов полиэтилена. Наиболее известным материалом, эффективно поглощающим гамма-излучение, является свинец. При изготовлении композиционного материала в качестве наиболее оптимального варианта бы-

ло выбрано изготовление гибридного композиционного материала с нульмерным и двумерным наполнителем, где в качестве матрицы был выбран полиэтилен, в качестве наполнителя дисперсный свинец. В качестве подложки служит ткань Армос, на которой располагается слой полиэтилена в объеме и на поверхности которого находятся частицы дисперсного свинца.

Для защиты от влаги предлагается использовать силиконовую прокладку, помещая ее после поверхностного слоя. Ткань с полимерным покрытием «Тон» Вид-2.

Существует необходимость поместить хлопчатобумажный слой ткани из мадаполама (плотность 80–100 г/м²) между носителем и композиционным материалом, для защиты кожного покрова носителя.

Для пошива костюма выбрана нить армированная 150ЛХ.

Для точечного источника ионизирующего излучения при $\Sigma_{\text{ввб}} = 0,124 \text{ см}^{-1}$, на 3 минуты защиты толщина слоя ПЭВД $x = 0,03 \text{ м}$. Толщина свинцового экрана с учетом предельно-допустимой дозы облучения на 3 минуты $x = 0,004 \text{ м}$.

Исходя из технологических параметров процесса и расчетных данных, принято для производства ПКМ для спецкостюма взять 6,6 кг ПЭВД и 16,5 кг свинца. Тканей для пошива потребуется 4 м каждого слоя толщиной 0,9 м ($S = 3,6 \text{ м}^2$). Масса всех слоёв кроме полиэтилена со свинцом составляет 1,3 кг. Из этого следует, что костюм общей массой 24,4 кг удовлетворяет требованиям к конструкции

изделия (общая масса не более 25 кг).

Также для сохранения подвижности носителя костюма предлагается для защиты суставных частей тела, которые нуждаются в меньшей защите из-за отсутствия в этих местах внутренних органов, использовать элементы меньшего размера. Для за-

щиты же остальных частей тела и обеспечения герметичности, более плотного прилегания костюма используются элементы большего размера. Из расплава литьем под давлением создается объект с размерами, изображёнными ниже на рисунке 1.

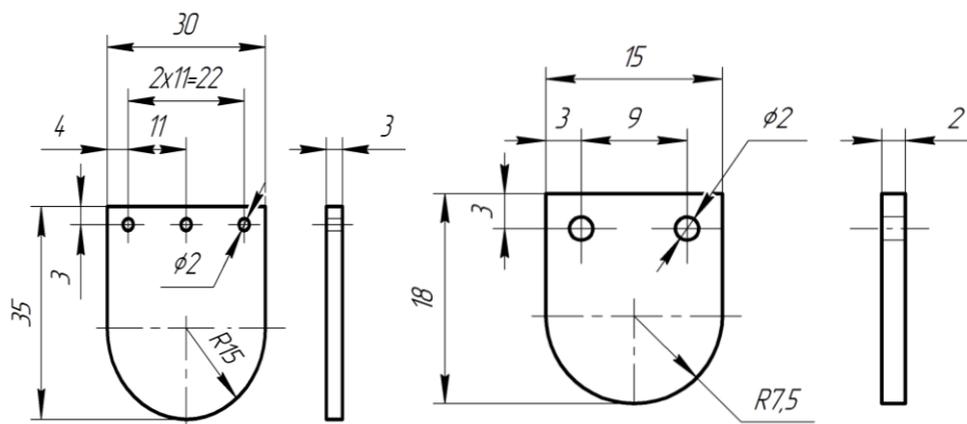


Рисунок 1 – Геометрические параметры элементов радиационно-термической защиты для изготовления спецкостюма

Технологический процесс изготовления материала для радиационно-термической защиты включает в себя литьё под давлением ПКМ, модификацию ткани Армос, выкройку, пошив изделия согласно очередности размещения слоев.

Для пошива защитного слоя из композиционного материала используются нитки 150ЛХ, обработанные в растворе антипирена. Пошив осуществляется вручную внахлёт согласно схеме, изображенной на рисунке 2, в качестве подложки применяется ткань Армос, обработанная антипиреном.

На рисунке 3 представлена схема технологического процесса изготовления многослойного материала для изготовления радиационно-термической защиты.

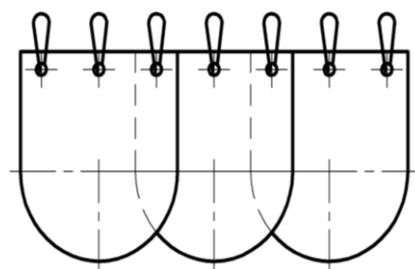


Рисунок 2 – Схема соединения элементов термо-радиационноустойчивого костюма

Все работы необходимо проводить при температуре 20–30 °С и относительной влажности 75 %. В процессе работы соблюдать требования по технике безопасности, промсанитарии и противопожарной технике.

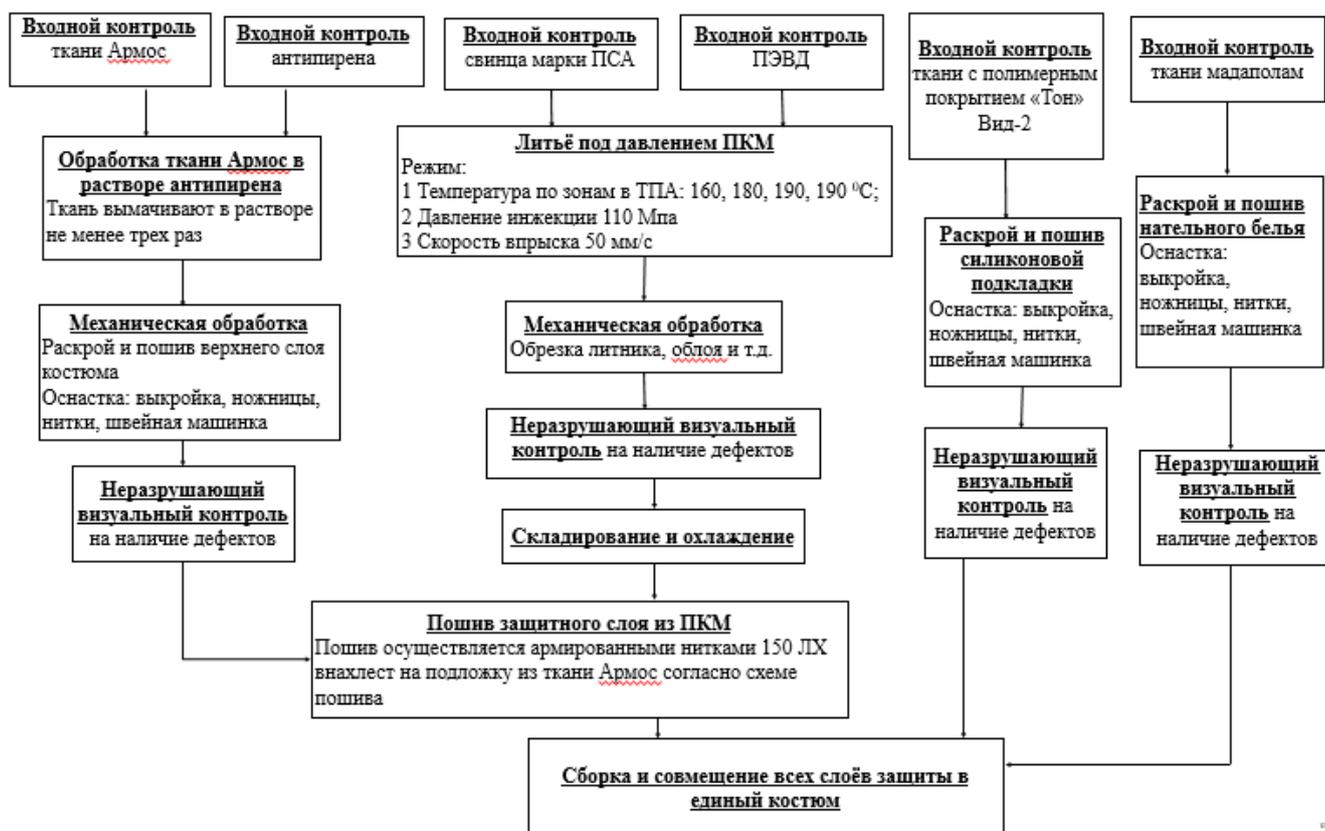


Рисунок 3 – Схема технологического процесса изготовления многослойного материала для изготовления радиационно-термической защиты

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинин, Г. Н. Конструкционные, проводниковые и магнитные материалы / Г. Н. Дубинин, Ю. С. Авраамов. – М. : Машиностроение, 1973. – 374 с.
2. Нейман, М. Б. Старение и стабилизация полимеров / М. Б. Нейман. – М. : Наука, 1964.
3. Пакшвер, А. Б. Физико-химические основы технологии хи-

- мических волокон / А. Б. Пакшвер. – М. : Химия, 1972. – 48 с.
4. Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам / Дж. Любин. – М. : Машиностроение, 1988. – 7 с.
5. Шустова, О. А. Полимеризационные пленкообразователи / О. А. Шустова. – М. : Химия, 1971. – 132 с.

© Матюхина Л. А., Головина Е. А., 2019.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ, ИННОВАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ АЛТАЙСКОГО КРАЯ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н. А. Мязкова

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Алтайский край имеет значительный потенциал в области развития малого и среднего бизнеса, занимающегося производством изделий из перспективных композиционных материалов, как в гражданском, так и в оборонном сегменте. В регионе технический университет и его филиал готовят кадры, получающие высокую квалификацию, которые затем востребованы по всей России и за рубежом. В статье приведены результаты исследования регионального рынка производителей изделий из композиционных материалов и подготовки кадров для данных предприятий.

Ключевые слова: *производство изделий, композиционные материалы, интеллектуальный потенциал, инновационный потенциал.*

Создание композиционных материалов является процессом, требующим высокой ответственности со стороны разработчика, который предполагает значительный багаж теоретических знаний в различных областях точных наук. Среди российских вузов только 5 обучают созданию новых материалов, изучению их перспективных возможностей, сфер применения, осуществляют фундаментальную подготовку, кадровое и научно-инновационное обеспечение различных отраслей. В перечень указанных вузов входят: ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана); Московский авиационный институт (национальный исследовательский институт); ФГБОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (национальный исследовательский университет); ФГБОУ ВО «Ка-

занский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»); ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ им. И.И. Ползунова).

О роли в подготовке кадров в Алтайском крае в АлтГТУ им. И.И. Ползунова для востребованного во многих отраслях направления говорят следующие факты. С 1989 г. на базе АлтГТУ им. И.И. Ползунова осуществляется набор студентов вначале на специальность «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов», а затем на направление «Материаловедение и технология материалов» с профилем подготовки «Композиционные материалы». Вклад АлтГТУ им. И.И. Ползунова в создание интеллектуального потенциала края характеризуется следующими показателями: более 400 выпускников, из которых 22 кандидата технических наук, руководителей предприятий, структурных под-

разделений, исследовательских лабораторий, 1 доктор физико-математических наук. География трудоустройства обширна – США (Нью-Йорк), Германия, Казахстан, Узбекистан, Таджикистан и др. Часто, еще в период обучения, студентов приглашают на работу на место прохождения практик, которые по договорам с вузом имеют тоже обширную географию – Подмосковье, Москва, Новосибирск, Барнаул, Бийск и др.

Интеллектуальный потенциал в рассматриваемой сфере формируется в АлтГТУ им. И.И. Ползунова, где обучение осуществляется по всем уровням – бакалавриат, магистратура, аспирантура. В крае действует 2 диссертационных совета по специальности «Технология и переработка полимеров и композитов» и по спецтематике по композиционным материалам (АлтГТУ им. И.И. Ползунова и АО ФНПЦ «Алтай»).

С целью развития кооперации вузов, осуществляющих подготовку кадров в области композиционных материалов, с предприятиями, создаются кластеры в регионах, сотрудничающие между собой и с общероссийским Объединением юридических лиц «Союз производителей композитов» («Союзкомпозит»), задачами деятельности которого являются:

- консолидация композитной отрасли Российской Федерации: производителей исходного сырья и материалов (стекловолокна, базальтоволокна, углеволокна, полимерных смол и т. д.), производителей оборудования и разработчиков технологий, производителей композитных материалов,

- изделий и конструкций, представителей отраслевых кафедр высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов;

- объединение усилий для устранения барьеров и создания благоприятных условий развития отрасли в целом и каждого предприятия в отдельности.

В Алтайском крае одним из 4-х инновационных кластеров является НП «Алтайский полимерный композитный кластер», созданный в 2019 г. Партнерами кластера, помимо указанного ранее «Союза производителей композитов», являются: кластер авиационно-космических технологий полимерных композиционных материалов и конструкций Калужской области; издательский дом «Мир композитов»; АО «ФНПЦ «Алтай».

Якорные предприятия кластера: ООО «Бийский завод стеклопластиков»; АО Научно-производственное предприятие «Алтик»; «Производственное объединение «Спецавтоматика».

Предприятия – участники кластера: АО «Научно-производственное предприятие «Алтайспецпродукт»; ООО «Полимерпласт»; ООО «Алдек»; ООО «Лигнатэк»; ООО «ПКМ Алтай»; ООО «Стеклопластик»; ООО «Ровинг»; ООО «Трубопласт-А»; ООО ТПГ (Торгово-промышленная группа) «Росал»; ООО «Бийский завод стеклопластиков»; ООО «Стеклопластик»; АО «НПП «Алтик»; ООО ТПГ «Росал»; АО «НПП «Алтайспецпродукт»; ООО «Полимерпласт»; ООО «Алдек»; ООО «Лигнатэк».

Кооперация предприятий осуществляется с научно-образовательными центрами (ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук» (ИПХЭТ СО РАН).

Участники кластера НП «Алтайский полимерный композитный кластер» имеют более 50 объектов интеллектуальной собственности, зарегистрированных в установленном порядке [10].

Инфраструктурные организации – партнеры участников кластера: Краевое государственное бюджетное учреждение «Алтайский центр кластерного развития», Региональный центр инжиниринга в сфере биотехнологий (РЦИ), Инновационно-технологический центр (АлтГТУ им. И.И. Ползунова), Ассоциация «Межрегиональный центр nanoиндустрии» Алтайского края, Краевое государственное бюджетное научно-исследовательское учреждение «Алтайский научно-образовательный комплекс», Алтайский центр научно-технической информации (ЦНТИ), Центр поддержки технологий и инноваций (ЦПТИ), Алтайский центр государственно-частного партнерства и привлечения инвестиций. Муниципальное бюджетное учреждение «Бийский бизнес-инкубатор».

Существующий производственный потенциал предприятий, входящих в состав кластера, дает основу

для выявления возможных перспектив развития малого и среднего бизнеса в Алтайском крае, специализирующегося на производстве изделий из композиционных материалов. Далее приведены товарные группы, выбранных в качестве примера, предприятий.

ООО «Бийский завод стеклопластиков» производит продукцию строительного назначения: уникальный энергоэффективный крепеж, применяемый для крепления теплоизоляции в различных фасадных, кровельных и трехслойных системах; для добычи полезных ископаемых: стеклопластиковые насосные штанги, анкерная крепь; для электроэнергетики: производство стержней для полимерных изоляторов; широкого назначения: трубы стеклопластиковые широкой геометрии; товары народного потребления: штекерные спиннинги, бортовые и зимние удилища, весла, лыжные палки, горнолыжные палки, хоккейные клюшки [4].

АО «НПП «Алтик» изготавливает изделия из стеклопластика в диапазоне диаметров от 40 мм до 315 мм, длиной до 6500 мм, а с заводскими стыками – до 12000 мм. Предприятие выпускает продукцию для: угольной отрасли: стеклопластиковые трубы и фитинги для шахт, рудников, горнообогатительных комбинатов; нефтяной отрасли: насосно-компрессорные трубы, линейные трубы, обсадные трубы, временные быстросборные трубопроводы, корпуса геофизических приборов; для электроэнергетики: несущие элементы опорных изоляторов; для ЖКХ и сельского хозяйства: трубы обсадные для водоподъ-

емных скважин, трубы насосные, трубы водопроводные, трубы канализационные, трубы вентиляционные [5].

ПО «Спецавтоматика» единственное предприятие в России, выпускающее наиболее полный спектр оборудования для автоматических систем пожаротушения и охранно-пожарной сигнализации – более 300 наименований [6].

ООО «Трубопласт-А» является крупнейшим в Сибирском регионе производителем полиэтиленовых труб для строительства подземных газопроводов, водопроводов, коммуникационных систем диаметром от 20 до 450 мм из полиэтилена марок ПЭ80 и ПЭ100 отечественного и импортного производства [7].

ООО ТПГ «Росал» производит для сферы ЖКХ: трубы ПВХ для наружной и внутренней канализации, напорные трубы и фитинги ПВХ; строительного назначения: гофрированные полиэтиленовые трубы ПНД, ПВД для прокладки электропроводки внутри помещения, трубы ПВХ для каркасно-монолитного строительства, полиэтиленовые трубы для подачи питьевой воды; для строительства линий связи: трубы ПВХ гладкие жесткие для прокладки сети ШПД, трубы ПНД для прокладки в траншею или бестраншейной прокладки методом ГНБ; для водозаборных и нефтяных скважин: обсадные трубы ПВХ, благодаря инновационным разработкам компании была получена дополнительная герметизация резьбового соединения и улучшенные прочностные характеристики трубы, что позволяет использовать данную продукцию на

крупногабаритных буровых установках; товары народного потребления: производство поливочных шлангов ПВХ и парников из полимерных дуг [8].

ООО «Полимерпласт» входит в пятерку крупнейших производителей изоляты ПВХ в России и СНГ. Ведущим направлением деятельности является производство электро- и гидроизоляционных липких лент из пластифицированного поливинилхлорида и полиэтилена. Стратегическое направление деятельности: оптимизация технологии переработки вторичных полимеров, рециклинга пластика [9].

Для Алтайского края актуальным является вопрос увеличения количества рабочих мест, в частности на предприятиях малого и среднего бизнеса. Решение данного вопроса возможно за счет реализации инновационного потенциала кластера, который представлен обзором перспективных разработок продукции на предприятиях-участниках:

- разработка и производство элементной базы и комплекса технических средств автоматического пожаротушения из композиционных материалов и нанокompозитов для оснащения зданий и сооружений в сфере строительства;

- разработка полимерных рецептур для производства труб (экологическое направление);

- инженерные решения по герметизации стыков труб;

- разработка технологии производства трубы со вспененным слоем,

адаптирование технологии производства для больших диаметров;

- разработка технологии производства трубы высокого давления (до 20 атм) в качестве аналога металлических труб для нужд водоканала;

- разработка технологии производства трубы для горячего водоснабжения;

- разработка новых, технологичных, конкурентоспособных изделий для строительной, нефтегазовой, энергетической отрасли экономики;

- изготовление изделий из КМ большого диаметра и фасонины для труб;

- оптимизация технологии переработки вторичных полимеров, рециклинга пластика; Комплексная программа по созданию в Алтайском регионе производств материалов и изделий из нерудных горных пород (теплоизоляционные полимерные композиционные материалы, армирующие наполнители для ПКМ);

- изделия из древесно-полимерного композита;

- композитные опоры воздушных линий электропередач (завершение НИОКР, отработка технологии, освоение серийного выпуска, создание специализированного комплекса для производства опор);

- стеклопластиковый дегазационный трубопровод для угольных шахт (расширение номенклатуры продукции, наращивание объемов производства);

- стеклопластиковые корпуса ракетных двигателей твердого топлива с улучшенными баллистическими характеристиками (продолжение

НИОКР, отработка технологии, изготовление прототипов, проектирование и изготовление производственного комплекса для серийного выпуска);

- композитные немагнитные радиопрозрачные кожухи и корпуса для геофизических приборов глубинного исследования скважин (расширение эксплуатационного диапазона температур свыше 150 градусов и давлений свыше 120 МПа);

- композитные газовые баллоны высоких и сверхвысоких давлений (продолжение НИОКР, освоение серийного производства);

- стеклопластиковые трубы для нефте- и газодобывающей отрасли (НИОКР, сертификация, освоение производства) [10].

Реализация указанных направлений позволит расширить деятельность предприятий малого и среднего бизнеса в области производства изделий из композиционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркин, В. Б. Перспективные материалы современного машиностроения. Труды Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. В. Б. Маркина; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2019. – С. 4–17. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=30298573>.

2. Мягкова, Н. А. О постановке инновационной продукции на производство / Инновации в машиностроении : сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ,

2018. – С. 522–526. – https://elibrary.ru/download/elibrary_36719252_94922616.Pdf.

3. Мягкова, Н. А. Об экономической подготовке бакалавров направления «Материаловедение и технология материалов» // Труды XIV Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. В. Б. Маркина ; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2019. – 176 с. – С. 83–86. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30420604>.

4. Официальный сайт ООО «Бийский завод стеклопластиков» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://bzs.ru/>.

5. Официальный сайт АО «НПП «Алтик» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://altik.su/proizvodstvo.html>.

6. Официальный сайт ПО Спецавтоматика [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://sa-biysk.ru/>.

7. Официальный сайт ООО «Трубопласт-А» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://truboplast-a.ru/>.

8. Официальный сайт ООО ТПГ «Росал» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.tpg-rosal.ru>.

9. Официальный сайт ООО «Полимерпласт» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://polimerpl.ru/>.

10. Пазников, Е. А. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка программы развития производства и внедрения композиционных материалов (композитов), конструкций и изделий из них в сферы экономики Алтайского края на основе кластерного подхода» / Е. А. Пазников. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kompozit22.ru/wp-content/uploads/2019/07/1.Programma-razvitiya-klastera.pdf>.

© Мягкова Н. А., 2019.

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДИСКИ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ

В. Э. Чиган, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Автомобильный диск служит основой для крепления шины, а также для передачи на нее крутящего момента от приводных валов. В зависимости от технологии и применяемого материала различают несколько видов дисков колес, каждый из которых имеет как преимущества, так и недостатки. А параметры колесных дисков, такие как: их диаметр, ширина и прочие показатели определяют выбор в пользу того или иного варианта.

Цель работы: разработка материала для изготовления автомобильного диска и технологического процесса для его получения, соответствующая требованиям прочности, условиям эксплуатации и требованиям техники безопасности. В результате работы были подобраны материалы и технология изготовления диска для легковых автомобилей, удовлетворяющее условиям эксплуатации.

***Ключевые слова:** углеродная ткань, углеродное волокно, эпоксидное связующее, автомобильные диски.*

Автомобильный диск служит основой для крепления шины, а также для передачи на нее крутящего момента от приводных валов. В зависимости от технологии и применяемого материала различают несколько видов дисков колес, каждый из которых имеет как преимущества, так и недостатки. А параметры колесных дисков, такие как: их диаметр, ширина и прочие показатели определяют выбор в пользу того или иного варианта.

Колесные диски помимо того, что улучшают внешний вид колеса, также являются необходимым элементом для движения автомобиля по дороге. Непосредственно на них одевается сама шина. А диск с надетой на него шиной представляет собой автомобильное колесо, закрепленное на ступице.

Шина на диске фиксируется за счет кольцевого выступа. Борт шины располагается на полке, отличающейся тремя размерностями: стандартной, плоской и расширенной. Посадка шины, как правило, происходит на

внешнюю полку. Полка плавно переходит в борт, имеющий различную форму профиля.

Главным назначением диска колес является обеспечение правильной посадки шины и ее эффективной работы во время движения. Именно поэтому основными требованиями, предъявляемыми к диску, являются прочность и жесткость. Также диск должен иметь относительно небольшую массу и геометрические параметры, заданные производителем. Это связано с тем, что колеса, как неподрессоренная масса, оказывают влияние на динамику движения автомобиля и на его управляемость.

В зависимости от материала изготовления и технологии производства существует следующая классификация колесных дисков:

- штампованные;
- литые;
- кованные;
- комбинированные или композитные.



Рисунок 1 – Диски из сплавов металла

Комбинированные и композитные диски сочетают в себе прочность «ковки» и дизайн «литья». В основе изделия литая конструкция с коваными ободьями, прикрученными болтами. Высокая стоимость дисков пере-

крывает множество их достоинств. Самый редкий тип – композитные, обладают очень высокой прочностью, легкостью и стоимостью из-за сложной технологии производства.



Рисунок 2 – Виды комбинированных дисков

Параметры колесных дисков

Колесные диски характеризуются следующими параметрами:

- шириной обода (расстоянием между полками);
- диаметром дисков;
- вылетом диска;
- количеством отверстий для крепления и диаметром их расположения;
- диаметром центрального отверстия диска.

Автомобильные диски из углепластика, их плюсы и минусы

Основу карбона составляют волокна углерода, которые соединяют с резиновыми нитями. Плотность углеродных нитей – 1600 кг/м³, но способность сопротивляться растяжению и разрыву выше, чем у стали. Но углерод – еще не карбон. Чтобы получить исходный композитный материал для карбоновых дисков, волокна углерода и резины переплетают под

строго выверенным углом, получая ткань. А затем слои ткани склеивают между собой эпоксидной смолой. Так изготавливают самый дорогой в мире материал для изготовления колесных дисков.

Дороговизна углепластика связана с технологией получения волокон углерода. Существует несколько способов выращивания длинных нитей: выращивание в световой дуге, авто-

клаве, химическое осаждение на специальный носитель. В процессе изготовления самых дорогих видов температура нагрева достигает 3500 °С, а менее прочные сорта требуют температуры как минимум до 260 °С. Разогреть исходное сырье (полиакрилонитрин) нужно только в инертной газовой среде, что приводит к дополнительным расходам.

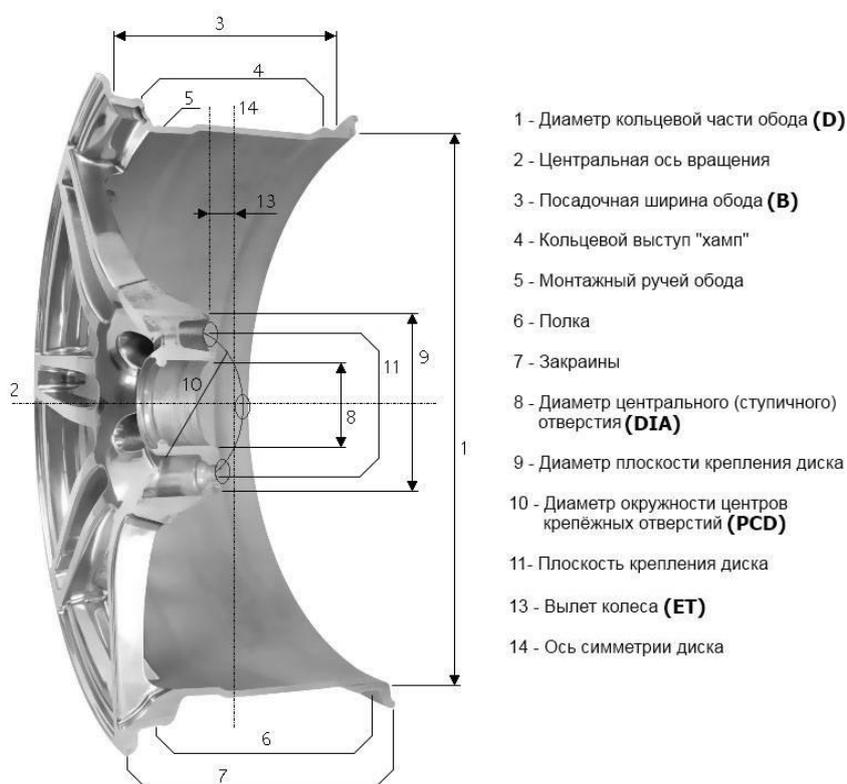


Рисунок 3 – Структура диска

Впрочем, затраты окупаются за счет уникальных характеристик углепластика. Углеволокно на 40 % легче стали, может выдерживать нагрузку до 70 000 кг на мм², прочность на разрыв составляет около 5 ГПа. Колесные диски из углепластика получаются легкими и исключительно прочными, а привлекательный внешний вид поверхности привел к появлению ди-

зайна моделей из сплавов «под карбон».

Плюсы и минусы карбоновых дисков

Достоинства дисков из углепластика:

1. Материал выдерживает большие нагрузки. При слишком высокой скорости обыкновенные диски могут получить повреждения, в то время как

модели из карбона меньше подвержены разрушению.

2. Легкость материала. Благодаря этому машина меньшего веса позволяет сэкономить на горючем.

3. Отличные аэродинамические характеристики. Отсутствие сопротивления воздуха снижает потребление топлива и срок изнашивания дисков.

4. Высокая температурная стойкость. Материал не плавится даже при температуре 1500 градусов.

Недостатки дисков из углепластика:

1. Карбоновые диски, несмотря на общую прочность, не переносят точечные удары, которые могут привести к раскалыванию материала на мелкие осколки, не подлежащие ремонту.

2. Производство дисков из этого материала занимает большое количество времени.

3. Солнечные лучи приводят к выгоранию углепластика, что сказывается на привлекательности внешнего вида изделия. Поэтому требуется дополнительная защита от ультрафиолета.

4. Высокая стоимость.

Процесс производства дисков из углепластика

Метод вакуумной инфузии применяем для формования автомобильного диска. Он позволяет:

- частично механизировать процесс за счет исключения операций пропитки, прикатки и уплотнения армирующего материала, уменьшив, тем самым влияние человеческого фактора;

- повысить качество изготовле-

ния за счет автоматизированного контроля количества связующего и достижения более высокой плотности укладки слоев армирующего материала;

- улучшить условия труда, существенно снизив выброс вредных веществ в окружающую среду;

- снизить трудоемкость, сократить продолжительность производственного цикла.

Согласно методу (технологическая схема процесса представлена на рисунке 4), подготавливаем поверхность оснастки будущего изделия, заранее заданной формы для обода и центра. Наносим на оснастку гелькоут для формирования наружной поверхности будущего изделия. Далее в оснастку слой за слоем укладываем углеродную ткань РК-303, толщиной в 20 слоев, а для того, чтобы ткань оставалась плотно прижатой, применяем спрей-клеи временной фиксации AEROFIX.

На этом этапе работы очень важно обеспечить равномерное прижатие ткани по всей поверхности оснастки. Так же следует качественно выложить углеродную ткань в углах. Если слои армирующего материала не будут плотно прилегать к оснастке и друг к другу образуются пустоты, которые будут либо заполнены связующим, либо образует полости. Оба фактора ведут к снижению прочности элемента и являются концентраторами напряжений.

Следующее действие заключается в укладывании жертвенной ткани для разделения между изделием и вспомогательными материалами инфузии,

и сетку для распределения смолы. Далее укладываются линии подачи связующего

и вакуумные линии – линии эвакуации воздуха, и излишков смолы.



Рисунок 4 – Технологическая схема процесса

Теперь занимаемся герметизацией формы, это предпоследний этап. В него входит укладывание вакуумной пленки, а при помощи герметизирующего жгута форма герметизируется и вакуумируется (подключаем вакуумный насос). Теперь подаем в систему давление в – 0,9 атм., затем завакумированную форму отключаем от вакуумного насоса и оставляем на

время наш пакет для проверки на герметичность. И не запускаем связующее до тех пор, пока не убедимся в герметичности формы.

Как только мы убедились в герметичности пакета, приступаем к пропитке связующим. В качестве связующего используем эпоксидную смолу L и отвердитель CIEL. Из-за разряжения смола всасывается в фор-

му и заполняет весь свободный объем, пропитывая все слои ткани по распределительной сетке. После того как связующее затвердело (около 20 часов), снимаем вакуумный пакет. Убираем технологический слой и вынимаем нашу деталь из оснастки, а в нашем случае это обод и центр (центральная секция). Готовые изделия подвергаются механической обработке, удаляется армирующий материал, зачищается и высверливаются отверстия для крепления болтов.

Далее собираем наш двусоставной диск. Присоединяем обод и центральную секцию, закрепляем их друг к другу болтами для дисков из титановых сплавов.

Вывод

Таким образом, был разработан новый способ изготовления двусоставных дисков из карбона, который позволяет нам минимизировать затраты на производство, что позволяет снизить цену на готовый товар и дает возможность пустить его в массовые продажи по приемлемой цене для данного вида дисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кушнере, В. С. Материаловедение [Текст] / В. С. Кушнере, ОГТУ, 2008. – 223 с.
2. Диски из карбона [Электронный ресурс]. – URL : <http://avtotrans-consultant.ru/15-kolesnye-diski-avtomobilej/>.
3. Энциклопедия по машиностроению [Электронный ресурс]. – URL : <http://autoleek.ru/hodovajachast/shiny-i-diski/koleso-avtomobilya.html>.
4. Васильев, В. В. Композиционные материалы [Текст] / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин. – Томск : Изд-во «Машиностроение», 1990. – 180 с.
5. ГОСТ Р 53824—2010 «Колесные диски автомобилей», разработан и внесен Министерством автомобильного и сельскохозяйственного машиностроения СССР. – М. : Изд-во ГСМ СМСП, 1977. – 63 с.
6. Петрова, А. П. Клеевые связующие для полимерных композиционных материалов на основе угле- и стеклопластика / А. П. Петрова, Л. А. Дементьева, Н. Ф. Лукина, Л. В. Чурсова. – М. : Материаловедение, 2019. – 64 с.

© Чиган В. Э., Головина Е. А., 2019.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ ГОРЯЧЕГО ОТВЕРЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДВК И СПОСОБЫ ЕЕ МОДИФИКАЦИИ

А. Е. Емельянова, С. А. Хапёрских

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

В статье представлена информация о смоле резольного типа горячего отверждения – СФЖ-3014 Смола используется в качестве связующего в деревообработке при производстве ДВП, водостойкой фанеры. Выпускаемые на основе этих смол ДВК соответствуют европейским стандартам по экологической безопасности. Использование этой смолы подразумевает соблюдение мер предосторожности и хранения. Смолы горячего отверждения имеют повышенную щелочность и непригодны для холодного склеивания, отвердитель им тоже не требуется. Катализатор реакции – высокая температура. Преимущества фенольных смол по сравнению с карбамидными – это высокая водо- и атмосферостойкость клеевых соединений. Недостатки клеев – более высокая цена, малая скорость отверждения, более высокая токсичность. Клей дает темный клеевой шов, имеется опасность кислотного повреждения древесных волокон, некоторые марки клеев требуют подсушки после нанесения. Фенольные смолы применяются в основном для производства водостойкой фанеры горячим способом, а также для пропитки шпона в производстве бакелизированной фанеры и древесно-слоистых пластиков.

***Ключевые слова:** фенолоформальдегидная смола, дерево-волоконистые композиционные материалы.*

Дерево-волоконистые композиты (ДВК), изготовленные обычным склеиванием смолами, при эксплуатации достаточно часто имеют ряд недостатков. Среди таких недостатков можно выделить следующие:

- низкая гидрофильность изделия;
- недостаточная адгезионная прочность клея;
- сниженные показатели прочности.

Кроме данных недостатков можно выделить и высокую истираемость поверхности изделия, что может быть обусловлено и недостаточной степенью отверждения смолы.

На сегодняшний день в производстве ДВК (фанеры, ДСП, бруса, и пр.) используются фенолоформальдегидные смолы. Они имеют внушитель-

ный ряд наименований, которые представлены в ГОСТ 20907-75 «Смолы фенолоформальдегидные жидкие. Технические условия» [1].

В данной статье речь пойдет о смоле резольного типа горячего отверждения – СФЖ-3014.

Фенолформальдегидные смолы $[-C_6H_3(OH)-CH_2-]_n$ – продукты поликонденсации фенола C_6H_5OH с формальдегидом $CH_2=O$. Взаимодействие фенола с формальдегидом идет по схеме, представленной на рисунке 1.

Смола используется в качестве связующего в деревообработке при производстве ДВП, водостойкой фанеры. Выпускаемые на основе этих смол ДВК соответствуют европейским стандартам по экологической безопасности [3].

Использование этой смолы подразумевает соблюдение мер предосторожности и хранения. Смолы горячего отверждения имеют повышенную

щелочность и непригодны для холодного склеивания, отвердитель им тоже не требуется. Катализатор реакции здесь – высокая температура [4, с. 43].

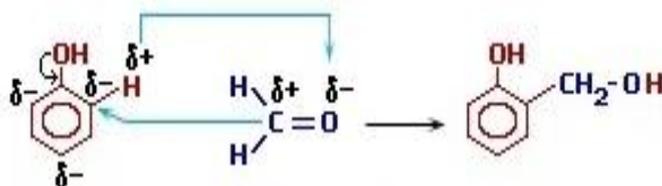


Рисунок 1 – Конденсация фенола с формальдегидом [2]

Общая характеристика данной смолы представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Общая характеристика СФЖ-3014 [3]

Наименование показателя	Нормативное значение
Внешний вид раствор	Однородная прозрачная жидкость от красновато-коричневого до темно-вишневого цвета, без механических примесей
Вязкость условия при 20 ± 5 °С по вискометру ВЗ-246 (сопло $d = 4$ мм), с	17–90
Массовая доля свободного фенола, %, не более	0,10
Массовая доля свободного фенола, % не более	0,10
Массовая доля нелетучих веществ, %	43–47
Предел прочности при скалывании фанеры по клеевому слою фанеры, МПа, не менее	1,47
Массовая доля свободного формальдегида, %, не более	78
Массовая доля щелочи, %	6–7,5

Преимущества фенольных смол по сравнению с карбамидными – это высокая водо- и атмосферостойкость клеевых соединений. Недостатки клеев – более высокая цена, малая скорость отверждения, более высокая токсичность. Клей дает темный клеевой шов, имеется опасность кислотного повреждения древесных волокон, некоторые марки клеев требуют подсушки после нанесения. Фенольные смолы применяются в основном для производства водостойкой фанеры горячим способом, а также для

пропитки шпона в производстве бакелитизированной фанеры и древесно-слоистых пластиков.

В общем виде преимущества СФЖ-3014 можно обозначить следующим образом:

- обладают водостойкостью;
- устойчивы к грибкам;
- прочное клеевое соединение;
- простота и быстрота приготовления клея;
- не сложные, однотипные режимы склеивания;
- достаточное количество времени

выдержки перед запрессовкой в изделие;

- выдержка под прессом требует немного времени, а при повышении температуры – еще может быть сокращена;

- необходимо только полное схватывание клея. Результат – выдержка склеенного материала относительно мала;

- увлажнение по клеевому шву при склеивании незначительно.

Несмотря на достоинства смолы СФЖ-3014, можно выделить и ее недостатки. Основными являются:

- жизнеспособность клея достаточно мала ввиду наличия в его составе большой доли воды, которая при открытой выдержке и повышенных температурах быстро испаряется;

- при использовании жидкой фенолоформальдегидной смолы необходимо применение достаточно высоких температур – до 160 °С и высокое давление;

- токсичность клеев;

- степень отверждения смолы зависит от температуры прогрева печи. Максимальная степень отверждения наступает при 220 °С (рисунок 2), но использование данной температуры при производстве ДВК недопустимо.

Например, шпон, пропитанный смолой, соприкасается с опалубкой из стали при прессовании изделия. В данной ситуации происходит не только нагрев смолы и ее отверждение, но и нагрев самого шпона. Нагревая шпон до 220 °С и выдерживая его определенное время в печи до полного отверждения смолы, есть вероятность

воспламенения дерева, что приводит к негодности изделия. Можно сделать вывод, что использование этой смолы в деревообработке приводит к ее неполному отверждению. Потому как при 160 °С степень отверждения СФЖ составляет около 96–97 % [5, с. 151].

Несмотря на имеющиеся недостатки, клеи на основе фенолоформальдегидных смол (ФФС), в т. ч. и жидких (СФЖ), обладают полезными свойствами, а их применение в деревообрабатывающих производствах будет нарастать. В данном случае речь пойдет о совершенствовании клеев – их модификации. Появление модифицированных клеев позволит решить ряд проблем, присущих существующим смолам.

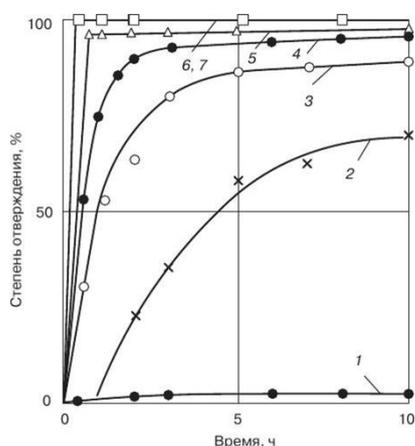
На сегодняшний день известны различные способы модификации фенолоформальдегидных смол. Осуществить модификацию смолы возможно при помощи следующих добавок [4, с. 44]:

- 1) синтетический каучук. Для смол СФЖ-3013-3014, применяемых для производства водостойкой фанеры из древесины хвойных пород, добавка составляет до 7 м. ч. каучука, который хорошо стабилизирует вязкость клея и дает хорошее качество холодной подпрессовки и горячего склеивания;

- 2) лигнинная мука. Применяют муку помола 140 с насыпной плотностью 300–400 кг/м³ в количестве до 5 м. ч.;

- 3) жидкие и твердые лигносульфонаты. Могут заменить до 20 % фенола при производстве фенольных смол.

Кроме того, Угрюмов С. А. и Осетров А. В. в своей статье [6] рассматривают модификацию ФФС посредством фурановой смолы с различным процентным содержанием. Эксперимент показал, что модификация смолы СФЖ-3014 на основе фуранового олигомера в размере 2–4 м.ч. способствует повышению прочностных и эксплуатационных характеристик, сокращения времени и степени отверждения клея.



1 – 80 °C; 2 – 100 °C; 3 – 120 °C; 4 – 140 °C;
5 – 180 °C; 6 – 200 °C; 7 – 220 °C

Рисунок 2 – Зависимость степени отверждения СФЖ-3014 от температуры нагрева

Таким образом, обобщая вышеизложенный материал, необходимо сделать некоторые выводы о фенолоформальдегидной смоле СФЖ-3014, ее отверждении и модификаторах, а именно: она является смолой горячего отверждения; при производстве ДВК температура нагрева смолы составляет около 160 °C; на сегодняшний день является перспективным объектом в части разработки направлений по ее

использованию в деревообработке и модификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20907-75 Смолы фенолоформальдегидные жидкие. Технические условия.

2. Фенолформальдегидные смолы. – Режим доступа: <https://himija-online.ru/organicheskaya-ximiya/fenol/fenolformaldegidnye-smoly.html> (Дата обращения 23.04.2019).

3. Смолы фенолоформальдегидные марки СФЖ-3013, СФЖ-3014. Спецификация. – Режим доступа: <http://www.ucp.ru/common/img/uploaded/files/SFG-3013,3014.pdf> (Дата обращения 24.04.2019).

3. Волынский, В. Н. Технология клееных материалов : учеб. пособие для вузов. (2-е изд., исправленное и дополненное) / В. Н. Волынский. – Архангельск : Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2003. – 280 с.

4. Мийченко, И. П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов / И. П. Мийченко. – СПб. : Научные основы и технологии, 2012. – 374 с.

5. Угрюмов, С. А. Модификация фенолоформальдегидных смол, используемых в производстве древесно-плитных материалах с целью повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик / С. А. Угрюмов, А. В. Осетров // ФГБОУ ВПО Костромской государственной технологической университет. – Режим доступа: <http://files.scienceforum.ru/pdf/2014/7496.pdf> (Дата обращения 25.04.2019).

© Емельянова А. Е., Хапёрских С. А., 2019.

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ СТОВРКИ МОТОГОНДОЛЫ ДВИГАТЕЛЯ САМОЛЕТА ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

В. В. Огилько, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Качественная подготовка технологического материала (исходного сырья для комплекса выкладки) во многом задается повышенными требованиями, сформулированными программой выкладки к прецизионности процесса. В качестве экспериментального готового изделия был выбран элемент створки мотогондолы двигателя самолета ИЛ-76МД-90А – трехслойная панель заданной кривизны с сотовым наполнителем. Выкладка панели производилась в один этап в соответствии в управляющей программой – укладка внутренней обшивки, закрепление сотового наполнителя, укладка наружной обшивки. Исследовательские испытания технологического процесса автоматизированной выкладки, с учетом эксплуатационных требований по технологичности материала на стадиях предварительной подготовки, позволили определить оптимальный технологический режим для изготовления технологического материала (препрега) и сделать вывод о применимости разработанной технологии для изготовления подобных – аналогичных изделий, соответствующих выбранному классу авиационных агрегатов. По итогам работ разработаны технические требования на адаптированный технологический материал (препрег), обеспечивающие наилучшие технологические свойства для автоматизированной выкладки.

Ключевые слова: *мотогондола, композиционные материалы, выкладка, сотовый наполнитель.*

Мотогондола – отсек летательного аппарата (как правило, обтекаемой формы, предназначенный для монтажа двигателя и выступающий за пределы фюзеляжа или крыла, на котором установлен двигатель. Мотогондой может называться также гондола аэростата, в которой установлены двигатели.

Створка гондолы двигателя летательного аппарата, содержащая обшивку с профилями жесткости, соединенную с каркасом через узлы подвески, и фиксирующие штанги, шарнирно закрепленные одним концом на профилях жесткости по бокам створки, отличающаяся тем, что, с целью повышения надежности подвески

и обеспечения удобства эксплуатации, фиксирующие штанги шарнирно закреплены на двигателе и выполнены в виде телескопически соединенных труб, состыкованных при помощи шариковых замков, снабженных муфтами и тросовым управлением, включающим тросы Боудена, соединенные с муфтами, и подпружиненную рукоятку управления замками, установленную с возможностью поступательного перемещения по направляющим, которые смонтированы на нижнем срезе внутренней поверхности обшивки.

Недостатком такой конструкции является неудобство эксплуатации, связанное с отсутствием шарниров

крепления крышки, недостаточная надежность, т. к. при попадании в пазы посторонних возможно заедание роликов, вызывающее перекося створки и неплотное ее закрытие, что недопустимо, сложность подгонки при сборке, т. е. необходимо точно совмещать ролики с пазами, что затруднено при больших размерах створки, повышенный вес и сложность конструкции, связанные с наличием кронштейнов крепления роликов и накладок, образующих пазы в основании.

Конструкция створки

Створки из ПКМ сотовой конструкции изготовлены методом склейки двух обшивок на основе углеродной ленты из волокна и сотового заполнителя. С внутренней стороны створок вклеена огнезащитная стальная сетка (Х18Н10Т). С внешней стороны створок вклеена молниезащитная медная сетка (ПТ-2). Кронштейны навески створок, изготовлены из титанового сплава. Крепление кронштейнов к створке осуществляется с помощью болтового соединения через распорные втулки, установленные в сотовый пакет на заливочной композиции.

На каждой створке установлены две самовыдвижные штанги. Каждая штанга состоит из трубы с шаровым замком и выдвигного штока. Шток имеет шариковую фиксацию в открытом положении створки. Штанга крепится шарнирно с помощью наконечников типа «ухо», ввернутых на резьбе в трубу и шток. Одним концом (трубой) штанга крепится на створке, а другим (штоком) на передней части гондолы или на реверсе двигателя. На внутренней стороне створки установ-

лен тросовый механизм закрытия створки вручную.

Через направляющую трубку пропущен трос, закрепленный на муфте опорной штанги. На конце троса имеется ручка. Для закрытия створки необходимо потянуть за ручку, шаровой замок расфиксируется, освободив тем самым шток от фиксации, и створка начнет закрываться. При закрытом положении створок для предотвращения вибрации штанг на створках под каждой штангой установлена резиновая опора, на которую опирается штанга в убранном положении. На правой и левой створках установлены датчики пожарной сигнализации М801-TRSS. На каждой створке имеются перемычки металлизации, соединяющие створку с кронштейнами навески, установленными на раме. Кроме основной металлизации каждая створка имеет дополнительную металлизацию, которая служит для уменьшения уровня наводимых молнией напряжений в электрических цепях, расположенных на двигателе. Конструктивно дополнительная металлизация состоит из электрических контакторов (пластин), установленных на передней части мотогондолы, створках мотогондолы и двигателе.

Дополнительная металлизация створок мотогондолы осуществляется по двум поясам:

- 1) переднему передней, к части мотогондолы;
- 2) заднему, к двигателю.

Пластины металлизации на передней части и створках мотогондолы крепятся на заклепках, а на двигателе

с помощью винтов и гаек, входящих в конструкцию двигателя.

При замене двигателя пластины металлизации должны быть сняты и перенесены на вновь установленный двигатель.

Пластины металлизации изготовлены из коррозионностойкой стали толщиной 0,2 мм. При закрытии створок мотогондолы осуществляется электрический контакт через пластины металлизации на переднюю часть мотогондолы и двигателя.

На створках предусмотрены узлы (с внешней стороны) для установки такелажных кронштейнов. Створки в закрытом положении опираются на переднюю часть гондолы и на реверс двигателя. Для обеспечения жесткости створок в закрытом положении предусмотрены опорные кронштейны, установленные на двигателе, а на створках по заднему краю установлены упоры.

На кронштейны навески створки на кронштейны стяжных замков установлены кожухи, для защиты элементов крепления от воздействия нагрева в случае возгорания двигателя. На створках предусмотрены кронштейны для центрирования створок между собой. В нижней части створок, от оси двигателя до нижнего края, по периметру подошв кронштейнов, по выступающему крепежу, по торцам вырезов под лючки нанесен герметик УЗ0МЭС-5М.

Требования, предъявляемые к изделию

Створка мотогондолы должна быть:

- легкой для того, чтобы не утяжелить конструкцию;
- надежное крепление к изделию;
- обладать повышенной прочностью;
- плотно прилегать к конструкции;
- удобной в эксплуатации.

Выбор материала для создания створки мотогондолы

Существует целый ряд факторов, которые должны учитываться в процессе производства: массу материала; цену материала, включающую стоимость его разработки; легкость в переработке; надежность. Значимость того или иного фактора зависит от области применения материала.

Уменьшение массы особенно важно при создании материалов для авиакосмической техники. Снижение массы и уменьшение размеров деталей при конструировании новых авиационных систем приводит, в конечном итоге, к снижению цены на изделие.

ПКМ на основе углеродных, стеклянных, органических и гибридных армирующих наполнителей по комплексу свойств превосходит металлические материалы. В числе основных преимуществ:

- 1) исключительно высокие удельные прочностные и жесткостные характеристики;
- 2) управляемая в широких пределах анизотропия свойств, что позволяет ликвидировать неизбежную в тонкостенных металлических конструкциях избыточность конструктивной массы и создавать крупногаба-

ритные изделия сложной формы с минимальным количеством деталей и крепежа;

3) высокая стойкость к виброакустическим нагрузкам и атмосферным воздействиям;

4) возможность обеспечения повышенных требований к качеству и форме внешней поверхности.

Исходя из всего этого, для изготовления крышки нижней части мотогондолы выбран ПКМ, а не металл. ПКМ позволяют создавать конструкции с заранее заданными характеристиками, что обеспечивает:

1) снижение массы на 20–40 %;

2) повышение аэродинамического качества, коррозионной стойкости, живучести, ремонтпригодности и т. п.;

3) существенное уменьшение количества деталей и соответственно, трудоемкости сборочных работ;

4) увеличение полезной нагрузки (дальности полета) или экономию топлива.

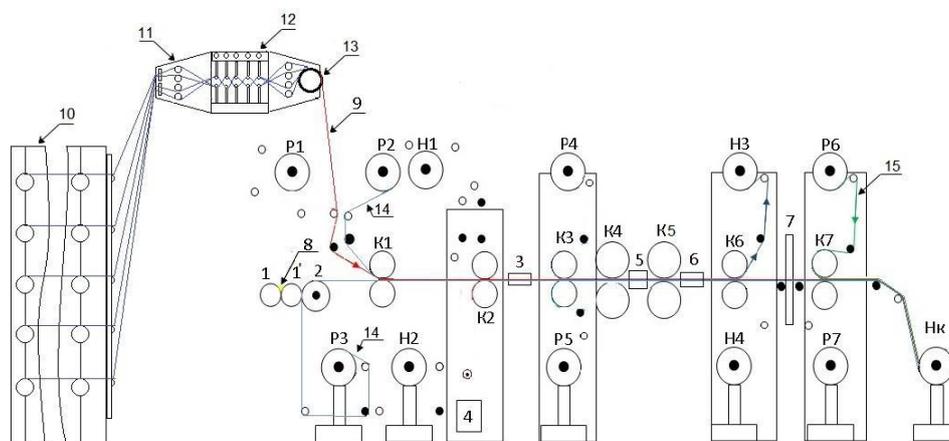
Требования к материалу для изготовления изделия

Створка мотогондолы не должна утяжелять конструкцию в целом.

Материал должен быть прочным, износостойким, термостойким, сопротивляться разрушению коррозией

Требования к связующему

Основное требование, предъявляемое связующему – огнестойкость и огнестойкость. Этим требованиям отвечает полиимидное связующее СП-97К.



1 – дозирующие валы; 2 – ламинирующий вал; 3 – ИК-печь; 4 – ванна со связующим; 5 – нагревательная панель; 6 – охлаждающий стол; 7 – система контроля качества препрега QMS-12 MАНЛО; 8 – связующее; 9 – сформированная лента; 10 – шпулярник; 11 – ролики с желобами; 12 – система натяжителей; 13 – мастер цилиндр; 14 – бумага; 15 – упаковочная пленка; P1-P7 – размотчики; H1-H4 – намотчики; K1-K7 – каландры; ● – тензодатчики; ○ – вспомогательные валы или ролики

Рисунок 1 – Технология получения препрега на основе безуткового углеродного однонаправленного наполнителя и расплавленного связующего с использованием комплекса COS.T.A

Отработка технологии изготовления однонаправленного углеродного препрега

Главной технологической особенностью изготовления материала, адаптированного для автоматизированной выкладки, а именно обладающего высокой технологичностью для предварительной подготовки (порезки и заправки), является отсутствие уточных нитей (стеклянных и углеродных) в препреге.

Для достижения поставленной цели было применено специальное техническое решение – изготовления безуткового препрега заданной поверхностной плотности с использованием блока плетения пропиточного комплекса.

Изготовление препрега, адаптированного для систем автоматизированной выкладки производится на опытном технологическом комплексе пропитки COS.T.A. методом горячего расплава (hot-melt) в несколько этапов:

- формирование однонаправленной ленты, без зазоров, шириной до

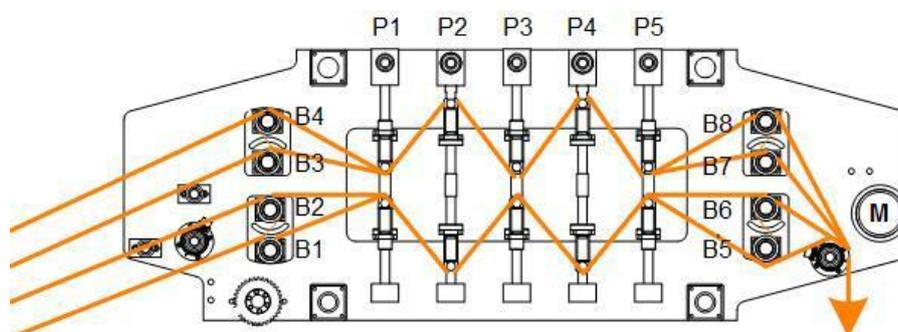
400 мм с заданной поверхностной плотностью от 160 до 200 г/м²;

- создание пленки связующего заданной ширины и толщины;

- совмещение сформированной однонаправленной ленты с пленкой связующего;

- процесс плавления и пропитка армирующего материала связующим и формирование необходимой толщины монослоя.

Для создания, направления и формирования однонаправленной безутковой углеродной ленты заданной поверхностной плотности – был модернизирован блок плетения линии. Узел состоит из приводного устройства протягивания, управляемого тензодатчиками, из регулируемых роликов нитенаправителя, из хромированных, полированных валов на подшипниках, имеющих желоба с определенным шагом для каждого волокна, и приводного механизма передвижения на колесиках. Расчет требуемой поверхностной плотности технологического материала позволил разработать валы нитенаправителя с уникальным шагом для волокон нитей.



P1–P5 – ролики системы натяжения; B1–B4 – входные направляющие валы;
B5–B8 – выходные направляющие валы

Рисунок 2 – Схема заправки углеродных нитей в блок плетения

Также был модернизирован узел нанесения расплава связующего на бумагу – путем выбора соответствующих зазоров между валами 1, 2 и 3 (рисунок 3) удалось точно контролировать долю нанесенного связующего в процентном соотношении к поверхностной плотности выбранной в качестве основы однонаправленной углеродной ленты. Подача клеевого связующего (4) осуществляется между валами 1 и 2, вращающимися вовнутрь, связующее попадает на бумагу с вала 3 и переносится затем на углеродную ленту.

Равномерность распределения связующего по ширине и длине препрега контролируется датчиком QMS-12 MANHO в режиме реального времени – непосредственный контроль качества

материала в ходе процесса пропитки.

Отработка технологии получения материала (препрега) заключалась в выборе оптимальных технологических режимов работы комплекса пропитки (скорость пропитки, зазоры и калибровки на валах нанесения) при различной вариации исходных материалов (процентное содержание связующего). Таким образом, было выявлено влияние фактов технологического процесса пропитки на конечные характеристики технологического материала (содержание связующего, поверхностная плотность материала). Для выходного контроля препрега – проводились физико-механические испытания элементарных образцов ПКМ, изготовленных на его основе для каждого режима пропитки.

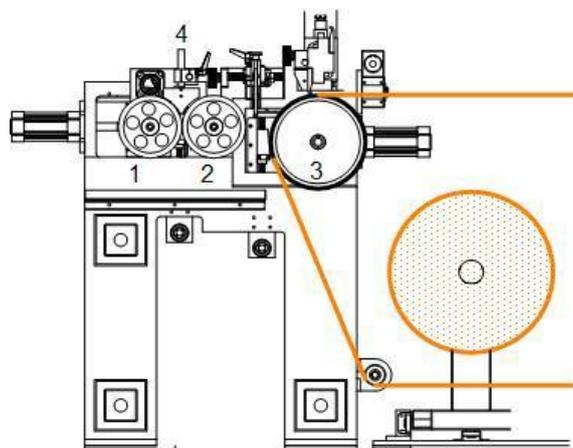


Рисунок 3 – Узел нанесения расплава связующего на бумагу

Технология автоматизированной выкладки

Качественная подготовка технологического материала (исходного сырья для комплекса выкладки) во многом задается повышенными требованиями, сформулированными программой выкладки к прецизионности процесса. Выкладка осуществляется согласно собственному разработанному универ-

сальному технологическому регламенту, оптимизированному для отработки технологий автоматизированной выкладки композитных конструкций с любыми геометрическими параметрами и ориентацией слоев. Задание точных параметров выкладки обеспечивается конкретной управляющей программой. Процесс разработки программы должен быть увязан с элек-

тронными моделями изготавливаемого изделия и криволинейной оснастки. Для комплекса выкладки MAG Viper 1200 (ПАО «ВАСО») в модуле Fibersim были заданы дополнительные характеристики изделия (конструктивное исполнение): сведения о материале, количество и направление слоев выкладки. Данные были переданы через графический интерфейс системы в среду программного обеспечения MAG IndustrialAutomationSystems ACE. В среде ACE были заданы технологические режимы работы станка (усилие прижатия ролика, температура подогрева оснастки, скорость движения ролика (скорость выкладки), сила натяжения лент препрега), а также была проведена обработка входящей информации (электронная модель изделия с конструктивным исполнением, технологическими режимами, электронная модель оснастки) и преобразование данных в управляющую программу для станка MAGIndustrialAutomationSystemsViper

1200. Возможности ПО позволяют пошагово визуализировать процесс выкладки.

В качестве экспериментального готового изделия был выбран элемент створки мотогондолы двигателя самолета ИЛ-76МД-90А – трехслойная панель заданной кривизны с сотовым наполнителем. Выкладка панели производилась в один этап в соответствии в управляющей программой – укладка внутренней обшивки, закрепление сотового наполнителя, укладка наружной обшивки.

Технология дальнейшей переработки готовой детали (формование в автоклаве, фрезерование по контуру и изготовление технических отверстий) производилась в соответствии с директивной технологией изготовления конструктивноподобного изделия, без внесения изменений. Внешний вид готового элемента створки мотогондолы двигателя самолета ИЛ-76МД-90А представлен на рисунке 4.

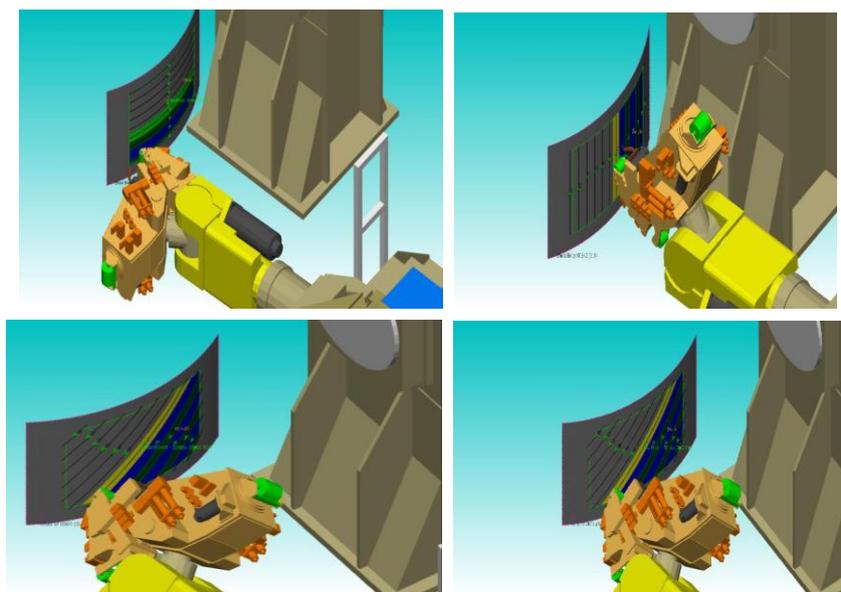


Рисунок 4 –Позиционирование технологической оснастки, загрузка управляющей программы в систему ЧПУ системы выкладки, протягивание запрограммированных углеродных лент через ролики укладки в выкладочной голове станка

Исследовательские испытания технологического процесса автоматизированной выкладки, с учетом эксплуатационных требований по технологичности материала на стадиях предварительной подготовки, позволили определить оптимальный технологический режим для изготовления технологического материала (препрега) и сделать вывод о применимости разработанной технологии для изготовления подобных – аналогичных изделий, соответствующих выбранному классу авиационных агрегатов.

По итогам работ разработаны технические требования на адаптированный технологический материал (препрег), обеспечивающие наилучшие технологические свойства для автоматизированной выкладки.

Вывод

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение в различных отраслях промышленности.



Рисунок 5 – Готовая створка мотогондолы

Сочетание высоких физико-механических характеристик и малый вес обеспечивает значительную конкурентоспособность ПКМ традиционным конструкционным материалам –

металлам и их сплавам. Наиболее востребованы ПКМ оказались в авиакосмической сфере. Тенденции развития современной авиационной отрасли задают новые, высокие требования, предъявляемые к качеству, точности и повторяемости изготовления деталей, повышению технологичности производственных процессов, сокращению трудоемкости и повышению производительности. В связи с этим, автоматизация процессов при работе с композиционными материалами является одной из самых актуальных задач при создании современного высокотехнологичного производства изделий из ПКМ. Высокотехнологичные комплексы систем автоматизированной выкладки лент AutomatedTapeLaying (ATL) и автоматизированная выкладка волокон AutomatedFiberPlacement (AFP) позволяют изготавливать элементы и детали различной сложности с высокой точностью и плотностью укладки волокна, обеспечивая при этом хорошую повторяемость и скорость выкладки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, В. С. Современная классификация металлорежущих станков и станочных систем. Основные термины и определения / В. С. Васильев [и др.] // Станки и инструмент.
2. Гусев, Ю. А. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP / Ю. А. Гусев, А. В. Борщев, А. В. Хрульков // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». – 2012.
3. Разработка технологии автоматизированной выкладки полимерно-

го композиционного материала /
К. С. Габриельс [и др.].

4. <http://graphitepro.ru/technology/%D0%BA%D0%B0%D1%80%D0%B1%D0%BE%D0%BD>.

5. <http://www.hccomposite.com/upload/iblock/075/075b87d9c171f567f29fc4c4d3614440.pdf>.

6. <http://www.findpatent.ru/patent/176/1766020.html>.

7. <https://4science.ru/external/downloads/conference2016/14.574.21.0083-2016-Annotation.pdf>.

© Огилько В. В., Головина Е. А., 2019.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЫЛА САМОЛЕТА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. С. Евсюков, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Главной целью самолетостроения является создание такой конструкции самолета, элементы которого обладали бы как можно меньшей массой и притом не снижали надежность и прочность. Реализация такой идеи приводит к снижению экономических затрат на эксплуатацию, увеличению дальности полета, что в свою очередь снижает стоимость услуг авиатранспорта при перевозке грузов и пассажиров.

Целью данной работы является создание композиционного материала и разработка технологии изготовления для лонжерона крыла самолета, чтобы он соответствовал всем требованиям для данной детали и обладал низким весом.

Ключевые слова: *углеродные волокна, эпоксидные связующие, лонжерон.*

Одной из важнейших задач, решаемых при создании любой конструкции, является обеспечение ее прочности, т. е. под действием нагрузок в эксплуатации не должно быть разрушений. В авиации одно из основных требований: обеспечение минимального веса конструкции, а также обеспечение усталостной прочности и долговечности.

В конструкциях летательных аппаратов, где задача снижения массы стоит особенно остро, изготовление из композиционных материалов крыльев, оперения и других балочных систем очень актуально.

Лонжерон крыла современного пассажирского и транспортного самолета представляет собой, обычно сборную тонкостенную балку, ее регулярная часть состоит из поясов и стенки. Стенка в свою очередь может быть подкреплена стойками. А к зонам нерегулярностей относятся стыковые узлы, зоны навески двигателей и элементов управления, агрегатов различных систем, вырезы в стенках.

Лонжероны – стыковые узлы

крыльев, которые являются частью компенсаторных узлов. Кроме лонжеронов к ним еще относят подмоторные рампы, различные подвески и прочее. Это продольный основной элемент силового набора самолета, и он выполняет такую функцию, как передача растягивающих, изгибающих, сжимающих и других типов нагрузок. Существует несколько видов лонжеронов – балочные, ферменно-балочные, ферменные, коробчатые. Кроме всего этого, лонжероны также принимают участие в восприятии перерезывающей силы.

Если рассматривать лонжероны с конструктивной точки зрения, то они бывают сборными или монолитными. Сборный лонжерон обладает нижним и верхним поясом и стенкой. Коробчатое сечение имеет только две стенки. Со стенкой пояса соединяются путем клепки, точечной электросварки, болтовых соединений или склейки. Пояса работают от изгибающего момента на растяжение-сжатие. Они составляют большую часть всей площади сечения лонжерона. Монолитные

лонжероны – это тип конструкции крыла, у которого при изгибе продольные силы воспринимаются стрингерами и обшивкой по всему поперечному контуру. В таких крыльях лонжеронов нет, но вместо них устанавливаются продольные стенки.

Технологический процесс инфузии

Суть метода инфузии заключается в создании вакуума внутри рабочей полости, через который происходит пропитка армирующего материала и отвод смол. Как и в случае других современных методов получения композитов, в качестве формовочной полости используется вакуум – как правило, для организации процесса используется специальный пленочный пакет. В отличие от распространенного метода контактного формования, установка вакуумной инфузии, которая включает в себя специальную матрицу с сухим наполнителем, позволяет изготавливать стекловолокно с минимальным содержанием пористых включений и более высокой степенью армирования. Это предполагает значительное сокращение выбросов вредных веществ. В частности, уменьшается количество стирола.

Прежде всего, на подготовленное оборудование выкладывается наполнитель с вакуумом, который может быть представлен как специальными веществами, так и комбинированными полотнами. Затем укладываются технологические слои, за счет чего в дальнейшем должно обеспечиваться равномерное распределение связующего компонента. Далее в технологический мешок направляется вакуум,

открывается канал допуска связующего, и под воздействием уже активного вакуума одновременно заполняются пустоты и пропитывается наполнитель. Процент пористости зависит от температуры окружающей среды, на которой вливание вакуума выполнено. Технология реализации метода в промышленных условиях в среднем обеспечивает сохранение 1–0,5 % из пор по отношению к полной массе составного продукта

Основой для установки инфузии является матрица, упомянутая выше. Это в некотором роде площадка, средние размеры которой могут соответствовать обычной квадратной ламинированной панели и площади производственного цеха.

С точки зрения качества получаемого композита, важнее обернуть матрицу, от которой зависит качество подачи связующего и вакуумная функция. За образование вакуума в системе отвечает вакуумный насос для инфузии, который помогает обеспечить равномерное прессование расходных материалов в матричной платформе. Другими словами, он создает эффект всасывания связующих компонентов. Для улавливания смолы также используется специальная ловушка, которая представляет собой герметичную емкость. Этот технологический элемент собирает излишки смолы, образующиеся в процессе пропитки армирующего материала. Ловушка защищает насос от проникновения в него той же смолы. Работа инфузии невозможна без качественной арматуры. Инфраструктура этой части представлена арматурой и тру-

бами, которые организуют работу каналов подачи связующего материала.

Материалы, используемые для размещения в базовом оборудовании, относятся к средствам армирования. Фактически они составляют основу будущего продукта и в наибольшей

степени определяют его эксплуатационные свойства. В зависимости от направления производства это могут быть углеродные наполнители, базальтовые ткани для изоляционных материалов, кевларовые арамиды и др.



Рисунок 1 – Технологическая схема производства лонжеронов крыла самолета методом вакуумной инфузии

Отдельной группой представлены материалы для вакуумной инфузии, из которых впоследствии получают стекловолно. Он включает тради-

ционные стеклянные ткани, стеклоткани волокна, стеклянные волокна и стеклянные циновки. Все и получают комбинированные ткани. В частности,

благодаря сочетанию различных технических и физических свойств популярны арамидно-углеродные и арамидно-базальтовые наполнители.

Помимо основных материалов, иногда применяются вспомогательные. Эта группа материалов используется только для организации самого процесса инфузии и не является частью конечного продукта. По мере завершения операции такие вещества удаляются. Основным компонентом данного типа является жертвенная ткань, которая предназначена для формирования гладкой внутренней полости заготовки, которая образуется путем вакуумной инфузии. Оборудование также защищено этой тканью от будучи нажиманным смолой вне.

Защитная функция жертвенного материала определяется стойкостью его структуры к внешним воздействиям и минимальной адгезией. Кроме того, в перечень необходимых вспомогательных материалов входит токопроводящая сетка, предназначенная для отвода воздуха и полимерного вкладыша к армирующей основе. При приготовлении матрицы также используют вакуумную пленку. Он различен увеличенным растяжимым модулем прочности около 400% и способностью выдержать температуры свыше 100 °С.

Большая ответственность ложится на связующее, поэтому к нему предъявляются высокие требования. Это должен быть материал с низкой степенью вязкости и экзотермический пик, и в то же время высокой жизнеспособностью. Соответствующее этим параметрам вещество обеспечит бы-

строе впитывание армирующего материала и сохранит оптимальную рабочую структуру. Для этого используются специальные смолы, благодаря которым вакуумная инфузия может обеспечить пропитку оснований толщиной до 10 мм. Высокая жизнеспособность имеет особое значение при работе с большими изделиями – это качество помогает завершить процесс до начала желатинизации.

Преимущества использования метода вакуумной инфузии при создании композитных элементов конструкции воздушных судов

1. Неограниченное время жизни материала в процессе выкладки позволяет реализовывать конструкции высокой степени интегральности.

2. Отверждение панели (обшивка + стрингера) при инфузионной технологии происходит за один цикл. При автоклавной технологии требуется два цикла отверждения (1-й цикл – отверждение стрингеров, 2-й цикл – совместное отверждение стрингеров + обшивка), суммарные затраты по времени и энергетике на изготовления крыльевых панелей выше (до 5 % по трудоемкости, до 30 % по энергетике).

3. Метод вакуумной инфузии (инфузионная технология), за один процесс пропитки, позволяет создавать интегральную монолитную конструкцию в противоположность клееклепаным автоклавным конструкциям (клеевая пленка между стрингером и обшивкой).

Процесс установки механического крепежа для дополнительной фиксации стрингеров увеличивает трудоем-

кость изготовления крыльевых панелей до 8 %.

4. В итоге суммарные затраты по времени и энергетике при автоклавной технологии выше, чем при инфузионной (до 13 % по трудоемкости, до 30 % по энергетике).

5. Меньшая жесткость ленты по сравнению с препрегом позволяет выкладывать изделия более сложной формы (минимальный радиус выкладки в пределах 500 мм из-за хорошей подвижности волокон (жгутов) в

ленте, что на препреге достичь невозможно из-за большого количества связующего и его высокой вязкости), что дает возможность использовать более резкий сбег толщин (например, путем уменьшения радиусов) и эффективное изменение толщин по размаху и по хорде (например, при переходах в залонжеронных зонах). Возможность получения более совершенной по весу конструкции (весовая эффективность до 7 % по сравнению с препреговой конструкцией).

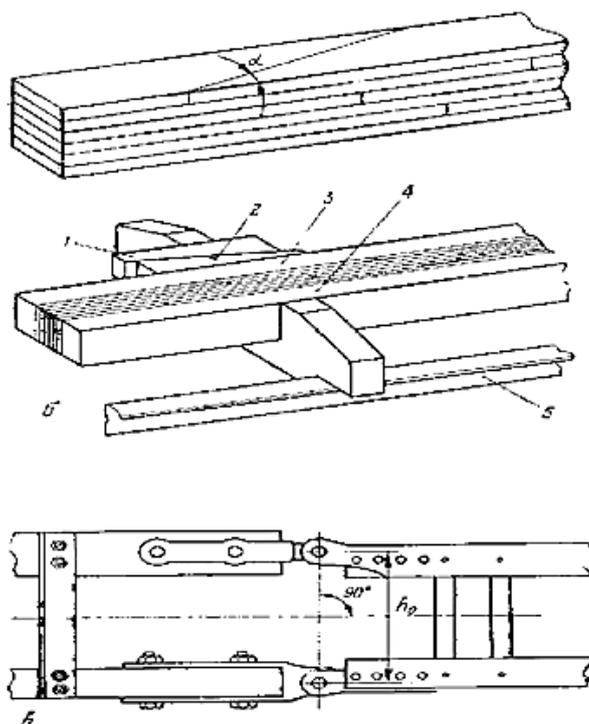


Рисунок 2 – Изготовление лонжеронов крыла, где $\sigma^{\text{кл}}$ – предел прочности клея при равномерном отрыве; $\tau^{\text{кл}}$ – предел касательных напряжений клеевой пленки; $\sigma^{\text{д}}$ – предел прочности используемой древесины

6. Технология не требует выдавливания вакуумным мешком излишков связующего из композита, что позволяет упростить стрингерную оснастку и появляется возможность получения изделия с меньшей пористостью и зонами непроклея [3].

7. Более низкая стоимость оборудования.

Изготовление лонжеронов

Производство лонжеронов начинается с изготовления его полок. Полки могут быть тесно соединены или склеены из отдельных плит. Угол

ос склейки на «ус» должен быть таким, чтобы обеспечивалась равнопрочность склеенной продольной планки на разрыв. Этот угол определяется из условия выполнения двух неравенств:

$$\sin 2\alpha < \frac{2\tau_{\text{кл}}}{\sigma_{\text{л}}}, \sin^2 \alpha < \alpha \frac{\sigma_{\text{кл}}}{\sigma_{\text{л}}}.$$

Склеивание полок должны быть выполнены на стапеле или другой плоской поверхности с необходимым сжатием ламелей. Обжатие можно выполнить, используя клин 1, 2 или струбицы. Бары должны быть обжаты с даже продольными барами 3, 4.

Желательно еще до сборки бокового элемента закрепить его стыковочные узлы, если таковые имеются.

При сборке центроплана крыла очень важно с одинаковой точностью сохранять для нижнего и верхнего фланцев одинаковое расстояние между осями замыкающих болтов точек стыковки по размаху крыла.

Сборка лонжеронов необходимо держать на складах в горизонтальном положении. Перед навинчиванием стелны необходимо закрепить к полкам так, чтобы прямая линия, соединяющая отверстия закрывающие болты верхней и нижней полки, имеет прямоугольное с полками или средней линией бортового члена. В этом случае необходимо выдерживать заданное расстояние и между осями отверстий стыковочных стыков h_0 по высоте. Точность выдерживания расстояний между полками определяется точностью изготовления и монтажа стоек, которые укрепляют стенки лонжерона. Стойки могут быть сделаны из дюрала углу и из дерева. В последнем случае их необходимо крепить к бокам боковых элементов бол-

тами во время движения он оставался перпендикулярным узорам [4].

Выводы

Выше была описана технология, которая позволяет использовать при создании лонжеронов крыла самолета выбранные нами материалы, которые обеспечивают необходимую жесткость конструкции и делают ее очень легкой. Если еще раз кратко выделить основные преимущества технологии, то это неограниченное время жизни материала в процессе выкладки, возможность выкладки сложной формы, относительная простота и дешевизна процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по композиционным материалам : В 2-х кн. Кн. 2 / Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта / Под ред. Б. Э. Геллера. – М. : Машиностроение, 1988. – 584 с.
 2. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя ; пер. с японск. / В. И. Анурьев. – М. : Дзако – М. : Мир, 1982. – 232 с.
 3. Гребеньков, О. А. Конструкция самолетов : учеб. пособие для авиационных вузов / О. А. Гребеньков. – М. ; Машиностроение, 1984. – 240 с.
 4. Проектирование конструкций самолетов : учеб. пособие / Е. С. Ендогур [и др.]. – СПб. : Профессия, 2004. – 462 с.
 5. Чумак, П. И. Расчет, проектирование и постройка «сверхлегких» самолетов / П. И. Чумак, В. Ф. Кривокрысенко. – М. : Патриот, 1991. – 238 с.
- © Евсюков А. С., Головина Е. А., 2019.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА И ТЕХПРОЦЕССА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ ОПОРЫ ОСВЕЩЕНИЯ

В. В. Блинов, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Опора освещения – это конструкция, которая предназначена для установки на определённых высотах приборов освещения, и для обеспечения питания прибора. Кроме освещения на опорах может располагаться дополнительное оборудование: светофоры, дорожные знаки, реклама. Основными нагрузками на опоры освещения являются массовые – от установленного оборудования на опору освещения, – также ветровые и гололёдные. При монтаже опоры могут подвергаться дополнительным нагрузкам от оборудования и персонала, который производил работы по установке опоры освещения.

Целью данной работы является проектирование материала для изготовления опоры освещения и разработка технологии ее производства.

***Ключевые слова:** стеклопластик, эпоксидное связующее, опора освещения, масса конструкции, проектируемый материал, препрег, технологический процесс, термовакуумное формование, запас прочности.*

Назначение и виды опор освещения

Опоры освещения – это металлические, железобетонные, композитные столбы, изготавливаемые и монтируемые с целью повышения освещённости на участках дорог, стройках, жилых территориях, остановок общественного транспорта [1].

Опора освещения может быть силовой и несиловой. К силовой опоре кабель подводится как подземным, так и воздушным способом. Кабель питает лампы освещения на самой опоре. Несиловая опора служит подставкой для кабеля, на котором подвешены люстры освещения.

По способу установки опоры делятся на:

- прямостоечные;
- фланцевые.

Прямостоечные опоры представляют собой единую конструкцию, которая монтируется в подготовленное

отверстие в земле, после чего оно заливается бетоном.

Фланцевые опоры состоят из двух частей: надземной и подземной. Их монтаж начинается с установки закладного элемента (подземной части) в грунт и его бетонирования. Это удобнее в том смысле, что небольшой блок намного проще центровать. Когда закладной элемент выставлен и забетонирован, к нему сверху крепится опора бортовым соединением.

По форме опоры всех типов бывают:

- коническими гранеными;
- коническими круглыми;
- трубчатыми цилиндрическими;
- трубчатыми складывающимися.

Независимо от вида, все опоры для освещения должны обладать повышенной прочностью и быть стойкими к климатическим воздействиям [1].

Основные требования, предъявляемые к опорам электроосвещения:

- 1) опора освещения должна обладать временным сопротивлением не менее 400 МПа;
- 2) высокая коррозионная стойкость;
- 3) ударная вязкость не менее КСУ 90 кДж/см²;
- 4) электропроводность;
- 5) простота монтажа;
- 6) долговечность.



Рисунок 1 – Опора освещения

Разработка технологического процесса изготовления опор освещения

Технологическая схема изготовления композитных опор освещения методом намотки представлена на рисунке 2.

Весь процесс формирования опор освещения включает комплекс последовательных операций, начиная с подготовки сырья, материалов, оборудования и заканчивая контролем качества.

Процесс включает следующие стадии:

1. Сборка оправки, размещение ее в станке и нанесение антиадгезионной тефлоновой пленки.

2. Подготовка ровинга волокна.

Входной контроль ровинга предполагает определение содержания влаги, которое должно быть в пределах 0,4–1,6 %. Содержание влаги определяют по ГОСТ 10213.3-2002. Для проведения испытаний применяют следующую аппаратуру и вспомогательные материалы: сушильный шкаф, сушильный текстильный аппарат, весы специального 1 класса точности, стаканчики для взвешивания, эксикаторы, сосуд или пакет влагонепроницаемые.

3. Подготовка связующего для пропитки.

Подготовка связующего включает входной контроль качества входящих компонентов. Отвердитель изо-МГТФА проверяется на плотность ($\rho = 1230 - 1300 \text{ кг/м}^3$). Плотность определяют по ГОСТ 15139-69. Для проведения испытаний применяют следующую аппаратуру и вспомогательные материалы: штангенциркуль, весы специального 1 класса точности, стаканчики для взвешивания. Визуально просматривается состояние связующего.

Жидкость должна быть прозрачной без механических включений от светло-желтого до светло-коричневого цвета.

В случае обнаружении кристаллов, если отвердитель хранили ниже температуры 20 °С, то его необходимо подогреть при температуре 50–60 °С до полного исчезновения кристаллов.

Смола ЭД-22 подвергается контролю на содержание эпоксидных групп (22,1–23,6 %). Содержание эпоксидных групп определяется по ГОСТ 12497-78.

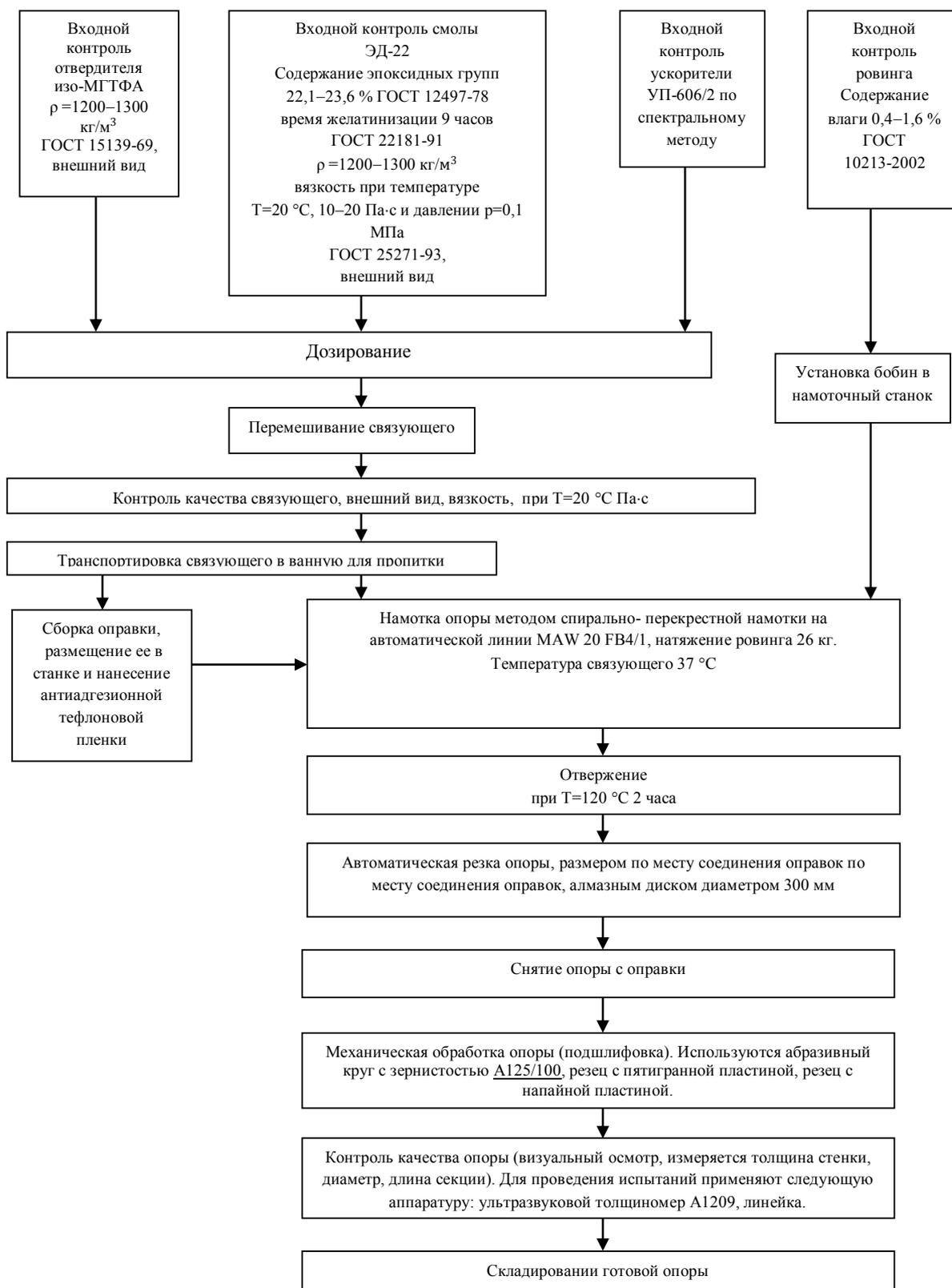


Рисунок 2 – Технологическая схема производства композитной опоры методом намотки

Для проведения испытаний применяют следующую аппаратуру: колбы, стаканы, колба, цилиндры, пипетка, рН-метр, электрод сравнения типа ЭВЛ-1М, заполненный насыщенным раствором хлористого калия в метаноле, электрод индикаторный стеклянный, мешалка магнитная типа ММ-2, термометр.

Смола подвергается контролю плотности (1200–1300 кг/м³), контролю времени желатинизации (9 часов). Время желатинизации определяется по ГОСТ 22181-91. Для проведения испытаний применяют следующую аппаратуру: стеклянная пробирка для испытуемой смеси минимальной длиной 120 мм, внутренним диаметром 18 мм, с хорошо подогнанной пробкой, вискозиметр, баня, термостатически контролируемая при температуре 25 ± 0,5 °С и защищенная от света, химический стакан вместимостью 100 см³, две градуированные пипетки вместимостью 1 см³ с ценой деления 0,01 см³, имеющие четкую маркировку с целью различия одной от другой, весы с точностью взвешивания не более 0,1 г, шпатель из нержавеющей стали, хронометр с ценой деления в секундах.

Смола подвергается контролю вязкости (при температуре 20 °С динамическая вязкость равна 10–20 Па·с), а также контроль внешнего вида. Вязкость определяется по ГОСТ 25271-93. Для проведения испытаний применяют следующую аппаратуру: вискозиметр Брукфильда, термостабилизующая жидкостная баня, штатив, поддерживающий вискозиметр, хи-

мический стакан диаметром 90–92 мм и высотой 115–160 мм, термометр.

Ускоритель УП-606/2 проверяется на содержание солей металлов. Проверка осуществляется по спектральному методу. Для проведения испытаний применяют следующую аппаратуру: спектрометр.

После того как компоненты прошли входной контроль производится их дозирование с помощью дозаторов и весов для приготовления композиции (связующего). Связующее составляет многокомпонентную систему, куда входят эпоксидная смола, отвердитель – для отверждения смолы в процессе изготовления изделий из композиционных материалов, ускорителя – для ускорения процесса отверждения. Все компоненты связующего берутся в определенном количественном соотношении (таблица 1).

Таблица 1 – Состав связующего

Компонент	Содержание, %
Эпоксидиановая смола ЭД-22	56,7
Изометилтетрагидрофталиевый ангидрид (изо-МТГФА)	42,5
Ускоритель УП-606/2	0,8
Готовое связующее	100,0

4. Намотка. Для изготовления опор используют метод спирально-перекрестной намотки (рисунок 5). При этом методе наполнитель укладывается на оправку спирально-винтовым способом. Материал наматывается на оправку под определенным углом к ее оси, соответствующую-

щим расчетным характеристикам.

После первого витка ленты, наматывается на оправку, образует спиральную или близкую к ней линию. Второй виток имеет определенное смещение по отношению к первому. Смещение витка зависит от угла меж-

ду плоскостью витка и осью оправки, ширины ленты и габаритных размеров изделия. С помощью соответствующего делительного устройства промежутки между витками заполняются последующими витками ленты.

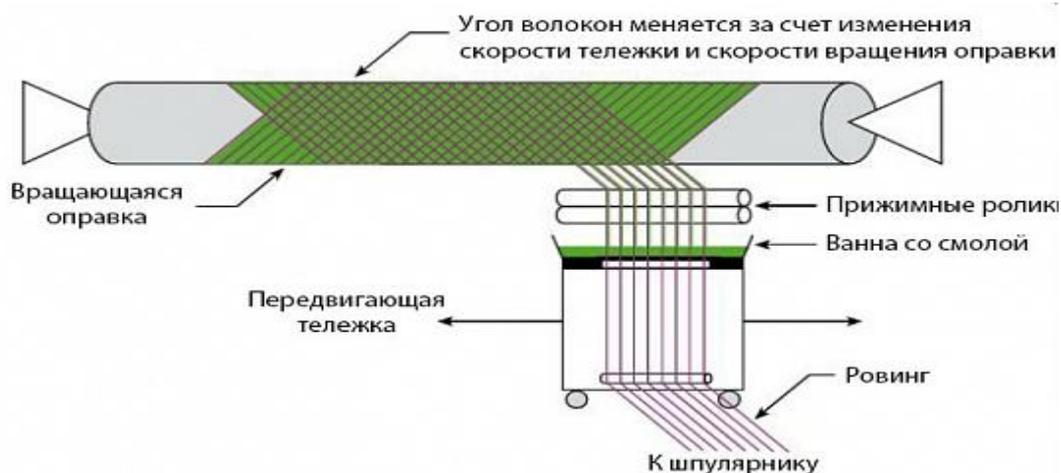


Рисунок 5 – Схема намотки

Намотка осуществляется следующим образом: ровинг пропитывается в ванне связующим и далее подают на

оправку, и укладывают на ее поверхности в заданном направлении. Параметры намотки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры намотки

Параметры	Единица измерения	Значение
Параметры станка		
Подача	мм/об	2,30
Параметры намотки		
Количество ровингов	шт.	30
Количество ровингов в канавке	шт.	2
Температура связующего состава в пропиточной ванне	°С	37
Натяжение	кг	26

5. Отверждение. Изделие на технологической оправке помещается в установку полимеризации на 2 часа, температура 120 °С. После заданного времени заполимеризованное изделие на технологической оправке извлека-

ется из установки полимеризации и поступает на охлаждение.

6. Автоматическая резка опоры, по месту соединения оправок, алмазным диском с диаметром 300 мм.

7. Снятие опоры с оправки с

помощью установки извлечения оправок.

8. Механическая обработка опоры (подшлифовка). Используются абразивный круг с зернистостью A125/100, резец с пятигранной пластиной, резец с напайной пластиной.

9. Контроль качества опоры (визуальный осмотр, измеряется толщина стенки, диаметр, длина секции). Для проведения испытаний применяют следующую аппаратуру: ультразвуковой толщиномер А1209, линейка.

Вывод

1. Для изготовления опоры освещения из стеклопластика, необходимо следующие: волокно марки Е, эпоксидную смолу марки ЭД-22 и отвердитель.

2. Рассмотрены технологические этапы производства опоры освещения, методом спирально-перекрестной намотки, такие как: сборка оправки, подготовка ровинга волокна, подготовка связующего, намотка, отверждение, автоматическая резка, снятие опоры, механическая обработка, контроль качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гален, В. Н. Словарь-справочник по опорам освещения [Текст] : справочник / В. Н. Гален. – М. : Электромонтаж, 1990. – 256 с.

2. Гологорский, Е. Г. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением [Текст] : справочник / Е. Г. Гологорский. – М. : Машиностроение, 2009. – 173 с.

3. ГОСТ 8045-82. Светильники для наружного освещения. Общие технические условия.

4. Геллер, Б. Э. Справочник по композиционным материалам [Текст] : справочник / Дж. Любина, Б. Э. Геллер. – М. : Машиностроение, 1988. – 584 с.

5. Крысин, В. Н. Технологические процессы формирования, намотки и склеивания конструкции [Текст] : справочник / В. Н. Крысин. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.

6. Современные композиционные материалы [Текст] : справ. пособие / Под ред. В. А. Худяков, С. Н. Кислицина. – М. : Феникс, 2007. – 224 с.

© Блинов В. В., Головина Е. А., 2019.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ДРЕВКА ЛЕДОВОГО ИНСТРУМЕНТА

А. А. Гребенников, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

В данной работе был спроектирован материал и технология изготовления древка ледового инструмента. Спроектированный материал и технология изготовления удовлетворяют общепринятому регламенту безопасности UIAA 152 и EN 10387, а также эксплуатационным характеристикам. В ходе использования ледовый инструмент подвергается статическим и динамическим нагрузкам на растяжение, данные нагрузки создаются массой тела спортсмена 80 кг. При этих нагрузках древко должно не терять свои эксплуатационные свойства и оставаться целостным. Анализ условий эксплуатации древка ледового инструмента показал, что максимальное напряжение создается в верхней части древка места крепления к головной части инструмента. Безусловно, древко из углепластика имеет преимущества в весе (почти в полтора раза легче) и не уступает по показателям прочности, в сравнении цельнометаллических конструкций. По полученным результатам можно сделать вывод, что материал для изготовления древка выбран верно и изделие соответствует предъявленным требованиям.

Ключевые слова: древко, ледовый инструмент, ледоруб, углепластик, углеткань, эпоксидное связующее, изготовление, технологический процесс, деталь. Объектами исследования в дипломной работе являются материал и технология изготовления ледового инструмента из углепластика.

Ледовый инструмент – разновидность ледоруба с изогнутым древком и клювом или бойком (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид ледового инструмента

Используется данный инструмент, главным образом, в спортивном ледолазании (на естественном и искусственном рельефах).

Ледовые инструменты состоят из следующих основных частей: головка и древко. В состав головки входит клюв, лопатка или боек, которые могут быть взаимозаменяемыми. Модульная головка может иметь съемные утяжелители для балансировки инструмента и максимально эффективного забивания его в лед. Также может быть оборудован молотком для забивания крючьев. Модульная конструкция головки необходима для адаптации инструмента к определенным условиям и виду активности:

- клюв с утяжелителями обеспечивает точное, эффективное вбивание инструмента в лед;
- клюв без утяжелителя значительно легче – для драйтулинга;

Сменный клюв утончен к концу для легкого проникновения даже в твердый лед. Его форма обеспечивает стабильную работу как на льду, так и на камнях.

На древке располагаются рукояти (верхняя и нижняя), обособленные снизу гардой.

Гарда – часть инструмента, служащая для защиты руки спортсмена от удара об рельеф, а также для предотвращения сползания руки с рукояти, тем самым обеспечивая более анатомичный захват рукой и в следствии надежное использование инвентаря.

Главные характеристики ледового инструмента. Двумя самыми важными характеристиками ледового инструмента, конечно же, являются его размер и вес.

Размеры инструмента регламентируются общепринятыми стандартами, а вес инструмента каждый производитель стремится сделать минимальным. Таким образом, размер ледоруба должен быть такой, чтобы он мог уместиться в так называемый айс бокс (icebox). Айс бокс – ящик прямоугольной формы с внутренними сторонами 250 мм и 500 мм.

Помимо веса и размера у ледовых инструментов можно выделить следующие характеристики, влияющие на достижение спортивного результата:

- Геометрия – специальная форма инструмента, с точно рассчитанными углами атаки, позволяющая использовать ледоруб на плоскостях различного наклона (также на положительных и горизонтальных). При проектировании инструмента – геометрия играет

очень важную роль, необходимо предусмотреть все возможные варианты нагружения;

- Прочность – свойство материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, возникающих под воздействием внешних сил. Свойство конструкции выполнять назначение, не разрушаясь в течение заданного времени;

- Жесткость – способность конструктивных элементов сопротивляться деформации при внешнем воздействии.

Во время эксплуатации ледовый инструмент подвергается статическим и в большей мере динамическим нагрузками (излом, скручивание, растяжение, сжатие), зная эти нагрузки мы можем дать оценку конструкции, спроектировать ее, произвести расчеты на прочность и далее грамотно эксплуатировать.

В настоящее время древко ледового инструмента из углепластика производят автоклавным формованием.

Процесс автоклавного формования состоит из следующих основных этапов:

Этап 1. На форму накладывают необходимое число слоев препрега;

Этап 2. При повышенных давлении и температуре в автоклаве проводят отверждение;

Этап 3. Осуществляют отделку (зачистку) отвержденных изделий.

Чаще всего при отверждении в автоклаве используют и вакуумный мешок. Рассмотренный метод формования является периодическим; на свойства изделий решающее влияние ока-

зывают технология выкладки препрега на форму, тип и свойства вакуумного мешка.

Автоклавное формование. Автоклавное формование – метод получения многослойных изделий из препрегов.

Препрег или многослойный пакет из препрега выкладывают на форму, вместе с ней помещают в вакуумный мешок и снижают в нем давление. Метод, при котором отверждение проводят, создавая градиент давления по отношению к атмосферному, называют формованием с помощью вакуумного мешка. Так как нередко избыточное внешнее давление создают с помощью автоклава, то этот метод также называют автоклавным формованием.

Можно отметить следующие характерные особенности метода автоклавного формования:

- Возможность получения изделий равномерной толщины.
- Возможность формования крупногабаритных изделий.
- Высокое качество поверхности изделий;
- При использовании вакуумного мешка получают высококачественные изделия с низкой пористостью.

Недостаток метода автоклавного формования заключается в том, что он довольно дорог, требует затрат ручного труда и поэтому малоприменим для массового производства изделий. Тем не менее, он весьма эффективен для изготовления изделий из таких высококачественных и легких материалов, как стеклопластики. Перспектива снижения стоимости про-

цесса (соответственно и изделий) связана с механизацией и автоматизацией ряда операций, сокращением благодаря этому трудовых затрат и подбором лучших материалов для вакуумных мешков. Исследуется возможность применения для этого метода термостойких и долговечных мешков из силиконового каучука, которые можно использовать многократно. В частности, важно выбирать температуру и давление с учетом характеристик процесса отверждения, так как эти параметры оказывают значительное влияние на свойства формируемого изделия.

Намотка. Для производства нашей детали был выбран метод автоклавного формования. Данный процесс предусматривает использование:

- Ручной и машинной выкладки.
- Однонаправленных и мультиаксиальных тканей.
- Термопластичных и терморезистивных матриц.
- Разрушаемых песчано-полимерных оправок.

Изделия из ПКМ, форма которых определяется вращением произвольных образующих, могут быть изготовлены намоткой на оправку соответствующей формы. В качестве ПКМ могут быть использованы нити, ленты или ткани, пропитанные основой. Когда армирующий материал укладывается по направлению главных растягивающих напряжений, создаются возможности для изготовления оптимальных конструкций (с минимальной массой при заданной прочности) [8].

Методом намотки создаются прочные конструкции при малой массе, что достигается ориентацией армирующего материала в направлении главных нагрузок.

В нашем случае мы используем намотку однонаправленной (прямой участок) и мультиаксиальной (изогнутый участок) углеродных тканей на сборочную оправку, состоящую из двух частей: стальная трубка прямоугольного сечения (в качестве оправки прямой части древка) и песчано-полимерную смесь (в качестве оправки для части сложной геометрической формы).

Намотка осуществляется при помощи ручной и машинной выкладки.

Методы получения многослойных изделий из препрегов. Такие методы аналогичны формованию уг-

лепластиков с ручной выкладкой углеродных полуфабрикатов. Слоистый пластик в этом случае получают ручной выкладкой слоев препрега на основе углеродных волокон, а отверждение проводят методами горячего прессования, автоклавного формования, методом формования на поворотном столе.

Процесс собственно автоклавного формования состоит из следующих основных этапов:

- на форму накладывают необходимое число слоев препрега;
- при повышенных давлении и температуре в автоклаве проводят отверждение;
- осуществляют отделку (зачистку) отвержденных изделий.

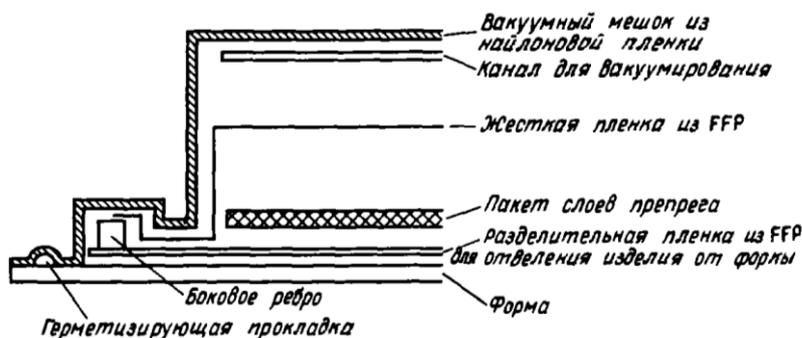


Рисунок 2 – Схема автоклавного формования

Чаще всего при отверждении в автоклаве используют и вакуумный мешок. Рассмотренный метод формования является периодическим, на свойства изделий решающее влияние оказывают технология выкладки препрега на форму, тип и свойства вакуумного мешка (рисунок 2).

Подготовка оправки для будущей намотки. Как уже излагалось

ранее, оправка прямой части древка представляет собой стальной прут прямоугольного сечения, поверхность которого предварительно полируется.

С оправкой для изогнутой части древка немного сложнее, так как оправка должна быть извлечена по завершению изготовления детали. Для этого используется песчано-полимерная смесь.

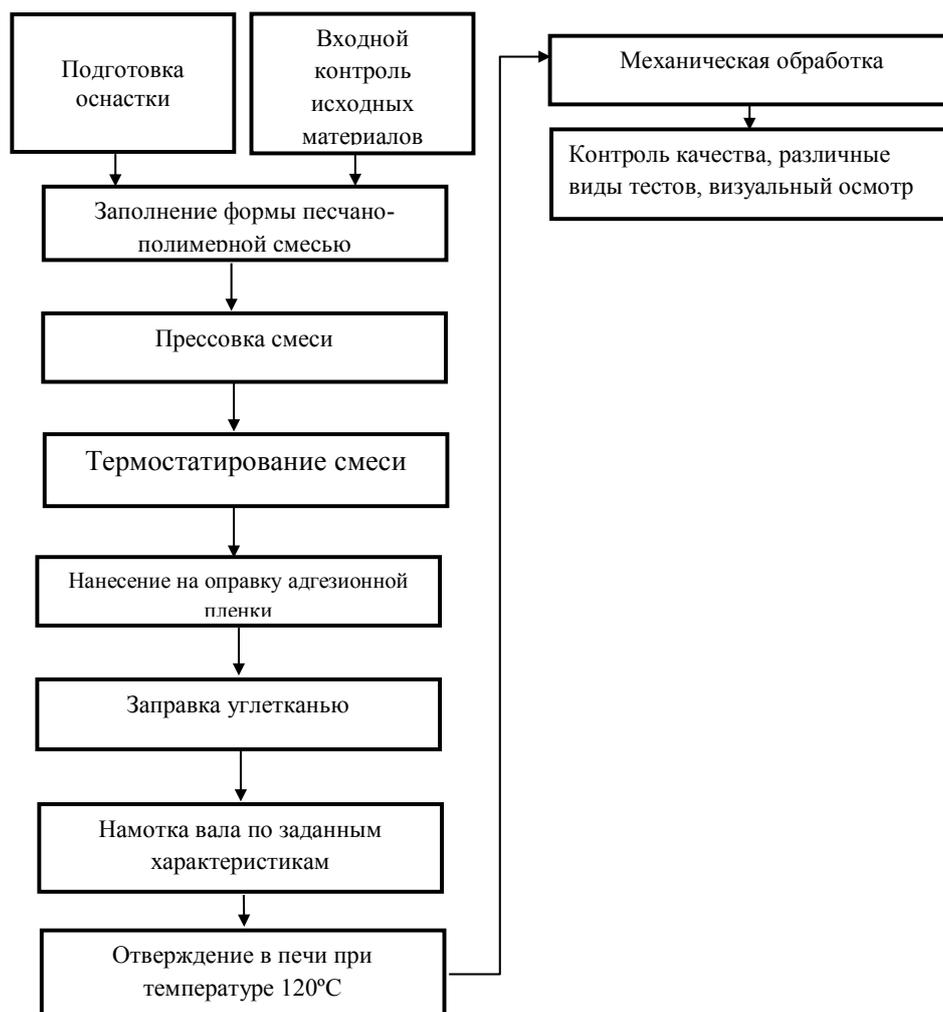


Рисунок 3 – Технологическая схема производства древка ледового инструмента

Изготовление секций оправки производится методом пневматической трамбовки в процессе заполнения песчано-полимерной смесью специальной формующей оснастки.

При этом в состав секции вводят, равномерно распределяя по объему песчано-полимерной смеси, стеклопластиковые стержни круглого поперечного сечения (с оплеткой), диаметром 10–15 мм, образующие арматуру, занимающую 10–15 % объема секции.

После чего проводят термостатирование по режиму:

- подъем температуры до 90 °С в течение 3^{+0,5} час.;
- выдержка при температуре 90±5 °С в течение 5^{+0,5} час.;
- подъем температуры до 130 °С в течение 6^{+0,5} час.;
- выдержка при t = 130 ± 5 °С в течение 28⁺¹ час.;
- инерционное охлаждение. По окончании режима производят извлечение затвердевших сформированных секций с помощью отжимных болтов, после чего производят монтаж с транспортными приспособлениями

для доставки и установки секций на вал оправки.

По заданному технологическому процессу на оправку, установленную на центральном валу, выкладывают раскроенные по шаблону заготовки из резин ТЗП и производят намотку силовой оболочки корпуса из препрега полимерного композиционного материала.

После окончания процесса намотки оправку с корпусом помещают в термокамеру для полимеризации, а после полимеризации подвергают выпариванию с внутренней стороны корпуса при $t = 95 - 100$ °С (до фазового превращения связующего) с целью разрушения оправки с последующим извлечением песка из корпуса для дальнейшего использования.

При этом разрушение оправки при выпаривании ускоряется в связи с разностью коэффициентов термического расширения стеклопластиковой арматуры и песчано-полимерной смеси (коэффициент термического расширения арматуры выше в ~1,5 раза, чем для песчано-полимерной смеси).

Технологическая схема производства древка ледового инструмента

Для изготовления древка используем способ намотки, который позволяет получить комплекс необходимых нам свойств.

На рисунке 3 представлена блок-схема технологического процесса изготовления древка ледового инструмента.

Вывод. На основе произведенной работы можно сделать вывод о том, что разработанная технология является оптимальной для изготовления древка ледового инструмента, с поддержанием высоких стандартов качества продукции и с обеспечением эксплуатационных свойств, не уступающих мировым аналогам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ледовый инструмент для альпинизма: [сайт]. URL : <https://sportmarafon.ru/article/alpinizm/kak-vybrat-ledovyy-instrument-dlya-alpinizma/>.
2. Ледоруб: [сайт]. URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ледоруб>.
3. Требования, предъявляемые к ледовым инструментам: [сайт]. URL: <https://www.theuiaa.org/ice-climbing/changes-todimensionoftheicetoolbox/>.
4. Материалы ледовых инструментов: [сайт]. URL : http://www.mountain.ru/useful/equipment/2001/ledovy_instr/.
5. Стандарт UIAA 152. Ледорубы и ледовые инструменты.
6. Стеклопластик: [сайт]. URL : https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00229860_0.html.
7. Преображенский, А. И. Стеклопластики – свойства, применение, технологии / А. И. Преображенский // Главный механик. – 2010. [сайт]. URL: https://www.e-zim.ru/assets/files/FRP_part1sm.pdf.

© Гребенников А. А., Головина Е. А., 2019.

ПОДБОР МАТЕРИАЛА И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

А. В. Синуцин, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Ветрогенератор – устройство для преобразования энергии движения ветра в энергию вращения ротора с следующим преобразованием её в электричество. Является очень эффективным средством получения электрической энергии в областях с преобладающими ветрами такими как степи, побережья.

Лопастни ветрогенераторов являются одним из основных заменяемых и подверженных нагрузкам элементом ветрогенератора. Для обеспечения оптимального соотношения цены и качества был подобран материал, а именно стеклоткань. Для создания лопастей разработан технологический процесс создания, который идеально подойдет для конвейерного производства, так как не будет необходимости создавать дорогостоящие матрицы.

Ключевые слова: ветрогенератор, лопасть, лонжерон, углепластик.

Ветрогенератор – устройство для преобразования энергии движения ветра в энергию вращения ротора с следующим преобразованием её в электричество. Является очень эффективным средством получения электрической энергии в областях с преобладающими ветрами такими, как степи, побережья.

Все ветрогенераторы возможно подразделить:

- на промышленные;
- на коммерческие;
- на бытовые.

Промышленные ветрогенераторы, в основном, используются государством и энергетическим компаниям. Несколько больших ветрогенераторов объединяют в сеть, которые составляют ветровые электростанции. В отличие от традиционных, у них полностью отсутствует сырье и отходы. Однако существует и требование – высокий среднегодовой уровень мощности ветра. Мощность ветрогенераторов на сегодняшний день дос-

тигает 8 МВт. Промышленные ветрогенераторы в основном используются для нужд своего предприятия и сокращения затрат на электроэнергию.

Коммерческие устанавливают огромные ветрогенераторы и собирают из них сеть, энергию, полученную с генераторов, они продают потребителям, обычным людям.

Бытовые – устанавливают в частном порядке, чтобы питать дом, квартиру, участок электричеством, Основным отличием от вышеперечисленных является малый размер ветрогенераторов, сравнительно не большая мощность и их количество, обычно один или два [3].

Классификация ветрогенераторов

Модели ветрогенераторов могут быть различной конструкции и мощности. По геометрии оси вращения их разделяют:

- на вертикальные – начинают работать при небольшом ветре, т. к. турбина вертикально расположена к плоскости земли;

- на горизонтальные – располагает большой мощностью для преобразования кинетической энергии в электрическую, постоянный и переменный ток.

Генератор с ротором Савоуниса – два цилиндра, которые совершают осевое вращение. Основным отличием является то, что осевое вращение не находится в зависимости от ветряного потока, вне зависимости от порывов ветра он крутится с заданной скоростью. Однако его конструктивные особенности лопастей не позволяют использовать всю энергию ветра, а лишь её четверть.

Генераторы с ротором Дарье – могут иметь две или три лопасти, легки в монтаже, конструкция проста и проста, можно запустить вращения лопастей даже рукой. Недостатком является малая мощность, высокий шум при работе из-за большого количества лопастей [3].

Геликоидный ротор – значительно увеличенный срок эксплуатации за счет стойких подшипников, генератор вращается равномерно из-за равномерно закрученных лопастей. Установка такого генератора требует времени и сопряжена с трудностями сборки, из-за сложной технологии изготовления цена высока.

Многолопастной ротор – вертикальное расположение оси и наличие большого количества лопастей делает его чувствительным даже к очень слабому ветру, за счет этого эффективность таких генераторов высока. Может выдавать большой объем тока, но имеет недостатки – высокая цена, высокий звуковой фон [3].

Ортогональный ротор – старт выработки энергии начинается при ветре скоростью 0,7 м/сек. Аналогично предыдущим имеет вертикальную ось и лопасти, но вес лопастей намного больше, что усложняет монтажные работы.

Положительные черты ветрогенераторов с вертикальной осью вращения:

- возможно использовать даже при слабом ветре;

- не зависит от направления ветрового потока из-за этого не надо настраивать;

- установка на короткой мачте, позволяющей обслуживать систем на земле;

- шум в пределах 30 дБ;

- приятный внешний вид.

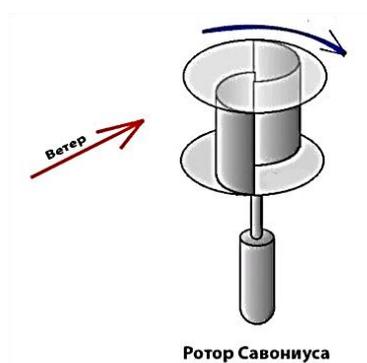
Недостатком является использование энергии ветра не полностью из-за низкой скорости вращения ротора.

Горизонтальные ветрогенераторы могут иметь модификации с установленными на них от одной и более лопастей, поэтому коэффициент полезного действия намного выше, чем у вертикальных.

Недостатками таких ветрогенераторов является необходимость ориентировать их на направление ветра, постоянное перемещение вслед за потоком снижает скорость вращения лопастей, что снижает производительность. Существует 3 вида горизонтальных ветрогенераторов:

- однолопастные и двухлопастные, имеют высокую скорость вращения, масса и габариты не большие, что облегчает установку;

- трехлопастные, популярны на рынке из-за возможности вырабатывать энергию до 7 МВт;



Ротор Савониуса

Рисунок 1 – Ротор Савониуса



Геликоидный

Рисунок 3 – Геликоидный ротор

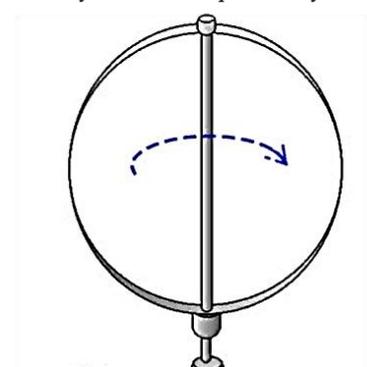


Рисунок 2 – Ротор Дарье



С прямыми лопастями

Рисунок 4 – Ортогональный ротор

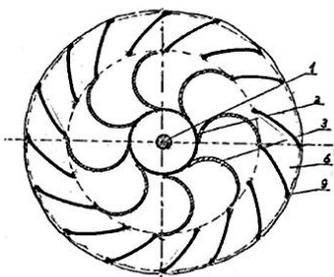
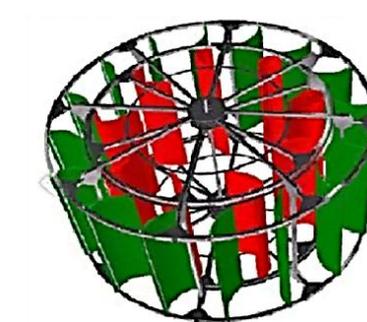


Рисунок 5 – Многолопастной ротор

Многолопастные могут иметь до пятидесяти лопастей, из-за этого располагают большой инерцией, эти преимущества позволяют использовать для водяных насосов [2].

Применение ветрогенераторов

Промышленные установки используются для нужд предприятий или обеспечения электрической энергией небольших поселков в условиях отсутствия или дефицита электричества. Установка производится на

больших открытых площадях в большом количестве. Простые ветрогенераторы предназначены для домашнего использования, также в зимнее время для экономии электричества сооружаются в жилых домах.

КПД ветрогенераторов

Для горизонтальных и вертикальных коэффициент полезного действия почти одинаков. Для горизонтальных 25–35 %, а для вертикальных 20–30%.

Для повышения коэффициента

полезного действия вертикальных ветрогенераторов можно заменить подшипники на неодимовые магниты, но это приведет к значительному удо-

рожанию изделия, основными расходными материалами являются подшипники и лопасти для обоих типов ветрогенераторов [2].

ВИДЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

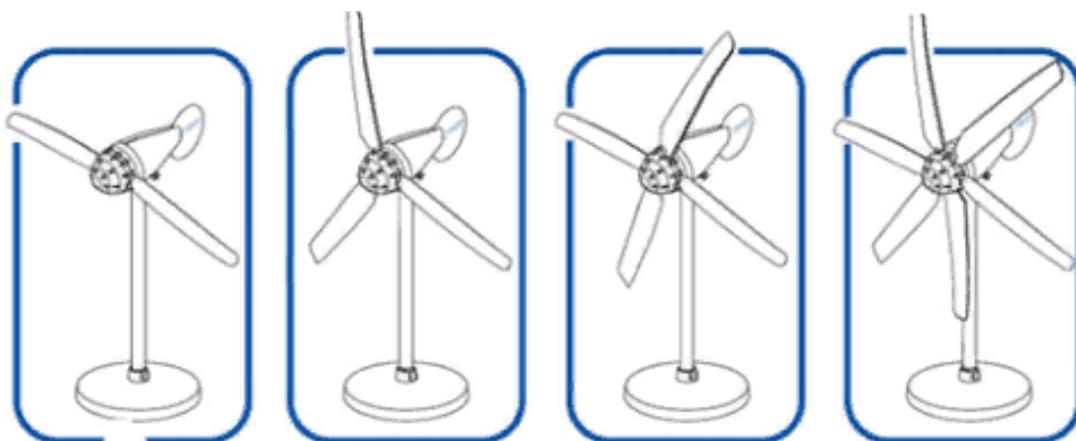


Рисунок 6 – Виды горизонтальных ветрогенераторов

Требования, предъявляемые к изделию

Один из наиболее важных частей ветрогенератора – его лопасти. Существует факторы, ограничивающие применению и изготовлению лопастей из любого материала, ведь лопасти существенно оказывают влияние на его эффективность.

На эффективность работы оказывает влияние:

- вес;
- размер;
- форма;
- материал;

количество. Количество лопастей не увеличивает эффективность ветрогенератора, т. к. каждая лопасть движется, преодолевая сопротивление воздуха. Большое количество лопастей ветрогенератора требует относительно большей силы ветра для совершения вращения, так же большое

количество лопастей может служить для создания воздушной шапки перед винтом из-за которой ветер огибает ветрогенератор, а не проходит сквозь.

Форма лопасти имеет огромное значение, от нее зависит скорость движения винта, не правильно подобранные формы лопасти могут стать причиной возникновения вихрей, тормозящих ветроколесо.

Существует два вида формы лопастей:

- парус;
- крыло.

Многолопастные могут иметь до пятидесяти лопастей, из-за этого располагают большой инерцией, эти преимущества позволяют использовать для водяных насосов [2].

Лопастей парусного типа – простые широкие полосы, что обеспечивает простоту в изготовлении, однако коэффициент полезного действия мал

всего 10–12 %, поэтому данный тип практически не применяется [2].

Лопастей крыльчатого типа являются гораздо эффективнее парусных, так как при изготовлении используются принципы аэродинамики, данный винт легче привести в движение и вращается он быстрее, из-за обте-

каемой формы сопротивление воздуха значительно меньше. Профиль лопасти должен быть похож на крылья самолета, а именно с одной стороны иметь утолщение, а с другой пологий спуск. Коэффициент полезного действия достигает значения 30–35 %.

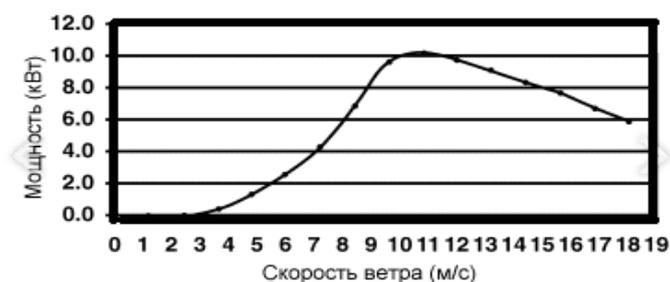


Рисунок 6 – График зависимости мощности вырабатываемой энергии от скорости ветра

Подбор материала лопасти

Для того чтобы начать изготовления лопастей необходимо выбрать материал, из которого в будущем будет создаваться лопасть. Выбор производится с учетом не только физико-механических свойств, но и с экономическим расчетом.

Требования, предъявляемые к материалу для изготовления лопастей:

- прочность при растяжении;
- прочность при сжатии;
- прочность при изгибе;
- возможность придания нужной формы;
- масса.

Рассмотрим поливинилхлорид в качестве материала изготовления лопастей, преимуществами являются:

- быстрота изготовления;
- дешевизна материала;
- стойкость к влаге;
- легкость в обработке;

- прочность при растяжении составляет 40–70 МПа;
- прочность при сжатии 60–160 МПа.

Недостатком является хрупкость при низких температурах, что делает невозможным использовать данный материал в резко-континентальном климате.

Алюминий возымел широкую популярность в самолетостроении из-за его свойств, что дает возможность его для создания лопастей ветрогенераторов. Алюминий – долговечный металл, прочный и не подвержен практически ни каким воздействиям окружающей среды кроме температуры. Однако он тяжелее, чем пластик и требует тщательной балансировки [1].

- прочность при растяжении 150–300 МПа;
- прочность при сжатии 411 МПа.

Рассмотрим углепластик как прочный и легкий материал, который подходит как материал для изготовления.

- Прочность при растяжении 1380 МПа;
- Прочность при сжатии 1380 МПа.

Углепластики химически инертны, стойкий в атмосфере и солевых растворах, воде, не гигроскопичный.

Однако стоимость готового изделия будет очень высокой [6].

Стеклопластик имеет относительно низкую массу, сохраняя при этом хорошие физико-механические свойства.

- Прочность при растяжении 1210 МПа;
- Прочность при сжатии 690 МПа.

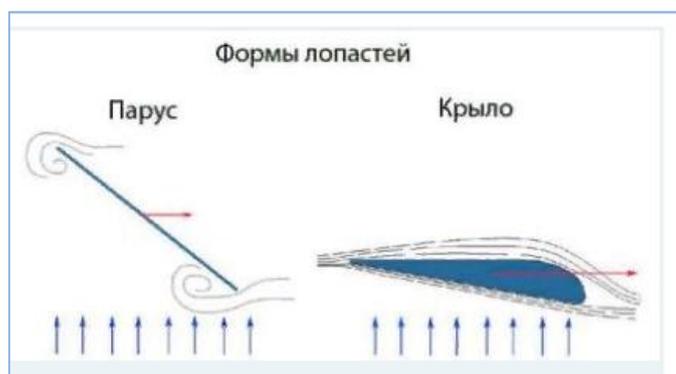


Рисунок 7 – Формы лопастей

Изготовление матрицы необходимой формы и размера из металла. Возможность изготовления формы

ограниченна из-за требуемой жесткости матрицы.



Рисунок 8 – Матрица для лопастей

Подготовка материалов для выкладки лопасти. Смешивание гелькоута с отвердителем, раскройка стеклоткани, подготовка композиции для пропитки стеклоткани. (48 % массы

смолы, 2 % пластификатор, 50 % массы стеклоткани).

Вырезка пенопластовых вставок, для полости лопасти, с отверстием под лонжерон.

Нанесение разделительного воскового слоя, до тех пор пока поверхность матрицы не станет матовой и абсолютно гладкой поверхностью. Это

будет сигналом, что есть необходимый разделительный слой для последующего извлечения заготовки.

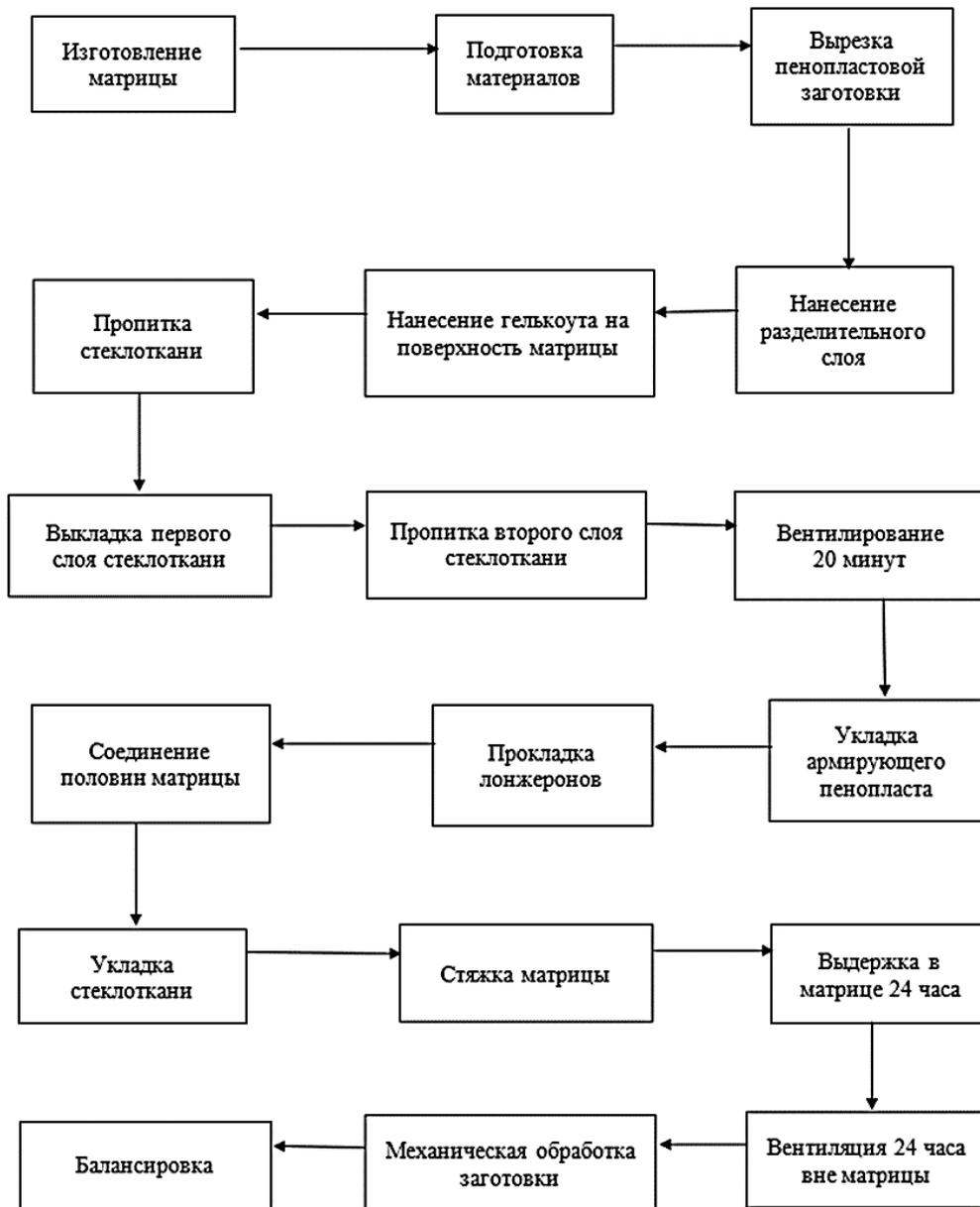


Рисунок 9 – Технологическая схема процесса изготовления лопасти ветрогенератора

Нанесение белого гелякута, придающего лопасти белый цвет и создающий защитный слой. Нанесение лучше всего производить силиконовой кисточкой или шпателем. Так же необходимо нанести смесь на бортики,

чтобы обе половины в последующем склеились.

Пропитка готовых заготовок стеклоткани с одной стороны, это необходимо чтобы каждый последующий

слой приклеился к предыдущему, но при этом не было излишков смолы.

Выкладка пропитанной стеклоткани.



Рисунок 10 – Нанесение гелькоута

Пропитка второго слоя стеклоткани. Необходимо максимально точно распределять смолу, т. к. это влияет на будущую равновесность лопастей. Укладка обоих слоев осуществляется параллельно, ориентируя длину волокон вдоль вертикальной оси лопасти для обеспечения максимальной прочности на растяжение и сжатие.

Вентилирование уложенной стеклоткани осуществляется 15 минут,

необходимо, чтобы смола загустела, для удобства работы.

Укладка пенопласта необходима для того, чтобы стеклоткань сохраняла форму в процессе отверждения смолы.

Прокладка лонжеронов осуществляется вдоль вертикальной оси лопасти и является основным силовым элементом конструкции.

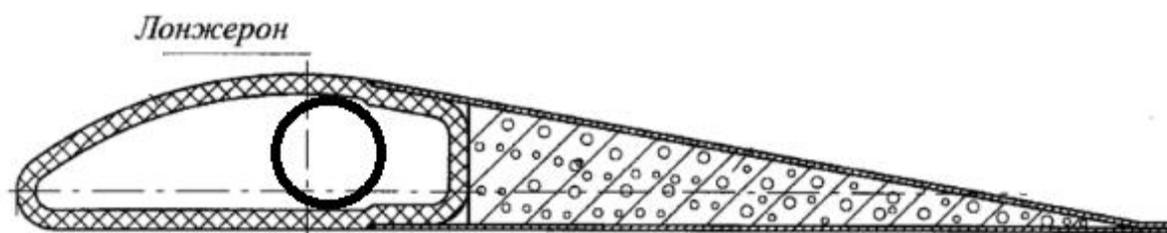


Рисунок 11 – Расположение лонжерона в лопасти

Соединение половин матрицы, после чего осуществляется доукладка стеклоткани, заполнение пробелов стеклоткани. Затем матрицу стягивают болтами. При стяжке необходимо

стягивать противоположные болты по очереди на не большое усилие, пока не подтяните все болты, затем окончательная стяжка аналогичным образом.

Выдержка в матрице осуществляется 24 часа, до первичного отверждения заготовки.

Вентиляция заготовки – 24 часа, необходимо для полного отверждения заготовки.

Механическую обработку необходимо выполнять в два этапа, первый – обработка основного слоя и кусков

стеклоткани, второй – осуществляется наждачной бумагой различной зернистости.

Балансировка осуществляется непосредственно на крутящей части, необходимо чтобы в любом положении любого винта, не было движения лопастей под собственным весом.



Рисунок 12 – Готовая лопасть

Как видно на рисунке 4, полученные лопасти получаются не только внешне приятные, но и как показывают прочностные данные материала, достаточно прочные по приемлемой цене.

Вывод

Рассмотрев выбранные выше материалы, можно сделать вывод, что возможно использовать только стеклопластик и углепластик, у алюминия и поливинилхлорида слишком низкие физико-механические свойства. Идеальным вариантом является углепластик, все его свойства выше, чем у стеклопластика, за исключением одного – цены. Стеклопластик же является оптимальным материалом при выборе из соображения цена – качество [5].

Лопастей ветрогенераторов являются одним из основных заменяемых

и подверженных нагрузкам элементом ветрогенератора. Для обеспечения оптимального соотношения цены и качества был подобран материал, а именно стеклоткань. Для создания лопастей разработан технологический процесс создания, который идеально подойдет для конвейерного производства, так как не будет необходимости создавать дорогостоящие матрицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Стеклопластик>.
2. Любин, Дж. Композиционные материалы : справочник / Дж. Любин. – М., 1988.
3. Химический энциклопедический словарь ; ред. И. Л. Кнунянц. – М. : Советская энциклопедия, 1983. – 792 с.

4. Кожухов, Ю. В. Аудит характеристик ветрогенераторов с применением CFD-моделирования на суперкомпьютере (рус.) / Ю. В. Кожухов [и др.] // CAD/CAM/CAE Observer : журнал. – 2016. – № 7 (107). – С. 81–87.

5. Алюминий // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 86 т. (82 т. и 4 доп.). – СПб., 1890–1907.

6. Билимович, Б. Ф. Законы механики в технике / Б. Ф. Билимович. –

М. : Просвещение, 1975. – Тираж 80000 экз. – С. 173.

7. Почему у ветрогенераторов три лопасти, а не две или четыре? // Популярная механика. – 2018. – № 5. – С. 16.

8. Чумаков, В. Токи ветров (рус.) // Вокруг света : журнал. – 2008. – Август (№ 8 (2815)). – С. 98–106.

© Синицин А. В., Головина Е. А., 2019.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. Б. Маркин

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Методы повышения адгезии при плазмохимической обработке армирующих волокон с низкой поверхностной активностью являются одними из вариантов модифицирования поверхности волокон без существенного изменения их уникальных физико-механических характеристик. Представленные методы активации поверхности волокон различного класса (органических, углеродных и полиэтиленовых) позволяют регулировать энергию взаимодействия на границе раздела «волокно-матрица», что дает возможность получать оптимальные значения адгезионной прочности в межфазном слое, способные влиять на прочностные свойства, долговечность и применимость полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: *производство изделий, композиционные материалы, плазмохимическая обработка, адгезия.*

Свойства конструкционных композиционных материалов определяются не только свойствами компонентов, но и их взаимодействием на границе раздела, поэтому межфазному взаимодействию посвящено достаточно много исследований, которые проводились на различных уровнях, и позволили сформулировать дополнения к правилу смесей, учитывающие именно свойства межфазной границы, то есть адгезионное взаимодействие на этой границе [1, 2, 5]. Это привело к появлению нового направления в материаловедении композиционных материалов, связанного с разработкой методов улучшения адгезионного взаимодействия на границе раздела «армирующее волокно-полимерная матрица». Среди таких методов особое место занимают радиационно-химические обработки, объединяющие воздействие на объект ионизирующей радиации в присутствии химического реагента.

Существенным преимуществом радиационно-химических методов яв-

ляется наличие широкого спектра активных частиц с различными уровнями возбуждения, возникающих в системе за счет рассеивания энергии излучения. Ионы и радикалы инициируют множество реакций, которые в обычных условиях невозможно реализовать, а также ряд побочных процессов, подавление которых является достаточно сложной задачей. Использование газоразрядной плазмы позволяет решить ряд проблем за счет использования более высоких энергий, которые при этом поддаются управлению за счет вариации напряжения и давления.

Процесс плазмохимического воздействия на любой материал сводится к взаимодействию активных атомов, молекул, радикалов, возникающих в плазме под действием электронных ударов, с атомами материала подложки и образованию летучих соединений, удаляемых откачкой. В случае композиционных материалов на основе химических волокон не следует ожидать сильного адгезионного взаимодействия вследствие того, что обе

фазы полимерное волокно – полимерное связующее характеризуются низкой поверхностной энергией. Однако близость природы обоих компонентов позволяет ожидать химическое взаимодействие между функциональными группами волокна и связующего.

Изучение этих вопросов находится на начальной стадии и развивается в направлении определения влияния природы и свойств поверхности химических волокон на структуру переходного слоя и объема полимера, а также взаимосвязи этой структуры с физико-химическими и механическими свойствами композиционных материалов. Это направление представляется перспективным, т. к. изменением строения поверхности волокна химическим или физическим модифицированием можно направленно регулировать структуру и свойства композита.

В общем случае переходный слой определяется как граничная область, включающая слои с относительно различной структурой; эти слои сформированы под влиянием твердой поверхности наполнителя и отличаются по своей структуре и свойствам от полимера в объеме. В настоящее время пока не установлены количественные методы оценки влияния переходного слоя на прочностные и упругие характеристики полимерных композитов для прогнозирования их свойств. Только систематические исследования на разных системах полимеров могут приблизить решение этой проблемы.

Для выявления корреляции между структурой переходного слоя и физико-механическими свойствами компо-

зиционных материалов использовались волокна, различающиеся не только химической природой, но и активностью поверхности к формированию адгезионного контакта, а, следовательно, способностью влиять на структурообразование переходного слоя. При этом возможно применение следующих физических методов модифицирования поверхности волокна: радиационный метод и обработка волокон в плазме газового разряда. Плазма как один из видов ионизирующего излучения имеет свои особенности, связанные с тем, что она затрагивает лишь поверхностные слои полимера. Это связано с тем, что интенсивность плазмы выше, чем интенсивность других ионизирующих излучений.

Изменение адгезионного взаимодействия при модифицировании поверхности волокна может быть прослежено при помощи морфологических исследований композиционных материалов на их основе, так как по состоянию границы раздела «полимерная матрица-волокно» можно судить о характере взаимодействия между этими полимерами; по изменению сдвиговой прочности микропластиков при сравнении их со стандартными образцами [5].

При изучении морфологии переходного слоя композиционного материала, армированного волокнами, наблюдаются два крайних случая образования граничного слоя между смолой и волокном:

- образование адгезионного граничного слоя в результате контакта между смолой и волокном;

- образование адгезионного граничного слоя с реализацией слоя толщиной порядка 1 мкм.

Граничный слой первого вида образуется в результате армирования эпоксидными связующими исходными органическими волокнами, такими как полиэтилен и ароматический полиамид Терлон. В этом случае взаимодействие между связующим и волокном очень мало, а на некоторых участках может вообще отсутствовать, и разрыв реплики происходит на границе раздела смола – волокно. Разрыв на границе раздела может быть и в том случае, если между компонентами не было межмолекулярного взаимодействия, и существовали пустоты из-за малой площади истинного контакта. Кроме того, на поверхности волокна всегда находятся различные загрязнения органического и неорганического происхождения, которые также снижают величину адгезионного взаимодействия со связующим при армировании. Удаление загрязнений с границы раздела может повысить величину активной поверхности волокна с тем, чтобы процесс отверждения начинался на поверхности волокна и смещался в прослойки смолы [3].

В случае обработки волокна в плазме, кроме активирования поверхности, т. е. увеличения реакционно-способных участков волокна, происходит еще и увеличение удельной поверхности волокна, и частичное удаление органических загрязнений, так как обработка ведется в вакууме при непрерывной откачке продуктов разложения.

Обработанное таким образом волокно при армировании образует переходный слой второго вида, когда реализуется две границы раздела: между волокном и переходным слоем и между переходным слоем и смолой. По своей морфологии переходный слой отличается от морфологии волокна и полимерной матрицы. В данном случае активированное волокно вызывает ориентированное нарастание слоев смолы – эпитаксию, в которой глобулярные образования смолы повторяют слоевую организацию волокна. Дальнейшее активированной поверхности заключается в том, что по мере удаления от поверхности волокна этот эффект постепенно затухает. Отсюда следует, что переход от поверхностного слоя к объему полимера в реальной системе происходит постепенно и поверхностные явления имеют объемный характер. Такое формирование структуры на границе раздела указывает на особый механизм адгезионного взаимодействия между аморфным и кристаллическим полимерами. Для неактивированной поверхности из-за плохой адгезии это явление не обнаруживается.

Возможно, что активация волокна увеличивает гетерогенность поверхностного слоя, оказывая положительное влияние на формирование граничной области за счет усиления взаимной диффузии компонентов полимерной системы. В этом случае образуются взаимопроникающие структуры, отличающиеся по составу и свойствам от отдельных компонентов.

С целью модификации поверхности волокон и изменении физико-механических характеристик микро-

пластиков на основе этих волокон и соответствующего связующего были проведены исследования с использованием наполнителей различной природы: арамидное волокно Терлон, углеродное волокно УКН-5000 и полиэтиленовое волокно.

Арамидное волокно Терлон, обладая высокой степенью кристалличности, не образует качественного пластика с известными связующими вследствие пассивности своей поверхности, поэтому задача активации ее достаточно актуальна. Для этого наполнителя была осуществлена группа плазмохимических методик, основанная на обработке волокна в низкотемпературной высокочастотной газоразрядной плазме, зажигаемой в парах соответствующих соединений.

Целью этих методик является прививка к поверхности волокна радикалов и ионов, образующихся в разряде.

1. Обработка в плазме паров воды и приготовление микропластика непосредственно после обработки.

2. Обработка в плазме та же, что и в случае 1, но микропластик изготавливается через 7 суток после обработки.

3. Обработка в плазме паров перекиси водорода.

4. Обработка в плазме паров формальдегида.

Было установлено, что наполнитель Терлон весьма чувствителен к плазмохимическим способам воздействия. В таблице 1 приведены результаты исследования по значениям разрывной и сдвиговой прочности микропластиков.

Как известно, получаемые на основе полиакрилонитрильных волокон углеродные волокна, на последней стадии подвергают термообработке при температурах вплоть до 3000 °С. Происходящие при высоких температурах структурно-химические превращения приводят к улучшению ориентации углеродных слоев вдоль оси волокна, что в конечном итоге определяет высокие модули упругости этих типов углеродных волокон.

Таблица 1 – Зависимость разрывной и сдвиговой прочности микропластиков на основе наполнителя Терлон и эпоксидного связующего ЭДТ-10 от методов плазмохимической модификации поверхности волокна

№ обработки	$\sigma_{\text{разр}}$, МПа	σ/σ_0 , %	$\tau_{\text{сдв}}$, МПа	τ/τ_0 , %
1	2686	103	113	153
2	3690	142	90	122
3	4070	157	110	149
5	–	–	109	147
стандарт	2600	100	75	100

Однако высокотемпературные структурно-химические превращения существенным образом снижают химическую активность поверхности углеродных волокон, которая является определяющей для реализации высокой адгезии на границе волокно – полимерная матрица. Следствие этого – низкие физико-механические характеристики углепластиков на основе высокомодульных углеродных волокон. Поэтому увеличение химической активности данных волокон с целью более полной реализации физико-механических свойств углеродных волокон в конечном изделии является задачей весьма актуальной [4].

Плазмохимическая модификация поверхности углеродных волокон ставила целью получение таких форм, которые позволили бы осуществить прививку к ним химически активных групп при совмещении углеродного волокна с полимерными материалами, а также усилить прочностные характеристики волокна за счет сополимеризации его с матрицей полимера.

Модификацию поверхности углеродных волокон проводили путем зажигания низкотемпературной высокочастотной плазмы в парах этилендиамина. Обработке подвергался жгут углеродного волокна УКН-5000, микропластики приготавливались на основе этого жгута и полиимидного связующего. Полученные микропластики, в свою очередь, испытывались на разрывную и сдвиговую прочность. Характер разрушения образцов на растяжение в продольном направлении был неоднозначным. В основном наблюдалось три разновидности разрушения:

- в образцах микропластиков происходило разделение на отдельные пучки волокон, которые затем разрушались подобно тому, как разламываются спички;

- у некоторых образцов микропластиков наряду с образованием трещин вдоль волокон наблюдался довольно четкий разрыв в поперечном направлении;

- наблюдались случаи разрушения микропластиков, когда образцы без образования продольных трещин сразу разрушались в строго поперечном направлении, причем поверхность излома была довольно ровной.

Характер разрушения микропла-

стиков зависит от соотношения между силой сцепления волокна со связующим и прочностью волокна.

В таблице 2 приведены данные исследований по плазмохимической модификации поверхности углеродных волокон с указанием характера разрушения микропластиков.

Полученные данные свидетельствуют о том, что увеличение времени обработки волокон пагубно влияет на характеристики микропластиков. Известно, что прочность полимерных материалов обеспечивается наличием двух типов связей; прочных (сопротивляющихся разрушению) и лабильных (способствующих сглаживанию пиков перенапряжений). Видимо в рассматриваемом случае превалируют прочные связи.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики микропластиков на основе жгута УКН-5000 и связующего ТП-80 при плазменной обработке наполнителя в парах этилендиамина

Время обработки, час	$\tau_{сдв}$, МПа	τ/τ_0 , %	σ_p , МПа	σ/σ_0 , %	Характер разрушения
0,5	19	264	1900	140	(2)
1	14,4	250	1700	127	(2)
2	9,4	130	1650	122	(1)
2,5	8,6	120	1500	110	(1)
3	5,8	80	1300	90	(1)
стандарт	7,2	100	1350	100	(1)

Создание высокопрочных и высокомодульных волокон на основе более дешевых крупнотоннажных видов полимеров является альтернативным путем научно-технического прогресса. Распространенные до настоящего

времени технологические процессы производства химических волокон не позволяют реализовать в должной мере потенциальные возможности, присущие гибкоцепным полимерам. Сопоставление теоретических и практически достигнутых показателей прочности и эластичности волокон демонстрирует низкий уровень реализации свойств исходных материалов. Большое различие теоретических и практических показателей принято связывать с особенностями кристаллизации гибкоцепных полимеров, к которым относится полиэтилен и волокна на его основе.

Для более полной реализации потенциальных возможностей гибкоцепных полимеров предприняты попытки усовершенствования технологических процессов получения высокопрочных и высококомодульных волокон. Первым успешным шагом в этом направлении явилась разработка процесса гель – прядения волокон из полиэтилена сверхвысокой молекулярной массы. Полученные волокна характеризуются уникальным сочетанием высокой прочности и жесткости, отсутствием влагопоглощения и низкой плотностью. По удельной прочности они превосходят все виды синтетических волокон, обладают высокими эксплуатационными характеристиками и хорошей технологичностью, поэтому представляют большой интерес как армирующий наполнитель для композиционных материалов.

Отличительными чертами этих материалов является значительное снижение массы, повышение ударопрочности и улучшение амортизирующих свойств. Недостатком поли-

этиленовых волокон считается низкая адгезия к известным полимерным связующим, поэтому, оценивая преимущества композиционных материалов на основе этих волокон, придается большое значение различным методам модификации, улучшающим армирующие свойства. Предполагаются различные способы обработки волокон: промывка в воде, сушка, травление кислотами, плазменная обработка, обработка коронным разрядом в атмосфере кислорода или углекислого газа, при которых физико-механические свойства волокон не ухудшались.

Авторами предложены методы плазмохимической обработки синтетических высококомодульных волокон полиэтилена (СВМПЭ) в парах некоторых соединений (вода, перекись водорода, диметилформамид, этилендиамин). Результаты обработки оценивались по значениям сдвиговой прочности в микропластиках, поскольку эта характеристика наиболее реально связана с адгезией, то есть энергией взаимодействия на границе раздела «волокно–матрица» [3].

Эффективность методов плазмохимической обработки армирующих полиэтиленовых волокон избирательна в зависимости от плазмообразующей субстанции. В таблице 3 приведены значения сдвиговой прочности в микропластиках, полученных из волокон, обработанных плазмой в различных средах.

Приведенные данные показывают, что плазмохимическая обработка полиэтиленовых волокон определенным образом влияет на значение сдвиговой прочности в микропластиках, особен-

но это заметно на «условно больших» площадях контакта, когда сдвиговая прочность в определенной степени со-

ответствует сдвиговой прочности композиционного материала.

Таблица 3 – Значения предела сдвиговой прочности микропластиков на основе полиэтиленовых волокон, обработанных в плазме различных соединений для различной площади сдвигового контакта

Продукты плазмы	Сдвиговая прочность при S = 2 мм ²		Сдвиговая прочность при S = 30 мм ²	
	$\tau_{сдв}$, МПа	$\tau_{сдв}/\tau_0$, %	$\tau_{сдв}$, МПа	$\tau_{сдв}/\tau_0$, %
Вода	17,3	100	6,0	80
Перекись водорода	25,1	149	11,5	150
Диметилформамид	24,9	148	20,5	272
Этилендиамин	14,9	81	11,3	148
Стандартные образцы	17,0	100	7,6	100

Таким образом, методы повышения адгезии при плазмохимической обработке армирующих волокон с низкой поверхностной активностью являются одними из вариантов модифицирования поверхности волокон без существенного изменения их уникальных физико-механических характеристик. Представленные методы активации поверхности волокон различного класса (органических, углеродных и полиэтиленовых) позволяют регулировать энергию взаимодействия на границе раздела «волокно-матрица», что дает возможность получать оптимальные значения адгезионной прочности в межфазном слое, способные влиять на прочностные свойства, долговечность и применимость полимерных композиционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Перепелкин, К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты: монография / К. Е. Пере-

пелкин. – СПб. : Научные основы и технологии, 2009. – 386 с.

2. Маркин, В. Б. Радиационные процессы в технологии полимерных композиционных материалов : монография / В. Б. Маркин, В. В. Воробей. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2018. – 249 с.

3. Маркин, В. Б. Радиационные процессы в технологии упрочнения конструкционных углепластиков / В. Б. Маркин // Сб. докл. Международной научно-технической конф. «Проблемы физико-технического образования и атомной промышленности». – Томск : ТПУ, 2000. – С. 75–77.

4. Воробей, В. В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций: монография / В. В. Воробей, В. Б. Маркин. – Новосибирск : Наука, 2006. – 190 с.

5. Бакли, Д. Поверхностные явления при адгезии и фракционном взаимодействии / Д. Бакли. – М. : Машиностроение, 1986. – 359 с.

© Маркин В. Б., 2019.

СПОСОБЫ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ АРМИРУЮЩИХ ВОЛОКОН

Н. Н. Ниёзбеков, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

В настоящее время все больше требуется снижение металлоемкости изделий при достаточно высоких прочностных характеристиках. В таком случае целесообразно использовать соединения металл-композит, сочетающих в себе как высокую степень прочности, так и снижение общего веса изделия. При том, чем выше адгезионная прочность контакта металла с КМ, тем выше общая прочность изделия.

Задачей работы является исследование влияния плазмы на волокнистые материалы.

Были исследованы: максимальная нагрузка, необходимая для разрушения образца, прочность при разрыве и сжатие, характер разрушения образцов, метод плазменной обработки волокна. Согласно адсорбционной теории, регулирование величины адгезии ПКМ к металлу возможно осуществить за счет изменения показателей поверхностных свойств материала, что может быть решено при помощи метода плазменной модификации.

Исследования образцов показали, что регулирование свойств волокон посредством использования низкотемпературной плазмы, имеет полное право на существование и позволяет направленно изменять показатели физико-механических характеристик волокон.

Ключевые слова: адгезия, соединение металл-композит, модификация, адгезионная прочность, низкотемпературная плазма, ВЧ-разряд, граница раздела.

Воздействие газоразрядной низкотемпературной плазмы на материалы. Типы разрядной плазмы

В большинстве случаев плазма представляет собой газовую смесь нейтральных и заряженных частиц. Если степень ионизации – отношение плотности заряженных частиц к плотности нейтральных частиц – мала, то такая система называется слабоионизированной плазмой. При комнатных температурах из-за большой энергии связи электронов в атомах и молекулах равновесная плотность заряженных частиц практически равна нулю. Однако можно и при комнатной температуре создать электропроводящий газ, называемый газовым разрядом, если поместить его в электрическое поле.

В основу классификации процессов взаимодействия электрических и

электромагнитных полей с ионизированными газами (плазмой) целесообразно положить два признака. Первым служит характер состояния ионизированного газа, который подвергается воздействию внешнего поля; вторым – частотный диапазон поля. По характеру ионизированного газа различают: пробой газа, поддержание полем неравновесной плазмы и поддержание равновесной плазмы. По признаку частоты – постоянное (низкочастотное) электрическое поле, высокочастотные поля, сверхвысокочастотные и оптические.

Все плазмохимические процессы можно разделить на два класса: квазиравновесные и неравновесные

Квазиравновесные процессы

В зависимости от фазового состояния системы (плазма – обрабатываемые вещества (сырье) – продукты

их взаимодействия) квазиравновесные процессы, в свою очередь, делятся на гомо- и гетерогенные. Учитывая, что плазма (газ) – обязательный компонент любой плазмохимической системы, возможен лишь один вариант гомогенной системы, при котором сырье и продукты реакции находятся в одной фазе – газовой (Г).

В гетерогенных процессах либо сырье, либо продукты взаимодействия, либо и то, и другое находятся в конденсированной фазе – жидкой (Ж) или твердой (Т). Здесь подразумевается фазовое состояние веществ с момента контакта их с плазмообразующим газом до момента вывода из

плазмохимического реактора. Например, если в процессе получения синтез – газа углеводород (бензин) контактирует с плазмой в газообразном (пар) состоянии, то этот процесс относится к гомогенным, если же он контактирует с плазмой в жидком состоянии, то процесс рассматривается как гетерогенный. Принципиально возможны три варианта гетерогенных систем: газ – жидкость (Г – Ж), газ – твердое вещество (Г – Т) и газ – жидкость – твердое вещество (Г – Ж – Т). Система может быть гетерогенной как по сырью, так и по продуктам реакции.

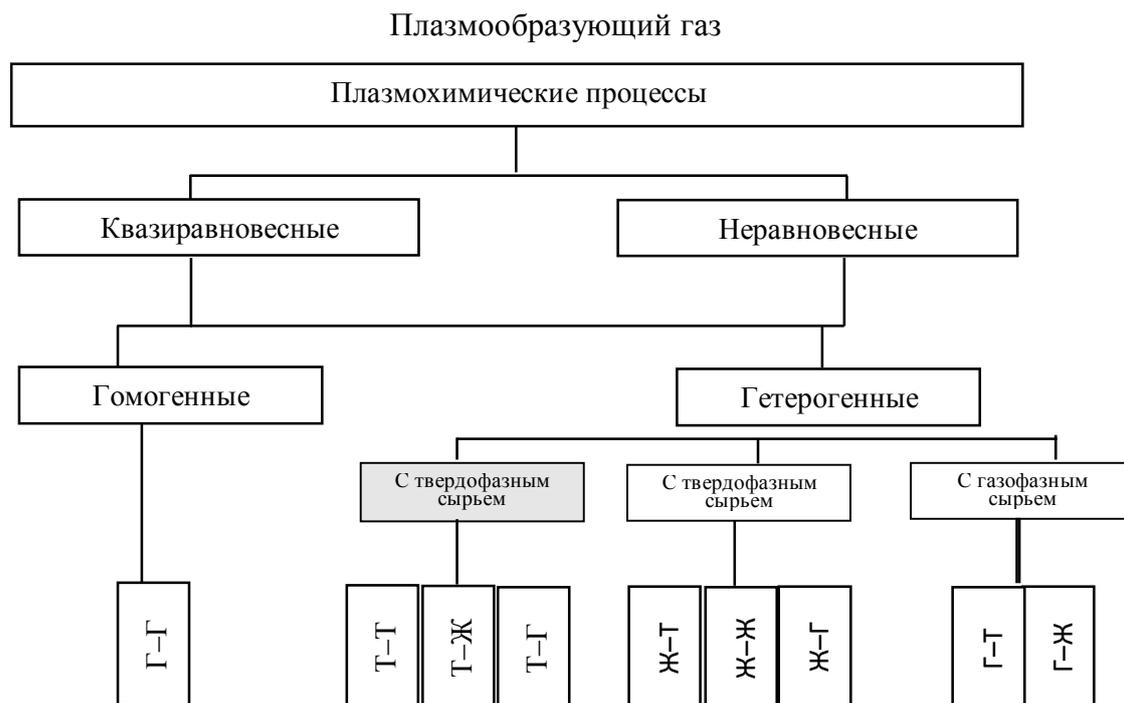


Рисунок 1 – Классификация плазмохимических процессов

Однако большее влияние на технологическое оформление процесса оказывает фазовое состояние сырья, исходя из которого гетерогенные процессы подразделяют на три группы: а) основанные на переработке га-

зообразного сырья с получением жидких или твердых продуктов; б) основанные на переработке жидкого сырья с получением жидких, твердых или газообразных продуктов; в) основанные на переработке твердо-

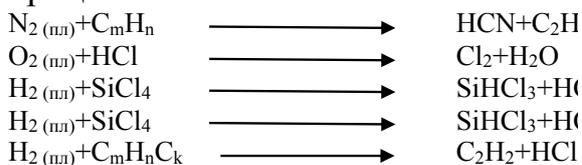
го сырья с получением продуктов в твердом, жидком или газообразном состояниях. Отметим, что во всех гетерогенных плазмохимических процессах обязательно присутствует газовая фаза, состоящая из плазмообразующего газа и газообразных продуктов взаимодействия, если таковые образуются.

Гомогенные процессы

В соответствии с принятой классификацией процесс будет гомогенным лишь при условии, что и сырье, и продукты взаимодействия газообразны. Известны три варианта гомогенных процессов.

Плазмообразующий газ является смесью реагентов, проходящих через электроразрядную зону генератора плазмы и образующих газообразные продукты взаимодействия. В этом случае плазмотрон и плазмохимический реактор конструктивно совмещены и процесс протекает непосредственно в электроразрядной зоне, например, фиксация атмосферного азота и конверсия углеводородов в ацетилен и этилен. Важное технологическое преимущество этих процессов заключается в том, что реагенты перемешаны с плазмообразующим газом до молекулярного уровня еще перед началом их нагревания.

Плазмообразующий газ является одним из реагентов. По этой схеме могут протекать, например, следующие процессы:

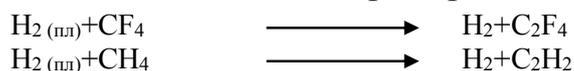


Здесь плазмообразующий газ не

только реагент, но и теплоноситель.

Поэтому при организации таких процессов важное значение отводится стадии перемешивания плазмообразующего газа с другими реагентами.

Плазмообразующий газ является лишь теплоносителем, например,



При этом реагенты не проходят через электроразрядную зону, перемешиваются с плазмообразующим газом непосредственно в плазмохимическом реакторе. К процессу перемешивания предъявляются жесткие требования, так как разность между температурами теплоносителя и реагентов составляет

несколько тысяч градусов. Хотя плазмообразующий газ и не является реагентом, однако его присутствие может сдвигать равновесие реакции в ту или иную сторону. Это обстоятельство, наряду с теплофизическим и другими свойствами, необходимо учитывать при выборе плазмообразующего газа.

Гетерогенные процессы. В результате переработки твердого сырья могут быть получены твердые (Т–Т), жидкие (Т–Ж) или газообразные (Т–Г) продукты.

По схеме Т–Т реализуется многочисленные плазмохимические процессы разложения, восстановления, синтеза и фазовых превращений.

К реакциям разложения, осуществляемым в азотной плазме, следует отнести, в первую очередь получение оксидов из различных минералов и солей.

Неравновесные процессы. Эти

процессы реализуются в основном в СВЧ-, тлеющим и импульсном разрядах. Уникальные свойства неравновесной плазмы позволяют обрабатывать материалы при относительно невысокой температуре, воздействуя на них химически активными частицами и излучением. Можно выделить три группы неравновесных процессов: синтез, модификации поверхностей и нанесение пленок.

Синтез. В неравновесных условиях получены такие новые соединения как фториды ксенона и криптона, кислорода, азота, хлора и серы. Этот способ практически единственный для получения технически важного продукта – озона. Сущность синтеза в неравновесных условиях заключается в том, что кинетическая энергия электронов при соударении их с молекулами передается на внутренние степени свободы. Реакции начинаются с возбужденных уровней, что снижает энергию их активации.

Модификация поверхностей. Под воздействием неравновесной плазмы изменяются свойства поверхностей различных материалов. В результате обработки поверхности полимеров меняются смачиваемость, коэффициент трения, износ, молекулярная масса и химический состав поверхностных слоев на глубину 1–10 мкм. В тлеющем разряде проводят ионное поверхностное азотирование сталей и сплавов. Вводя в плазму тлеющего разряда углерод, азот, кремний, можно цементировать, цианировать и силицировать стали. При такой обработке повышаются твердость, жаростойкость, износостойкость наиболее

нагруженных контактных поверхностей деталей машин и механизмов. К этой же группе относятся процессы плазменного травления поверхностей.

Нанесение пленок. Неравновесная плазма позволяет получать органические полимерные пленки, обладающие повышенной однородностью, хорошей адгезией к подложке, высокими термостойкостью и диэлектрическими свойствами, а также низкой электропроводностью, высокими напряжениями пробоя, малыми диэлектрическими свойствами, а также низкой электропроводностью, высокими напряжениями пробоя, малыми диэлектрическими потерям. Такие пленки применяются, в частности, в микроэлектронике для пассивации интегральных систем.

Следует отметить, что приведенная классификация не является достаточно строгой, однако позволяет систематизировать многочисленные плазмохимические процессы по технологическому признаку.

Еще более условно разделение электромагнитных полей по диапазонам. Диапазон низкочастотных полей порядка 10^2 – 10^3 Гц, высокочастотный диапазон (ВЧ) охватывает частоты, исчисляемые мегагерцами (10^5 – 10^8 Гц). Типичный сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазон простирается в районе 109–1011 Гц и наконец, оптический диапазон охватывает излучения от далекого инфракрасного до жесткого ультрафиолетового; центральной его частью является видимый свет.

Поля каждого из четырех диапазонов могут взаимодействовать с каждым

из трех перечисленных типов плазмы, всего получается двенадцать вариантов взаимодействий (таблица 1).

В газовом разряде плотность заряженных частиц (электронов и ионов) много меньше плотности нейтральных частиц (атомов или молекул). Такая плазма носит название слабоионизированной или низкотемпературной, ибо средняя энергия электронов или ионов значительно меньше потенциала ионизации частиц газа. Другой предельный случай представляет собой горячая плазма, в которой средняя энергия ионов значительно больше потенциала ионизации частиц газа. Такая плазма состоит

из электронов и ионов, а нейтральные частицы отсутствуют.

Примером горячей плазмы является термоядерная плазма, которую необходимо создать для протекания управляемой термоядерной реакции.

Наиболее удобная реакция термоядерного синтеза происходит с участием ядер дейтерия и трития – изотопов водорода. Для осуществления этой реакции необходимо, чтобы за время удержания плазмы (время, в течение которого ионы дейтерия или трития находятся в зоне реакции), эти ионы успевали вступить в ядерную реакцию.

Таблица 1 – Различные варианты взаимодействия электрических полей и плазмы

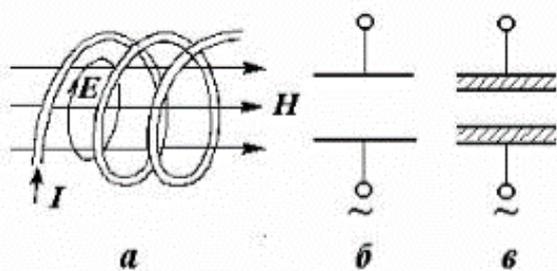
	Пробой	Неравновесная плазма	Равновесная плазма
Постоянное электрическое поле	Возникновение искры между электродами	Положительный столб тлеющего разряда	Положительный столб дуги высокого давления
Высокие частоты	Зажигание ВЧ разряда	ВЧ разряды в разряженных газах	ВЧ индукционный плазматрон
СВЧ	Пробой в волноводах и резонаторах	СВЧ разряды в разряженных газах	СВЧ плазматрон
Свет	Пробой газов лазерным излучением	Завершающая стадия оптического пробоя	Непрерывный оптический разряд

Разрядная плазма – и неравновесная, и равновесная – с равным успехом может стационарно поддерживаться и постоянным, и переменным электрическими полями. В настоящей исследовательской работе применялся разряд в высокочастотном поле с частотой около 40 МГц ($\lambda = 7,7$ м). Поэтому, более подробно остановимся на рассмотрении особенностей высокочастотного разряда, как способа возбуждения неравновесной низкотемпературной плазмы. Поэтому, бо-

лее подробно остановимся на рассмотрении особенностей высокочастотного разряда, как способа возбуждения неравновесной низкотемпературной плазмы.

Существуют различные способы введения переменного электрического поля в разрядный объем. Их можно разбить на две основные группы по признаку того, замыкается ли силовые линии электрического поля в разрядной плазме или нет, иначе – является ли поле вихревым или потенциаль-

ным. К первой группе относятся индукционные методы, основанные на использовании явления электромагнитной индукции. В качестве примера можно привести использование катушки соленоида для генерации вихревого электрического поля (рисунок 2).



а – индукционный (при помощи соленоида);
б – напряжение подается на электроды, соприкасающиеся с плазмой; в – электроды изолированы от плазмы (безэлектродный емкостной способ)

Рисунок 2 – Схемы возбуждения ВЧ-разрядов

В методах второй группы высокочастотное (вообще любое переменное) напряжение подают на электроды. Электроды могут быть оголенными и непосредственно соприкасаться с разрядной плазмой, а могут быть изолированными от плазмы диэлектриками (рисунок 2). Система двух электродов ведет себя по отношению к переменному напряжению как конденсатор, «емкость», поэтому разряды данной категории, в отличие от индукционных, называют емкостными, или Е-типа. Термин «емкостный» чаще применяют к безэлектродному варианту, в котором электроды изолированы от разряда. Следует отметить, что понятия «электродный», «безэлектродный» применительно к раз-

ряду Е-типа зачастую отражают лишь внешнюю сторону конструктивного оформления установки, а не существо дела [3–4].

Разряд с оголенными электродами лишь тогда можно с полным основанием назвать электродным, когда электроды в нем функционируют так, как в разряде постоянного тока. Для этого нужны очень сильные поля у электрода, интенсивные источники ионов, т. е. вторичная эмиссия и многократное размножение электронов. Если всего этого нет, слабы ионный ток не в состоянии уносить на электрод положительные заряды, которые остаются в результате отталкивания электронов отрицательным электродом. Тогда нет и особого различия между электродным и безэлектродным разрядами.

Опыты показывают, что при небольших токах высокочастотный разряд между оголенными электродами ведет себя как между изолированными. Но при определенных условиях разряд переходит в ионную форму, в которой, по всей вероятности, электроды функционируют подобно тому, как это происходит в тлеющем разряде постоянного тока. Аналогично, при некоторых условиях наблюдается переход безэлектродного разряда в новую форму, как будто включается процессы вторичной эмиссии с поверхности изоляторов. Безэлектродный разряд становится похожим на настоящий электродный.

Роль электронно-атомных столкновений

Ионизация молекул происходит в результате электронного удара. Существует три типа столкновений

электрона с молекулой. При низких энергиях происходят упругие столкновения. При достаточно высоких энергиях большая доля энергии электронов расходуется на электронное возбуждение молекул, и при более высоких – на их ионизацию.

При столкновении электрона с атомом часто энергии электрона расходуется на возбуждение атома или сообщение ему кинетической энергии. В зависимости от энергии K , сообщаемой первичным электроном атому, электронно-атомарные столкновения могут быть классифицированы следующим образом.

1. $K > qVi$, где q – заряд электрона и qVi – потенциал ионизации атома. При ионизации атом превращается в положительно заряженный ион с зарядом $+q$.

2. $qVi > K > 0$ – происходит электронное возбуждение атома. Через короткое время возбужденный атом возвращается в основное состояние, выделяя поглощённую энергию.

$K = 0$. Атом остается в основном электронном состоянии. Если $K = 0$, столкновения называются упругими. Столкновения, сопровождающиеся изменением внутренней энергии атома, называются неупругими. К неупругим столкновениям относятся процессы ионизации электронного возбуждения атомов.

Столкновения между молекулами.

Ионизация может происходить и при столкновении молекул. Это возможно при таких столкновениях без участия электрического или магнитного поля только при очень высоких температурах. Когда кинетическая энергия сталкивающихся молекул

становится больше потенциала ионизации молекул, возможна их ионизация. Такая ионизация называется термической. Важной особенностью термической ионизации является то, что молекулы, ионы и электроны в плазме находятся в тепловом равновесии. Плазма, созданная электрическим разрядом, термически неравновесна.

Столкновения между заряженными частицами.

Столкновения между заряженными частицами (электронами, положительными и отрицательными ионами) намного сложнее, чем описанные выше процессы, из-за сильного кулоновского взаимодействия между частицами. Такие столкновения очень важны для полностью ионизированного газа: однако в плазме, созданной электрическим разрядом в большинстве случаев роль столкновений между заряженными частицами существенно меньше из-за того, что в неравновесной плазме частично ионизированного газа нейтральных частиц значительно больше, чем заряженных.

Выбор плазматрона

Тип плазматрона определяется, в первую очередь, его термодинамическими и кинематическими особенностями.

Плазмотрон, используемый в технологическом процессе, должен отвечать следующим требованиям:

- температуры плазмы должна соответствовать значениям, найденным из термодинамических и кинематических расчетов;

- мощность плазматрона должна быть достаточной для обеспечения заданной производительности процесса;

- КПД преобразования электрической энергии в энергию плазмы должен быть достаточно высоким;

- функционировать непрерывно и стабильно в течение длительного периода времени (как правило, не менее 100 ч);

- обеспечивать стабильные значения температуры плазмы и расхода плазмообразующего газа, а также управление этими параметрами в возможно более широком диапазоне;

- не загрязнять плазму продуктами эрозии;

- стоимость получаемой плазмы должна быть минимальной;

Кроме того, при выборе плазматрона, следует учитывать ряд специфических условий;

Возможность ввода в разряд газообразных и конденсированных веществ;

- наличие электрических и магнитных полей;

- неравновесность генерируемой плазмы;

- наличие стандартного оборудования, обеспечивающего работу плазматрона и др.

Для организации промышленных технологических процессов применяются электродуговые, высокочастотные и сверхвысокочастотные плазматроны.

Установка для плазмохимической обработки материалов

В настоящее время использование высокочастотного разряда для генерации низкотемпературной плазмы широко используется в современной физике газоразрядных процессов. Разрабатывая методы экспериментальной

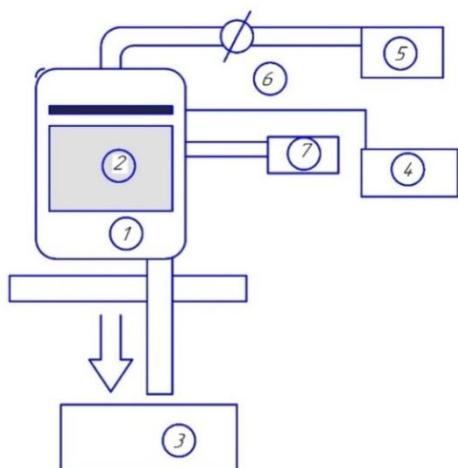
физики для плазменной обработки перспективных органических волокнистых наполнителей, встает задача аппаратного обеспечения данных методов.

Существует большое количество различных установок, в которых происходит генерация неравновесной низкотемпературной плазмы. Среда, в которой происходит зажигание ВЧ разряда, как правило, не изменяется. В случае разработки методов активации поверхности органических волокон необходимо варьировать среду, в плазме которой идет обработка. Наиболее оптимальным в тенденциях развития модификация модификации поверхности наполнителей является переход от универсальных методов к принципиально селективным.

Для реализации этих требований была спроектирована специальная установка, в которой главной конструктивной особенностью является наличие системы напуска паров различных соединений в реакционную камеру. С помощью специального вентиля происходит регулирование концентрации паров прививаемого соединения в процессе плазменной обработки в определенном диапазоне давлений.

Таким образом, уникальностью данной установки по сравнению традиционными конструкциями генерации газовых разрядов является возможность варьирования среды в рабочем объеме, что позволяет производить обработку широкого класса материалов в плазме паров различных соединений.

Принципиальная схема установки показана на рисунке 3.



1 – рабочий сосуд; 2 – обрабатываемое волокно; 3 – система вакуумирования; 4 – ВЧ генератор; 5 – сосуд с соединением, в парах которого идет разряд; 6 – вентиль для напуска паров; 7 – вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2-П

Рисунок 3 – Схема плазменной установки

Краткая характеристика установки

Тип получаемой плазмы – разрядная неравновесная, возникающая при приложении переменного электрического поля в разрядный объем. Способ возбуждения поля – применение емкостного ВЧ разряда.

В качестве ВЧ генератора используется аппарат УВЧ-66. Частота высокочастотных колебаний, создаваемых аппаратом, соответствует $40,68 \pm 2$ % МГц. Выходная мощность, подводимая к электродам, регулируется тремя ступенями: 20 ± 6 Вт; 40 ± 12 Вт; 70 ± 21 Вт. Аппарат работает от сети переменного тока напряжением 220 В, частоты 50 Гц при отклонениях напряжения сети ± 10 % от номинального значения.

Для определения рабочего давления в рабочем сосуде при плазменной обработке использовался вакуумметр ионизационно-термопарный. Диапа-

зон давлений, измеряемых вакуумметром 20×10^{-5} не более 30 %. Вакуумметр питается от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В, частотой 50 ± 5 %. Гц.

Вывод

Произведён анализ существующих методов модификации армирующих волокон и выбран метод: обработка низкотемпературной плазмы, что осуществляется при комнатной температуре и влияет только на поверхности волокон.

Разработана установка для достижения поставленной цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьин, С. В. Методы экспериментальной физики для исследования взаимодействия на межфазной границе в полимерных композиционных материалах [Электронный ресурс] : дис. канд. тех. наук / С. В. Ананьин. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/metody-eksperimentalnoi-fiziki-dlya-issledovaniya-vzaimodeistviya-na-mezhfaznoi-granitse-v-p>.
2. Назаров, В. Г. Поверхностная модификация полимеров / В. Г. Назаров. – М. : МГУ, 2008.
3. Пархоменко, В. Д. Технология плазмохимических производств / В. Д. Пархоменко. – Киев : Вища школа, 1991.
4. Пархоменко, В. Д. Низкотемпературная плазма (Т. 4) / В. Д. Пархоменко. – Новосибирск : Наука, 1991.
5. Ф. Мэттьюз, Р. Р. Композитные материалы. Механика и технология / Р. Р. Ф. Мэттьюз. – М. : Техносфера, 2004.

© Ниёзбеков Н. Н., Головина Е. А., 2019.

ОСОБЕННОСТИ ФОНОННОГО СПЕКТРА КРИСТАЛЛА UO_2 ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАЗЛИЧНОЙ ТРАНСЛЯЦИОННОЙ СИММЕТРИЕЙ ПОДРЕШЕТОК

М. Л. Золотарев, А. С. Поплавной

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

В кристалле UO_2 акустические ветви фононного спектра отвечают преимущественно колебаниям атомов металла, оптические – кислорода за счет существенного различия величин масс этих компонент соединения. Важный кристаллографический фактор – металл и кислород размещаются в подрешетках, отвечающих разным типам Бравэ, что дает возможность анализировать колебания в соответствующих зонах Бриллюэна (ЗБ). Этот анализ проведен путем разворачивания оптических ветвей фононного спектра из ЗБ кристалла в ЗБ подрешетки кислорода, что позволило вдвое уменьшить число оптических ветвей и установить некоторые их топологические особенности.

Ключевые слова: диоксид урана, фононный спектр, подрешетки, псевдосимметрия.

Диоксид урана UO_2 является тепловыделяющим элементом (ТВЭЛ) ядерных реакторов и поэтому его физические свойства исследуются уже достаточно длительное время в широком интервале температур [1]. В частности, значительное внимание уделяется исследованиям динамики кристаллической решетки как экспериментальными [2–5], так и теоретическими [2, 6–9] методами. Уже в ранней работе [5] колебательные спектры монокристаллов UO_2 исследовались методом когерентного однофононного рассеяния медленных нейтронов. Там же вычислены фононные спектры в моделях жестких и поляризуемых ионов, некоторые термодинамические функции и факторы Дебая-Уоллера. Отмечается, что модель жестких ионов достаточно хорошо описывает основные особенности фононных спектров; подобные модели и до настоящего времени используются как для вычисления колебательных спектров, так и для моделирования термического и барического поведения некоторых ТВЭЛ методами молекуляр-

ной динамики [10]. В цитированных работах указывалось также на различную роль подрешеток металла и кислорода в физических и физико-химических явлениях.

В работе [11] развит метод исследования особенностей фононных спектров кристаллов, составленных из подрешеток различного типа Бравэ, установлены механизмы формирования фононных спектров, в частности, возникновения квазивыврождений за счет свертывания спектров подрешеток. Этот подход был применен в работах [8–9] к расчету фононного спектра UO_2 в феноменологической модели Борна-Майера, в частности, в приближении «замороженных подрешеток», когда исключались элементы динамической матрицы, отвечающие за взаимодействие подрешеток. Как показано в этой работе, оптические ветви фононного спектра UO_2 преимущественно определяются колебаниями ионов подрешетки кислорода, акустические – металла, что обусловлено различием на порядок величины масс атомов металла и кислорода (в

а.и.: U – 238, O – 16). Вместе с тем имеются и некоторые симметричные особенности ветвей фоновных спектров кристалла и спектров в приближении «замороженных подрешеток», которые целесообразно исследовать, развернув фоновные спектры из зоны Бриллюэна (ЗБ) кристалла в ЗБ подрешеток. Такое исследование представлено в настоящей работе.

На рисунке 1 изображены ЗБ кристалла и подрешетки металла (1), и подрешетки кислорода (2). Буквами обозначены симметричные точки и направления в ЗБ(1), буквами со штрихами – симметричные точки и направления в частях ЗБ(2), выходящие за пределы ЗБ(1).

UO₂ кристаллизуется в решетку флюорита, которая составлена из гранцентрированной кубической (ГЦК) решетки металла и простой кубической (ПК) решетки кислорода. В примитивной ячейке находится 3 частицы, отвечающие формульной единице соединения, поэтому фоновный спектр ЗБ кристалла содержит 9 ветвей. 3 акустические ветви отвечают преимущественно колебаниям атомов металла в соответствующей ГЦК подрешетке. 6 оптических с высокой точностью определяемые колебаниями ионов кислорода представляют собой ветви оптических колебаний ПК подрешетки кислорода «свернутые» в ЗБ (1) кристалла. Именно эти ветви необходимо «развернуть» в естественную для них ЗБ (2) подрешетки.

На рисунке 2 в средней части (б) представлен фоновный спектр UO₂ вычисленный в работе [8] в модели

«замороженных подрешеток».

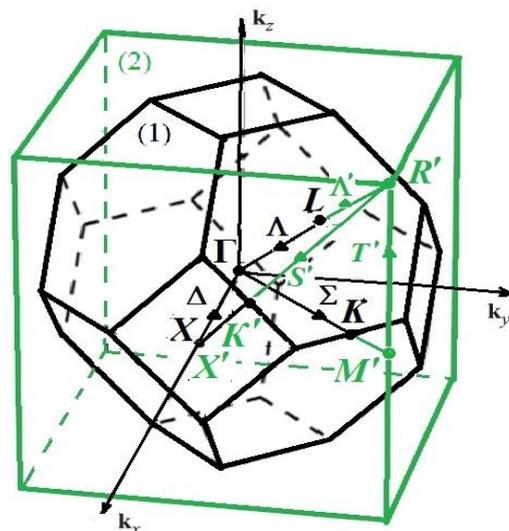
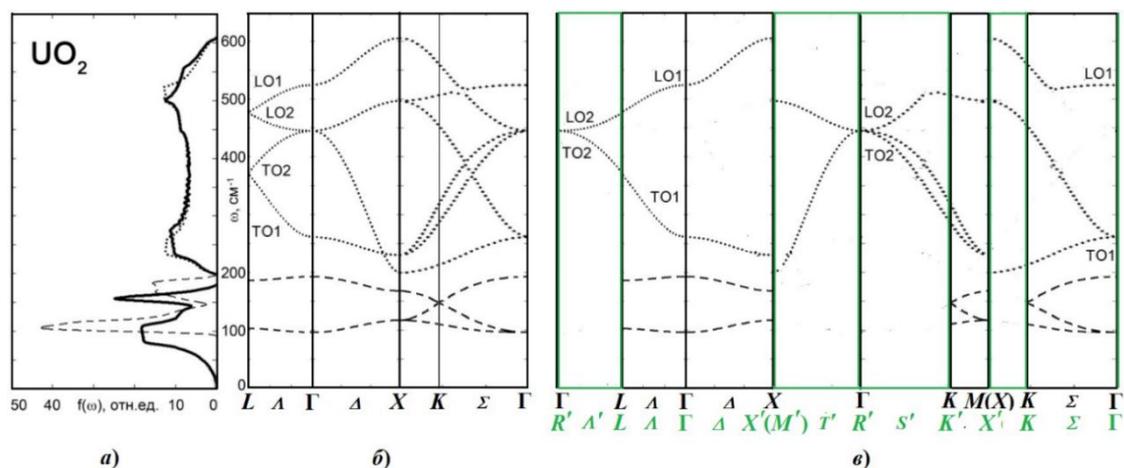


Рисунок 1 – ЗБ кристалла и подрешетки металла (1) и ЗБ подрешетки кислорода (2)

Обращение в нуль недиагональные элементы динамической матрицы отвечающих за взаимодействие подрешеток не означает полного исключения взаимодействия, взаимодействие между ними входит через силовые матрицы самодействия в диагональных элементах динамической матрицы. Фактически при «замораживании» подрешеток взаимодействие металл-кислород учитывается в первом порядке теории возмущений, второй порядок учитывается при «размораживании» и учете недиагональных элементов динамической матрицы. Заметим, что в фоновных спектрах подрешеток отсутствуют акустические ветви, поскольку условия их реализации выполняются для полной динамической матрицы, а не ее частей.



а) плотность фононных частот UO_2 в модели «замороженных подрешеток» (прерывистые линии), точная кристаллическая фононная плотность (сплошная жирная линия); б) фононный спектр UO_2 в модели «замороженных подрешеток» в ЗБ кристалла; в) развернутый фононный спектр UO_2 в ЗБ подрешетки кислорода

Рисунок 2

На левой части (а) рисунка 2 представлены плотности фононных состояний в приближении «замороженных подрешеток» (пунктир) и точная плотность состояний, вычисленная в той же работе [8]. Из рисунка видно, что плотность состояний в модели «замороженных подрешеток» отличается от точной в области акустических фононов, что естественно из-за отсутствия акустических ветвей в этом приближении. Вместе с тем имеется качественно двухпиковая структура точной и приближенной плотностей. В оптической области точная и приближенная плотности состояний весьма близки друг к другу и это свидетельствует о том, что в приближении «замороженных подрешеток», часть фононного спектра, отвечающая преимущественно колебаниям легких атомов достаточно близка к точному.

В правой части (в) рисунка 2 представлен фононный спектр UO_2 ,

вычисленный в модели «замороженных подрешеток» и развернутый в ЗБ подрешеток. На этом же рисунке симметричные точки и направления в частях ЗБ подрешетки кислорода, выходящие за пределы ЗБ кристалла помечены штрихами. Поскольку ЗБ кристалла и подрешетки металла совпадают, три нижние ветви фононного спектра, отвечающие колебаниям ионов металла оставлены в ЗБ кристалла. При разворачивании 6 верхних ветвей спектра, отвечающих колебаниям ионов кислорода в соответствующей подрешетке необходимо учесть следующее обстоятельство. Перенос ветвей спектра из ЗБ кристалла в области, выходящие за ее пределы в ЗБ подрешетки кислорода осуществляется векторами обратной решетки кристалла, которые могут быть параллельными и не параллельными перемещаемой линии. Топология ветвей развернутого фононного спектра в этих случаях оказывается разной.

Рассмотрим это конкретно. Направлению $(1,1,1)$ в ЗБ кристалла отвечает линия $\Lambda(\lambda, \lambda, \lambda)$, $0 < \lambda < 1/2$ от центра ЗБ до точки $L(1/2, 1/2, 1/2)$ (рисунок 1). За пределами ЗБ кристалла это направление отвечает линии $\Lambda'(\lambda', \lambda', \lambda')$, $1/2 < \lambda' < 1$ от точки $L(1/2, 1/2, 1/2)$ до точки $R'(1,1,1)$ ЗБ подрешетки кислорода. Координаты точки R' соответствуют вектору обратной решетки кристалла, поэтому точки $\Gamma(0,0,0)$ и $R'(1,1,1)$ эквивалентны. Следовательно, три ветви фононного спектра, отмеченные на рисунке 2, *б* как LO_2 и TO_2 переносятся из точки $\Gamma(0,0,0)$ в точку $R'(1,1,1)$, а соответствующие ветви с линии $\Lambda(\lambda, \lambda, \lambda)$ транслируются на линию $\Lambda'(\lambda', \lambda', \lambda')$, при этом линии LO_1 и TO_1 в ЗБ кристалла непрерывно переходят в линии LO_2 и TO_2 в ЗБ подрешетки кислорода. Именно непрерывность линий LO_2 , LO_1 и TO_2 , TO_1 при «свертывании» спектра обратно в ЗБ кристалла приводит к вырождениям в точке $L(1/2, 1/2, 1/2)$. Подчеркнем, что в этом случае мы рассматривали ветви фононного спектра для одного и того же направления $(1,1,1)$ в обоих ЗБ и трансляция точек и линий проводилась на вектор обратной решетки параллельный этому направлению. Здесь как раз и уместны термины «свертывание» или «развертывание» ветвей спектра.

Другая ситуация реализуется для направлений $(1,0,0)$ и $(1,1,0)$ в ЗБ кристалла. Направлению $(1,0,0)$ в ЗБ кристалла отвечает линия $\Delta(\delta, 0, 0)$, $0 < \delta < 1$ от центра ЗБ $\Gamma(0,0,0)$ до точки $X(1,0,0)$, совпадающей с точкой X' ЗБ подрешетки кислорода. На это на-

правление вектором обратной решетки кристалла $(1,1,1)$ транслируется линия $T'(1,1,\delta')$, $0 < \delta' < 1$ от точки $M'(1,1,0)$ до точки $R'(1,1,1)$ ЗБ подрешетки кислорода, находящаяся за пределами ЗБ кристалла. Таким образом, перенос ветвей фононного спектра происходит не с продолжения одной и той же линии, находящейся внутри обоих ЗБ, как в рассмотренном выше случае, а с линии, также находящейся внутри этих зон на линию, отвечающую ребру ЗБ подрешетки кислорода вектором обратной решетки кристалла, не параллельным этим линиям. Здесь уместно говорить не о «свертывании» или «развертывании» ветвей спектра, а именно о «переносе» ветвей между разными (не относящимися к одной и той же линии) частями ЗБ. Качественно подобная картина имеет место и для направления $(1,1,0)$ и в граничных точках K , M , которая приведена на рисунке 2, *в*. Конкретная реализация «развёртывания» спектра устанавливается на основе изложенного алгоритма и анализа геометрических особенностей ЗБ кристалла и подрешетки (рисунок 1).

На рисунке 3 представлены вычисленные в работе [8] в модели Борна-Майера функция плотности частот (*а*), фононный спектр в ЗБ кристалла (*б*) с экспериментальными данными, полученными путем измерения неупругого рассеяния медленных нейтронов [5] и фононный спектр, развернутый в ЗБ подрешеток (*в*). В отличие от рисунка 2, полученного на основе вычислений в приближении «замороженных подрешеток», фононный спектр на рисунке 3, *б* установлен пу-

тем диагонализации полной динамической матрицы и поэтому на рисунке имеются акустические ветви. Что касается оптических ветвей, то они, как

уже отмечалось, оказываются близкими к ветвям в приближении «замороженных подрешеток».

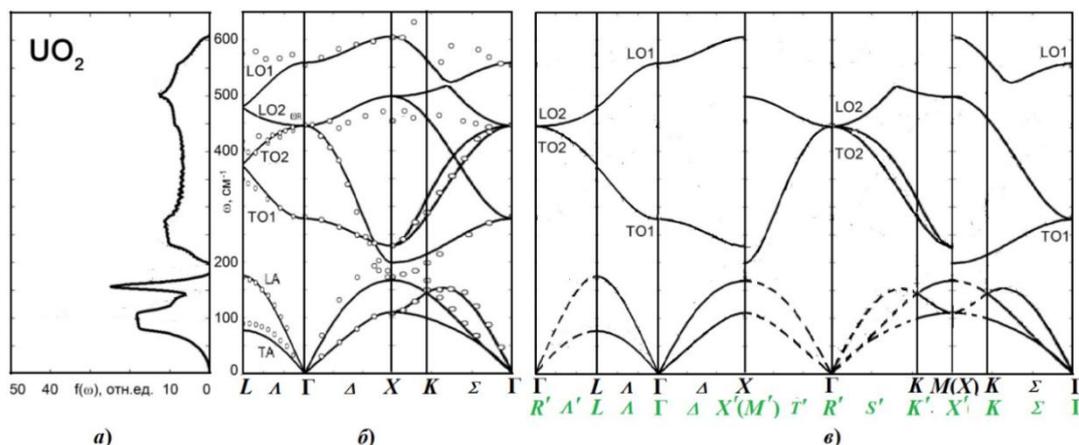


Рисунок 1 – Плотность фононных частот (а) и фононный спектр (б) UO_2 [8] (светлые кружки в части б) – эксперимент [5]); (в) – фононный спектр UO_2 , развернутый в ЗБ подрешетки кислорода

Полный учет взаимодействия подрешеток привел к появлению небольшого вклада колебаний ионов кислорода в акустические ветви и колебаний металла – в оптические. По этой причине на рисунке 3, в, в отличие от рисунка 2, в, пунктирными линиями отмечены фононные акустические ветви в частях ЗБ отвечающих ЗБ подрешетки кислорода, выходящих за пределы ЗБ кристалла. Другим отличием рисунков 2 и 3 является появление небольшого расщепления оптических ветвей в точке L за счет взаимодействия подрешеток. По этому поводу отметим следующее. Во всех расчетах фононных спектров кристаллов с решеткой флюорита с использованием феноменологических моделей получают небольшие расщепления в точке L [8, 9], в то время как в расчетах с применением первопринципного метода функционала плотности эти расщепления более

существенны [7]. Остальные топологические особенности фононных спектров оказались теми же самыми, что уже обсужденные выше для модели «замороженных подрешеток».

Фононные спектры многих кристаллов с существенными отличиями величин масс составляющих их химических элементов всегда подразделяются на ветви, которые отвечают колебаниям тяжелых или легких компонент. Это необходимо учитывать при анализе физико-химических свойств соответствующих соединений. В случае если различающиеся по массам компоненты размещаются в подрешетках, отвечающим разным типам Бравэ, то этот кристаллографический фактор дает возможность анализировать колебания в соответствующих ЗБ, т. е. максимально учитывать специфику кристаллической структуры.

В настоящей работе это проанали-

зировано на примере фононного спектра кристалла UO_2 , имеющего структуру флюорита с двумя подрешетками разного типа Бравэ. Проведенное исследование позволило установить некоторые топологические особенности фононного спектра UO_2 . Кроме того, «развертывание» фононного спектра из ЗБ кристалла в ЗБ подрешетки кислорода уменьшает число оптических ветвей с 6 до 3, что упрощает правила отбора для различных физических процессов с участием фононов. Конечно, эти правила отбора будут приближенными, с погрешностями порядка вклада в оптические ветви колебаний металла. Подобный тип симметрии, называемый в литературе «псевдосимметрией», предназначен для учета внутренней, «скрытой» симметрии кристаллической структуры [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. https://wiki2.org/en/Nuclear_fue (обзорная статья «Ядерное топливо»).
2. Dolling, G. The crystal dynamics of uranium dioxide / G. Dolling, R. A. Cowley, A. D. B. Woods // *Can. J. Phys.* – 1965. – V. 43. – № 2. – P. 1397–1413.
3. Liwnex, T. Coupling of multi-LO phonon to crystal-field excitation in UO_2 studied by Raman Spectroscopy / T. Liwnex // *J. Phys. : Condens. Matter.* – 2008. – V. 20. – № 2. – P.085202 (1–8).
4. Axe, J. D. Infrared dielectric dispersion and lattice dynamics of uranium and thorium dioxide / J. D. Axe, G. D. Petit // *Phys. Rev.* – 1966. – V. 151. – № 2. – P. 676–680.
5. Willis, B. T. M. Neutron diffraction studies of actinide oxides. II. Thermal motion of the atoms in uranium dioxide and thorium dioxide between

room temperature and 1100 °C / B. T. M. Willis // *Proc. R. Soc. London. A.* – 1963. – V. 274. – № 1356. – P. 134–144.

6. Sobolev, V. Modelling thermal properties of actinide dioxide fuels / V. Sobolev // *J. of Nucl. Mat.* – 2005. – V. 344. – № 13. – P. 198–205.

7. Wang, B. T. First-principles study of ground-state properties and high-pressure behavior of ThO_2 . / B. T. Wang, H., W.-D. Shi Li, P. Zhang // *J. of Nucl. Mat.* – 2010. – V. 399. – № 2–3. – P. 181–188.

8. Поплавной, А. С. Фононный спектр и факторы Дебая-Уоллера UO_2 в модели подрешеток / А. С. Поплавной, Т. П. Федорова // *Вестник МГУ. – Серия 3. Физика. Астрономия.* – 2010. – № 5. – С. 60–64.

9. Поплавной, А. С. Фононные спектры, однофононные и двухфононные плотности состояний UO_2 и PuO_2 . / А. С. Поплавной, Т. П. Федорова, И. А. Федоров // *ФТТ.* – 2019. – Т. 59. – № 4. – С. 748–754.

10. Молекулярно-динамическое восстановление межчастичных потенциалов в диоксиде урана по тепловому расширению / С. И. Поташников [и др.] // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2007. – Т. 52. – № 8. – С. 43–52.

11. Поплавной, А. С. Симметрия фононных спектров в кристаллах с подрешетками / А. С. Поплавной // *Изв. вузов. Физика.* – 2008. – Т. 51. – № 7. – С. 31–38.

12. Поплавной, А. С. Псевдосимметрия в кристаллических соединениях с высокосимметричными подрешетками / А. С. Поплавной // *ЖСХ.* – 2013. – Т. 54. – № 1. – С. 99–103.

© Золотарев М. Л., Поплавной А. С., 2019.

УПРУГИЕ СВОЙСТВА ИМИДА ЛИТИЯ

Е. Б. Кайзер, Н. Г. Кравченко, А. С. Поплавной, В. В. Жданов

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Вычислены упругие постоянные и коэффициенты податливости для орторомбического Li_2NH с кристаллической структурой $Ima2$. Найденные упругие постоянные удовлетворяют всем условиям механической стабильности. В отношении упругих свойств Li_2NH практически изотропен.

Ключевые слова: имид лития, упругие свойства, упругие постоянные

В последние годы комплексные гидриды привлекают внимание исследователей, как перспективные материалы для хранения и транспортировки водорода [1–2]. Особый интерес вызывают амид и имид лития, т. к. амид лития перспективен как материал с высокой плотностью водорода, а имид интересен еще из-за высокой ионной проводимости по литию. Для исследования механизмов разложения, гидрирования и дегидрирования необходима информация о фундаментальных физических и физико-химических характеристиках этих соединений.

На сегодняшний день, не имеется единого мнения о структуре как высокотемпературных, так и низкотемпературных фаз имида лития, что составляет определенные трудности в исследовании этого соединения. Причина заключается в трудностях определения экспериментальными методами координат водорода, и высокой подвижности ионов лития в Li_2NH , что приводит к различным типам разупорядочения в соответствующей подрешетке.

Всего при моделировании кристаллических структур различных фаз имида лития используется около полутора десятка пространственных групп, относящихся к 6 сингониям. Авторы работы [3] тщательно проанализировали теоретические работы по

поиску низкотемпературных фаз Li_2NH , предсказали некоторые новые, вычислили фононные спектры и упругие постоянные для имида лития со структурой $Ima2$. В этой же работе особо отмечается, что структура $Ima2$ несколько лучше, чем другие, описывает имеющиеся дифракционные данные, фононные частоты, вычисленные на основе этой структуры оказываются ближе к рамановским частотам, и приводят некоторые другие аргументы в пользу большей достоверности структуры $Ima2$ по сравнению с другими. На данный момент эта структура является наиболее надежно установленной низкотемпературной фазой с упорядоченным расположением структурных элементов для имида лития. Для оптимизированной структуры этой фазы [4] нами выполнены теоретические исследования упругих свойств имида лития.

Исследования упругих свойств имида лития были выполнены на основании вычисленных, с применением программного кода Crystal14 [5], упругих постоянных $C_{\alpha\beta}$, а также коэффициентов податливости $S_{\alpha\beta}$. Полученные результаты приводятся в таблице 1. Как видно из таблицы, полученные значения $C_{\alpha\beta}$ качественно согласуются с результатами более ранней работы [3]. Из сравнения результатов вычислений, выполненных в данной работе и в [3] видно, что су-

щественное различие наблюдается в численном значении модуля C_{66} (20.1GPa в нашей работе и 32.1GPa в [3]), в остальном результаты схожи. Как и в [3], найденные нами компоненты $C_{\alpha\beta}$ удовлетворяют всем усло-

виям механической стабильности.

На основании полученных $C_{\alpha\beta}$ и $S_{\alpha\beta}$ можно провести анализ некоторых упругих характеристик материалов.

Таблица 1 – Упругие постоянные $C_{\alpha\beta}$ (GPa), коэффициент податливости $S_{\alpha\beta}$ (TPa), объемный модуль упругости B , модуль сдвига G и модуль Юнга E для Li_2NH

[3]	Наш расчет		
$C_{\alpha\beta}$	$C_{\alpha\beta}$	$S_{\alpha\beta}$	B, E, G
$C_{11} = 97,6$	$C_{11} = 103,7$	$S_{11} = 10,7$	$B = 49,3$ $G = 28,1$ $E = 70,9$
$C_{12} = 27,5$	$C_{12} = 28,1$	$S_{12} = -3,3$	
$C_{13} = 20,0$	$C_{13} = 21,1$	$S_{13} = -1,3$	
$C_{22} = 74,4$	$C_{22} = 79,2$	$S_{22} = 16,3$	
$C_{23} = 35,0$	$C_{23} = 35,3$	$S_{23} = -5,6$	
$C_{33} = 87,4$	$C_{33} = 90,1$	$S_{33} = 13,6$	
$C_{44} = 37,0$	$C_{44} = 33,5$	$S_{44} = 29,8$	
$C_{55} = 26,3$	$C_{55} = 28,3$	$S_{55} = 35,3$	
$C_{66} = 32,1$	$C_{66} = 20,1$	$S_{66} = 49,7$	

В результате вычислений в приближениях Реусса и Фойгта, было получено, что верхняя граница объемного модуля упругости B равна 49,1 GPa, нижняя – 49,5 GPa. Верхняя и нижняя граница модуля сдвига G равны 28,9 GPa и 27,3 GPa соответственно. Объемный модуль упругости B и модуль сдвига G для Li_2NH , вычисленные в приближении Фойхта–Реусса–Хилла как их усредненные значения, приводятся в таблице 1. Отношения $\frac{B_V}{B_R}$ и $\frac{G_V}{G_R}$ для Li_2NH равны 0,99 и 1,06 соответственно, оказались близки к 1, что говорит о том, что этот кристалл в смысле упругих свойств является практически изотропным.

Отношение $D = B/G$ используется для анализа вязкости-хрупкости материала. Критическое значение параметра D , которое разделяет хрупкие и пластичные материалы составляет 1,75. Вычисленные значения составили $D(Li_2NH) = 1,75$. Таким образом, видим,

что имид лития находится точно на границе хрупкость / пластичность.

Соотношение между изменением линейного размера тела и изменением поперечного сечения характеризуется коэффициентом Пуассона ν . Величина коэффициента Пуассона для разных материалов изменяется от 0 до 0,5. Кристалл считается несжимаемым, если $\nu = 0,5$. Известно, что в случае изотропного кристалла коэффициент Пуассона ν и модуль Юнга можно определить, исходя из значений объемного модуля упругости B и модуля сдвига G . Полученное в этом приближении значение коэффициента Пуассона ν для имида лития равно 0,26, что говорит о том, что при одностороннем растяжении кристалла происходит его поперечное сжатие. Модуль Юнга для Li_2NH принимает достаточно высокое значение 70,9 (таблица 1), что говорит о значительной жесткости кристалла имида лития.

Важным параметром для оценки

механических свойств соединений является упругая анизотропия кристаллов, которая возникает в силу различной прочности связи в различных кристаллографических направлениях и тесно связана с возможностью возникновения микротрещин в кристаллах. Оценку анизотропии кристалла можно дать тремя коэффициентами: универсальный изотропный индекс A^U , упругая анизотропия сжимаемости (A_B) и упругая анизотропия сдвига (A_G). Значения A^U для изотропного материала должно быть равно нулю, а отклонение от нуля показывает степень анизотропии. Также в рассмотрении используют сдвиговый анизотропный фактор. Сдвиг плоскости $\{100\}$ в направлениях между $\langle 011 \rangle$ и $\langle 010 \rangle$ характеризуется коэффициентом A_1 , $\{010\}$ в направлениях между $\langle 101 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$ – A_2 и $\{001\}$ в направлениях между $\langle 110 \rangle$ и $\langle 010 \rangle$ – A_3 . Для изотропного кристалла A_1 , A_2 и A_3 должны быть равны единице, любое отклонение от этого значения является мерой анизотропии рассматриваемого кристалла. Рассчитанные значения приводятся в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры упругой анизотропии и анизотропные факторы для Li_2NH .

Параметры упругой анизотропии		Анизотропные факторы	
A^U	0,29	A_1	0,88
A_B	0,00	A_2	1,14
A_G	0,02	A_3	0,63

Полученные значения этих параметров подтверждают сделанные ранее выводы о том, что кристалл имида лития является практически изотропным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов, Б. П. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумуляирования водорода / Б. П. Тарасов, М. В. Лотоцкий, В. А. Яртысь // Рос. хим. ж. – 2006. – Л. – № 6. – С. 34.
2. Материалы для хранения водорода: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках / В. М. Ажажа [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – 15. – № 1. – С. 145.
3. L. G. Jr. Hector, J. F. Herbst // Journal of Physics : Condensed Matter, 2008. – 064229. 1–11.
4. Первопринципные исследования кристаллической структуры, электронных спектров и химической связи в низкотемпературной фазе имида лития / Н. Г. Кравченко [и др.] // Журнал структурной химии. – 2018. – Т. 59. – № 6. – С. 1308–1314.
5. CRYSTAL14 / R. Dovesi [et al.] User's Manual University of Torino, Torino, 2014.

© Жданов В. В., Кайзер Е. Б., Кравченко Н. Г., Поплавной А. С., 2019.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Ф. М. Кодиров, А. В. Попов

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Рассмотрены основные методы компьютерного моделирования электронной структуры наноматериалов, определены дальнейшие пути их развития в рамках использования математического аппарата теории несамосопряженных операторов.

Ключевые слова: *наноматериалы, компьютерное моделирование, несамосопряженные операторы.*

В современном мире, наноматериалы получили выдающееся технологическое развитие благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. Многочисленные исследования показали, что основные и технически интересные свойства наноматериалов, такие как прочность, электропроводность, твердость проявляется именно в наномасштабе. Поэтому изучение свойств таких материалов является чуть ли не самым важным в современном материаловедении. Для изучения оптических и электронных свойств используются как экспериментальные, так и теоретические методы. Использование экспериментальных методов приводит к большим финансовым, временным и трудовым расходам, которые могут быть существенно сокращены при использовании методов компьютерного моделирования свойств новых наноматериалов.

Основным уравнением описания наносистем является квантово-механическое уравнение Шредингера, точное решение которого может быть получено лишь для двух частиц. Для описания большего количества прибегают к численному моделированию.

Многие физико-химические свой-

ства вещества определяются его электронным строением. Знание электронного строения позволяет не только объяснять обнаруженное поведение вещества, но и предсказывать, создавать материалы с заранее заданными свойствами. На сегодняшний день в исследовании электронной структуры атомов, молекул, твердых тел достигнут значительный успех. Наиболее популярными являются методы расчета электронной структуры вещества в основном состоянии. Однако больший интерес представляют возбуждения: тепловые, вакансионные, примесные, электромагнитные и др., в которых пребывают электроны реального вещества

Один из способов описания возбуждений заключается в использовании многочастичной теории возмущений, позволяющей учесть все взаимодействия между частицами. Данная теория дает адекватные результаты в случае, если возмущения малы. Если же возмущения велики, то возникает ряд трудностей технического характера. При этом остается открытым вопрос и об учете сплошного спектра в задаче на собственные значения энергии электронов. До сих

пор отсутствуют четкие критерии, позволяющие ограничить бесконечный набор дискретных состояний и континуум.

Теорема Хоэнберга-Кона [1] позволила обосновать теорию функционала электронной плотности для точного описания свойств основного состояния системы взаимодействующих частиц. На основе этой теории были разработаны несложные в реализации методы расчета электронной структуры различных материалов. Возникающие здесь трудности определяются в основном тем, что вид точного функционала не известен [2]. Современные попытки построить *ab initio* функционал не дают ожидаемых результатов вычислений [3]. Многоконфигурационное приближение и здесь дает результаты, лучше описывающие экспериментальные данные. Однако расчеты, выполненные в рамках этого чрезвычайно слабо сходящегося приближения, оказываются настолько трудоемкими, что применяются для вычисления свойств систем с небольшим числом электронов [4].

Таким образом, проблема расчета возбужденных состояний многоэлектронных систем на сегодняшний день полностью не решена, требуется дальнейшее развитие теории в этом направлении. При этом мы связываем определенные надежды с применением математического аппарата теории несамосопряженных операторов [5]. Например, в квантовой оптике при использовании комплексных показателей преломления, в квантовой теории поля при рассмотрении РТ-симметричных систем, и даже в тех

случаях, когда используется формализм квантовой механики при описании проблем, связанных с классической статистической механикой или диффузией в биологических системах [6]. Однако при исследовании электронной структуры вещества несамосопряженные операторы пока не получили распространения.

Отметим, что в работе [7] была предложена нестандартная идея использования несамосопряженных операторов для описания электронных возбуждений в открытых многоэлектронных системах. Дело в том, что стандартное решение спектральной задачи основного состояния многоэлектронного атома предполагает разделение переменных на радиальные и угловые, причем собственные функции оператора Гамильтона представимы в виде произведения радиальной функции на угловую. При этом стандартные граничные условия периодичности, накладываемые на угловую функцию, приводят к проблеме собственных значений, допускающей решения только при целых значениях орбитального и магнитного квантовых чисел. При описании же электронных возбуждений мы предлагаем не ограничиваться рассмотрением только целочисленных значений орбитального квантового числа, т. е. включить в рассмотрение всевозможные орбитальные переходы электронов в атоме. Тогда орбитальное квантовое число можно представить комплексным, что позволяет включить в рассмотрение затухание волновой функции, т.е. спонтанный распад возбуждения за некоторое конечное вре-

мя. Более того, в соответствии с соотношением неопределенностей Гейзенберга, если некоторое квантовое состояние существует в течение некоторого времени, то оно имеет энергетический спектр шириной обратно пропорциональной этому времени. Справедливо и обратное утверждение, если некоторое состояние имеет некую ширину, то оно существует в течение времени обратно пропорционального этой ширине. Неэрмитовость получившейся спектральной задачи позволяет в рамках единого подхода еще и учесть ширину атомных уровней, а, значит, оценить время жизни возбуждения. Более подробное описание предлагаемого подхода (с основными формулами) доступно в обзоре [8].

Предложенная методика описания электронных возбужденных состояний многоатомных систем позволила обнаружить ряд новых явлений, таких как энергетический коллапс атомов, аномальное расщепление и перемешивание энергетических состояний. Показана принципиальная возможность существования долгоживущих метастабильных состояний в бериллии [9], магнии [10], кальции [11], а также осуществлен поиск Ридберговской материи [12].

Также было получено аналитическое решение спектральной задачи для атома водорода в рамках предложенного подхода [13]. Предложен оригинальный метод описания и расчета электронной структуры кластера при его малом взаимодействии с окружающими кластерами в случае, когда пренебречь этим взаимодействием

нельзя [14], позволивший существенно сократить численные расчеты при учете вклада сплошного спектра. На примере лития показано, что образование кристалла происходит через образование ряда метастабильных возбужденных кластеров [15].

В дальнейшем предполагается продолжить работу с гибридными малыми кластерами [16, 17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hohenberg, P. Inhomogeneous Electron Gas / P. Hohenberg, W. Kohn // *Physical Review*. – 1964. – Т. 136 – № 3В – С.В864–В871.
2. Сарры, А. М. К теории функционала плотности / А. М. Сарры, М. Ф. Сарры // *Физика твердого тела* – 2012. – Т. 54 – № 6 – С.1237–1243.
3. Ипатов, А. Н. Расчет возбужденных состояний молекул при помощи метода теории функционала плотности с орбитально-зависимым неабатическим обменным ядром / А. Н. Ипатов // *Журнал экспериментальной и теоретической физики* – 2010. – Т. 137. – С. 226–240.
4. Advanced multiconfiguration methods for complex atoms: I. Energies and wave functions / C. F. Fischer [et al.] // *Journal of Physics B : Atomic, Molecular and Optical Physics* – 2016. – Т. 49 – № 18 – С. 182004.
5. Jagau, T.-C. Extending Quantum Chemistry of Bound States to Electronic Resonances / T.-C. Jagau, K. V. Bravaya, A. I. Krylov // *Annual Review of Physical Chemistry*. – 2019. – Т. 68 – № 1 – С. 525–553.
6. Moiseyev, N. Non-Hermitian quantum mechanics / N. Moiseyev. –

Cambridge University Press, 2011.– 394 с.

7. Попов, А. В. Решение спектральной задачи для электронов в атоме, учитывающей ширину энергетических уровней / А. В. Попов // Оптика и спектроскопия – 2002. – Т. 93 – С. 5–7.

8. Popov, A. V. Computer simulation of electronic excitations in beryllium / A. V. Popov // Mathematical Modelling and Geometry – 2019. – Т. 3 – С. 29–59.

9. Popov, A. V. Condensed excited states in beryllium / A. V. Popov // Computational Materials Science. – 2006. – Т. 36 – № 1–2 – С. 217–220.

10. Попов, А. В. Конденсат возбужденных состояний в магнии / А. В. Попов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2005. – Т. 128 – С. 227–232.

11. Попов, А. В. Конденсат возбужденных состояний в кальции / А. В. Попов // Физика плазмы. – 2006. – Т. 32 – С. 362–367.

12. Popov, A. V. Search for Rydberg matter: Beryllium, magnesium and calcium / A. V. Popov // Czechoslovak

Journal of Physics. – 2006. – Т. 56 – № S2. – С. B1294–B1299.

13. Попов, А. В. Применение несамосопряженных операторов для описания возбуждений на примере атома водорода / А. В. Попов // Известия Алтайского государственного университета – 2012. – Т. 2 – С. 154–157.

14. Попов, А. В. Конденсация кластеров бериллия / А. В. Попов // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50. – С. 759–764.

15. Popov, A. Simulation of the crystal structure formation from the small lithium clusters / A. Popov // Molecular Physics – 2019. – Т. 117 – № 14. – С. 1833–1837.

16. Попов, А. В. Генерация кластеров лития в плазменном потоке гелия / А. В. Попов, В. А. Попов // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – Вып. 8 – С. 1170–1175.

17. Попов, А. В. Нуклеация натрия в плазменном потоке с неоном / А. В. Попов, Н. В. Мельникова // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т. 62. – С. 145–152.

© Кодиров Ф. М., Попов А. В., 2019.

ОБРАЗОВАНИЕ МАЛЫХ КЛАСТЕРОВ ЛИТИЯ В ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ ГЕЛИЯ

А. В. Попов, В. А. Попов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Рассмотрен вопрос образования малых кластеров лития в плазменном потоке гелия для создания более эффективного анода литий-ионных аккумуляторов, состоящих из малых кластеров лития. Рассчитана энергетическая структура атомных пучков лития в потоке, содержащем гелий. Показана принципиальная возможность образования устойчивых возбуждений двух-, трех-, четырехатомных кластеров, содержащих только атомы лития.

Ключевые слова: наноматериалы, кластерные пучки, компьютерное моделирование, литий-ионные аккумуляторы.

Благодаря низкому отрицательному потенциалу и высокой реакционной способности литий оказался наиболее подходящим материалом для получения источников тока с максимальной теоретической удельной емкостью и высокой удельной энергией. Это, в свою очередь, способствовало повсеместному внедрению литий-ионных аккумуляторов. Однако, уже сегодня ведутся активные исследования в области создания других типов литиевых аккумуляторов [1–4]. Интересны работы по интеркаляции кластеров лития Li_{12} в C_{60} [5, 6]. В работе [7] показано, что малые кластеры лития (в частности, Li_3) могут оказаться более эффективными при создании анода литий-ионных аккумуляторов, нежели отдельные атомы. Ввиду высокой реакционной способности кластеров возникает ряд вопросов, касающихся их стабилизации, времени жизни и способов изолирования друг от друга. Более того, как известно, физико-химические свойства кластеров могут существенно измениться после добавления даже одного атома [8]. В то же время, кластеры являются

промежуточной формой между веществом и атомами этого вещества, что делает интересным изучение новых форм кластеров и с фундаментальной точки зрения.

В настоящее время разработано большое количество методов синтеза малых кластеров различных веществ [9–11]. Наиболее перспективным представляется использование атомных пучков, которые обеспечивают высокую скорость генерации кластеров требуемой структуры и размеров, а также их быструю доставку к месту получения материала с заранее заданными свойствами [12]. Возникающая при этом цепь сложных неравновесных процессов сильно зависит от внешних условий и режимов генерации, для управления которыми часто используется инертный газ в качестве буферного [13, 14]. Для подавления агрегации или диссоциации кластеров можно использовать лазерное излучение [15]. Однако, по мере усложнения реакций синтеза, традиционные методы проб и ошибок становятся более неэффективными, возникает потребность в теоретическом исследовании

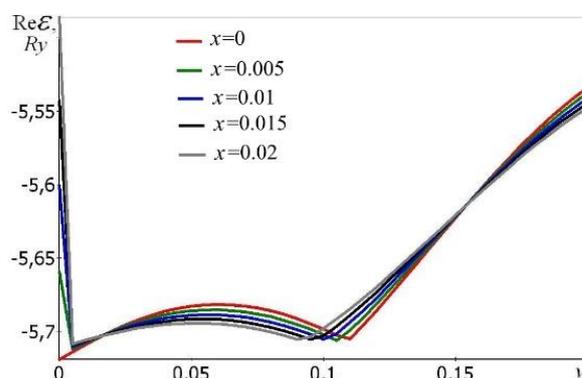
процессов, происходящих в сильно неравновесных атомных пучках.

В настоящей работе рассмотрено формирование кластеров лития в гелиевом потоке в рамках теоретического метода описания электронной структуры, учитывающего ширину энергетических уровней [16].

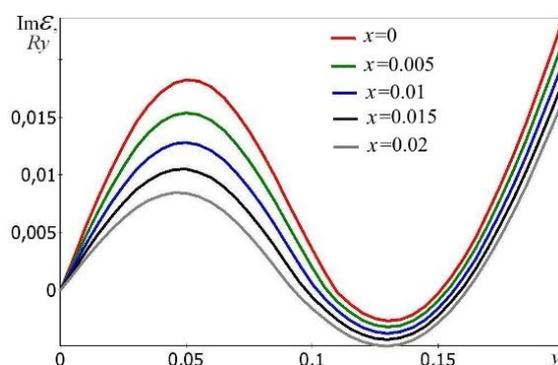
Уравнение Шредингера решалось с учетом орбитальных возбуждений [17]. В качестве базисных функций использовали функции гауссова типа [18], используя 18 функций в разложении по $l = 0$ и 12 функций в разложении по $l = 1$. Оценки показали, что базис такой длины вполне пригоден при решении уравнения Шредингера методом Рутана для лития и гелия, если $|x| < 0,03$ и $|y| < 0,03$, т. к. увеличение длины этого базиса не меняет требуемой точности всех значений, приведенных ниже для обсуждения.

Результаты самосогласованных вычислений, приведенные на рис.1а, показывают, что действительная часть полной энергии $Re \mathcal{E}$ возбужденного атома гелия всюду выше энергии его основного состояния при $x = y = 0$, равной $-5.7233 R_y$, что соответствует данным других работ [19, 20]. Мнимая часть полной энергии $Im \mathcal{E}$ атома гелия как функция параметра y для пяти значений параметра $x = 0, 0,005, 0,01, 0,015, 0,02$ изображена на рисунке 1, б. Поскольку модуль этой величины есть вероятность распада возбуждений атома в единицу времени, то наиболее интересными являются неограниченно долго живущие состояния с $Im \mathcal{E} = 0$. Кроме основного состояния при $x = y = 0$, к таковым относятся возбужденные со-

стояния вблизи $y = 0,1$ и $y = 0,15$ (рисунк 1, б).



а)



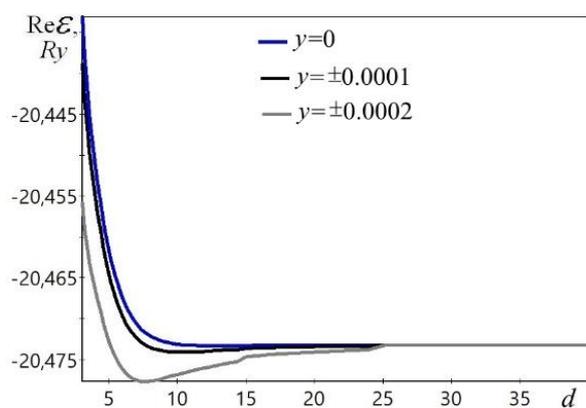
б)

Рисунок 1 – Зависимости действительной части полной энергии $Re \mathcal{E}$ (а) и мнимой части полной энергии $Im \mathcal{E}$ (б) атома гелия от параметра возбуждения y при $x = 0, 0,005, 0,01, 0,015, 0,02$.

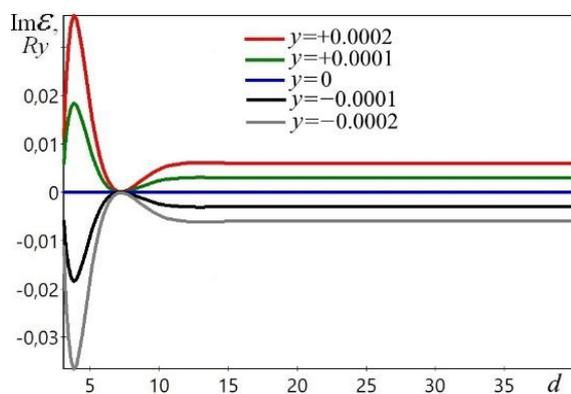
Таким образом, можно утверждать, что в гелии, в принципе, возможно существование неограниченно долго живущих возбуждений, соответствующих значениям $y = 0,1$ и $y = 0,15$, например, в результате столкновения с каким-либо атомом. В качестве такого атома выберем атом лития.

Результаты расчетов, представленные на рисунке 2, а, показывают, что действительная часть полной энергии $Re \mathcal{E}$ двухатомной системы

Li–Ne достигает минимума, тем более глубокого, чем больше интенсивность возбуждения. Из представленных на рисунке 2, а наиболее глубокий минимум соответствует значению параметра $y = \pm 0,0002$. При тех же расстояниях около семи боровских радиусов мнимая часть полной энергии $\text{Im } \mathcal{E} = 0$ (рисунок 2, б).



а

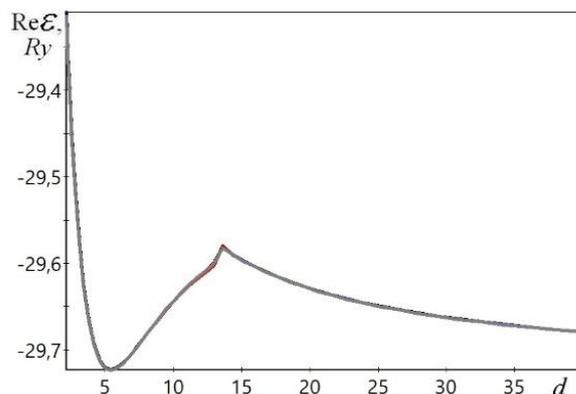


б

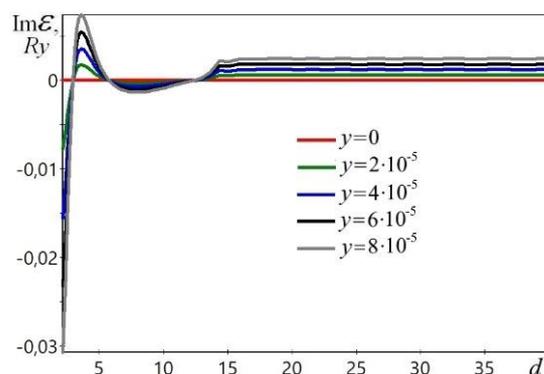
Рисунок 2 – Зависимости действительной части полной энергии $\text{Re } \mathcal{E}$ (а) и мнимой части полной энергии $\text{Im } \mathcal{E}$ (б) от расстояния d (в боровских радиусах) между атомами Li и Ne при $x = 0$ и $y = 0, \pm 0,0001, \pm 0,0002$

Следовательно, можно утверждать, что двухатомная система Li–Ne может существовать неограниченно долго в условиях внешних возбуждений при расстояниях около семи

боровских радиусов. При снятии возбуждений система Li–Ne распадается на отдельные атомы, в отличие от системы Li–Li, для которой результаты расчета полной энергии приведены на рисунке 3.



а



б

Рисунок 3 – Зависимости действительной части полной энергии $\text{Re } \mathcal{E}$ (а) и мнимой части полной энергии $\text{Im } \mathcal{E}$ (б) от расстояния d (в боровских радиусах) между двумя атомами лития при $x = 0$ и $y = 0, 2 \cdot 10^{-5}, 4 \cdot 10^{-5}, 6 \cdot 10^{-5}, 8 \cdot 10^{-5}$

Результаты расчетов, представленные на рисунке 3, а, показывают, что действительная часть полной энергии $\text{Re } \mathcal{E}$ двухатомной системы Li–Li достигает очень глубокого минимума, почти не зависящего от параметра возбуждения y при расстоянии между атомами $d = 5,12$ боров-

ских радиусов, что соответствует данным работы [7]. При этом же расстоянии между атомами лития мнимая часть полной энергии $\text{Im } \mathcal{E}$ обращается в нуль (рисунок 3, б), т. е. система Li–Li является долгоживущей. Заметим, что $\text{Im } \mathcal{E} = 0$ и при расстоянии между атомами $d = 13$ боровских радиусов (рисунок 3, б). Однако, если снять возбуждения, такая система Li–Li переходит в основное состояние с расстоянием между атомами $d = 5,12$ боровских радиусов, либо распадается на два атома.

Полученные нами данные позволяют предполагать, что если интересующий нас атом лития поместить в поле двух, трех, или большего числа атомов, то может образоваться кластер, стабильный по энергии и с продолжительным временем жизни.

Для проверки обнаруженных закономерностей была вычислена полная энергия четырех атомов лития как функция расстояния между атомами при значениях внешнего возбуждения. Результаты расчетов [17] подтверждают высказанные выше предположения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Review on Li-Sulfur Battery Systems: an Integral Perspective / A. Rosenman [et al.] // *Advanced Energy Materials* – 2019. – Т. 5 – № 16 – С. 1500212.
2. Hart, C. J. Rational design of sulphur host materials for Li–S batteries: correlating lithium polysulphide adsorptivity and self-discharge capacity loss / C. J. Hart [et al.] // *Chemical Communications*. – 2019. – Т. 51 – № 12. – С. 2308–2311.
3. Fluoroethylene carbonate as an important component in organic carbonate electrolyte solutions for lithium sulfur batteries / E. Markevich [et al.] // *Electrochemistry Communications*. – 2019. – Т. 60. – С. 42–46.
4. Sharon, D. Reactivity of Amide Based Solutions in Lithium–Oxygen Cells / D. Sharon [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2014. – Т. 118. – № 28. – С. 15207–15213.
5. Cristofolini, L. NMR and high-resolution x-ray diffraction evidence for an alkali-metal fulleride with large interstitial clusters : Li₁₂C₆₀ / L. Cristofolini, M. Riccò, R. De Renzi // *Physical Review B*. – 1999. – Т. 59. – № 13. – С. 8343–8346.
6. Kohanoff, J. A possible new highly stable fulleride cluster : Li₁₂C₆₀ / J. Kohanoff, W. Andreoni, M. Parrinello // *Chemical Physics Letters*. – 1992. – Т. 198. – № 5. – С. 472–477.
7. Kushwaha, A. K. Engineering Redox Potential of Lithium Clusters for Electrode Material in Lithium-Ion Batteries / A. K. Kushwaha, M. R. Sahoo, J. Nanda, S. K. Nayak // *Journal of Cluster Science*. – 2019. – Т. 28 – № 5 – С. 2779–2793.
8. Woodruff, D. P. Atomic clusters : from gas phase to deposited / D. P. Woodruff. – Elsevier, 2007. – 626 с.
9. Mathew, A. Noble Metal Clusters: Applications in Energy, Environment, and Biology / A. Mathew, T. Pradeep // *Particle & Particle Systems Characterization*. – 2014. – Т. 31. – № 10. – С. 1017–1053.

10. Heer, W. A. de The physics of simple metal clusters: experimental aspects and simple models / W. A. de Heer // *Reviews of Modern Physics*. – 1993. – Т. 65. – № 3. – С. 611–676.
11. Lu, Y. Sub-nanometre sized metal clusters: from synthetic challenges to the unique property discoveries / Y. Lu, W. Chen // *Chemical Society Reviews*. – 2012. – Т. 41. – № 9. – С. 3594.
12. Смирнов, Б. М. Генерация кластерных пучков / Б. М. Смирнов // *Успехи физических наук*. – 2003. – № 173. – С. 609–648.
13. Lou, J. W. Characterization of atomic spin polarization lifetime of cesium vapor cells with neon buffer gas / J. W. Lou, G. A. Cranch // *AIP Advances*. – 2018. – Т. 8. – № 2. – С. 025305.
14. Molecular Structures and Ion Mobility Cross Sections : Analysis of the Effects of He and N2 Buffer Gas / C. Bleiholder [et al.] // *Analytical Chemistry*. – 2019. – Т. 87. – № 14. – С. 7196–7203.
15. Управление процессом образования кластеров в молекулярных пучках с помощью ИК-лазеров / В. М. Апатин [и др.]. – 2019. – Т. 152. – С. 627–640.
16. Попов, А. В. Computer simulation of electronic excitations in beryllium / А. В. Попов // *Mathematical Modelling and Geometry*. – 2019. – Т. 3. – С. 29–59.
17. Попов, А. В. Генерация кластеров лития в плазменном потоке гелия / А. В. Попов, В. А. Попов // *Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 89. – № 8. – С. 1176–1181.
18. Huzinaga, S. Gaussian- Type Functions for Polyatomic Systems. I / S. Huzinaga // *The Journal of Chemical Physics*. – 1965. – Т. 42. – № 4. – С. 1293–1302.
19. Li, J. Comparing many-body approaches against the helium atom exact solution / J. Li, N. D. Drummond, P. Schuck, V. Olevano. – 2018.
20. Clementi, E. Roothaan-Hartree-Fock atomic wavefunctions / E. Clementi, C. Roetti // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. – 1974. – Т. 14. – № 3–4. – С. 177–478.

© Попов А. В., Попов В. А., 2019.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЦЕПТУРЫ ПЕСЧАНО-СМОЛЯНОЙ СМЕСИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВАРИАТИВНОГО ДАВЛЕНИЯ

В. Ю. Куликов¹, Св. С. Квон, Т. В. Ковалёва¹, С. К. Аринова²

¹Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

Наиболее перспективным средством решения задач оптимизации является метод планирования эксперимента. В качестве функции отклика Y была выбрана прочность на сжатие. Построенная математическая модель адекватна и может предсказывать результаты с точностью.

Ключевые слова: оболочка, планирование эксперимента, модель, многофакторный эксперимент.

Известно, что к наиболее перспективным средствам решения задач оптимизации является метод планирования эксперимента. Среди положительных сторон данного метода – универсальность.

Известно, что одним из основных параметров литейной формы является прочность на сжатие. Низкая прочность приведет к разрушению формы при заливке или при транспортировке формы. Высокая прочность приведёт к повышенным энергетическим затратам на выбивку из нее отливки. С этой точки зрения были проведены испытания по определению оптимального параметра прочности при заливке металла. Определено, что прочность на сжатие менее 11 МПа приводит к частичному разрушению формы, появляются заливки, засоры и другие виды брака. Прочность на сжатие более 16–17 МПа приводит к повышенному образованию пригара и значительно усложняет выбивку отливки из такой формы.

Основными компонентами песчано-смоляной смеси, наряду с наполнителем – песком, являются пульвер-

бакелит (связующее) и керосин (добавка). Из технологических параметров, наряду с температурой нагрева, применяется давление.

Влияние давления прессования и концентрации основных компонентов на прочность готовой формы приведены в таблице 1. Температура нагрева смеси во всех случаях составляла 250 °С, температура спекания – 350 °С.

Таким образом, необходимо рассмотреть смесь с содержанием пульвербакелита в диапазоне от 3–7 %, керосина 0–0,5 %. Величина базового давления формообразования оболочки – 0,2–0,4 МПа.

Расчет проводили по методике, описанной в [1]. Методом полного факторного эксперимента получаем математическое описание процесса. Математическое описание процесса в виде уравнение регрессии имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n. \quad (1)$$

В нашем случае, то есть при полном факторном эксперименте $N = 2^n$ ($N = 23$), уравнение имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3, \quad (2)$$

где N – число опытов; n – число факторов.

В качестве функции отклика Y была выбрана прочность на сжатие (таблицы 2, 3).

Основные варьируемые факторы:

X₁ – пульвербакелит, %;

X₂ – керосин, %;

X₃ – давление, МПа.

Таблица 1 – Результаты базовых экспериментов

№	Пульвербакелит, %	Керосин, %	Давление, МПа	Прочность на сжатие, МПа
1	2 %	0	0,4	10,7
2	5 %	0	0,3	12,6
3	8 %	0	0,2	16,9
4	2 %	0,5	0,4	11,2
5	5 %	0,5	0,3	12,7
6	8 %	0,5	0,2	16,7
7	2 %	1	0,4	11,3
8	5 %	1	0,3	12,5
9	8 %	1	0,2	16,2

Таблица 2 – Условия проведения эксперимента

	Факторы		
	X1	X2	X3
Основной уровень	4,5	0,5	0,3
Интервал варьирования	1	0,2	0,05
Верхний уровень	5,5	0,7	0,35
Нижний уровень	3,5	0,3	0,25
Единица измерения	%	%	МПа

Построчная дисперсия определяется по формуле:

$$S^2_{y_u} = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{ug} - \bar{y}_u)^2}{f_u}, \quad (3)$$

$$f_u = n_u - 1, \quad (4)$$

\bar{y}_u – среднее арифметическое значение; n_u – номер эксперимента; y_{ug} – результат повторения эксперимента; f = число степеней свободы в каждом опыте при определении построчной дисперсии. В нашем случае (примере) $f_u=2$. В таком случае уравнение (3) имеет следующий вид:

$$S^2_{y_u} = \frac{\sum_{g=1}^3 (y_{ug} - \bar{y}_u)^2}{2} \quad (5)$$

Построчная дисперсия соответственно для каждого опыта рассчитывается отдельно. Абсолютную ошибку измерения в каждом опыте определяется из выражения:

$$\sigma_{y_u} = \sqrt{S^2_{y_u}}. \quad (6)$$

Относительная ошибка измерения в каждом опыте рассчитывается по формуле:

$$V_{y_u} = \frac{\sigma_{y_u} \cdot 100\%}{\bar{y}_u}, \quad (7)$$

где

$$\bar{y}_u = \frac{\sum_{i=1}^8 \bar{y}_{ui}}{N} \quad (8)$$

Результаты расчетов дисперсий по вышеуказанным формулам приведены в таблице 4.

Таблица 3 – Матрица планирования эксперимента

Номер Опыта	X1	X2	X3	Y1	Y1	Y1	\bar{y}_u
1	+	+	+	14,8	14,9	14,2	14,63
2	-	+	+	13,7	14,3	14,8	14,27
3	+	-	+	13,9	15,0	14,2	14,36
4	-	-	+	14,5	13,8	14,1	14,13
5	+	+	-	13,5	14,6	14,4	14,17
6	-	+	-	14,5	15,0	13,8	14,43
7	+	-	-	14,8	13,9	14,2	14,30
8	-	-	-	14,9	13,7	14,1	14,23

Поскольку $S^2_{y_u}$, σ_{y_u} и V_{y_u} значений были определены в условиях ограниченной выборки, каждый опыт дублировался 3 раза. Для оценки надежности вычислений возникает необходимость рассчитать доверитель-

ные интервалы средних значений функции отклика \bar{y}_u . Математическое условие для доверительного интервала имеет вид:

$$P = (\bar{y}_u - \Delta y_u < \bar{y}_u < \bar{y}_u + \Delta y_u) = 1 - \alpha \quad (9)$$

Таблица 4 – Результаты построчных дисперсий

Номер опыта u	Среднее арифметическое значение функции отклика \bar{y}_u	Дисперсия (построчная) $S^2_{y_u}$	σ_{y_u}	V_{y_u}
1	14,63	0,14	0,37	2,58
2	14,27	0,30	0,55	3,84
3	14,36	0,32	0,57	3,98
4	14,13	0,12	0,35	2,44
5	14,17	0,34	0,58	4,05
6	14,43	0,36	0,60	4,19
7	14,30	0,21	0,46	3,21
8	14,23	0,37	0,61	4,26
Сумма		2,16	-	-

Для определения ширины доверительного интервала используют следующую формулу [1]:

$$\Delta y_u = t_1 \frac{\sigma_u}{\sqrt{n_u}} \quad (10)$$

где t_1 критерий Стьюдента; σ_u – абсолютная ошибка измерений; n_u – количество дублей (в нашем

чае $n_u = 3$). Значения t_1 берется из таблицы t_1 распределения Стьюдента. Опыт считается бракованным, если экспериментальное значение критерия t_1 по модулю больше табличного значения. Для $n_u = 3$ и уровня значимости 0,1 $t_1 = 2,92$.

Значения построенных дисперсий,

абсолютных ошибок и вариаций измерений являются статистически значимыми, если выполняется следующее условие:

$$\Delta y_u > \sigma_{y_u} . \quad (11)$$

Таблица 5 – Оценка статистической значимости

Номер опыта u	\bar{y}_u	n_u	t_1	σ_{y_u}	Δy_u	Доверительный интервал
1	14,63	3	2,92	0,37	0,62	(14,01; 15,25)
2	14,27			0,55	0,93	(13,34; 15,20)
3	14,36			0,57	0,96	(13,40; 15,32)
4	14,13			0,35	0,59	(13,54; 14,72)
5	14,17			0,58	0,98	(13,19; 15,15)
6	14,43			0,60	1,01	(13,42; 15,44)
7	14,30			0,46	0,77	(13,53; 15,07)
8	14,23			0,61	1,02	(13,21; 15,25)

После расчетов и оценки статистической значимости необходимо провести проверку воспроизводимости экспериментальных данных. Проверка этой гипотезы позволяет определить однородность либо неоднородность дисперсий.

Расчетное значение критерия Кохрена находится по формуле:

$$G_{расч.} = \frac{S^2_{y_{u_{max}}}}{\sum_{u=1}^N S^2_{y_u}} . \quad (12)$$

Из всех дисперсий находится наибольшая $S^2_{y_{u_{max}}}$, которую сравнивают со значением критерия, взятым из таблицы. Соответствующее значение критерия Кохрена $G_{табл} = 0,516$ (согласно приложению). Найдено в зависимости от значений параметров: уровень значимости $P = 0,10$, из числа опытов $N = 8$; число степени свободы $f = 2$.

Из таблицы 4 находим максимальную построчную дисперсию и сумму всех построчных дисперсий. $G_{расч.} = 4,22/2,16 = 0,17$.

В нашем случае все значения статистически значимы, поскольку значения в каждом опыте выполняются условия (10) (таблица 5).

И так в нашем случае условие $G_{расч} < G_{табл}$ выполняется, ряд дисперсий однороден.

Теперь можно приступить к определению дисперсии:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^8 S_{y_u}^2}{N} . \quad (13)$$

$S_{y_u}^2$ – построчная дисперсия. Выражение абсолютной ошибки и вариаций эксперимента выражаются:

$$\sigma_y = \sqrt{S_y^2} . \quad (14)$$

Относительная ошибка измерения в каждом опыте рассчитывается по формуле:

$$V_y = \frac{\sigma_y \cdot 100\%}{\bar{y}} . \quad (15)$$

где

$$\bar{y} = \frac{\sum_{u=1}^8 \bar{y}_u}{N} . \quad (16)$$

Вариация эксперимента выражает меру его точности. Точность считается удовлетворительной, если вариация

ция не превышает 10 % [1]. В нашем случае:

$$S_y^2 = 2,16/8 = 0,27.$$

$$\sigma_y = \sqrt{0,27} = 0,52.$$

$$V_y = 0,52 * 100 / 14,315 = 3,6 \%$$

Точность эксперимента можно считать удовлетворительной, поскольку расхождение не превышает 10 % [2].

Модель процесса применительно к трехфакторному эксперименту имеет вид:

$$y' = b_0 + \sum b_j X_j + \sum b_{ij} X_i X_j + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (16)$$

На основании полного факторного эксперимента коэффициенты вычисляются по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{0u} \bar{y}_u}{N}, \quad b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{1u} \bar{y}_u}{N},$$

$$b_2 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{2u} \bar{y}_u}{N}, \quad b_3 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{3u} \bar{y}_u}{N}, \quad (17)$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 \cdot X_2)_u \bar{y}_u}{N},$$

$$b_{13} = \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 \cdot X_3)_u \bar{y}_u}{N},$$

$$b_{23} = \frac{\sum_{u=1}^N (X_2 \cdot X_3)_u \bar{y}_u}{N},$$

$$b_{123} = \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3)_u \bar{y}_u}{N}.$$

Расширенная матрица трехфакторного эксперимента приведена в таблице 6.

Таблица 6 – Расширенная матрица трехфакторного эксперимента

u	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄ = X ₁ X ₂	X ₅ = X ₁ X ₃	X ₆ = X ₂ X ₃	X ₇ = X ₁ X ₂ X ₃
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

$$b_0 = 14,3; \quad b_1 = -0,05; \quad b_2 = -0,06; \quad b_3 = -0,03; \quad (18)$$

$$b_4 = -0,02 \quad ; \quad b_5 = 0,09; \quad b_6 = 0,04; \quad b_7 = -0,06.$$

Проверка значимости каждого коэффициента проводится независимо. Осуществляется двумя способами проверкой по *t*-критерию Стьюдента или построения доверительного интервала. При полном факторном эксперименте доверительные интервалы для всех коэффициентов равны друг

другу. Если же все коэффициенты регрессивного уравнения значимые, следует исключить наименьший коэффициент.

Прежде надо найти дисперсию коэффициента регрессии $S^2_{b_i}$. Определяется в нашем случае по формуле

$$S^2_{b_i} = \frac{S^2_y}{n_u \cdot N}, \quad (19)$$

где S^2_y – дисперсия эксперимента.

Квадратная ошибка коэффициента регрессии

$$S_{b_i} = + \sqrt{S^2_{b_i}} \cdot \quad (20) \tag{21}$$

Формулу доверительного интервала можно записать в следующей форме;

$$\Delta_{b_i} = t_2 \cdot S_{b_i}, \tag{21}$$

$$f_2 = (n_u - 1) \cdot N$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Доверительный интервал задается верхней и нижней границами $|b_i| \geq \Delta_{b_i}$ или $|b_i| \geq t_2 \cdot S_{b_i}$

В рассматриваемой модели $S^2_{b_i} = 0,0008 S_{b_i} = 0,03$;

$$t_2 = 1,75. \Delta_{b_i} = 0,05.$$

Статистически значимыми коэффициентами являются: b_0, b_1, b_3, b_4 .

$$y'_u = 14,3 - 0,05X_1 - 0,06X_2 + 0,09X_5 - 0,06X_7$$

Для проверки гипотезы об адекватности используют критерию Фишера. Удобство использования критерия Фишера состоит в том что проверку гипотезы можно свести к сравнению с табличным значением. Прежде необходимо рассчитать значения функции отклика y'_u с помощью уравнения (21).

$$S^2_{неад} = \frac{\sum_{u=1}^N (y'_u - \bar{y}_u)^2}{f_1}, f_1 = N - k' \tag{22}$$

где $y'_u - \bar{y}_u$ – значение функции отклика в каждом опыте. $f_1 = 3$; $S^2_{неад} = 0,01$.

Сравнение экспериментальных [3–6] и расчётных данных приведено в таблице 7.

Таблица 7 – Экспериментальные и расчетные данные

Номер опыта u	\bar{y}_u	y'_u	$ \Delta y = y'_u - \bar{y}_u $
1	14,63	14,14	- 0,49
2	14,27	14,34	0,07
3	14,36	14,14	- 0,22
4	14,13	14,16	0,03
5	14,17	14,26	0,09
6	14,43	14,46	0,03
7	14,30	14,26	- 0,04
8	14,23	14,56	0,33

Расчетное значение Фишера определяется отношением оценок дисперсий:

$$F_{расч} = \frac{S^2_{неад}}{S^2_y} \tag{22}$$

$$F_{расч} = \frac{0,01}{0,002} = 5,0$$

Табличное значение критерия Фишера $F_{табл} = 5,19$ в условиях $\alpha = 0,10, f = 3$ и $f = 16$.

Модель считается адекватной если выполняется следующее условие:

$$F_{расч} < F_{табл}$$

Соответственно построенная математическая модель адекватна и может предсказывать результаты с точностью 95 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер. – М. : Наука, 1976. – 286 с.

2. Исагулов, А. З. Вывод уравнения прессования песчано-смоляных смесей и их реологические модели / А. З. Исагулов, В. Ю. Куликов // Известия высших учебных заведений. – Черная металлургия. – 2007. – № 6. – С. 52–56.

3. Developing technological process of obtaining quality casts / A. Issagulov [et al.] // Metalurgija (Croatia). – 2014. – Т. 53. – № 4. – С. 601–604.

4. О реологических свойствах песчано-смоляных форм / А. З. Исагулов [и др.] // Литейное производство. – 2019. – № 2. – С. 15–17.

5. Kvon, S. S. Using high-chromium iron as material for production of the equipping components of mine shafts / S. S. Kvon [et al.] // Metalurgija (Croatia). – 2016. – Т. 55. – № 2. – С. 206–208.

6. Studying microstructure of heat resistant steel deoxidized by barium ferrosilicon / A. Z. Issagulov [et al.] // Metalurgija (Croatia). – 2016. – Т. 55. – № 3. – С. 388–390.

© Куликов В. Ю., Квон Св. С.,
Ковалёва Т. В., Аринова С. К.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПОК ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

А. З. Исагулов¹, Т. В. Ковалёва¹, Н. И. Твердохлебов¹, Е. П. Щербакова¹

¹Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда,
Казахстан

Конструкция опоки играет значительную роль при изготовлении отливок литьем по газифицируемым моделям (ЛГМ). С целью исключения неравномерного вакуумирования вдоль поверхности модели или по общему песку газовые каналы было предложено расположить не только на дне опоки, но, и на боковых стенках опоки. Забор воздуха осуществляется с помощью гофрированного металлорукава. Применение металлорукава позволило решить проблему по засору воздухопроводов, гибкость металлорукава позволяет расположить его по периметру модели (модального куста) причем в несколько рядов.

Ключевые слова: опока, полистирол, отливка, качество, конструкция

В последнее время к литью предъявляются новые требования это уменьшение затратного механизма, повышение качества отливок снижение себестоимости литья. Этому в полной мере отвечает технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ), где в качестве исходного материала для изготовления моделей является полистирол. Такая технология успешно внедрена на ТОО «КМЗ им. Пархоменко» (г. Караганда).

Для получения отливок высокого качества необходимо нужно было найти материал, который был бы не дорогой и при этом было бы хорошее качество отливки. Кафедра «Нанотехнологии и металлургия» Карагандинского государственного технического университета совместно с сотрудниками ТОО «КМЗ им. Пархоменко» провела исследование свойств полистирола в лабораториях университета, с целью определения оптимальной марки полистирола для чугуновых и стальных отливок сложной конфигурации для литых деталей оборудования горнодобывающей промышлен-

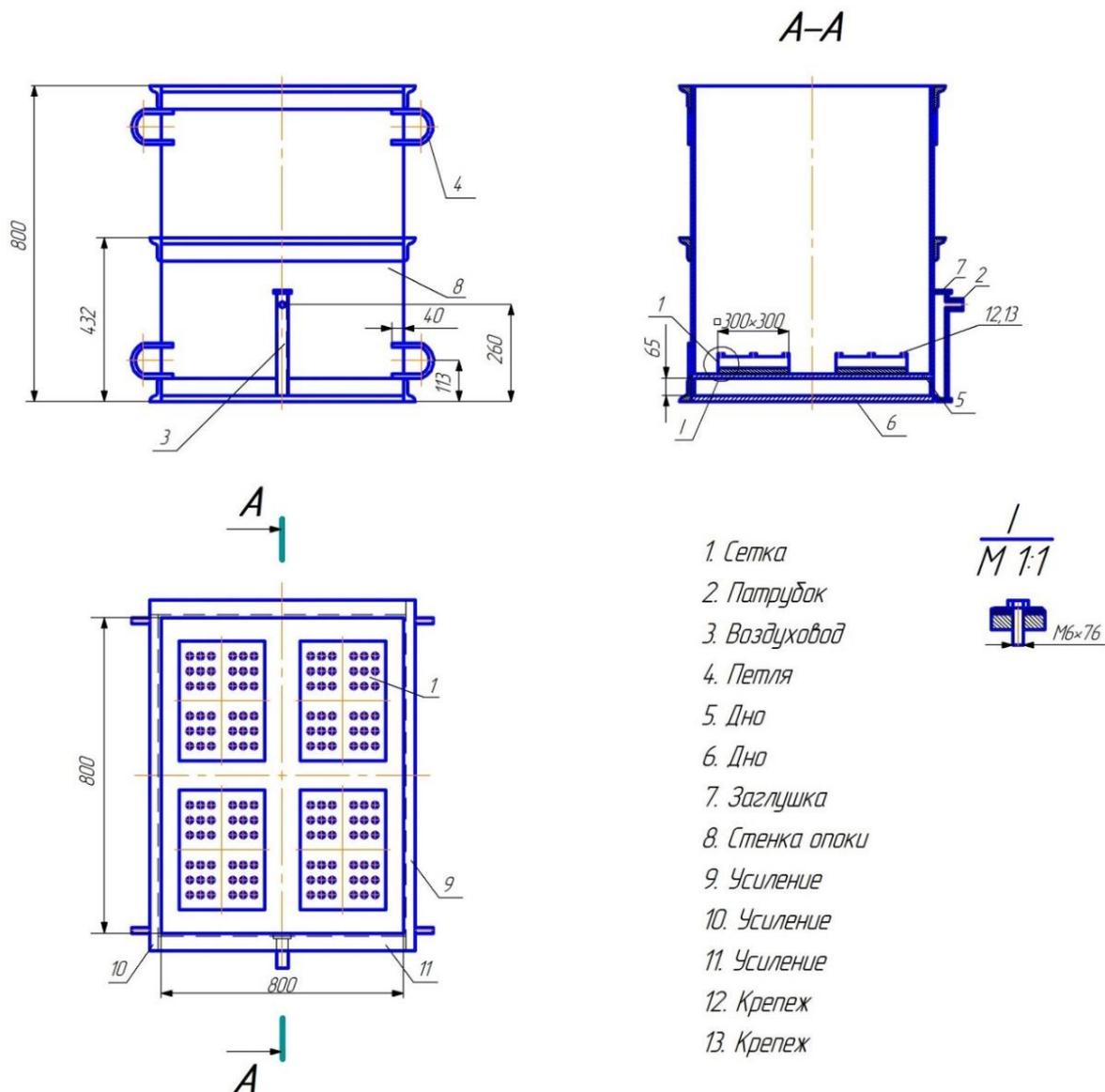
ности Республики Казахстан был проведен анализ применяемого материала в мировой практике.

Опорная оснастка необходима для поддержания требуемого режима вакуумирования по границе металл-форма. Основной задачей конструирования опоки является обеспечение перечисленных функций с минимальными при этом затратами. Были разработаны и испытаны несколько конструкций вакуумированных опок.

На рисунке 1 представлена вакуумированная опока, в которой забор воздуха происходит внизу. Толщина листа стенки такой опоки составляет 8 мм, контуры стенок усиливаются двумя рядами уголка, дно изготавливается из листа 10 мм. На дне установлены четыре сетки, которые защищены листами с отверстиями, через которые проходит воздух. Конструкция данной опоки имеет ряд недостатков, по жесткости удовлетворяла технологический показатель, однако одним из недостатков опоки является то, что мелкодисперсные песчинки, уносятся вместе с газами разложения и попада-

ют в каналы наряду с газообразными продуктами пенополистирола. Это резко уменьшает проходное сечение, а

это увеличивает количество литейного брака (металлический и земляной пригары, недоливы и др.).



1. Сетка
2. Патрубок
3. Воздуховод
4. Петля
5. Дно
6. Дно
7. Заглушка
8. Стенка опоки
9. Усиление
10. Усиление
11. Усиление
12. Крепеж
13. Крепеж

Рисунок 1 – Схема съема опоки

Для исключения ухудшения условий откачки газов, приходилось периодически чистить каналы и заменять сетки. Данную конструкцию опоки изготовить не представляется технически сложным, у нее относительно небольшая стоимость, но при эксплуатации она весьма трудозатратна, а основным минусом конст-

рукции является, то, что забор газов происходит снизу. Это приводит к неравномерному вакуумированию вдоль поверхности модели или по общему песку, что ухудшает экологию и качество отливки. Для устранения этих недостатков, была предложена новая конструкция вакуумированной опоки (рисунки 2, 3).

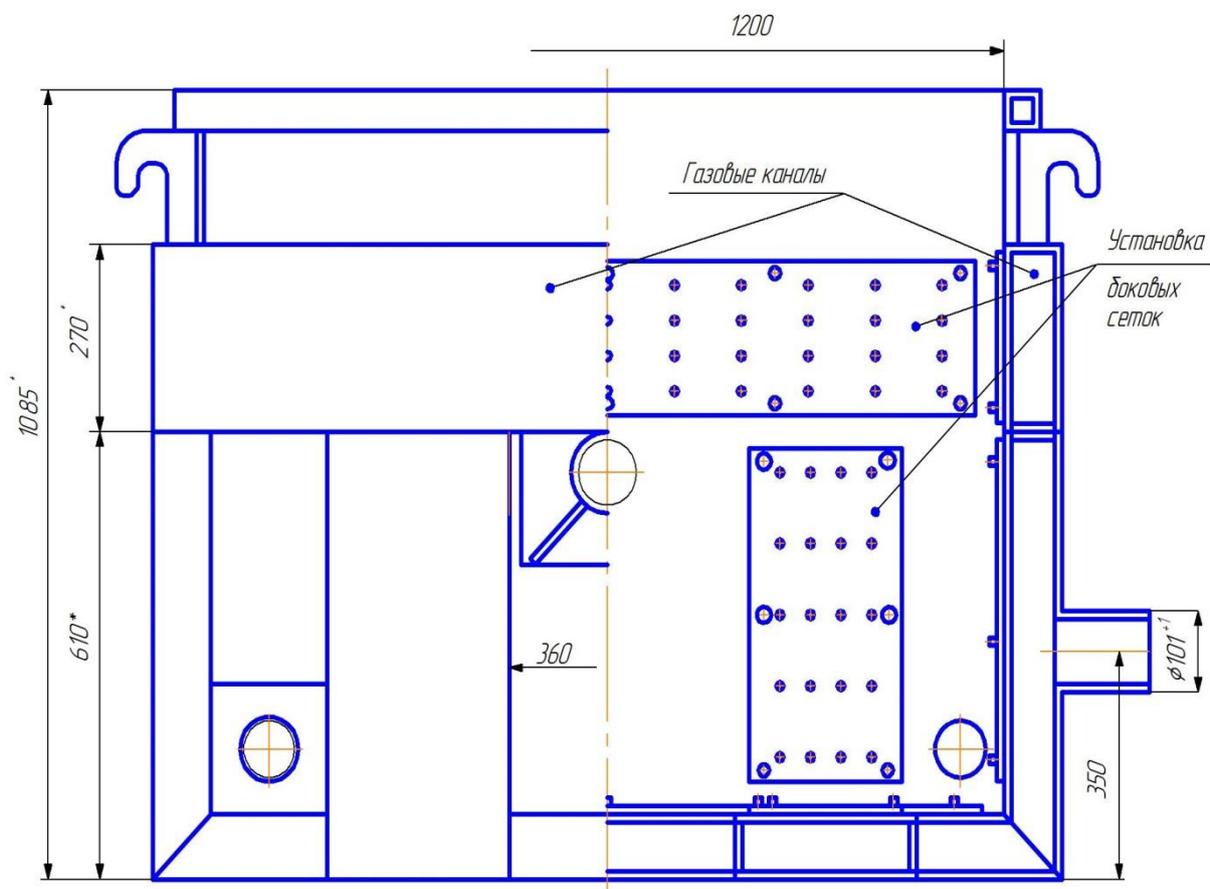


Рисунок 2 – Схема вакуумированной опоки с боковым и нижним забором воздуха



Рисунок 3 – Вакуумированная опока с боковым и нижним забором воздуха

Газовые каналы было предложено расположить не только на дне опоки, но, и на боковых стенках опоки. Трудоемкость изготовления и стоимость опоки значительно увеличилась, но при этом качество отливок улучшилось. Стенки опоки были изготовлены из листовой стали толщиной 6 мм, дно двойное из листовой стали толщиной 8 мм. При этом увеличилось количество газовых каналов, которые изготавливались из листовой стали толщиной 5 мм, которые в свою очередь служат усилением для боковых стенок. Дефекты отливок в такой конструкции опок снизился до 8–10 %, однако осталась проблема засорения газовых каналов и уменьшения про-

ходного сечения, что влияет на условия газов. Для решения данной проблемы приходится регулярно разбирать, очищать каналы и менять сетки. Это вызывает большие трудозатраты и увеличивает стоимость опочной оснастки. Тогда перед конструкторами и технологами была поставлена новая задача, как сделать опоку дешевой, надежную, и чтобы качество отливок было высокое. Такое решение [1, 2] совместно специалистами ТОО «КМЗ им. Пархоменко» и кафедры «Нанотехнологии и металлургии» Карагандинского государственного технического университета было найдено (рисунок 4).

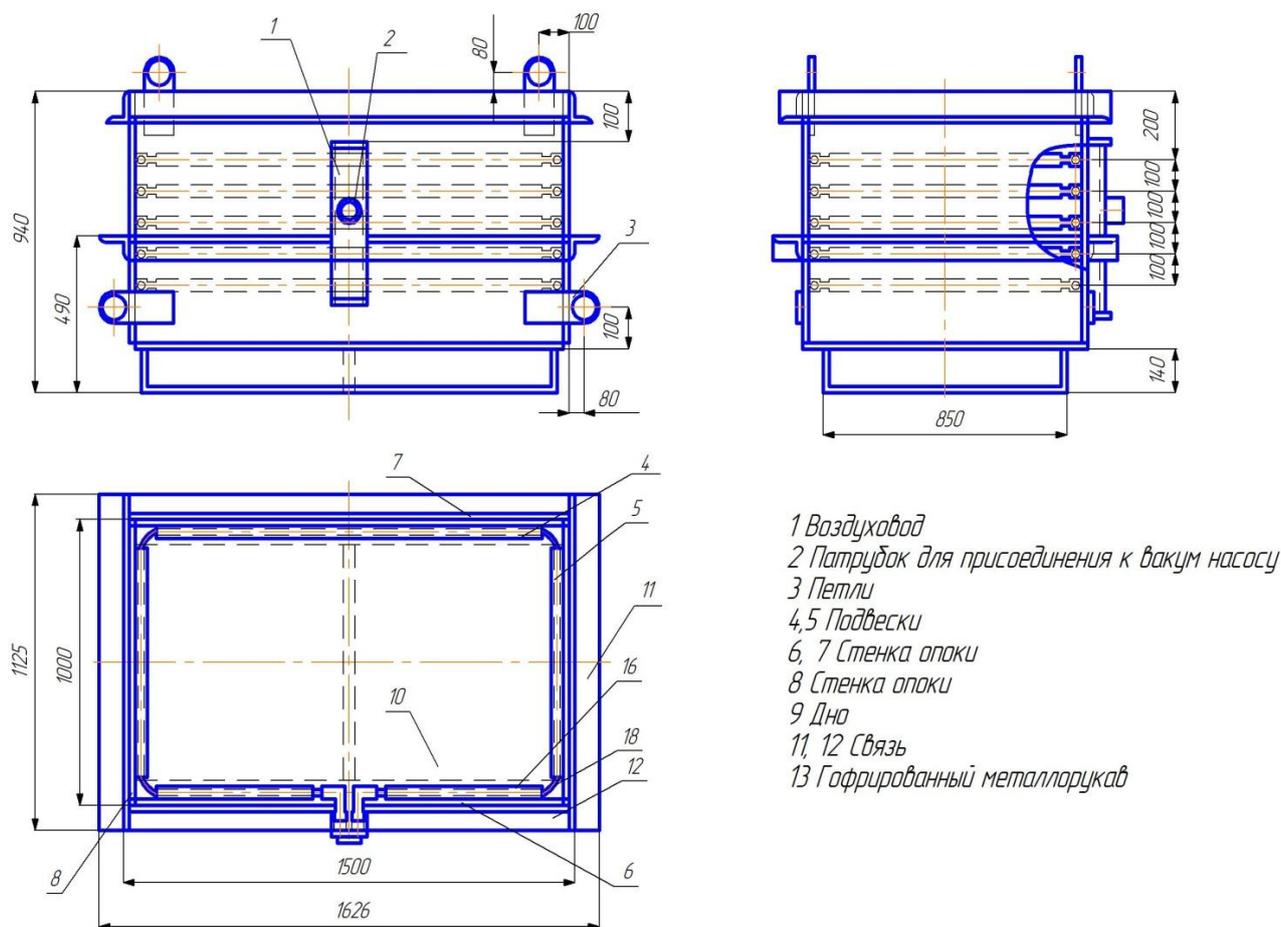


Рисунок 4 – Вакуумированная опока с гофрированным металлорукавом

Размер опоки составляет 1500×1000×800 мм, толщина ее стенок составляет 6 мм, днище является двойным и изготавливается из листа 8 мм. Это способствует улучшению виброуплотнения и позволяет опоку перемещать по рольгангу. Откачка газов осуществляется с помощью гофрированного металлорукава. Применение металлорукава позволило решить проблему по засору воздухопроводов, гибкость металлорукава позволяет расположить его по периметру модели (модального куста) причем в несколько рядов. Наиболее оптимальный вариант это 5 рядов с расстоянием между рядами 100 мм и время ва-

куумирования составляет от 1 до 3-х минут, это зависит от размера модели и количества моделей «в кусту». Преимущество данной конструкции вакуумированной опоки в следующем [3–6]:

1. Простота изготовления.
2. Забор воздуха осуществляется через межвитковые щели, а металлорукав не засоряется.
3. Уменьшается внедрение газа, что позволяет получать качественные отливки (дефекты, как показали эксперименты, составляет не более 3–4 %), при этом отсутствует науглероживание и газовые раковины (рисунок 5).



Рисунок 5 – Отливка, полученная с использованием опоки с гофрированным металлорукавом

4. Опоки с такой конструкцией возможно применять для изготовления литых заготовок с различными габаритами и сложной конфигурацией.

5. Дно опоки изготавливается из двойного толстого листа, что гарантирует равномерность контакта с плитой вибростола, и дает возможность перемещения опоки по рольгангам.

6. Эксперименты показали, что конструкция опоки надежная, универсальная практически обходится без ремонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалёва, Т. В. Разработка конструкции опоки с равномерным вакуумированием по поверхности модели / Т. В. Ковалёва [и др.] // В сборнике: Инновационные технологии реновации в машиностроении Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана ;

под общ. ред. В. Ю. Лавриненко. – М., 2019. – С. 329–332.

2. Литье по газифицируемым моделям в опоках с боковым и нижним забором воздуха / А. З. Исагулов [и др.] // Литейное производство. – 2016. – № 10. – С. 22–25.

3. Получение отливок литьем по газифицируемым моделям с использованием моделей из строительного полистирола / А. З. Исагулов [и др.] // Труды Университета. – 2019. – № 3 (68). – С. 30–32.

4. Совершенствование литья по газифицируемым моделям / А. З. Иса-

гулов [и др.] // Литейное производство. – 2014. – № 4. – С. 16–18.

5. Изготовление моделей в литье по газифицируемым моделям / А. З. Исагулов [и др.] // Литейное производство. – 2013. – № 4. – С. 33–34.

6. Пастухов, А. Г. Оценка напряженно-деформированного состояния сегмента прессвалкового измельчителя / А. Г. Пастухов, А. Г. Минасян, О. А. Шарая // Технология машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 43–46.

© Исагулов А. З., Ковалёва Т. В.,

Твердохлебов Н. И., Щербакова Е. П.

**РЕЦЕПТУРА СОСТАВА ПЕСЧАНО-СМОЛЯНОЙ СМЕСИ
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВАРИАТИВНОГО ДАВЛЕНИЯ**

В. Ю. Куликов¹, Т. В. Ковалёва¹, Е. Н. Еремин²

¹*Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан*

²*Омский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан*

Подобран состав основных и вспомогательных составляющих песчано-смоляной смеси с точки зрения обеспечения высокой прочности и газопроницаемости и низкой шероховатости форм. Особенностью технологического режима является использование вариативного давления: одновременно с засыпкой песчано-смоляной смеси на нагретую до 230–250 °С модельную плиту посредством плиты, вмонтированной в бункер, на смесь подавали давление 0,25 МПа. Спустя 10 секунд давление повышали до 0,35 МПа. А еще через 10 секунд давление снижается до 0,2 МПа.

Ключевые слова: оболочка, пульвербакелит, песок, керосин, уайт-спирит, шероховатость, прочность, газопроницаемость.

Песчано-смоляные литейные формы обеспечивают получение качественных отливок [1–4]. Основными компонентами смеси являются кварцевый песок и связующее – пульвербакелит [5–6]. Наиболее распространенным является пульвербакелит марки СФ-011. Кроме того, в состав смеси входят керосин и растворитель (технический спирт) [6–7]. В серии экспериментов определяли наиболее целесообразное применение рецептуры состава смеси (таблица 1).

В серии экспериментов определяли влияние содержания пульвербакелита на механические и технологические свойства смеси. Технологический процесс, ранее определенный [8–10], выглядит так: после процесса смешивания компонентов формовочной песчано-смоляной смеси, она засыпается в бункер формовочной машины. После осуществляется переворачивание бункера, наполненного смесью на модельную плиту с моде-

лями отливок, предварительно нагретую до 230 °С.

Таблица 1 – Используемые в исследованиях составы смеси

Наименование компонента	Процентное содержание в смеси, %
Кварцевый песок марки 1К0315	0–100
Кварцевый песок марки 1К0315	0–100
Пульвербакелит СФ-011А	1–8 (сверх 100 %)
Керосин	0–1 (сверх 100 %)
Уайт-спирит	1–5 (сверх 100 %)
Борная кислота	0–0,5 (сверх 100 %)

Вместе с тем, одновременно посредством плиты, вмонтированной в бункер, на смесь подавали давление 0,25 МПа. Спустя 10 секунд давление повышали до 0,35 МПа. А еще через 10 секунд давление снижается до 0,2 МПа. В результате таких технологических режимов формируется оболочка толщиной 10–12 мм. После сня-

тия с модельной плиты, оболочка спекалась при температуре 320–340 °С в течение 2 минут.

Исследовали зависимость прочности и газопроницаемости песчано-смоляной формы от концентрации пульвербакелита в смеси (таблица 2), что по данной технологии содержание свыше 4–5 процентов слабо влияет на увеличение прочности. Газопроницаемость же остаётся в пределах технологически необходимой при всех использованных концентрациях смолы.

Таблица 2 – Влияние содержания связующего на прочность и газопроницаемость

Содержание пульвербакелита, %	Прочность на сжатие, МПа	Газопроницаемость, ед.
3	10,9	158
4	13,9	144
5	14,3	133
6	14,7	126
7	14,9	119

Очевидно, что для достижения необходимых технологических показателей смеси при использованной технологии достаточно использовать 4–5 % связующего. Очевидно, что используя в смеси меньшее содержание связующего, адгезия и когезия её составляющих недостаточно велика для того, чтобы выдержать заливку формы расплавом. Более высокое же содержание нецелесообразно, так как технологические показатели формы не повышаются, а стоимость такой формы будут возрастать. Содержание пульвербакелита же свыше 7–8 % будет приводить к образованию избыточной жидкой фазы и прочность сис-

темы при этом будут снижаться.

Наиболее целесообразным определено использование кварцевых песков разных фракций (таблица 3). Большая фракция – 70 %, меньшая – 30 %. Определяли влияние концентрации фракций песка (1K0315 и 1K02) в смеси на характеристики прочности и газопроницаемости. Здесь концентрация связующего (пульвербакелит) – 4,5 %.

Оптимальное соотношение, очевидно, связано с наиболее плотной упаковкой частиц песка и наибольшим числом контактов в данной укладке. При этом газопроницаемость остается в пределах технологически необходимых показателей (порядка 100 единиц). Это связано в целом с тем, что песчано-смоляная смесь, уплотненная с помощью достаточно хорошо и равномерно способна пропускать газы.

Также исследовали количественное содержание керосина в смеси (таблица 4). Известно, что назначение керосина – уменьшение прилипаемости компонентов смеси к поверхности моделей и модельной плиты. Состав смеси в этих экспериментах был следующий: кварцевый песок 1K315 – 70 %; кварцевый песок 1K02 – 30 %; пульвербакелит – 4,5 % (свыше 100 %), керосин – 0-1 % (свыше 100 %).

Наиболее положительную динамику показывает содержание керосина 0,2–0,4 %. Больше содержание приводит к повышенному газообразованию, меньше – приводит к повышению прилипаемости и, соответ-

венно, поверхность формы при ее съеме с модельной плиты, становится значительно более неровной (рисунок 1). При этом значительного влияния на прочность и газопроницаемость керосин не оказывает.

Таблица 3 – Зависимость прочности и газопроницаемости оболочки от соотношения фракций песка

Соотношение фракций 1К0315 и 1К02 в смеси	Прочность на сжатие, МПа	Газопроницаемость, ед.
100:0	12,5	148
30:70	11,9	111
50:50	13,3	118
70:30	14,6	129
0:100	10,7	102

Таблица 4 – Влияние содержания керосина на прочность, газопроницаемость и шероховатость

Содержание керосина, %	Прочность на сжатие, МПа	Газопроницаемость, ед.	Шероховатость формы, мкм
0	14,5	132	165
0,2	14,6	130	106
0,4	14,7	128	96
0,6	14,5	122	95
0,8	13,8	115	95
1,0	13,0	106	94

Другой добавкой, используемой в смеси являются уайт-спирит или технический спирт. Они используются как увлажнители. Исследовали влияние концентрации увлажнителя на технологические свойства оболочки (таблица 5).

Таблица 5 – Влияние содержания уайт-спирита на прочность, газопроницаемость и шероховатость

Концентрация уайт-спирита, %	Прочность на сжатие, МПа	Газопроницаемость, ед.	Шероховатость формы, мкм
0	14,9	108	139
1	14,6	122	114
2	14,1	138	98
3	13,1	135	96
4	11,9	119	95
5	10,2	104	94

В качестве увлажнителя использовали уайт-спирит. Исследования показали, что целесообразно использовать 2–3 % увлажнителя. Превышение данного показателя приводит к разупрочнению и при заливке к повышенному газообразованию, а более низкое его содержание способствует заполнению пылевидной фракции песка пространства между частицами песка и смолы и, следовательно, значительно ухудшает газопроницаемость, что в конечном итоге также приводит к газовой пористости в отливках.



Рисунок 1 – Оболочковая форма при отсутствии содержания керосина в составе

Шероховатость также в указанных пределах содержания увлажнителя улучшается. Меньшее количество уайт-спирита приводит к наличию на приграничном к отливке слое формы повышенного содержания тонкодисперсной фракции песка, большое же количество приводит к повышенному газообразованию и возникновению на поверхности отливки вследствие этого неровностей.

Также исследовали влияние содержания борной кислоты на свойства оболочковой формы (таблица 6). Исследования показали, что ее использование в форме при разрабатываемом технологическом режиме не обязательно, так как она практически не влияет на показатели технологичности оболочки.

Таблица 6 – Влияние содержания борной кислоты на прочность, газопроницаемость и шероховатость

Борная кислота, %	Прочность на сжатие, МПа	Газопроницаемость, ед.	Шероховатость формы, мкм
0	14,2	141	118
0,2	14,0	149	104
0,4	14,0	146	106
0,6	13,8	137	108
0,8	11,8	116	111
1,0	10,4	103	112

На начальных этапах газопроницаемость немного улучшилась, очевидно, борная кислота играла роль увлажнителя, однако затем ее наличие стало приводить к видимому ухудшению газопроницаемости, в результате заполнения пор. Исследования пока-

зали, что значительное содержания борной кислоты (близкое к 1 %) также снижает прочность формы.

Очевидно, что повышенная остаточная влага песка (более 0,4 %) приводит к разупрочнению и снижению адгезионных свойств смолы. Однако, полное исключение влаги приводит к некоторому разупрочнению, так как влага является увлажнителем, к тому же ухудшается газопроницаемость. Также к ухудшению газопроницаемости приводит и высокое содержание влаги, т. к. она заполняет поры между частицами песка и смолы. С точки зрения газопроницаемости наиболее оптимальным является показатель остаточной влажности песка 0,2–0,4 %.

Таким образом, наиболее оптимальным составом для формообразования с использованием вариативного давления признан следующий (таблица 7):

Таблица 7 – Оптимальный состав песчано-смоляной смеси

Наименование компонента	Процентное содержание в смеси, %
Кварцевый песок марки 1К0315	70
Кварцевый песок марки 1К02	30
Пульвербакелит СФ-011А	4,5 (свыше 100 %)
Керосин	0,2–0,4 (свыше 100 %)
Уайт-спирит	2–3 (свыше 100 %)
Борная кислота	0–0,2 (свыше 100 %)

Данные исследования проведены в рамках реализации гранта Комитета науки МОН РК АР05130026

«Разработка и внедрение производства песчано-смоляных форм при нестационарном давлении с целью улучшения качества готовой продукции».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гуляев, Б. Б. Формовочные процессы / Б. Б. Гуляев, О. А. Корнюшкин, А. В. Кузин – Л. : Машиностроение, 1987. – 264 с.

2. Волков, Д. А. Литье в оболочковые формы и его универсальность в мелкосерийном и серийном производстве / Д. А. Волков, А. Д. Волков, А. В. Ефименко // Литейщик России. – 2016. – № 4. – С. 26–30.

3. Влияние степени спекания оболочковой формы на ее механические и технологические свойства / В. Ю. Куликов [и др.] // Литейное производство. – 2018. – № 4. – С. 32–34.

4. Пастухов, А. Г. Оценка напряженно-деформированного состояния сегмента прессвалкового измельчителя / А. Г. Пастухов, А. Г. Минасян, О. А. Шарая // Технология машиностроения. – 2016. – № 3. – С. 43–46.

4. Водолазская, Н. К. вопросу повышения надежности и безопасной эксплуатации мостовых и металлургических кранов за счет оценки их остаточного ресурса / Н. К. Водолазская // Практика и перспективы развития

партнерства в сфере высшей школы. – Т. 3. – Донецк : ДонНТУ, 2013. – Т. 3. – Донецк : ДонНТУ – 187 с.

5. О реологических свойствах песчано-смоляных форм / А. З. Исагулов [и др.] // Литейное производство. – 2019. – № 2. – С. 15–17.

6. Improving production technology of tube steel grades in converter process / P. V. Kovalev [et al.] // Metalurgija (Croatia). – 2016. – Т. 55. – № 4. – С. 715–718.

7. Using high-chromium iron as material for production of the equipping components of mine shafts / S. S. Kvon [et al.] // Metalurgija (Zagreb, Croatia). – 2016. – Т. 55. – № 2. – С. 206–208.

8. Исследования влияния режимов прессования на параметры пористой структуры формы / В. Ю. Куликов [и др.] // Литейщик России. – 2018. – № 8. – С. 9–14.

9. Повышение равномерности плотности и увеличение прочности оболочковой формы / В. Ю. Куликов [и др.] // Литейное производство. – 2018. – № 3. – С. 27–29.

10. Разработка состава песчано-смоляной смеси для формообразования в условиях вариативного прессования / В. Ю. Куликов [и др.] // Литейное производство. – 2019. – № 4. – С. 22–26.

© Куликов В. Ю., Ковалёва Т. В., Еремин Е. Н.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКИХ И ИЗОГНУТЫХ ПЛАСТИН ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

А. А. Белоусова, Е. С. Ананьева

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Объектами исследования в работе являются слоистые композиты на основе термопластичных связующих и технология изготовления панели интерьера пассажирского самолета.

Изучение упруго-прочностных характеристик конструкционных стеклопластиков на основе термопластичных связующих, таких как полиэтилен высокого давления (ПЭВД) и полиамид-6 (ПА-6) за счет изменений величины адгезионного взаимодействия компонентов КМ сочетанием аппретирования поверхности армирующих волокон полимерными аппретами.

В результате была разработана технология изготовления панелей из стеклопластика на основе термопластичных связующих, изучена эффективность термопластичных связующих путем испытаний опытных образцов.

***Ключевые слова:** стекловолокно, термопластичное связующее, волокнистый наполнитель, технология, стеклянное волокно, слоистые термопласты.*

Композиционный материал представляет собой систему, которая состоит из матрицы, армирующего наполнителя и межфазного слоя. Матрица – полимерное связующее, соединяющее компоненты в монолитный материал и сохраняющее форму изделия. Задачи армирующего наполнителя заключаются в достижении высокой жесткости, прочности, что приводит к снижению ползучести. Так же армирующий наполнитель повышает теплостойкость и принимает на себя основные нагрузки при эксплуатации изделия. Межфазный слой или граница раздела служит для передачи нагрузки от матрицы к наполнителю при нагружении. В композиционном материале главную роль играет матрица – связующее, которое соединяет компоненты КМ.

Термопласты – это полимерные материалы, способные многократно размягчаться и затвердевать. К термопластам относят полиэтилен, поли-

пропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиамид и другие. Выбор термопластов определяют условиями эксплуатации изделий, технологическими свойствами полимера, доступностью материала и способностью окрашиваться. Выбор термопластичной матрицы обусловлен тем, что для них характерна высокая производительность; формование деталей менее энергоёмко; возможность формования крупных сложных деталей; возможна вторичная переработка; пониженная горючесть, дымовыделение и токсичность; сочетание высокой прочности и теплостойкости с высокой ударной прочностью и трещиностойкостью. В таблице 1 представлены варианты материалов для использования в качестве связующего. Красным цветом выделены выбранные материалы в качестве связующего.

Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) прочный материал, прочность составляет 18,24 МПа, мягкий,

имеет высокую тягучесть. Полиамид пожаробезопасен, он не горит, а плавится. Этот материал обладает стой-

костью к ультрафиолетовым лучам и грибку, хорошо поддается для окрашивания в разные цвета.

Таблица 1 – Физические характеристики термопластичных матриц

Характеристика	Матрица					
	ПЭВД	ПЭНД	ПА-6	ПП	ПВХ	
Плотность (при 25 °С) ρ , кг/м ³	910–930	959–960	1130–1140	910–950	400–700	
Модуль упругости при растяжении E, ГПа	0,09–0,01	0,55–0,65	0,30–0,40	0,80–1,18	2,60–3,00	
Временное сопротивление σ_v , МПа	18,24	13,00	46,00	29,18	54,00	
Относительное удлинение при разрыве δ , %	50–600	5–1000	70–110	10–800	5–100	
Температура плавления $T_{пл}$, °С	118	128	170	–	85	
Ударная вязкость, кДж/м ²	с надрезом	не разр.	не разр.	5–10	3,5–80,0	2–10
	без надреза	не разр.	не разр.	не разр.	30–80	40–80
Толщина, мм	0,10	0,10	0,10	0,12	0,20	

Следующим компонентом композиционного материала является наполнитель. В таблице 2 представлены возможные наполнители для термопластичной матрицы. Красным выделен выбранный материал.

Стекланная ткань обладает стойкостью к ультрафиолету, к влажной среде, модуль упругости при растяжении порядка 50–95 ГПа. Термостойкость колеблется от 200 до 700 °С. Стеклоткань экологически чистый материал, имеет хорошую адгезию с термопластичным связующим.

Из всех разновидностей стеклотканей наибольшее применение нашла ткань из алюмоборосиликатного стекла. Поверхностный слой стекла может вступать в химические реакции с полимерными аппретами и матрицей. *Аппрет* – химическое вещество или композиция, которая наносится на поверхность волокон с целью придания им определенных свойств. Апп-

претирующее вещество нужно для увеличения химических и физических связей между матрицей и наполнителем, для облегчения физического взаимодействия компонентов композиционного материала и для снижения остаточных внутренних напряжений [8].

Так как аппрет непосредственно принимает участие в формировании межфазного слоя, принято считать, что в составе композита должны быть связующее, наполнитель и аппрет.

Стекловолокно не только повышает прочность и деформационные свойства термопластов, но и позволяет снизить коэффициент теплового расширения, усадку в процессе изготовления, иногда повышает температуру стеклования. Волокна покрывают технологическим замасливателем, чтобы предохранить волокна от разрушений и улучшить текстильные свойства волокна.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики наполнителей для термопластичных матриц

Характеристика	Значение		
	Стеклоянная ткань	Углеродная ткань	Базальтовое волокно
Плотность (при 25 °С) ρ , кг/м ³	2540	2400	2600
Модуль упругости при растяжении E, ГПа	50,0–95,0	200,0–500,0	95,0–100,0
Временное сопротивление σ_b , ГПа	3,45	4,00	4,84
Относительное удлинение при разрыве δ , %	2,40	1,70	3,20
Толщина, мм	0,18	0,10	0,26

Замасливатели перед введением волокна в матрицу следует удалять. Существуют замасливатели, которые не требуют удаления, они играют роль аппретов.

Немаловажную роль в формировании свойств КМ играет межфазный слой на границе раздела матрицы и армирующей фазы. Формирование межфазного слоя занимает определенное время, длительность которого зависит от вязкости полимера, его молекулярной массы, физико-химических свойств, размеров дефектов в волокне.

Чтобы добиться хороших прочностных свойств композиционного материала, нужно обеспечить эффективную передачу нагрузки от волокна к волокну через границу раздела. Для этого должны учитываться следующие факторы:

- 1) смачиваемость поверхности волокна;
- 2) химическое взаимодействие поверхности наполнителя с матрицей;
- 3) образование промежуточного слоя между матрицей и наполнителем со средним значением модуля упругости;

4) действие трех факторов одновременно.

Адгезионная прочность материала повышается с созданием межфазного слоя.

Исследование влияния модификаторов на полиэтилен высокого давления

Для оценки характеристик стеклопластика на основе термопластичных связующих с аппретами бутадиен-нитрильным каучуком (СКН-8) и поливиниловым спиртом (ПВС) был изготовлен образец, его подвергали растяжению на разрывной машине. На рисунке 1 изображена схема изготовления образца из пленок и стеклоткани.



Рисунок 1 – Схема формирования образцов

Эффективность добавок оценивалось по изменению упругопрочностных характеристик (предел прочности при растяжении (рису-

нок 2) и модуль упругости (рисунок 3) в зависимости от концентрации модификатора СКН-8), и релаксационно-диссипативных свойств

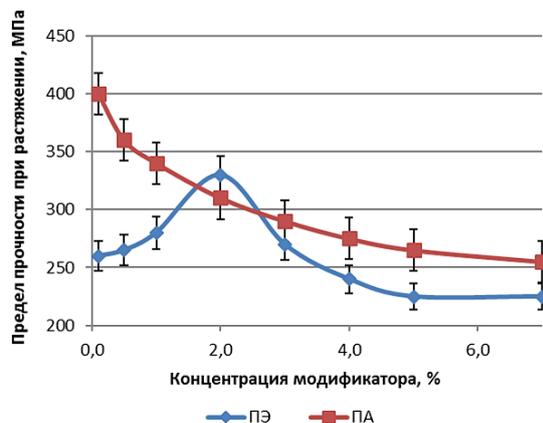


Рисунок 2 - Зависимость предела прочности при растяжении однослойных пластиков на основе стекловолокна от концентрации каучука

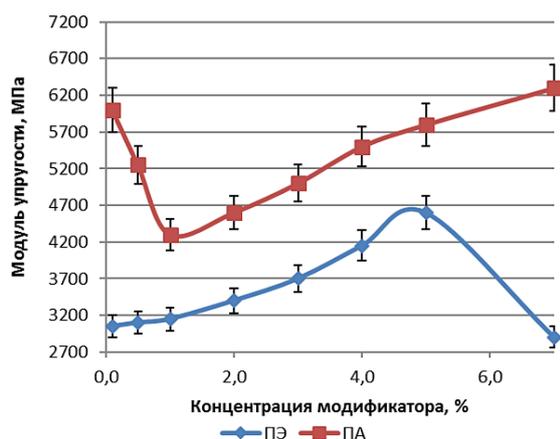


Рисунок 3 - Зависимость модуля упругости однослойных пластиков на основе стекловолокна от концентрации каучука

Характеры зависимости физико-механических свойств стеклопластика на основе ПЭ- и ПА-матриц сильно различаются при нанесении на поверхность тканого наполнителя Э-180зам. небольшого количества каучукового аппрета СКН-8.

Зависимости предела прочности при растяжении СП с ПЭ- и ПА-матрицей от концентрации ПВС представлены на рисунке 6.

(относительная деформация (рисунок 4) и работа разрушения (рисунок 5) в зависимости от концентрации модификатора СКН-8).

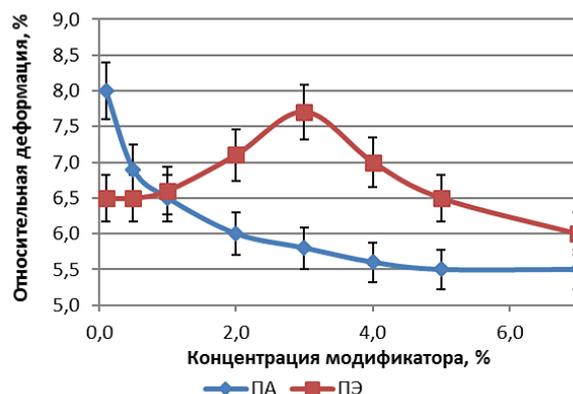


Рисунок 4 - Зависимость относительной деформации однослойных пластиков на основе стекловолокна от концентрации каучука

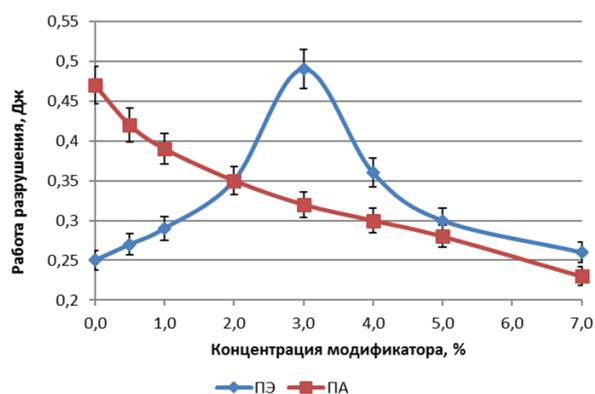


Рисунок 5 - Зависимость относительной деформации однослойных пластиков на основе стекловолокна от концентрации каучука

Зависимости модуля упругости стеклопластика на основе ПЭ- и ПА-матрицы от концентрации модификатора изображены на рисунке 7.

На рисунке 8 можно отследить зависимости относительных деформаций термопластов от концентрации ПВС. На рисунке 9 представлена зависимость работы разрушения стеклопластика с ПЭ- и ПА-матрицей от содержания модификатора в нем.

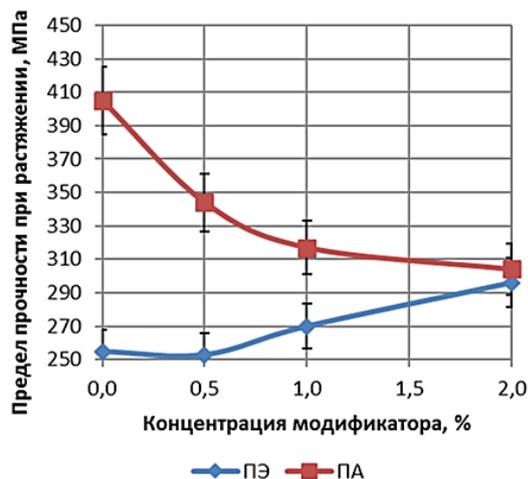


Рисунок 6 - Зависимость предела прочности при растяжении стеклопластика от концентрации модификатора

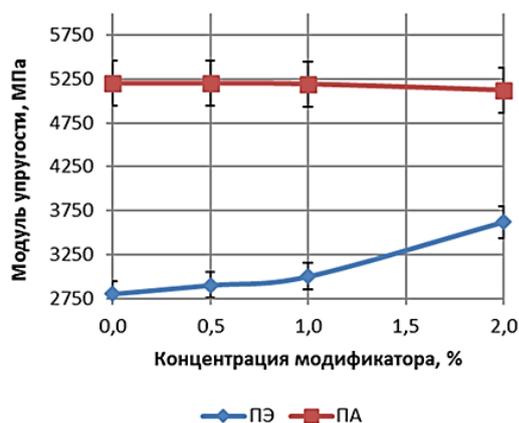


Рисунок 7 - Зависимость модуля упругости стеклопластика от концентрации модификатора

Обработка стеклоткани каучуком СКН-8 снижает прочность и относительную деформацию стеклопластика на основе ПА-матрицы, но увеличивает модуль упругости. А в стеклопластиках на основе ПЭ-матрицы двухпроцентный раствор каучука СКН-8 увеличивает и прочность, и модуль упругости.

В случае ПЭ-матрицы и добавки неполярного каучука СКН-8 и добавки полярного ПВС значительно повышают упруго-прочностные и релаксационно-диссипативные свойства стеклопластика, а в случае ПА-

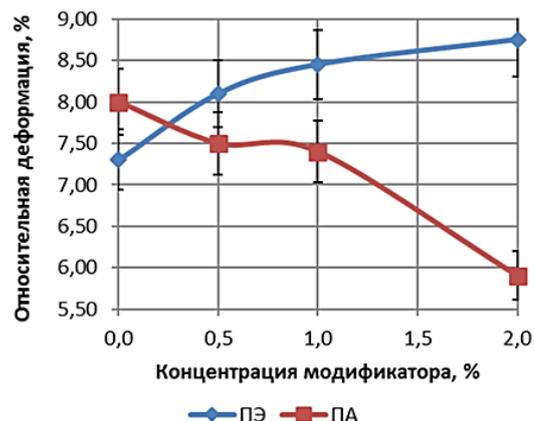


Рисунок 8 - Зависимость относительной деформации стеклопластика от концентрации модификатора

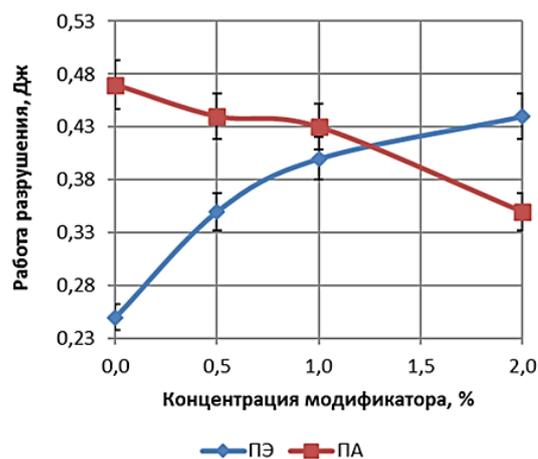


Рисунок 9 - Зависимость работы разрушения стеклопластика от концентрации модификатора

матрицы, наоборот, эти характеристики снижаются.

Технологический процесс изготовления плоских и изогнутых пластин из композитов на основе термопластичных матриц

Технология изготовления панели изображена на рисунке 10.

Изготовления панелей сложной формы осуществляется формованием в матрицах с нагревом в автоклавах.

Основные характеристики панели:

- высокая прочность;
- широкий выбор сердечников, а также облицовочных покрытий дос-

тупных для общего пользования сэндвич-панелей;

- допустимая температура эксплуатации от $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Размеры панели:

- толщина панели – $50,8\text{ мм}$;
- толщина обшивки – $2,54\text{ мм}$;
- ширина – 1219 мм .

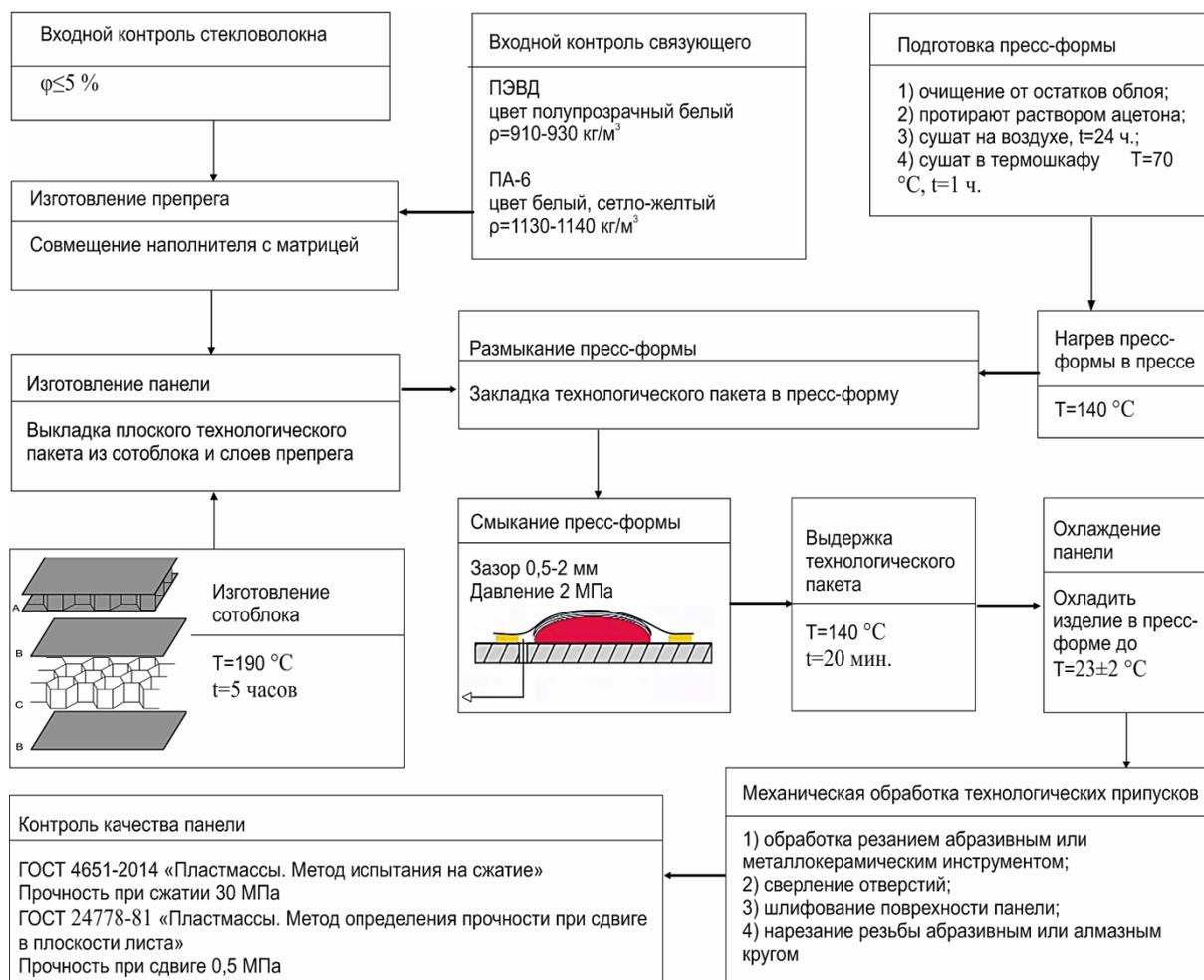


Рисунок 10 – Схема изготовления панели

Панели интерьера самолета изготавливают формованием в матрицах с нагревом в автоклавах. Этапы формования:

1) изготавливают сотовый наполнитель:

- готовят препрег из стеклоткани.

Ширина полосы $4,0 \pm 0,5\text{ мм}$;

- просушивают препрег последовательно при температурах $40 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- протягивают препрег со скоростью 3 м/мин ;

- выдерживают в термошкафу при температуре $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 часов;

- обрабатывают края – обрезают припуски 5 мм от края;

- проверка качества: цвет полупрозрачный, форма шестигранная.

2) нагрев пресс-формы до $140\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- 3) закладывают в пресс-форму препрег, между ними сотовый напол-

нитель, закрывают форму и создают давление 2 МПа;

4) охлаждают деталь вместе с пресс-формой до температуры 23 ± 2 °С;

5) механическая обработка краев панели, сверление отверстий для креплений, шлифовка поверхности, нарезание резьбы;

6) контроль качества панели: нормально возгораемый материал; испытание на сжатие – прочность при сжатии составляет 30 МПа;

7) испытание на сдвиг – прочность при сдвиге 0,5 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеева, Н. В. Изучение адгезии термопластичных матриц к волокнам. Пластические массы / Н. В. Корнеева, Ю. А. Горбаткина. – 1992. – № 5. – С. 12–13.

2. Фротшер, Г. Химия и физическая химия текстильных вспомогательных материалов ; т. 2. / Г. Фротшер. – М. : Государственное научно-

техническое издательство литературы по легкой промышленности, 1958. – 200 с.

3. Влияние поверхностной обработки армирующей стеклоткани на свойства стеклопластиков на основе термопластичной матрицы. Химическая обработка. Пластические массы / Ю. Н. Смирнов [и др.]. – 2004. – № 8. – С. 3–7.

4. Оптимизация механических свойств композиции стеклонаполненного полипропилена путем формирования межфазного взаимодействия. Пластические массы / И. А. Сафрыгина [и др.]. – 1992. – № 5. – С. 29–31.

5. Разработка водорастворимых полимеров для отделки текстильных материалов. Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов ; Междунар. науч. конф. / Б. Р. Таусарова [и др.]. – СПб. : ФГБОУВПО «СПГУТД», 2012. – С. 167.

© Белоусова А. А., Ананьева Е. С., 2019.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АРМИРОВАННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

В. В. Огилько, Е. С. Ананьева

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

Целью работы является исследование влияния углеродных нанотрубок на физико-механические свойства армированных углепластиков.

В качестве метода исследования использован: метод испытаний на растяжение, межслойный сдвиг и трехточечный изгиб. Испытание произведено в соответствии ГОСТ Р 50583-93 «Материалы композиционные полимерные. ГОСТ Р 57407-2019 Волокна углеродные. Общие технические требования и методы испытаний. ГОСТ 32659-2014. Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки. ГОСТ Р 56805-2019 Композиты полимерные. Методы определения механических характеристик при изгибе.

В результате испытаний было исследовано влияние модифицированного нанотрубками связующего на армированный углепластик.

Ключевые слова: *углеродные нанотрубки, модифицированное связующее, армированный углепластик.*

В настоящее время существует большой спрос на композиционные материалы (КМ). Объясняется это стремление в необходимости применять высокопрочные и высококомодульные материалы, с относительно малым весом, способные к длительной эксплуатации в жестких условиях под воздействием высоких температур, больших и разнообразных механических нагрузок, химически активных сред, во всех областях промышленности.

Создание и исследование новых, перспективных материалов остаётся главной задачей в механике композиционных материалов.

Перспективы их применения связаны с усилением механических прочностных свойств материалов и повышением процента реализации прочностных свойств армирующего элемента в пластике.

Для углепластиков, решение этой проблемы приведет к возможности широкого их применения в несущих конструкциях с повышенной степенью надежности и обеспечит стабильность эксплуатационных свойств при воздействии высоких температур.

Известно, что свойства полимерного КМ существенно зависят от характеристик межфазного слоя, образовавшегося вследствие адгезионного взаимодействия поверхности наполнителя с полимерной матрицей. Адгезионная прочность вносит наибольший вклад в прочность КМ и существенно зависит от взаимодействия армирующая фаза – связующее.

Следовательно, можно утверждать, что важнейшим условием получения высокопрочных и теплостойких материалов на основе углеродных волокон (УВ) является достижение оптимальной связанности матрицы и их поверхности. Таким образом, воз-

возможность варьирования силой межфазного взаимодействия компонентов приведет к целенаправленному изменению механизма разрушения.

Конструктивные особенности, различные типы дефектов обеспечивают разнообразие процессов разрушения и их взаимодействие, что затрудняет прогнозирование прочности и долговечности композитов. При рассмотрении волокнистых полимерных композиционных материалов выделяют четыре основных процесса разрушения: разрушение волокон; разрушение матрицы в направлении, совпадающем с направлением волокон; разрушение матрицы в направлении, перпендикулярном направлению волокон; расслаивание на границе раздела волокно-матрица. Если исключить процесс разрушения из-за нарушения связи между волокном и матрицей, то в однонаправленном армированном слое прочность и механизм разрушения будут определяться характером приложенной нагрузки:

а) при растяжении вдоль волокон механизмом разрушения будет накопление разрывов волокон, прочность КМ определяется прочностью волокон;

б) при растяжении поперек волокон происходит образование продольных трещин матрицы, прочность определяется пределом прочности матрицы;

в) при сжатии по механизму разрушения зерна – прочность на изгиб, определяемая прочностью волокон на сжатие и упругостью матрицы;

г) при сжатии поперек волокон прочность определяется прочностью матрицы на сжатие;

д) при сдвиге – зависит от силы сдвига матрицы.

Следовательно, анализ прочности всего пакета КМ осуществляется путем последовательного рассмотрения разрушения в отдельных слоях. Однако в реальных композитных системах нельзя пренебрегать условиями на интерфейсе. Состояние межфазного слоя существенно определит механизм разрушения материала. Обратное возможно только если оптимальной связанности на границе раздела. Таким образом, разнообразие процессов разрушения в ПКМ обусловлено особенностью строения композитов, свойствами компонентов материала, порядком укладки волокон, прочностью сцепления на межфазной границе раздела и условиями нагружения [9].

Целенаправленное изменение вышеуказанных факторов позволяет регулировать кинетику и характер протекания процесса разрушения материала

Не высокая степень реализации прочностных характеристик ПКМ обусловлена низкими упруго-прочностными характеристиками полимерной матрицы, что влечёт за собой нарушение монолитности всего материала. Углепластик склонен к хрупкому разрушению, что является большой проблемой при его использовании.

Данная проблема в значительной степени проявляется в потребности промышленности в усовершенствованных материалах и технологиях с

одной стороны, и возможности, появившиеся при создании новых сырьевых материалов и оборудования с другой стороны. Для повышения свойств материала применяют различные методы модификации, например усовершенствование материала с помощью модифицирования связующего.

Целью работы было исследование влияния углеродных нанотрубок на физико-механические свойства арми-

рованных углепластиков, а задачей являлось разработка технологии модификации углепластика с целью регулирования, улучшения его свойств, таких как межслойный сдвиг, растяжение и изгиб.

Для испытания были изготовлены образцы в количестве 5 шт. на каждый метод. Была разработана методика испытания.

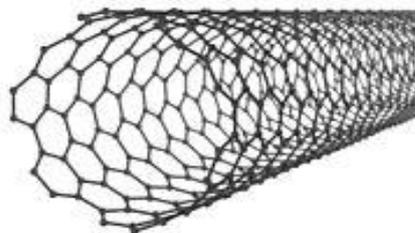
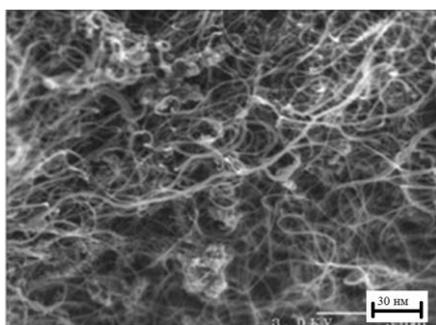


Рисунок 1 – Схематическое изображение нанотрубки

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования механических свойств углепластика с модифицированным многослойными углеродными нанотрубками связующем при растяжении, межслойном сдвиге и трехточечном изгибе в условиях нормальных температур.

Полученные данные:

- максимальное касательное напряжение $\tau_{\max} = 15$ МПа;
- предел прочности при разрыве $\sigma_B = 763$ МПа;
- модуль упругости при растяжении $E = 82$ ГПа.

Помимо этого было исследовано влияние степени наполнения на свойства связующего, в результате которого было выявлено падение плотно-

сти отверждённого связующего с увеличением концентрации УНТ.

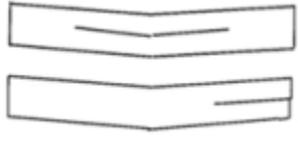
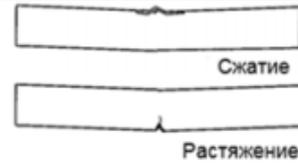
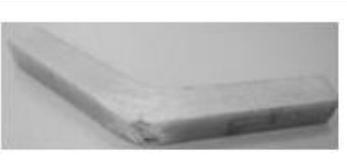
Результаты исследований показали, что введение УНТ в состав эпоксидного связующего горячего отверждения приводит

1) к улучшению его предела прочности при растяжении с 1183 ± 80 МПа (для микропластика с чистым связующим) до 1615 ± 83 МПа (для микропластиков с концентрацией УНТ 0,10 % масс);

2) к снижению плотности связующего с 1206 ± 4 кг/м³. Относительное удлинение при разрыве, %. Массовое содержание УНТ;

3) незначительному снижению относительного удлинения образцов при разрыве, которое лежит в пределах погрешности.

Таблица 1 – Характерные виды разрушения при испытании намежслоевой сдвиг по методу изгиба короткой балки

№	Механизм разрушения	Схема разрушения	Пример	Приемлемость
1	Межслоевой сдвиг			+
2	Изгиб			-
3	Пластическое деформирование			-

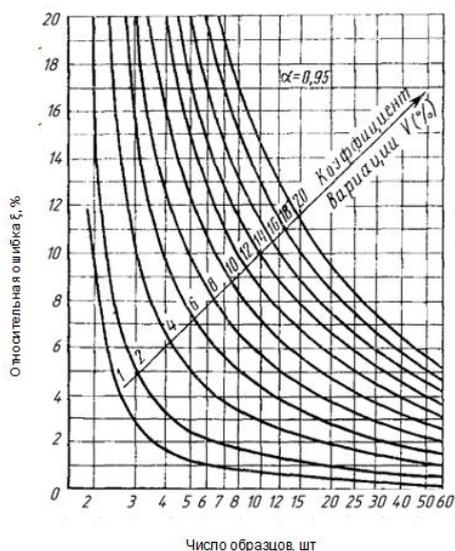


Рисунок 2 – Зависимость необходимого числа образцов для обеспечения заданной относительной ошибки и коэффициента вариации при критерии точности $\alpha = 0,95$

После анализа полученных данных была найдена оптимальная степень наполнения, и она составила 0,10 % масс. Превышение этой степени наполнения ведёт к образованию большого количества агломератов,

являющихся концентраторами напряжения и отрицательно сказываются на прочности композита, степень эффективности модификации снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобанов, Д. С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем : дисс. ... / Д. С. Лобанов // ФГБОУ ВПО. – 2019. – С. 49, 53, 68.
2. Бейдер, Э. Я. Аппретирование углеродных волокон-наполнителей термопластичных карбопластиков / Э. Я. Бейдер, Г. Н. Петрова, М. И. Дыкун // ВИАМ. – 2014. – С. 10.
3. Гуняев, Г. М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами / Г. М. Гуняев, Е. Н. Каблов, В. М. Алексашин // ВИАМ. – 2009. – С. 24.
4. Новиковский, Е. А. Особенности реализации технологического

процесса модификации эпоксидных компаундов углеродными нанотрубками и ультрадисперсными частицами / Е. А. Новиковский // Ползуновский вестник. – 2016. – № 1. – С. 102.

5. Воронина, Е. Н. Математическое моделирование структуры полимерных нанокомпозитов на основе углеродных нанотрубок. Труды XX Международного совещания Радиационная физика твердого тела : т. 2. / Е. Н. Воронина. – Севастополь. – С.601–611.

6. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы : структура, свойства, технология / М. Л. Кербер. – СПб. : Профессия, 2009. – 556 с.

7. Бартнев, Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартнев. – М. : Химия, 1984. – 280 с.

8. Новиков, В. У. Влияние наполнителя на структуру полимерной матрицы. Пластические массы / В. У. Новиков. – 2004. – № 8. – С. 12–24.

9. Углеродные наноматериалы и композиты на их основе. Вестник Тамбовского университета. Серия : Естественные и технические науки. – 2013. – № 4. – С. 1220–1228.

© Огилько В. В., Ананьева Е. С., 2019.

РАСПЫЛЕНИЕ НЕЙТРОННО-ПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ БОРИДОВ ТИТАНА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ, АРГОНА, КРИПТОНА И КСЕНОНА В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 10 КЭВ – 7 МЭВ

А. Н. Карпиков, С. Б. Кислицин, А. С. Ларионов, Л. В. Чекушина

РГП «Институт ядерной физики», г. Алматы, Республика Казахстан

При создании конструкционных материалов ядерных, а также термоядерных реакторов и хранилищ для отработанного ядерного топлива необходимо учитывать множество параметров, одним из которых является степень поглощения нейтронов. Улучшение этого параметра – повышение поглощения – достигается путем нанесения нейтронно-поглощающих покрытий на изделия из реакторной стали. Одним из возможных кандидатов для таких покрытий является ^{11}B , который обладает высоким сечением поглощения тепловых нейтронов. Для создания покрытий используются различные технологии; перспективным считается нанесение покрытия на основе борида титана методом магнетронного напыления. Для таких покрытий, полученных экспериментально, рассчитаны зависимости коэффициента распыления от энергии ионов He, Ar, Kr и Xe в широком интервале значений.

Введение. Одной из наиболее важных задач современного радиационного материаловедения является создание сверхпрочных радиационно-стойких материалов для ядерных и термоядерных реакторов (ТЯР), а также для хранилищ отработанного ядерного топлива (ОЯТ). При создании этих материалов необходимо учитывать множество параметров материала, одним из которых является степень поглощения нейтронов.

В качестве таких материалов обычно используются различные реакторные стали, а для повышения поглощения ими нейтронов – специальные покрытия. Одним из решений на сегодняшний день является применение покрытий, содержащих ^{11}B , который обладает высоким сечением поглощения тепловых нейтронов. Для создания таких покрытий используются различные плазменные технологии. В [1] было

предложено применение перспективного покрытия на основе борида титана, нанесённого методом магнетронного напыления. Такое покрытие обладает рядом преимуществ: простота методики, высокая плотность распределения бора в материале, высокие физико-механические характеристики.

Для длительного практического использования, помимо нейтронно-поглощающих свойств покрытие должно обладать хорошей радиационной стойкостью.

Поэтому, для определения ресурсных возможностей покрытий необходимо исследование их распыления в процессе облучения потоками ионов различного вида в широком интервале энергий ионов E_0 .

Распыление титана и бора.

Физическое распыление представляет собой удаление атомов из приповерхностных слоев мишени при её бомбардировке ускоренными

ми частицами – ионами. Интенсивность этого процесса характеризуется коэффициентом распыления k , который представляет собой число атомов мишени, выбиваемых одним ионом.

Коэффициент распыления зависит от условий облучения (энергии E_0 , массы и флюенса бомбардирующих частиц, угла их падения относительно нормали к поверхности мишени), а также типа распыляемого материала, его структурно-фазового состояния и др. [2]. Число атомов, распыляемых одной налетающей частицей, является статистической величиной.

Исследование закономерностей процесса распыления имеет важное значение с точки зрения определения эрозионной стойкости материалов.

Коэффициенты распыления k определялись с помощью программного пакета SRIM-2012, который позволяет рассчитывать каскады атомных соударений для широкого спектра ионов и мишеней. Каждое значение k было рассчитано моделированием 10000 каскадов; область моделирования включала в себя весь каскад.

На рисунке 1 представлена зависимость коэффициентов распыления бора и титана от энергии ионов аргона и криптона, рассчитанная в интервале энергий максимального распыления.

Из рисунка видно, что коэффициенты распыления бора и титана

имеют достаточно близкие значения, причем величина kTi превышает kB в $1,5 \div 2$ раза во всем интервале энергий. Аналогичная картина наблюдается и для других ионов.

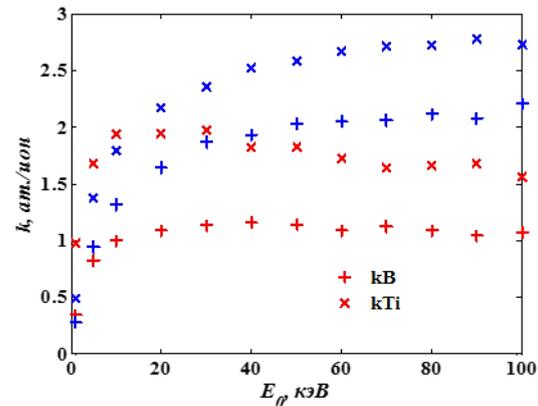


Рисунок 1 – Зависимость коэффициентов распыления бора (кВ) и титана (кTi) от энергии ионов (E_0) аргона (красные символы) и криптона (синие символы)

Распыление Ti_2B_5 и TiB_{12} .

Полученное в [1] покрытие содер­жало два вида боридов титана – Ti_2B_5 (гексагональная ω -фаза) и TiB_{12} (орторомбическая β -фаза). Поэтому следующим этапом стал расчет коэффициентов распыления для этих фаз. На рисунках 2 и 3 приведены зависимости от E_0 парциальных (kB , kTi) и полных (k) коэффициентов распыления при облучении Ti_2B_5 и TiB_{12} ионами He, Ar, Kr и Xe. Линиями того же цвета, что и символы, изображены гауссовы аппроксимации расчетных значений. При расчетах использованы параметры материала, экспериментально определенные в [3].

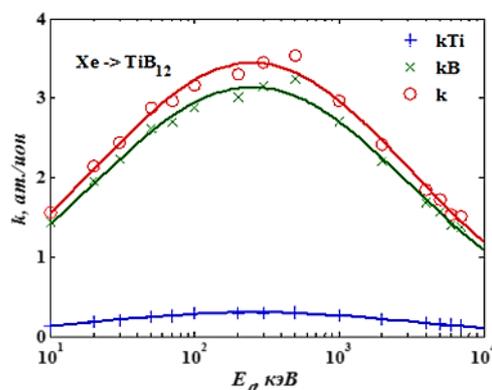
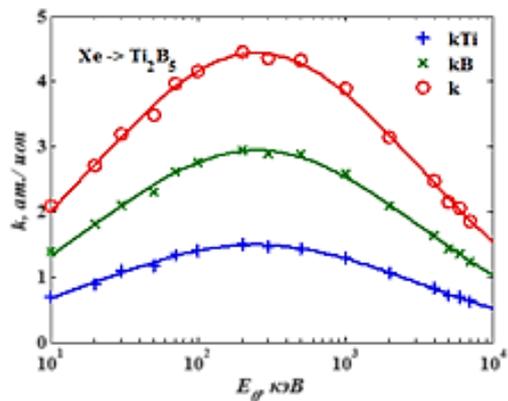
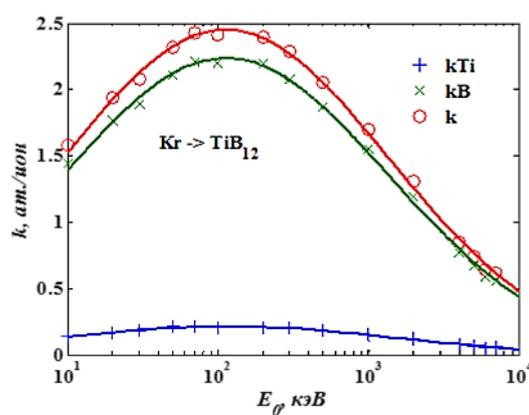
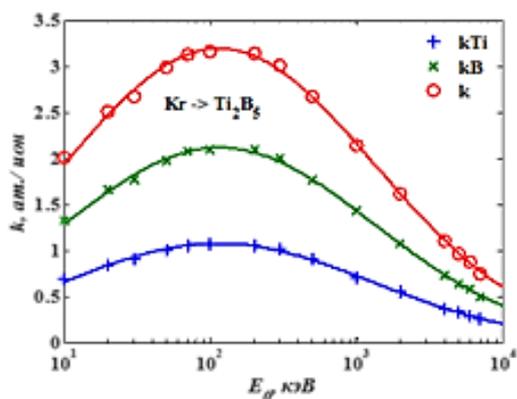
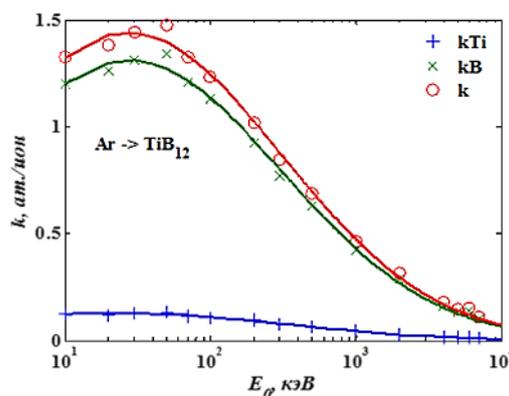
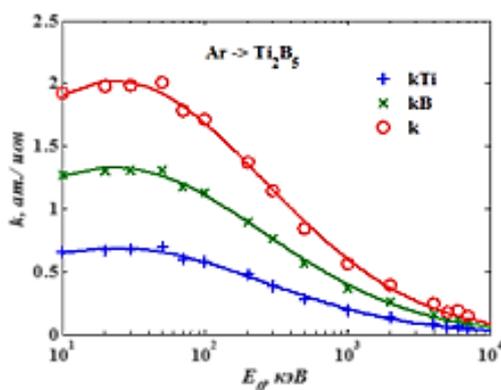
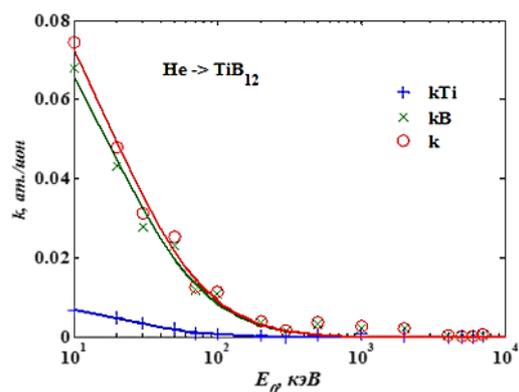
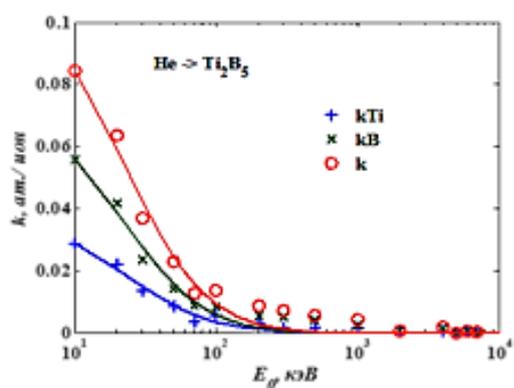


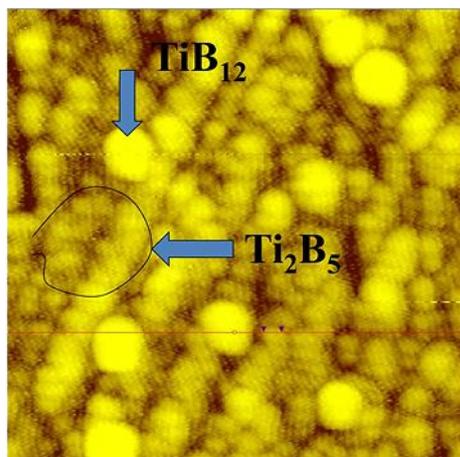
Рисунок 2 – Зависимость k_{Ti} , k_B и k от E_0 при облучении Ti_2B_5

Рисунок 3 – Зависимость k_{Ti} , k_B и k от E_0 при облучении TiB_{12}

Из рисунков 2 и 3 следует, что парциальные коэффициенты k_B превышают k_{Ti} во всех случаях, что определяется фазовым составом исследуемых материалов. Чем больше бора в составе фазы, тем меньше её коэффициент распыления. Это оказывает положительное влияние на стабильность фазового состава в процессе облучения.

Распыление экспериментально напыленного покрытия.

Экспериментально напыленное на ДС-магнетроне покрытие содержало в себе борид титана Ti_2B_5 (матрица, 66,8 %) и додекаборид титана TiB_{12} (фаза внедрения, 33,2 %) (рисунок 4).



5×5 мкм Ti_2B_5 D ~ 50 – 200 нм
 TiB_{12} D ~ 0,5 – 1 мкм

Рисунок 4 – Экспериментально напыленное покрытие (сканирующая зондовая микроскопия) [1].

На рисунке 5 представлены результаты расчетов энергетической зависимости коэффициентов распыления фаз Ti_2B_5 и TiB_{12} , а также коэффициента распыления k экспериментально полученного покрытия.

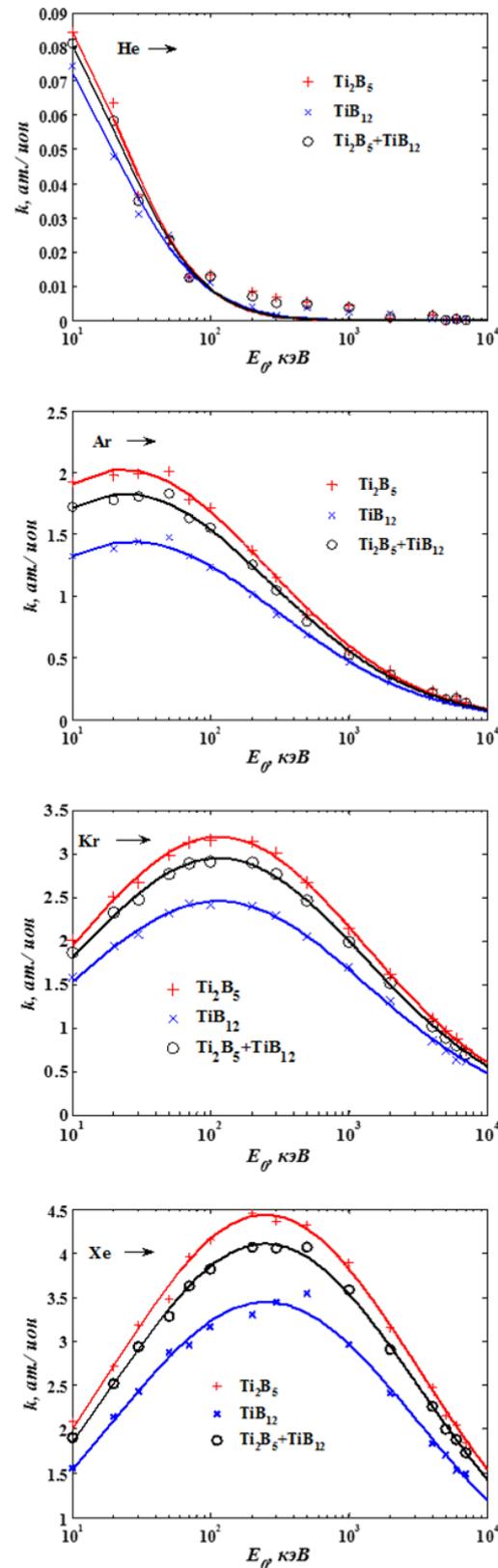


Рисунок 5 – Зависимость $k_{Ti_2B_5}$, $k_{TiB_{12}}$ и k от E_0 при облучении покрытия

Вид зависимостей $k(E_0)$ не отличается от общеизвестного – для Ne пик распыления приходится на меньшие энергии. Исходя из полученных результатов, нетрудно оценить поведение покрытий с ростом флюенса. Так, например, толщина комбинированного покрытия уменьшится на 0,5 мкм при $\sim 1,5 \times 10^{19}$ ион/см² и при $\sim 1,6 \times 10^{16}$ ион/см² при облучении, соответственно, ионами Ne и Xe с энергией 1 МэВ.

Заключение. Проведенные расчеты показали, что, несмотря на то, что коэффициент распыления чистого титана превосходит коэффициент распыления бора при всех энергиях, парциальный коэффициент распыления бора в фазах Ti₂B₅ и TiB₁₂ выше, чем титана. Это способствует стабильности фазового состава в процессе облучения.

Полученных результаты позволяют оценить поведение комбинированных покрытий с ростом флюенса при облучении ионами гелия, аргона, криптона и ксенона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Larionov, A. S. Development and Investigation of High-Strength Neutron-Absorbing Composite Coatings Based on Borides of Metals / A. S. Larionov, L. V. Chekushina, E. E. Suslov // Materials Science Forum. – 2019. – 945. – P. 660–664.

2. Физическое материаловедение ; Том 4. : Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование / Под общей ред. Б. А. Калина / Е. Г. Григорьев [и др.] – М. : МИФИ, 2008. – 696 с.

3. Synthesis of boride-titanium coatings by magnetron sputtering of composite targets / A. S. Larionov [et al.] // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2018. – 2 (3). – P. 251–258.

© Карпиков А. Н., 2019.

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ СМОЛЫ СФЖ-3014 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ ОТВЕРЖДЕНИЯ

С. А. Хапёрских, Е. А. Головина

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия*

В статье представлена информация о выборе оптимального температурно-временного режима отверждения смолы СФЖ-3014. Чтобы объективно судить о возможности использования того или иного температурно-временного режима, в первую очередь, необходимо отследить «поведение» смолы при различных температурных режимах печи. Кроме того, целесообразно проанализировать разность температур исследуемого образца и печи. Это необходимо для установления максимальной температуры печи для прогрева образца с оптимальными для него условиями.

Ключевые слова: фенолоформальдегидная смола, волокнистые композиционные материалы, температурно-временной режим.

Для того чтобы объективно судить о возможности использования того или иного температурно-временного режима, в первую очередь, необходимо отследить «поведение» смолы при различных температурных режимах печи. Кроме того, целесообразно проанализировать разность температур исследуемого образца и печи. Это необходимо для установления максимальной температуры печи для прогрева образца с оптимальными для него условиями.

Для определения экзотермических характеристик отверждения навеску смолы СФЖ-3014, равную 10 мл, помещали в тигель. В центр тигля вводили хромель-алюмелевую термопару. Затем ее погружали в печь при нормальных условиях ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, w не более 45 %). Изменение температуры массы смолы во времени фиксировали с помощью мультиметра. На начало эксперимента температура в печи и смолы одинаковы, то есть нагрев – постепенный.

Полученные образцы отвержденной СФЖ-3014 отверждены при условиях, указанных в таблице 1.

Ниже на рисунке 1 приведены результаты исследований процесса гелеобразования связующего – СФЖ-3014 (скорость нагрева составляет $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) при фазовых переходах. Иными словами, на протяжении всего времени посредством термического анализа регистрировались значения температуры печи и образца.

Метод термического анализа – метод, основанный на изменении свойств материалов под воздействием температуры. Он используется для регистрации фазовых превращений в образце и исследования их параметров.

Анализируя рисунок 1, можно утверждать, что при скорости нагрева реакционного объема печи $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ разность температур образца и печи не превышает $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этот градиент необходим для того, чтобы обеспечить вектор теплового потока на об-

разец смолы и позволить системе переходить из жидкого состояния в стеклообразное.

Отверждение по механизму поликонденсации протекает с постоянным нарастанием вязкости до точки гелеобразования, соответствующей достижению определенной степени конверсии функциональных групп олигомера. В этом случае отверждение может быть прервано на любой на любой глубине. После точки гелеобразования скорость отверждения обычно замедляется, и процесс заканчивается вследствие истощения

функциональных групп или резкого возрастания стерических и диффузионных препятствий их взаимодействию.

Таблица 1 – Параметры отверждения образцов смолы СФЖ-3014 при скорости нагревания $v = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

№ образца	Температура печи $T_{п}$, $^{\circ}\text{C}$	Время выдержки t , мин
1	130	60
2	160	120
3	180	60
4	220	60

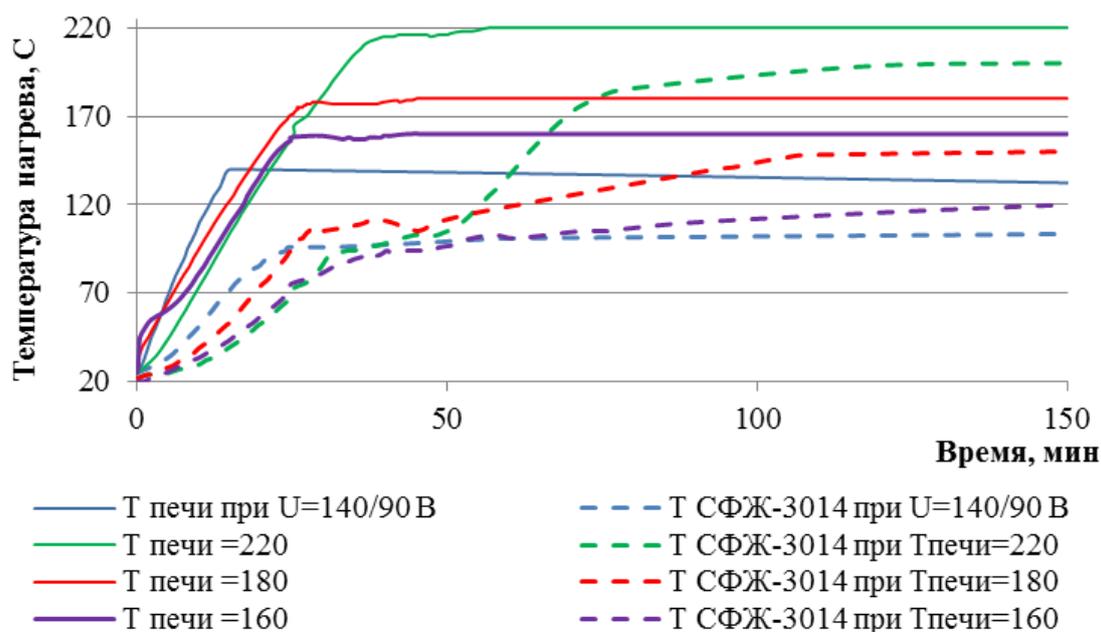


Рисунок 1 – Зависимость температуры нагрева печи и прогрева в образце при фазовых переходах

При отверждении резольных смол (типа СФЖ-3014) наиболее существенную роль играют реакции конденсации, приводящие к образованию метиленовых мостиков между фенольными ядрами. Наряду с этим в течение 25–40 мин (в зависимости от

температуры нагрева печи) при 80–100 $^{\circ}\text{C}$ метильные группы взаимодействуют между собой с образованием диметиленэфирных мостиков, которые при более высоких температурах превращаясь в метиленовые.

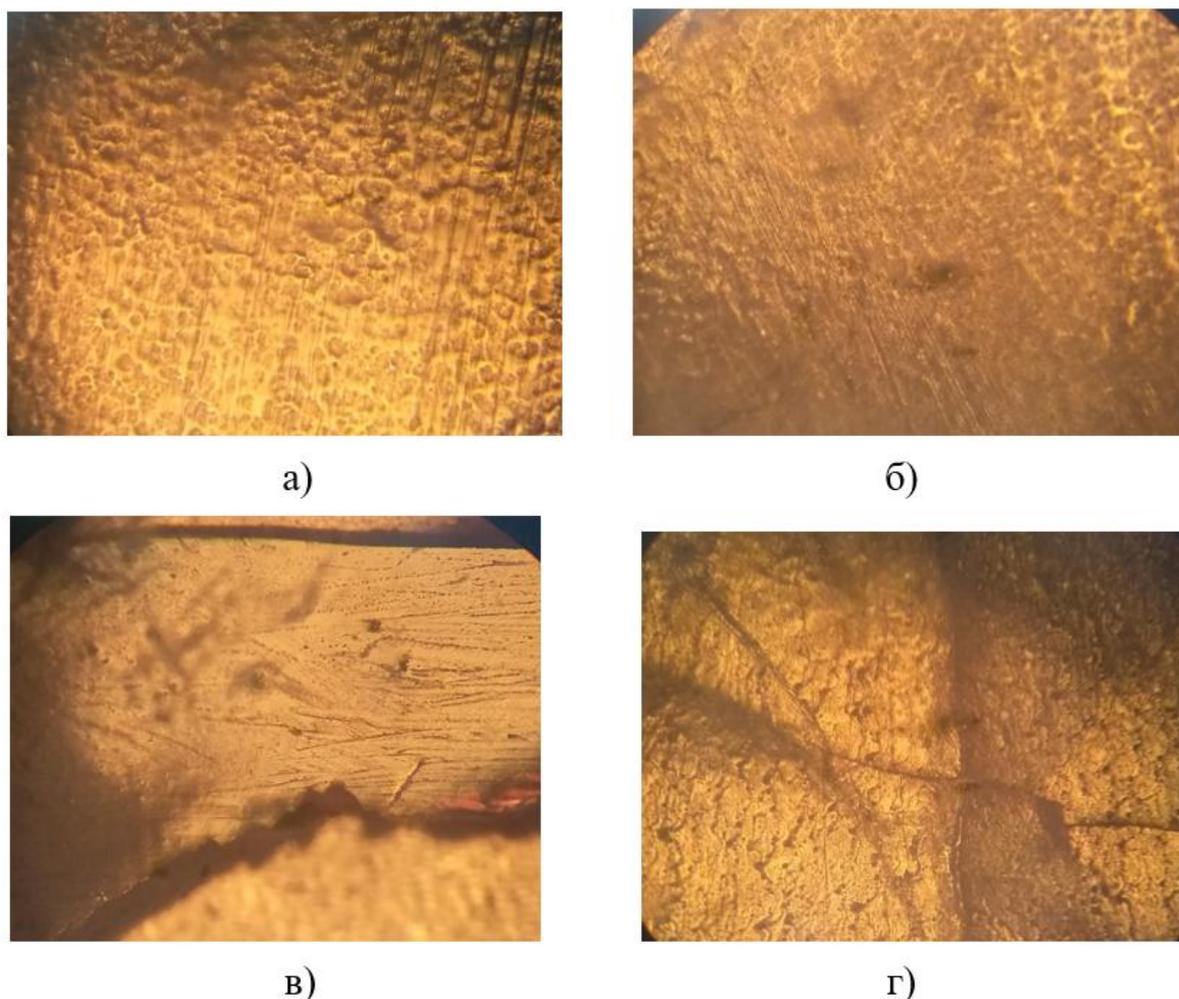


Рисунок 2 – Микроструктура поверхности смолы СФЖ-3014 при различных температурно-временных режимах отверждения (скорость прогрева печи 10 °С/мин):
 а) $T_{\text{печи}} = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 60 \text{ мин}$; б) $T_{\text{печи}} = 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 120 \text{ мин}$; в) $T_{\text{печи}} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 60 \text{ мин}$;
 г) $T_{\text{печи}} = 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 60 \text{ мин}$

Далее – прогрев образца при постоянной температуре печи до полного насыщения. После отверждения полученную смолу СФЖ-3014 охлаждают до температуры 40 °С.

Проведено экспериментальное обоснование полученных результатов и дана оценка структуры поверхностей полученных образцов посредством микроскопа (рисунок 2).

Из-за высокой плотности смолы СФЖ-3014 и вязкой структуры частиц, пластическая деформация проис-

ходит менее интенсивно. При повышенных температурах (180–220 °С) и высокой скорости нагрева увеличивается количество внутримолекулярных дефектов (рисунок 2, в, г), которые ответственны за проявление γ -перехода (точка стеклования). Кроме того, пластическая деформация приводит к разгрузке напряженных проходных молекул, через которые внутренние напряжения, передаются к кристаллитам.

Из анализа этих данных также следует, что (при одной и той же скорости нагрева печи) разный температурный режим существенно влияет на экзотермические характеристики смолы. О чем свидетельствует графики гелеобразования СФЖ-3014 (рисунок 1) и микроструктура поверхности отвержденной смолы.

В целом, по полученным данным микроструктуры поверхности, наиболее приемлемую поверхность имеет образец на рисунке 2, б, что соответствует прогреву печи до 160 °С и выдержки в печи около 120 мин. Недостаток температуры гелеобразования и времени выдержки (рисунок 2, а) способствует не полному отверждению смолы и приводит к неровностям по всей поверхности связующего, ввиду наличия в ее составе не до конца проведенного процесса стеклования, и как следствие – избыток внутренних напряжений, излишняя хрупкость материала.

Несмотря на то, что повышение температуры прогрева смолы приводит к полному ее отверждению, хороших результатов по качеству поверхности такие образцы не дали (рисунок 2, в, г). При нагреве печи до 180 °С и дальнейшей выдержке образца, наступает медленное охлаждение системы. Зачастую именно в период охлаждения образца смолы появляются внутренние напряжения внутри молекул полимера, поэтому конечным этапом отверждения смолы должно стать – планомерное охлаждение системы. Нельзя допускать, чтобы температура печи снижалась быстрее, чем температура отвержден-

ной смолы. Иначе результат тот же – появление глубоких трещин, вакансий, пор.

Выводы.

Анализ экспериментальных данных позволил определить оптимальные температурно-временные режимы склеивания:

- пропитка шпона при нормальных условиях: $T = 20-25$ °С до 8 мин, либо простое окунание;
- открытая выдержка шпона после окунания: $T = 20-25$ °С до 30 мин;
- закрытая выдержка шпона: $T = 20-25$ °С до 10 мин;
- спекание в печи:
 - нагрев печи постепенный при скорости прогрева $v = 10$ °С;
 - прогрев печи до $T = 160$ °С в течение $t = 60$ мин, выдержка в печи $t = 120$ мин;
 - остывание образцов в печи постепенное в течение минимум $t = 120$ мин.

Анализ микроструктуры поверхности отвержденных образцов смолы свидетельствуют о том, что при формировании бездефектной поверхности наиболее оптимальной температурой является температура прогрева печи до 160 °С в течение 120 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20907-75 Смолы фенолформальдегидные жидкие. Технические условия.
2. Фенолформальдегидные смолы. – Режим доступа: <https://himija-online.ru/organicheskaya-ximiya/fenol/fenolformaldegidnye-smoly.html> (Дата обращения 23.04.2019).

3. Смолы фенолоформальдегидные марки СФЖ-3013, СФЖ-3014. Спецификация. – Режим доступа : <http://www.ucpr.ru/common/img/uploaded/files/SFG-3013,3014.pdf> (Дата обращения 24.04.2019).

4. Волынский, В. Н. Технология клееных материалов : учеб. пособие для вузов. (2-е изд., исправленное и дополненное) / В. Н. Волынский. – Архангельск : Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2003. – 280 с.

5. Мийченко, И. П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов / И. П. Мийченко. – СПб. : Научные основы и технологии, 2012. –

374 с. ISBN 978-5-91703-031-9.

6. Угрюмов, С. А. Модификация фенолоформальдегидных смол используемых в производстве древесно-плитных материалах с целью повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик / С. А. Угрюмов, А.В. Осетров // ФГБОУ ВПО Костромской государственной технологической университет. – Режим доступа: <http://files.scienceforum.ru/pdf/2014/7496.pdf> (Дата обращения 25.04.2019).

© Хапёрских С. А., Головина Е. А., 2019.

ABSTRACT

**PLASMA-CHEMICAL MODIFICATION
OF SURFACE OF GLASS AND BASALT
FIBERS**

Markin V. B., Niyozbekov N. N.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

In different spheres of industry and technology, including such as aerospace, aircraft and ship-building, all larger used high-strength composite materials. The effectiveness of their use of transmission loading, heavy loading and most complete application of the properties of the reinforcing fibers is possible only if a sufficiently reliable relationship between the elements provided only if adequate adhesion strength in the "fiber – matrix". In this regard, the issues of adhesion of matrix to reinforcing materials, intensification and directional change in the adhesive interaction to be of central importance in the formation of composite materials. The regulation of this interaction and the study of its nature can be considered a topical task, the solution of which is possible with the development of methods of physical effects at the interface fiber-matrix, which is able to improve one of the most important properties that define a composite. Well-known modification of properties of fibrous fillers in the environment of so-called "cold" plasma, which is referred to glow discharge plasma of low pressure and atmospheric pressure plasma initiated low-power surface, barrier or corona discharges. These processes have long been used in various fields of research.

Key words: fibrous fillers, basalt, basalt fibers, glass fibers, low-temperature plasma.

**COMPOUNDS OF METAL COMPOSITE
IN MODERN ENGINEERING**

Markin V. B.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The use of polymeric composite materials in the designs of modern technology is associated with the need to reduce metal consumption and material consumption. However, the complete replacement of metals with composite materials

is associated with great technical and technological problems, so the actual task is the development of docking elements that make connections between the metal and composite parts of the product. The methods of joining metals and composites, their features and the possibility of transferring loads are considered. For highly loaded structures, it is advisable to use solid compounds, in which the adhesive properties of the contacting components play an important role. Using the example of products used in the oil industry, it has been shown that it is possible to replace steel rods with fiberglass unidirectional rods obtained by pultrusion. Reducing the weight of products along with increased corrosion resistance is the result of this replacement.

Keywords: polymeric composite materials, pultrusion, metal consumption of structures, metal-composite docking elements, oil industry.

**STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN
TWO-LAYERED HEAT-RESISTANT AND
HEAT-RESISTANT COATINGS**

Afanasyev N. I., Lepakova O. K.

**Department of Structural Macrokinetics,
Tsc Sb Ras, Tomsk, Russia**

The evolution of the structure in bilayer heat-resistant (ni-12al-5cr or ni-27.3ta) and heat-resistant (ni- (19–23) - cr, (9-11) al- (0,15–0,4) y) was studied coatings and in the surface layers of the zhs6u alloy under the coating during high-temperature annealing and creep. The application of additional heat-resistant coating leads to an increase in ablation resistance and long-term strength of the alloy.

Keywords: structure, heat resistance, heat resistance, creep.

**FORMATION OF SMALL CARBON
CLUSTERS IN A HELIUM FLOW**

Efremov V. E., Popov A. V.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

Computer modeling of small carbon clusters formed in the plasma flow of helium was car-

ried out. It was shown that carbon atoms are stable dimers and, quite possibly, polyatomic clusters containing only carbon.

Key words: nanomaterials, cluster beams, computer simulation.

INTERACTION OF CARBON ATOMS WITH EDGE DISLOCATIONS IN ALUMINUM

Dzhumaev R. M., Poletaev G. M.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The present work is devoted to the determination, using molecular dynamics modeling, of the binding energy of an impurity carbon atom with edge dislocations in aluminum.

Key words: Cottrell atmosphere computer simulation.

INTERACTION OF CARBON ATOMS WITH OWN INTERSTITIAL ATOMS IN ALUMINUM

Kovalenko E. V., Poletaev G. M.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

This work is devoted to the study using molecular dynamics modeling of the interaction of impurity carbon atoms with intrinsic interstitial atoms in aluminum. Modeling was carried out using the molecular dynamics method. The calculated block of the crystal had a parallelepiped shape and contained 8400 atoms. Boundary conditions were used periodically. The interactions of metal atoms with each other were described by morse potentials.

Keywords: nanomaterials, morse potential, FCC lattice, computer simulation.

MAGNETIC FIELD OF STAINLESS STEEL IRRADIATED BY HIGH-ENERGY ELECTRONS

Vattimuri D. G., Nikiforov A. G.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The paper studies the structure of the magnetic field irradiated by an electron beam of x18h10t steel. Magnetic field induction was measured by a hall sensor with a sensitivity of 0,01 MT, the electron energy in the beam was 2 MeV.

Key words: x18h10t steel, ferromagnetic phase, computer simulation.

RESEARCH OF THE MIGRATION OF SELF INTERSTITIAL ATOMS IN FCC METALS

Kuznetsov S. A., Poletaev G. M.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

This work is devoted to study using the method of molecular dynamics leading mechanisms of diffusion of self interstitial atoms in ni, ag, al and the determination of the activation energy of the migration. The calculated block of the crystal had the shape of a parallelepiped and contained 8400 atoms. The boundary conditions used were periodic. The interaction of metal atoms with each other were described by morse potentials.

Key words: diffusion mechanisms, the morse potential, kraudion, computer simulation.

PARTICLE FORMATION DURING SURFACE MELTING OF COPPER

Herzen, V. S., Demyanov B. F.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The aim of this work is to study the features of the phenomenon of heterogeneous melting of the surface of bulk materials on the example of copper.

Key words: copper marks m1, spherical particles, melting.

THE MELTING OF NANOSCALE OXIDE FILMS OF COPPER

Ryzhkov P. D., Demyanov B. F.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The aim of this work is the study of behaviour of thin film systems of nanometer-scale dimensions when exposed to thermal heating, for example, the oxide film of cu₂o on the copper surface. The object of research was a thin film of cu₂o formed on the copper surface during 1 year and 20 years.

Key words: cu₂o, thin-film system

THE STRUCTURE OF THE FREE SURFACE OF COPPER

Tihansky N. D., Nikiforov A. G.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

One of the most effective methods of studying the structure of solid surfaces at the atomic level is atomic force microscopy. In this work the study of the free surface of thin copper films obtained by deposition in vacuum.

Key words: surface of a thin metal oxide films, the method of atomic force microscopy, copper grade M1.

GROWTH KINETICS OF INTERMETALLIC COMPOUNDS AT THE INTERFACE OF COPPER - LIQUID TIN

Bondar A. A., Dem'yanov B. F.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

Soldering technology is widely used for the connection of the various elements of microelectronics. Copper and tin are the most common pair of electrical contacts. Mostly the connection is carried out between the copper plate (substrate) and a copper wire.

The mechanism of formation of the intermetallic layer at the interface is complex and at present insufficiently investigated.

The conducted research allows to clarify some features of the formation and growth of crystals of the intermetallic compound.

Key words: technology of brazing, the intermetallic compound, centers of crystallization phase.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF TOOLING FOR THE PRODUCTION OF ARTICLES FROM COMPOSITE MATERIALS

Trusov N. O., GOLOVINA E. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The manufacturing process is one of the most significant factors that affect the successful application of advanced composite materials in products of various types. The special significance of the manufacturing process is determined by the following reasons: the need to build the basic structural material from a source

of unidirectional or woven before or simultaneously with the receipt of the products; difficulties which are caused by the increase in the number of process parameters characteristic of the processing of heterogeneous multicomponent materials; difficulties in the processing of some components; importance of strict control of the process to achieve the solidity and permanence of the properties of the products; high requirements to mating or contacting surfaces.

This paper analyzes the technological processes (contact molding and vacuum infusion), can provide helpful, easy to use, repairable, cost effective, competitive products. The analysis should give sufficient information to make informed decisions when choosing competing technologies, based not only on their technical merits, but given these comparative figures, as the ease and cost of manufacture, the possibility of effective control and economic exploitation.

Key words: hand-laying, vacuum infusion.

DESIGN LAYERED MATERIAL AND DESIGN PROCESS FOR ROAD TRANSPORT

Boiko O. O., Golovina E. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

Armored glass is a laminated glass, the layers of which are glued together with polymer films or filled a special photocurable polymer. The thickness of the armored glass (ranging from 10 to 80 mm) defines the degree of protection. The large thickness of the glass gives it a characteristic green opacity. The making of any protective glasses is regulated by GOST R 51136-2008.

Keywords: bulletproof glass, transparent armor, sitall, pvb film, crack resistance, technology, tempered glass.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF MANUFACTURE RING OF THE WIND TURBINE

Semenchuk I. E., Golovina E. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

Currently, worldwide there is an increasing interest for use in various sectors of the economy non-traditional renewable sources of energy. Is

heated debate about the choice of ways of development of energy. Wind energy is one of the main favorites. This is due, primarily, with the growing need of environmental protection and depletion of fossil natural resources.

Key words: ring wind turbine, fiberglass, epoxy, winding.

**OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL
PROCESS OF MANUFACTURING OF
DETAILS FOR THE INTERIOR
PANELLING OF THE AIRCRAFT**

Koval S. G., Golovina E. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

Technology contact adhesives designed for the manufacture of many parts and designs. This method is easy to obtain products of complex shapes, including double shape, and relatively large parts. The process is, in principle, can be used in cases when you cannot apply high pressure molding.

Keywords: prepregs, the method of contact molding.

**TEST MATERIAL DESIGNED FOR THE
MANUFACTURE OF THE WING OF A
CAR MADE OF COMPOSITE
MATERIALS**

Pavlov N. A., Morozov S. V.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The objects of study in the work are material and manufacturing technology of automotive wing.

The aim of the work: design of material for making the wing of the car and the process to obtain it, which should match the operational requirements.

As a result of work was designed the material for making the wing of the car that meets operational requirements, and developed technology for its production.

Keywords: fiberglass, polyester binder, car wings.

**SIMULATOR FOR TRAINING FLIGHT
CREW ON A DYNAMIC PLATFORM**

Timoshenko S. S., Golovina E. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The simulator is an important means of training pilots with the aim of safety, as it allows to train the aircrew in piloting and navigation in all weather conditions, custom flight cases.

Keywords: simulator dome screen, sandwich-panel.

**ALUMINUM FIREPROOF COMPOSITE
PANEL**

Tcherezov N. P., Golovina E. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The objects of study in the work are material and manufacturing technology of composite panels of aluminum and polyethylene.

Objective: develop a material for the manufacture of composite panels and process for its production, which must meet the requirements of durability, performance requirements, fire safety requirements.

The resulting work was designed material for the manufacture of composite panels that meets performance requirements and can be used in cladding of residential buildings, as well as developed technology for manufacturing.

Keywords: aluminum, polyethylene, facade panel, composite material, size, design, fire resistance, design the material, process, calandrinia.

**DESIGN AND DEVELOPMENT OF
TECHNOLOGIES FOR THE
PRODUCTION OF RADIATION – AND
HEAT-RESISTANT MATERIAL**

Matyukhina L. A., Golovina E. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The objects of study is materials and manufacturing technology of radiation-thermal protection/suit using lead and polyethylene.

Objective: develop a material for the manufacture of radiation-thermal protection/costume and process for its production, which must meet the requirements of durability, operating condi-

tions and safety requirements, therequirements of minimum weight.

As a result of work have been developed of radiation-thermal suit satisfies the operating conditions and the optimum production technology.

Key words: polyethylene, lead, radiation, radiation-thermal protection, modification, technology.

**INTELLECTUAL AND INNOVATION
POTENTIAL OF THE ALTAI
TERRITORY IN THE FIELD OF
PRODUCTION OF COMPOSITE
MATERIALS**

Myagkova N.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

Altai krai has considerable potential in the field of development of small and medium businesses that manufacture products from advanced composite materials in both civil and defense segment. In the region of technical university and its branches to train personnel in the higher qualifications, which are then in demand all over russia and abroad. The article presents the results of a study of the regional market of products from composite materials and training for these enterprises.

Keywords: manufacturing, composites, intellectual potential, innovation potential.

**RIMS OF CARBON FIBER BY VACUUM
INFUSION**

Chigan V. E., Golovina E. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

Car disc acts as the base for mounting the tires and to transmit to it the torque from the driveshafts. Depending on the technology and the materials used there are several types of drive wheels, each of which has both advantages and disadvantages. And the parameters of the wheels, such as their diameter, width and other parameters determine the choice in favor of either option.

Objective: develop a material for the manufacture of automobile disk and process for its production, conforming to the requirements of durability, operating conditions and safety requirements. The resulting works were the chosen materials and manufacturing technology of

disc for passenger cars that meet the conditions of use.

Keywords: carbon fabric, carbon fiber, epoxy binder rims.

**GENERAL CHARACTERISTICS OF A
PHENOL-FORMALDEHYDE RESIN HOT
CURING FOR THE PRODUCTION OF
DVK AND WAYS OF ITS
MODIFICATION**

Emelyanova A. E., Regenerated S. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The article presents information on resin nesolenogo style hot curing – SFG-3014 resin used as a binder in wood processing in the production of mdf, waterproof plywood. Produced based on these resins dvk correspond to the european standards of ecology safety. The use of this resin involves the precautions and storage. Resin heat curing have a high alkalinity and is not suitable for cold bonding, curing them is not required. The catalyst – high temperature. Advantages of phenolic resins compared to urea is high water and weather resistance of the adhesive joints. Disadvantages of glue – higher price, small velocity of curing, the higher the toxicity. The glue gives a dark glue line, there is a risk of acid damage to wood fibres, some brands of adhesives require drying after application. phenolic resins are mainly used for the production of waterproof plywood in a hot way, as well as for the impregnation of veneers in the production of bakelized plywood and wood-laminated plastics.

Keywords: phenol-formaldehyde resin, wood-fiber composite materials.

**DEVELOPMENT OF THE TECHNICAL
PROCESS OF AUTOMATED LAYING OF
THE SHOW OF THE ENGINE OF THE
AIRCRAFT ENGINE FROM CARBON
PLASTIC**

Ogilko V. V., Golovina E. A.

**Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

High-quality preparation of technological material (feedstock for the calculation complex) is largely determined by the increased requirements formulated by the calculation program

for the precision of the process. As an experimental finished product, the element of the engine nacelle of the engine of the aircraft IL-76MD-90A was chosen - a three-layer panel of a given curvature with honeycomb core. Layout of the panel was carried out in one step in accordance with the control program - laying of the inner lining, fixing the honeycomb, laying the outer lining. Research tests of the automated calculation technological process, taking into account the operational requirements for the technological consistency of the material at the preliminary preparation stages, made it possible to determine the optimal technological mode for manufacturing the technological material (prepreg) and conclude that the developed technology is applicable for the manufacture of similar - similar products corresponding to selected class of aircraft units. As a result of the work, the technical requirements for the adapted technological material (prepreg) were developed that provide the best technological properties for automated calculation.

Keywords: nacelle, composite materials, calculation, honeycomb.

DESIGN AND TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF AN AIRCRAFT WING MADE OF COMPOSITE MATERIALS

Evsjukov S. A., Golovina E. A.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The main purpose of aircraft is to create such an aircraft structure, the elements of which would have the least possible weight and that is not reduced reliability and durability. Implementation of this goal leads to the reduction of economic costs of operation, increase in flight range, which in turn reduces the cost of services of air transport for the carriage of goods and passengers.

The aim of this work is the creation of composite materials and development of manufacturing techniques for aircraft wing spar to meet all of the requirements for the part and had a low birth weight.

Key words: carbon fiber, epoxy binders, spar.

DESIGN MATERIAL AND FABRICATION PROCESS TO MANUFACTURE FIBERGLASS LIGHTING POLES

Blinov V. V., Golovina E. A.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Reliance lighting is a design which is intended for installation on certain heights of lighting and to provide power to the instrument. Except for lighting poles may be located additional equipment: traffic lights, road signs, advertising. The main loads on the lighting poles are massive – from the installed equipment capacity of lighting – also wind and ice. When mounting the support may be subjected to additional loads from equipment and personnel who performed work on the installation of lighting poles.

The aim of this work is to design material for the manufacture of lighting poles and developing the technology of its production.

Keywords: fiberglass, epoxy binder, a pillar of light, mass design, design material, prepreg, process, thermal vacuum forming, margin of safety.

THE MANUFACTURING PROCESS OF THE SHAFT OF THE ICE TOOL

Grebennikov A. A., Golovina E. A.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

In this work, we have designed the material and technology of manufacture of the shaft of the ice tool. Designed material and production technology satisfy generally accepted safety procedures UIAA 152, EN 10387, and operational characteristics. In the course of using the ice tool is subjected to static and dynamic tensile loads, these loads are created by the body weight of the athlete 80 kg. At these loads, the shaft must not to lose their performance characteristics and stay consistent. Analysis of operating conditions of the shaft of the ice tool showed that the maximum tension is created in the upper part of the shaft attachment point to the head of the tool. Of course, the shaft made of CFRP has advantages in weight (almost half as less) and is not inferior in strength in compari-

son to all-metal designs. According to the obtained results it can be concluded that the material for the manufacture of the shaft is chosen correctly and the product meets their requirements.

Keywords: pole, ice tool, ice axe, carbon fiber, frp sheets, epoxy binder, production, process, detail. The objects of study in the thesis are material and manufacturing technology ice tool carbon fiber.

SELECTION OF MATERIAL AND DEVELOPMENT OF PROCESS TECHNOLOGY FOR THE MANUFACTURE OF WIND TURBINES

Sinitsyn V. A., Golovina E. A.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Wind turbine is a device for converting energy of the wind into rotational energy of the rotor following by converting it into electricity. Is a very efficient means of producing electrical energy in areas with prevailing winds such as desert, coast.

The blades of wind turbines are one of the main model and exposed to stress an element of a wind turbine. To ensure optimal ratio of price and quality, was chosen a material, namely fiberglass. To create the blades of the developed technological process of creation, ideal for conveyor production, as they will not need to create an expensive matrix.

Key words: wind turbine, blade, spar, carbon fiber.

PLASMA-CHEMICAL PROCESSES IN TECHNOLOGY OF POLYMER COMPOSITES

Markin V. B.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Methods of improving the adhesion of plasma-chemical processing of reinforcing fibers with a low surface activity are some of the options for the surface modification of fibers without substantial change in their unique physical and mechanical characteristics. Presents methods for

surface activation of fibres of different classes (organic, carbon and plastic) allow you to adjust the interaction energy on the boundary "fiber-matrix", that allows to obtain the optimal values of adhesion strength in the interface layer that can influence mechanical properties, durability and applicability of polymer composite materials.

Keywords: manufacturing, composites, plasma treatment, adhesion.

METHODS OF PLASMA-CHEMICAL MODIFICATION OF THE REINFORCING FIBERS

Niazbekov N. N., Golovina E. A.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Currently, increasingly requires the reduction of metal products at a sufficiently high strength characteristic. In this case, it is advisable to use compounds of the metal and the composite, combining a high degree of durability and reduction in weight of the total product. Thus, the higher the adhesive strength of the contact metal with the km, the higher the overall strength of the product.

The objective of this work is to study the impact of the plasma on fibrous materials.

Were investigated: the maximum load required to fracture the sample, tensile strength and compression fracture of samples, themethod of plasma treatment of fibers. According to the adsorption theory, the regulation of the pkm values of adhesion to metal, it is possible to implement due to the changes in the indices of the surface properties of the material, which can be solved by the method of plasma modification.

Examination of the samples showed that the regulation properties of the fibers through the use of low-temperature plasma, has the full right to exist and allows the directional change of the physico-mechanical characteristics of the fibers.

Key words: adhesion, the connection is a metal-composite, modification, adhesion, low-temperature plasma, hf-discharge, boundary.

FEATURES OF THE PHONON SPECTRUM OF THE CRYSTAL OF UO₂ DUE TO DIFFERENT TRANSLATIONAL SYMMETRY OF THE SUBLATTICES

Zolotarev M. L., Poplavnoi A. S.

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

In the crystal UO₂ acoustic branches of the phonon spectrum respond mainly to vibrations of the metal atoms, optical – oxygen, due to substantial differences of the values of the masses of component compounds. Important crystallographic factor is the metal and oxygen are in the sublattices, corresponding to different types of bravais, which gives the opportunity to analyze fluctuations in the corresponding brillouin zones (BZ). This analysis is performed by deploying the optical branches of the phonon spectrum of the crystal of zb in zb sublattice of oxygen, which allowed to halve the number of optical branches and establish some of their topological features.

Keywords: uranium dioxide, phonon spectrum, sublattice, pseudosymmetry.

THE ELASTIC PROPERTIES OF THE IMIDE LITHIUM

Kaiser E. B., Kravchenko N. G.,

Poplavnoi A. S., Zhdanov V. V.

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The calculated elastic constants and the compliance coefficients for orthorhombic li₂nh crystal structure ima₂. Found elastic constants satisfy all of the conditions of mechanical stability. In relation to the elastic properties of li₂nh is almost isotropic.

Key words: lithium imide, elastic properties, elastic constants.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR COMPUTER SIMULATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF NANOMATERIALS

Kodirov F. M., Popov A. V.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The basic methods of computer modeling of electronic structure of nanomaterials, to determine further ways of development using math-

ematical apparatus of the theory of nonselfadjoint operators.

Key words: nanomaterials, computer modeling, non-selfadjoint operators.

THE FORMATION OF SMALL CLUSTERS OF LITHIUM IN THE PLASMA FLOW OF HELIUM

Popov A. V., Popov V. A.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Consider the formation of small clusters of lithium in the plasma flow of helium to create a more efficient anode of lithium-ion batteries, consisting of small clusters of lithium. The calculated energy structure of atomic beams of lithium in the stream containing helium. We show the possibility of formation of stable excitations of two-, three-, chetyrekhtomnym clusters containing only atoms of lithium.

Key words: nanomaterials, cluster beams, computer simulation, lithium-ion batteries.

MATHEMATICAL MODEL FORMULATION OF SAND-RESIN MIXTURE IN THE MANUFACTURE OF SHELL MOLDS WITH A VARIABLE PRESSURE

Kulikow Sv M. N., Kwon S.,

Kowalewa T. V., Arinow S. K.

Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan

The most promising means of solving optimization problems is the method of experiment planning. As a response function y was chosen as the compressive strength. A mathematical model is adequate and can predict the results with accuracy.

Keywords: shell, design of experiments, model, multifactor experiment.

DESIGN FEATURES OF THE FLASKS DURING CASTING BY GASIFIED MODELS

Isagulov A. Z., Kovalev T. V.,

Tverdokhlebov N. I., Shcherbakova E. P.

Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan

The design of the flask plays a significant role in the manufacture of castings by casting on

gasified models (Igm). To avoid uneven vacuuming along the surface of the model or the overall sand gas channels were proposed to have not only at the bottom of the flask, but on the side walls of the flask. The air intake is through a corrugated metal hose. The use of metal hose solves the problem of clogging of ducts metallorukav flexibility allows it to be placed around the perimeter of the model (modal bush) and in several rows.

Key words: silica, polystyrene, casting, quality, design.

**THE FORMULATION OF THE
COMPOSITION OF THE SAND-RESIN
MIXTURE IN THE MANUFACTURE OF
SHELL MOLDS WITH A VARIABLE
PRESSURE**

**Kulikov V. Y., Kovaleva T. V., Eremin E. N.
Karaganda State Technical University,
Karaganda, Kazakhstan
Omsk State Technical University,
Karaganda, Kazakhstan**

Matched the composition of the main and auxiliary components of the sand-resin mixture from the viewpoint of ensuring high strength and low gas permeability and roughness forms. Feature of grid mode is the use of variable pressure: simultaneously with the filling of sand-resin mixture is heated to 230-250 °C model plate by plate mounted in the hopper, the mixture was applied pressure of 0.25 MPa. After 10 seconds, the pressure increased to 0.35 MPa. And after 10 seconds the pressure drops TO 0.2 MPa.

Keywords: shell, pulvermuller, sand, kerosene, white spirit, roughness, strength, gas permeability.

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF
FORMATION OF FLAT AND CURVED
PLATES OF LAYERED COMPOSITE
MATERIALS BASED ON
THERMOPLASTIC BINDERS**

**Belousova A. A., Ananjeva E. S.
Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The objects of study in the work are layered composites based on thermoplastic adhesives,

and manufacturing technology panel interior passenger aircraft.

The study of elastic-strength characteristics of constructional glass-reinforced plastics based on thermoplastic binders, such as high-pressure polyethylene (ldpe) and polyamide-6 (PA-6) due to changes in the magnitude of the adhesion interaction of components of the km combination of apprecilove the surface of reinforcing fibers with a polymer coupling agents.

The result was developed the technology of manufacturing fiberglass panels on the basis of thermoplastic binder, studied the effectiveness of a thermoplastic binder by testing prototypes. Keywords: glass fiber, thermoplastic binder, a fibrous filler technology, glass fiber, laminated thermoplastics.

**THE STUDY OF THE INFLUENCE OF
CARBON NANOTUBES ON PHYSICAL
AND MECHANICAL PROPERTIES OF
REINFORCED CARBON FIBER
REINFORCED PLASTICS KEY WORDS:
CARBON NANOTUBES, MODIFIED
BINDER, SEE CARBON FIBER.**

**Ogilko V. V., Ananyeva E. S.
Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The aim of this work is to study the influence of carbon nanotubes on physical and mechanical properties of reinforced carbon fiber reinforced plastics.

As a method of research used: the method of tensile tests, interlaminar shear and three-point bending. Test made in sootvestVII GOST P 50583-93 "Composite polymeric materials. GOST R 57407-2019 carbon fiber. General technical requirements and test methods. GOST 32659-2014. The polymer composites. Test methods. The determination of apparent tensile strength when the interlaminar shear test method for short beam. Gost r 56805-2019 polymer composites. Methods of determination of mechanical characteristics in bending.

As a result of the tests was to study the influence of modified binders on nanotubes reinforced carbon fiber.

Keywords: carbon nanotubes, modified binder, see carbon fiber.

SPRAYING THE NEUTRON-ABSORBING COATINGS OF BORIDES OF TITANIUM UNDER IRRADIATION BY IONS OF HELIUM, ARGON, KRYPTON, AND XENON IN THE ENERGY RANGE OF 10 KEV – 7 MEV

**Carp A. N., Kislitsin S. B., Larionov A.,
Chekushina L.**

RSE "INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS", ALMATY, republic OF KAZAKHSTAN

When you create structural materials of nuclear and fusion reactors and storage facilities for spent nuclear fuel must take into account many parameters, one of which is the degree of absorption of neutrons. The improvement of this setting is to increase absorption – achieved by applying a neutron-absorbing coating on the reactor steel. One of the possible candidates for such coatings is ^{11}B , which has a high absorption cross section for thermal neutrons. To create coatings using different technologies; promising is the coating on the basis of a boride of titanium by magnetron sputtering. For such coatings, obtained experimentally, the calculat-

ed dependences of the coefficient of sputtering on the energy of ions of he, ar, kr and xe in a wide range of values.

ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF RESIN SAMPLES SFZH-3014 AT VARIOUS TEMPERATURE-TEMPORARY CURING MODES

**Haporskih S. A., Golovina E. A.
Polzunov Altai State Technical University,
Barnaul, Russia**

The article provides information on choosing the optimal temperature-time regime for curing resin sfzh-3014. In order to objectively judge the possibility of using this or that temperature-time regime, first of all, it is necessary to track the “behavior” of the resin at various temperature conditions of the furnace. In addition, it is advisable to analyze the temperature difference of the investigated sample and the furnace. This is necessary to establish the maximum temperature of the furnace for heating the sample with optimal conditions for it.

Keywords: phenol-formaldehyde resin, -fibrous composite materials, temperature-time regime.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	<i>Маркин В. Б., Ниёзбеков Н. Н.</i>	Плазмохимическая модификация поверхности стеклянных и базальтовых волокон	4
2.	<i>Маркин В. Б.</i>	Соединения металл-композит в современном машиностроении	8
3.	<i>Афанасьев Н. И., Лепаква О. К.</i>	Структурные превращения в двухслойных жаростойких и жаропрочных покрытиях	13
4.	<i>Ефремов В. Е., Попов А. В.</i>	Формирование малых кластеров углерода в гелиевом потоке	17
5.	<i>Джумаев Р. М., Полетаев Г. М.</i>	Взаимодействие атомов углерода с краевыми дислокациями в алюминии	21
6.	<i>Коваленко Е. В., Полетаев Г. М.</i>	Взаимодействие атомов углерода с собственными межузельными атомами в алюминии	25
7.	<i>Ваттимури Д. Г., Никифоров А. Г.</i>	Магнитное поле нержавеющей стали, облученной высокоэнергетическими электронами	28
8.	<i>Кузнецов С. О., Полетаев Г. М.</i>	Исследование миграции собственного межузельного атома в ГЦК металлах	31
9.	<i>Герцен В. С., Демьянов Б. Ф.</i>	Образование частиц при поверхностном плавлении меди	35
10.	<i>Рыжков П. Д., Демьянов Б. Ф.</i>	Плавление наноразмерных окисных пленок меди	37
11.	<i>Тихонский Н. Д., Никифоров А. Г.</i>	Структура свободной поверхности меди	40
12.	<i>Бондарь А. А., Демьянов Б. Ф.</i>	Кинетика роста интерметаллидов на границе раздела медь - жидкое олово	43
13.	<i>Трусов Н. О., Головина Е. А.</i>	Оптимизация технологии изготовления оснастки для производства изделий из композиционных материалов	46
14.	<i>Бойко О. О., Головина Е. А.</i>	Проектирование слоистого материала и разработка технологического процесса изготовления бронестекла для автомобильного транспорта	52
15.	<i>Семенчук И. Е., Головина Е. А.</i>	Разработка технологии изготовления кольца ветрогенератора	58
16.	<i>Коваль С. Г., Головина Е. А.</i>	Оптимизация технологического процесса изготовления деталей для внутренней обшивки самолета	63

17. Павлов Н. А., Морозов С. В.	Испытание спроектированного материала для изготовления крыла легкового автомобиля из композиционных материалов	66
18. Тимощенко С. С., Головина Е. А.	Тренажер для подготовки летного экипажа на динамической платформе	70
19. Черезов Н. П., Головина Е. А.	Алюминиевые огнестойкие композитные панели	73
20. Матюхина Л. А., Головина Е. А.	Проектирование и разработка технологии по изготовлению радиационно- и термостойкого материала	77
21. Мягкова Н. А.	Интеллектуальный, инновационный потенциал алтайского края в области производства изделий из композиционных материалов	83
22. Чиган В. Э., Головина Е. А.	Автомобильные диски из углепластика методом вакуумной инфузии	89
23. Емельянова А. Е., Хапёрских С. А.	Общая характеристика фенолоформальдегидных смол горячего отверждения для производства ДВК и способы ее модификации	95
24. Огилько В. В., Головина Е. А.	Разработка технического процесса автоматизированной выкладки створки мотогондолы двигателя самолета из углепластика	99
25. Евсюков А. С., Головина Е. А.	Проектирование и технология изготовления крыла самолета из композиционных материалов	108
26. Блинов В. В., Головина Е. А.	Проектирование материала и техпроцесса для изготовления стеклопластиковой опоры освещения	114
27. Гребенников А. А., Головина Е. А.	Технологический процесс производства древка ледового инструмента	120
28. Синицин А. В., Головина Е. А.	Подбор материала и разработка технологического процесса для изготовления лопастей ветрогенераторов	126
29. Маркин В. Б.	Плазмохимические процессы в технологии полимерных композиционных материалов	136
30. Ниёзбеков Н. Н., Головина Е. А.	Способы плазмохимической модификации армирующих волокон	143
31. Золотарев М. Л., Поплавной А. С.	Особенности фононного спектра кристалла UO ₂ обусловленные различной трансляционной симметрией подрешеток	152

32.	<i>Кайзер Е. Б., Кравченко Н. Г., Поплавной А. С., Жданов В. В.</i>	Упругие свойства имида лития	158
33.	<i>Кодиров Ф. М., Попов А. В.</i>	Развитие методов компьютерного моделирования структуры и свойств наноматериалов	161
34.	<i>Попов А. В., Попов В. А.</i>	Образование малых кластеров лития в плазменном потоке гелия	165
35.	<i>Куликов В. Ю., Квон Св. С., Ковалёва Т. В., Аринова С. К.</i>	Математическая модель рецептуры песчано-смоляной смеси при изготовлении оболочковых форм с использованием вариативного давления	170
36.	<i>Исагулов А. З., Ковалёва Т. В., Твердохлебов Н. И., Щербакова Е. П.</i>	Конструктивные особенности опок при литье по газифицируемым моделям	177
37.	<i>Куликов В. Ю., Ковалёва Т. В., Еремин Е. Н.</i>	Рецептура состава песчано-смоляной смеси при изготовлении оболочковых форм с использованием вариативного давления	183
38.	<i>Белоусова А. А., Ананьева Е. С.</i>	Разработка технологии формирования плоских и изогнутых пластин из слоистых композитов на основе термопластичных связующих	188
39.	<i>Огилько В. В., Ананьева Е. С.</i>	Исследование влияния углеродных нанотрубок на физико-механические свойства армированных углепластиков ключевые слова: углеродные нанотрубки, модифицированное связующее, армированный углепластик	195
40.	<i>Картиков А. Н., Кислицин С. Б., Ларионов А. С., Чекушина Л. В.</i>	Распыление нейтронно-поглощающих покрытий из боридов титана при облучении ионами гелия, аргона, криптона и ксенона в интервале энергий 10 кэВ – 7 МэВ	200
41.	<i>Хапёрских С. А., Головина Е. А.</i>	Анализ микроструктуры образцов смолы СФЖ-3014 при различных температурно-временных режимах отверждения	205
42.		Abstract	210