



**Министерство образования и науки 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 XVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ
ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ «ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ И ПРИКЛАДНОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»**

ISBN 978-5-7568-1384-5



**АлтГТУ
Барнаул • 2021**

УДК 620.22-419.8

Труды XVIII Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение» / под ред. В. Б. Маркина ; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : АлтГТУ, 2021. – 120 с.; ил. – URL: https://journal.altstu.ru/konf_2021/2021_1/90/. – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7568-1384-5

DOI 10.25712/c0866-6260-3885-b

В сборнике представлены избранные статьи участников XVIII Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение», прошедшей в Алтайском государственном техническом университете им И.И. Ползунова 14–15 октября 2021 г. Выпуск сборника и его редакция проведены в соответствии с решением оргкомитета конференции.

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

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

Материалы конференции

Минимальные системные требования Yandex (20.12.1) или Google Chrome (87.0.4280.141) и т. п.
Скорость подключения – не менее 5 Мб/с, Adobe Reader и т. п.

Дата подписания к использованию 09.11.2021. Объем издания – 5 Мб.
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, <https://www.altstu.ru>.

ISBN 978-5-7568-1384-5

DOI 10.25712/c0866-6260-3885-b

[вперед \(к содержанию\)](#)

© Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 2021

Уважаемые читатели!



В этом сборнике представлены труды XVIII 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 века 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

ГИБРИДНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ И ТЕПЛОСТОЙКОСТИ

В. Б. Маркин¹, М. Д. Жумадилов²

*¹Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия*

²ООО «Алтайский геофизический завод», г. Барнаул, Россия

Аннотация. Разработан гибридный композиционный материал, который можно использовать для изготовления укрытий конвейерных транспортеров, работающих в условиях повышенных температур, а также влажности, содержащей активные коррозионные компоненты. Примером использования таких изделий может служить конвейерные транспортеры кокса от батарей к складированию, в которых композитные укрытия могут заменить используемые изделия из нержавеющей стали, срок функционирования которых не превышает года.

Ключевые слова: гибридный композиционный материал, полимерное связующее, прочность, деформативность, армирование, стеклоткань, базальтовая ткань, прорезно-вытяжная сетка.

Введение. В коксохимическом производстве используются конвейерные транспортеры кокса от батарей к складированию, укрытие которых выполнено из нержавеющей стали, которое выполняющих свои функции при повышенных температурах (120-150 °С) в агрессивной среде, содержащей влагу и активные коррозионные компоненты, выделяемые разогретым коксом. В таких сложных условиях нержавеющая сталь может служить не более 1 года, после чего требуется замена укрытий транспортера на новые. Поскольку стоимость нержавеющей стали достаточно высока, такие замены влияют на стоимость продукции и требуют дополнительных работ по демонтажу старых укрытий и установке новых. Это послужило мотивом для разработки и исследования гибридного

композиционного материала, который способен сохранять свои свойства при эксплуатации в условиях повышенных температур, а также паров и влажности, содержащей коррозионные компоненты.

Формирование композиционного материала целесообразно начинать с выбора армирующего компонента, то есть ткани, изготовленной из неорганического волокна, имеющего температуру плавления, превышающую заданные выше значения. Для этой цели подходят стеклянные и базальтовые волокна, состав и свойства которых приведены в таблице 1.

Боросодержащие стеклянные волокна Е-типа чаще используют при производстве электронных плат и в аэрокосмической промышленности.

Стекланные волокна S-типа обладает рекордными значениями прочности и модуля упругости для данного класса материалов. Лучшая продукция из S-стекла ничем не

уступает по своему качеству *углеродному волокну* и применяется в основном в аэрокосмической области.

Таблица 1 – Свойства минеральных армирующих волокон

Свойство	Тип волокна		
	Е	S	Базальт
Температура формования, °С	1260	1565	1350-1450
Температура размягчения, °С	916	1056	1100-1200
Температура плавления, °С	1200	1500	1200-1300
Плотность, г/см ³	2,62	2,49	2,67
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ С ⁻¹	6	2,9	2,8
Прочность, Мпа	3100-3500	4380-4590	2700-3500
Модуль упругости, Гпа	80	88-91	70-90
Удлинение до разрыва, %	4,6	4,5-4,9	3

Базальтовые волокна, полученные из природного базальтового минерала и искусственной смеси того же состава, демонстрируют различные физико-механические свойства. Возможно, при плавлении базальта образуется жидкость с расположением частиц близким исходному кристаллическому образцу, которое сохраняется и при образовании стекловолокна.

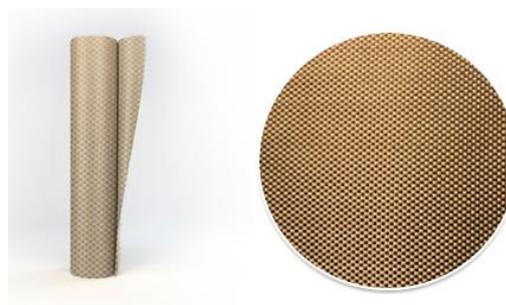
Конструкционные ткани производятся из алюмоборосиликатного стекла типа Е или базальтовых волокон с различной структурой переплетения, необработанные, либо предварительно пропитанные для улучшенного взаимодействия с полиэфирными, эпоксидными, формальдегидными, эпоксифенольными и другими видами смол.

На рисунке 1 представлены фотографии тканей, которые по

своим свойствам, характеру плетения волокон и стоимости наиболее подходят для создания гибридного композиционного материала.



а



б

Рисунок 1 – Стеклоткань Т-13 (а) и базальтовая ткань БТ-13 (б)

Представляет несомненный интерес применение базальтовой ткани для изготовления укрытий транспортной ленты. Лучшие характеристики имеет базальтовая ткань марки БТ-13, ширина которой равна 100 см. Она применяется для защиты *горячих поверхностей, имеющих температуру до 700°C*, обладает долговечностью, высокой стойкостью к разложению и механическому износу. Не подвержена гниению и воздействию вредных веществ. Выбор связующего для полимерного композиционного материала обусловлен (в первом приближении) правилом смесей, учитывающим аддитивный вклад свойств компонент в свойства композита:

$$\sigma_{\text{км}} = K \left[\sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \right], \quad (1)$$

где σ_f и σ_m – прочность волокна и матрицы, соответственно;

V_f – объемное содержание волокна в композиционном материале;

K – коэффициент, определяющий уровень связи компонентов на границе раздела, при идеальной связи между компонентами $K = 1$.

Из уравнения (1) следует, что прочность отвержденной матрицы однозначно влияет на прочность композита, так как её объемное содержание составляет 30-40 %.

Анализ физико-механических свойств отвержденных матриц и их теплофизических характеристик показал, что эпоксидные матрицы на основе эпоксидных смол ЭД-20 и

ЭД-22 обладают лучшими механическими характеристиками, а их теплостойкость зависит от степени отверждения и температуры стеклования.

Особый интерес представляют минеральные (неорганические) связующие. К числу таких материалов, которые при затвердевании дают прочное и качественное соединение между компонентами, относится жидкое стекло, которое представляет собой водно-щелочной раствор силикатов натрия. Наличие воды обеспечивает необходимую вязкость жидкого стекла, необходимую для качественной пропитки. При отвердевании вода испаряется и практически отсутствует в отвержденной фазе. Существуют ускорители отверждения жидкого стекла (отвердители), к числу которых относится кремнефтористый натрий. Применение этого отвердителя существенно снижает энергозатраты на изготовление изделий технического назначения в строительстве.

Для нормальной работы композитного покрытия при повышенных температурах целесообразно использовать теплозащитные материалы, среди которых наиболее широкое применение получили базальтовые прошивные маты, в которых базальтовая вата уплотняется до нужной толщины и прошивается с алюминиевой фольгой для получения сплошности. Наличие алюминиевой фольги имеет определенное преимущество для соединения с силовой оболочкой композитной панели, применяемой в качестве укрытия.

Результаты. Для проведения исследований физико-механических и термических исследований были изготовлены образцы гибридных композиционных материалов различной структуры.

Для изделий, работающих при температурах 150-200 °С, из эпоксидных связующих целесообразно использование связующие горячего отверждения, поскольку структурирование полимерной сетки протекает более интенсивно и значения температуры стеклования становятся выше. Возможно применение для таких связующих ускорителя-модификатора в виде эпоксидной смолы ДЭГ-1, ускоряющего процесс отверждения и улучшающего прочностные характеристики изделий. Таким образом, рецептура связующего, рекомендованного для изготовления композитных укрытий выглядит следующим образом:

1. Эпоксидная смола ЭД-22 (ЭД-20) – 100 вес. частей;
2. Отвердитель триэтанолминотитанат (ТЭТА) – 10 вес. частей;
3. Модификатор-ускоритель ДЭГ-1 – 10 вес. частей.

Отверждение связующих с отвердителем ТЭТА происходит при повышенных температурах, предусматривающих ступенчатый характер повышения температуры во времени.

Рецептура минерального связующего:

1. Натриевое жидкое стекло – 100 вес. частей;
2. Отвердитель (кремнефтористый натрий) – 18 вес. частей.

Время жизни такого связующего составляет несколько часов при комнатной температуре, что позволяет планировать технологический процесс.

Для исследований были приготовлены образцы полимерного композиционного материала по следующим схемам армирования:

- 1) 4 слоя стеклопластика и 1 слой базальтового прошивного мата;
- 2) создавался гибридный композиционный материал, состоящий из двух слоев базальтопластика, между которыми делалась выкладка из 2 слоев стеклопластика;
- 3) применялась промежуточная металлическая просечно-вытяжная сетка между слоями стеклопластика и базальтопластика.

Была предпринята попытка изготовления композитной панели по первой схеме армирования с применением минерального связующего на основе жидкого стекла. На рисунке 2 показана поверхность этого образца и характер его разрушения при изгибе.

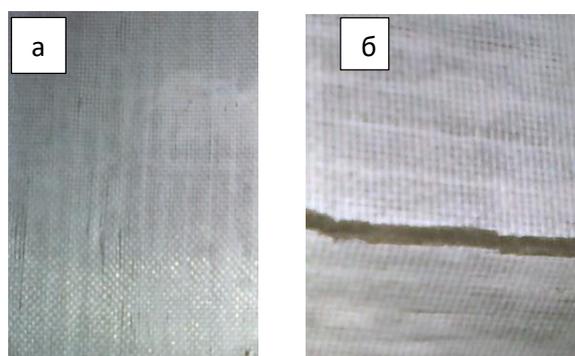


Рисунок 2 – Поверхность образца трехслойного стеклопластика на основе минерального связующего (а) и его разлом при действии малой нагрузки (б)

Несмотря на то, что есть определенные положительные моменты, связанные с применением минерального связующего на основе жидкого стекла, анализ разрушения образцов показал, что стеклянные волокна взаимодействуют с активной щелочной составляющей жидкого стекла, растворяются в нем без образования границы раздела. Стеклоткань после отверждения и

нагревания становится хрупкой, ломается на кусочки, а весь образец не обладает значительным запасом прочности.

Идея использовать для увеличения жесткости композитной пластины металлическую сетку получила продолжение в применении стальных просечно-вытяжных сеток (рисунок 3) в качестве армирующего компонента.



а

б

в

Рисунок 3 – Просечно-вытяжные металлические сетки различного типа (а, б) и стеклопластик, армированный сеткой (в)

После проведения анализа возможных видов разрушения композитных панелей в условиях эксплуатации, выбраны виды физико-механических испытаний материалов, которые соответствуют этим условиям.

- Испытание на изгиб. Для испытаний были приготовлены образцы в виде параллельных пластин, ширина которых выбиралась так, чтобы были видны не менее 4-х ромбических групп армирующей просечно-вытяжной сетки. Испытания проводились на исследовательском комплексе INSTRON по методикам, рекомендованным ГОСТ для композиционных материалов. Ре-

зультаты испытаний образцов материалов, армированных сеткой $20 \times 2 \times 0,5$ мм, приведены на рисунках 4- 5.

Кривые нагружения имеют сложную форму, обусловленную наличием трех материалов в структуре: стеклопластик, базальтопластик и металлическая сетка. Прочность на изгиб этого материала находится в пределах 250 МПа. При этом вначале происходит растрескивание границы раздела слоёв гибридного композита в силу серьезного различия модулей упругости этих материалов, затем начинает разрушаться граница раздела, но этих напряжений недостаточно для

разрушения материала сетки, поэтому при дальнейшей нагрузке тотального разрушения образца не происходит.

Модуль упругости гибридного композита при изгибе около 27 ГПа. Средняя деформация при изгибе при целостности слоев не превышает 1,5 %.

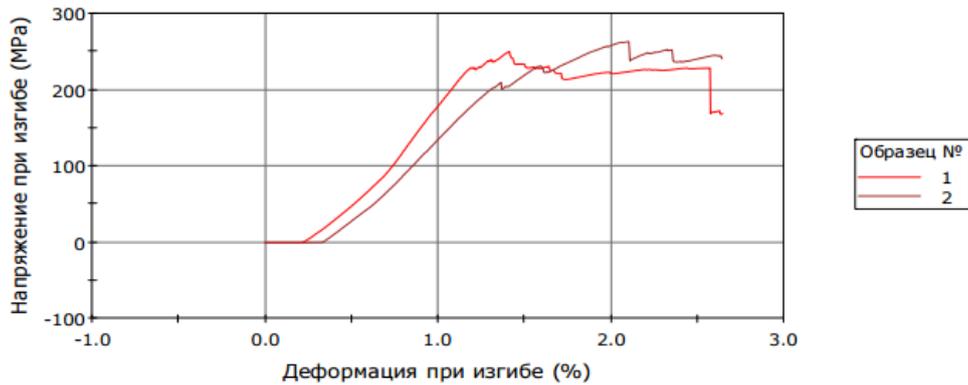


Рисунок 4 – Кривые нагружения образцов стекло- и базальтопластика, армированного сеткой до (1) и после выдержке в течение 2 часов при температуре 200 °С (2)



Рисунок 5 – Диаграмма нагружения при трехточечном изгибе образцов композиционного материала панели, армированной сеткой 20x2x0,5 мм, с силовой оболочкой из стеклопластика: 1 – при температуре 20 °С; 2 – после выдержки в течение 2 часов при температуре 200 °С

Для образцов гибридного композита с силовой оболочкой из стеклопластика (рисунок 5) картина разрушения несколько иная, поскольку адгезионная связь имеется только на границе раздела стеклопластика и металлической сетки. Изгибная прочность такого матери-

ала находится в пределах 100 МПа. При этом напряжении происходит разрушение материала по границе раздела компонент, а дальнейшее нагружение приводит только к изгибу (без разрушения) металлической сетки. Модуль упругости составляет приблизительно 7,8 ГПа,

а средняя деформация при изгибе при целостности слоев композита не превышает 1,8 %.

Таким образом, сравнение результатов испытаний на изгибающие нагрузки двух типов материалов показал, что они обладают серьезным запасом прочности, но предпочтение можно отдать более прочному и жесткому гибриднему композиту, содержащему стекло- и базальтопластик.

Испытание материалов на ударную вязкость по Шарпи проводились на маятниковом копре (рисунок 6) на образцах, отличающихся по размерам от рекомендованных ГОСТ, так как наличие сетки диагональю 20 мм в структуре материала не позволяет получить стандартные образцы шириной 10 мм без разрушения ячеек армирующей сетки.



Рисунок 6 – Маятниковый копёр для испытания полимерных композиционных материалов на ударную вязкость

Наличие армирующей сетки препятствовало разрушению образцов гибридных композитов, так как сетка не ломалась, поэтому были определены значения ударной вязкости для композитной основы (стеклопластик). Результаты испытаний позволили рассчитать значения энергии, пошедшей на разрушение образцов, и, следовательно, значение ударной вязкости a_n исследуемого стеклопластика:

$$a_n = \frac{K}{F'} \quad (2)$$

где K – работа ударного разрушения образца (путем изгиба),

F' – площадь поперечного сечения образца.

Среднее значение коэффициента ударной вязкости стеклопластика равно

$$a_n = 0,395 \text{ МДж/м}^2.$$

Выводы. Разработан гибридный композиционный материал для использования в конструкции ленточного транспортера коксохимического производства в качестве материала укрытия. Предложено несколько вариантов структуры гибридного композита, определены основные физико-механические характеристики материала, и также их сохранность при превышении температуры выше температуры стеклования. Интересные результаты получены при введении в слоистый композит металлических просечно-вытяжных сеток, увеличивающих жесткость материала и его прочность. Так как сетка ограничена по

двум поверхностям полимерным композиционным материалом (стеклопластиком), обладающим высокой химической стойкостью и малым водопоглощением, структура металла сетки не будет подвержена коррозии в процессе использования укрытия в реальных условиях коксохимического производства.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Маркин В.Б. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных материалов: учебное пособие / В.Б. Маркин; Алт.

гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 144 с.

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

4. Жумадилов, В.Б. Маркин. Патент на изобретение РФ № 2712694 30.01.2020

Русских, Г. И. Основы технологии полимерных композиционных материалов: учебное пособие / Г.И. Русских, А.Н. Блазнов. – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2020. – 145 с.

© Маркин В. Б., Жумадилов М.Д. 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Б. Маркин

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

Аннотация: Рассмотрены основные виды дефектности структуры крупногабаритных намоточных конструкций из композиционных материалов, приводящих к потере сплошности силовой оболочки, её деформированию, что существенно влияет на нормальную эксплуатацию изделий без дальнейшего ремонта, обеспечивающего герметичность и соответствующие прочностные характеристики. На примере конструкции композитной емкости показаны основные внешние факторы и воздействия, приводящие к появлению макродефектов, оказывающих влияние на целостность многослойной композитной оболочки и снижение её эксплуатационных характеристик. Применение программы Solid Works для расчета напряженно-деформированного состояния композитных конструкций позволило проводить оценку возможного уровня дефектности силовой оболочки и делать выводы по их эксплуатации.

Ключевые слова: стеклопластик, намотка, крупногабаритные конструкции, дефекты структуры, прочность.

Введение. Стеклопластиковые крупногабаритные конструкции в настоящее время нашли достаточно широкое применение в качестве емкостей различного назначения. Свойства стеклопластика – высокие прочностные характеристики, жесткость (модуль упругости), высокая химическая стойкость и низкое влагопоглощение – позволили применить этот композиционный материал в изделиях наземного и погружаемого в грунт назначения. Разрабо-

таны технологические регламенты изготовления намоткой цилиндрической части и выкладкой на днищах емкости, а также их стыковочного совмещения. Отработаны и апробированы схемы намотки, а также рецептурные составы используемых материалов (волоконистых наполнителей и полимерных матриц). Примерная структура композитной ёмкости диаметром более 3 м (состав слоёв) и расход материалов приведены ниже и в таблице 1.

Таблица 1 – Расход материалов

Материал	Крышки	Лейнер	Намотка	Ламинация
Смола, кг	416,51	273,36	639,89	165,64
Спец смола, кг	81,77	382,70		175,53
Отвердитель, кг	6,25	4,10	9,60	2,48
Ровинг намотка, кг			955,43	
Ровинг чоппер, кг	113,13			
Стеклоткань, кг	301,48	535,93		222,50
Стекломат, кг	70,00			84,05
Песок, кг			1 188,94	

Масса материалов: 1129,14, 1732,02, 3982.71, 650,2.

Состав слоев:

- 1) Лейнер – 7,2 мм;
 - 2) Кольцевая намотка, слоев – 1;
 - 3) Песок – 8 мм;
 - 4) Кольцевая намотка, слоев – 1;
 - 5) Крестовая намотка, слоев – 4;
 - 6) Кольцевая намотка, слоев – 3;
- Толщина внешнего слоя (намотка) – 6 мм;

Полная толщина стенки – 21,2 мм

Анализ структуры силовой оболочки показал, что при общей толщине стенки 21,2 мм подкрепляющий в лейнере слой стеклопластика, реализованного намоткой, составляет всего 6 мм. При длине цилиндрической части емкости более 8 метров и массе около 7,5 тонн сохранность конструкции будет определяться соблюдением правил её монтажа, уплотнения подложки и применением стандартизированной засыпки, а также и её уплотнением.

Результаты исследований. После намотки цилиндрической части емкости, монтажа крышек и анализа конструкции производится её доставка к месту установки на автомобильных платформах с горизонтальным расположением и закреплением страховочными лентами (рисунок 1). Чтобы исключить возможные перемещения емкости при транспортировке, тряске и центробежных усилий, возникающих на поворотах, под ёмкость подкладываются деревянные элементы, имеющие площадь контакта, обеспечивающую нормальное (установленное) давление на силовую оболочку.



Рисунок 1 – Закрепление емкости на автомобильной платформе для транспортировки

Однако это правило зачастую нарушается и закрепление производится деревянными клиньями (рисунок 2), которые обеспечивают лишь местный контакт с оболочкой емкости.



Рисунок 2 – Закрепление емкости на автомобильной платформе при помощи клиньев для транспортировки

При массе емкости более 7500 кг и её большой инерции возможно воздействие на силовую оболочку нормальных по отношению к контуру оболочки усилий, способных вызывать некоторую деформацию внешнего слоя, которая может в дальнейшем послужить концентратором напряжений

при монтаже и эксплуатации.

Подтвердить данное предположение можно только расчетным путем с использованием программного продукта для расчета композитных конструкций, на которые действует внешняя нагрузка (например, опора конструкции на внешний жесткий элемент при транспортировке или укладке конструкции в земляную траншею). Были применены программные продукты Solid Works и лицензированное программное обеспечение DesingofLayers НПО «Технология» г. Обнинск, проведены расчеты

напряжений и деформаций в цилиндрической композитной оболочке по толщине оболочки (трехслойная при усилении лайнера намоткой при армировании 50%-кольцевые слои, 50% - спиральные с углом армирования до 30°). Расчет проводился как по всей оболочке, так и по её фрагменту, имеющему наибольшее нагружение в контакте с посторонним предметом. Результаты расчета приведены ниже в виде этапов от проекта до определения деформации (рисунок 3).

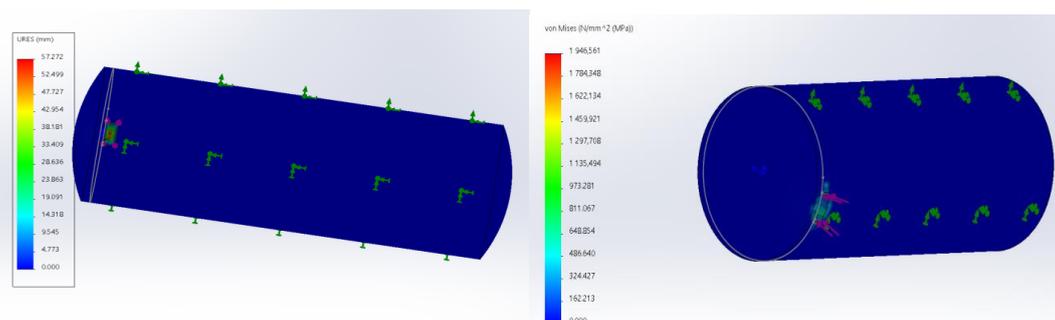


Рисунок 3 – Результаты расчета на собственный вес деформативности (перемещений) и усилий в оболочке емкости, имеющей в нижней части контакт с посторонним предметом (для наглядности сделан поворот емкости)

Поверхность контакта оболочки и предмета опоры является наиболее нагруженной и деформации на ней показаны на рисунке 4.

Таким образом, расчеты показали, что в случае прямого контакта силовой оболочки емкости с посторонним предметом (брусом, кирпичом и т. п.) при транспортировке возможные деформации могут составить до 50 мм.

Если эти деформации носят упругий характер, то они могут восстановиться после окончания воздействия. Если же они затронут внутренние слои (песчаный полимербетон или сетчатый стеклопластик лайнера), возможно образование трещин на границе их раздела, которые впоследствии могут привести к расслоению в структуре материалов оболочки.

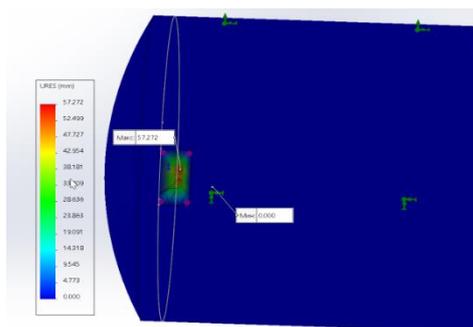


Рисунок 4 – Деформация силовой оболочки емкости в месте контакта при расчете на собственный вес

Подобный контакт между силовой оболочкой и посторонним жестким включением возможен и при монтаже емкости в траншею.

Если поверхность для установки емкости была подготовлена с отклонением от рекомендаций изготовителя, а засыпка и уплотнение осуществлялись местным грунтом, избежать отмеченных последствий явно не удастся.

После полной засыпки емкости грунтом увеличивается сила давления на поверхность и в этом случае напряжения в месте контакта оболочки и жесткой компоненты грунта будут существенно выше и приведут к увеличению прогиба (деформации) в месте контакта (рисунок 5).

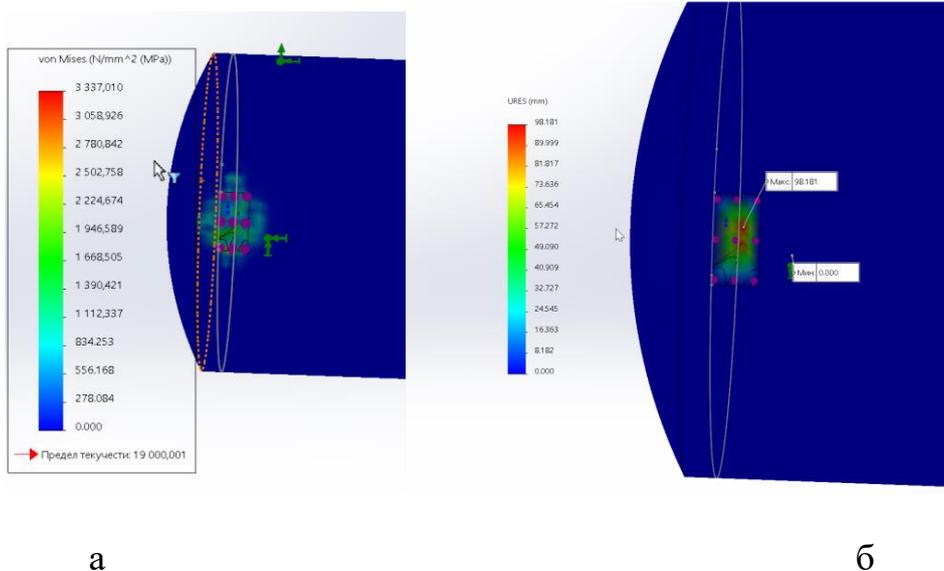


Рисунок 5 – Распределение усилий (напряжений) в силовой оболочке композитной емкости при учете её веса и внешней нагрузки слоя земли (а) и распределение перемещений оболочки в зоне контакта (б)

В процессе монтажа емкостей могут быть допущены отклонения от рекомендаций по монтажу, описанных в рекомендациях (например, обратная засыпка проводится местным грунтом, нет нормального уплотнение грунта в пазухах под

емкостью и др.). Ниже приведены фотографии наиболее часто встречающихся нарушений процесса монтажа емкостей (рисунок 6), позволяющие установить эти отклонения.



а

б

Рисунок 6 – Основные нарушения технологии засыпки композитных ёмкостей: установка емкостей на бетонные опоры с подсыпкой тем же грунтом, который вынут из котлована (а); недопустимая операция засыпки на поверхность емкостей с высоты ковша над поверхностью емкости более 5 метров (б)

Конструкции из композиционных материалов очень чувствительны к технологическим и приобретенным дефектам, например, к расслоениям и трещинам, образовавшимся при эксплуатации. Для расчета роста расслоений в сжатых

элементах конструкции необходимо учитывать энергию изгиба, высвобождающуюся при росте выпуклого отслоения. На рисунке 7 показаны некоторые качественные особенности роста отслоения.

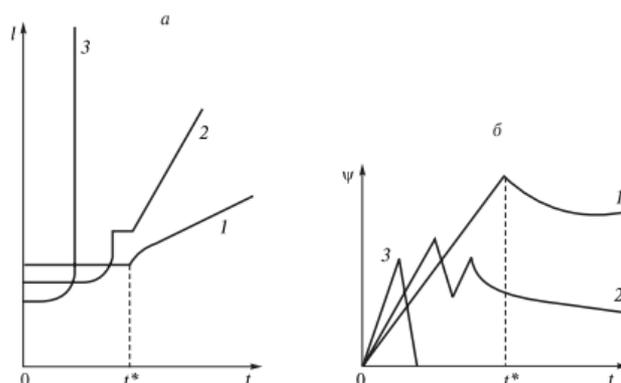


Рисунок 7 – Диаграмма отслоений в композите при сжатии: а – рост отслоений; б – накопление микрповреждений на фронте отслоения.

Кривая 1 относится к случаю, когда начальный размер отслоения достаточно велик, но начальное со-

стояние субравновесно, кривая 2 соответствует также субравновесному начальному состоянию, но

существует некоторая относительно непродолжительная инкубационная стадия.

Кривая 3 соответствует значениям отслоения, при которых начальная точка находится в довольно узкой полосе, заключенной между областью, где выпучивания нет, и областью, в которой наблюдается полное отщепление наружного слоя.

Для установления характера дефектов в композитных емкостях

были проведены натурные исследования целостности структуры слоёв силовой оболочки с помощью акустического дефектоскопа AD-60K. Настройка прибора проводилась на условно бездефектной области оболочки. На рисунке 8 приведены фотографии полученных результатов на бездефектной области силовой оболочки и на области выпучивания, образовавшегося при ошибках установки емкости в траншею.

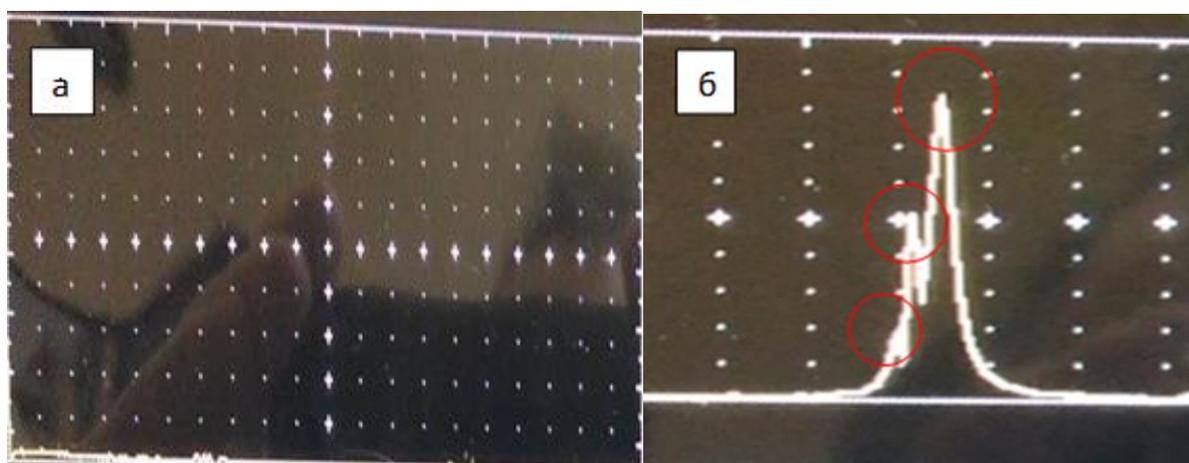


Рисунок 8 – Фотографии экрана акустического дефектоскопа AD-60K на бездефектной области композитной емкости (а) и в области выпучивания, показавшей наличие трех типов расщепления слоев силовой оболочки и появления магистральной трещины (б)

Выводы. Композитные емкости большого объема очень чувствительны к внешним воздействиям, имеющим сосредоточенный характер, при которых только небольшая область силовой оболочки подвержена деформации. Стремление снизить стоимость крупногабаритных композитных изделий приводит к нарушению классической схемы армирования и появлению в структуре силовой оболочки слоёв

полимербетона (смесь песка и полимерного связующего), изотропность свойств которого снижает прочность и жесткость оболочки. Проведенные исследования показали появление дефектов силовой оболочки композитной емкости при неправильной транспортировке и ошибках её установки. Характер полученных при этом повреждений приводит к появлению расщепления слоев композита, отмечаемые

при ультразвуковой дефектоскопии в виде трёх сигналов, принадлежащих: первый – отражению от дефектности поверхностного слоя (ламинирования), второй – отражению от дефекта первого слоя лайнера, третий – от расслоения в лайнере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробей В. В. Основы проектирования и технология сверхлегких композитных баллонов высокого давления: монография / В. В. Воробей, В. Б. Маркин. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – 166 с.

2. Маркин В. Б. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных материалов: учебное пособие / В. Б. Маркин; Алт. гос.техн. ун-т им. И.И. Ползунова. –

Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 144 с.

3. Русских Г. И. Технология непрерывного формования стеклопластиков: монография / Г.И. Русских, В.А. Башара, А.Н. Блазнов; Алт. гос.техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 178 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. Строительная механика композитных конструкций: Учебное пособие – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – 180 с.

© Маркин В. Б. 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ СТРУКТУРЫ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

С. В. Морозов, Е. И. Волченко, А. Н. Макарьев

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

Аннотация: *Современные подходы к созданию объемной копии физического объекта значительно упрощены благодаря использованию виртуальной модели и устройств быстрого прототипирования, также известных как 3D-принтеры. С каждым новым этапом развития технологий 3D-печати появляются обширные области её применения такие как: строительство, медицина, машиностроение, электроника и др. Во всех этих областях широкое распространение получило применение различных новых материалов: термопластичные полимеры, бетоны, гипс, акрил, металлические порошки и многие другие. Исходя из этого возникает задача определения механических характеристик изделий и разработки методов усиления конструкции посредством армирования. Целью этой работы является изучение влияния структуры заполнения, а также пространственной ориентации внутренних структур на конечные характеристики изделий полученных методом 3D-печати.*

Ключевые слова: *3D-принтер, структура заполнения, пространственная ориентация.*

В качестве объекта исследования была рассмотрена пространственная ориентация внутренней структуры изделий. Были взяты 3 основных типа структурного заполнения полимерных материалов, такие как: 0° и 90° ; 45° и 120° ; 90° . Материалом для данных образцов был выбран полимер марки PLA. Данный полимер широко применяется при 3D-печати.

Технологий 3D-печати существует великое множество, названий же для них еще больше ввиду патентных ограничений. Тем не менее, можно попробовать разделить технологии по основным направлениям: 1. Экструзионная печать. Сюда входят такие методы, как послойное наплавление (FDM) и многоструйная печать (MJM). В основе этого метода лежит выдавливание (экструзия) расходного материала с последовательным формированием готового изделия. Как правило, расходные материалы состо-

ят из термопластов, либо композитных материалов на их основе.

2. Плавка, спекание или склеивание

Этот подход основывается на соединении порошкового материала в единое целое. Формирование производится разными способами. Наиболее простым является склеивание, как в случае со струйной трехмерной печатью (3DP). Подобные принтеры наносят на рабочую платформу тонкие слои порошка, которые затем выборочно склеиваются связующим материалом. Порошки могут состоять из практически любого материала, который можно измельчить до состояния пудры – пластика, древесины, металла. Наиболее популярными же в данной категории стали технологии лазерного спекания (SLS и DMLS) и плавки (SLM), позволяющие создавать цельнометаллические детали. Как и в случае со струйной трехмер-

ной печатью, эти устройства наносят тонкие слои порошка, но материал не склеивается, а спекается или плавится с помощью лазера. Лазерное спекание (SLS) применяется для работы как с пластиковыми, так и с металлическими порошками, хотя металлические гранулы обычно имеют более легкоплавкую оболочку, а после печати дополнительно спекаются в специальных печах. DMLS – вариант SLS установок с более мощными лазерами, позволяющими спекать непосредственно металлические порошки без добавок. SLM-принтеры предусматривают уже не просто спекание частиц, а их полную плавку, что позволяет создавать монолитные модели, не страдающие от относительной хрупкости, вызываемой пористостью структуры. Как правило, принтеры для работы с металлическими порошками оснащаются вакуумными рабочими камерами, либо замещают воздух инертными газами. Подобное усложнение конструкции вызывается необходимостью работы с металлами и сплавами, подверженными оксидации – например, с титаном.

3. Стереолитография. Стереолитографические принтеры используют специальные жидкие материалы, называемые «фотополимерными смолами». Термин «фотополимеризация» указывает на способность материала затвердевать под воздействием света. Как правило, такие материалы реагируют на облучение ультрафиолетом.

Смола заливается в специальный контейнер с подвижной платформой, которая устанавливается в позиции возле поверхности жидкости. Слой

смолы, покрывающий платформу, соответствует одному слою цифровой модели. Затем тонкий слой смолы обрабатывается лазерным лучом, затвердевая в точках соприкосновения. По окончании засветки платформа вместе с готовым слоем погружается на толщину следующего слоя, и засветка производится вновь.

4. Ламинирование. Некоторые 3D-принтеры выстраивают модели, используя листовые материалы – бумагу, фольгу, пластиковую пленку.

Слои материала наклеиваются друг на друга и обрезаются по контурам цифровой модели с помощью лазера или лезвия.

Такие установки хорошо подходят для макетирования и могут использовать очень дешевые расходные материалы, включая обычную офисную бумагу. Тем не менее, сложность и шумность таких принтеров, вкуче с ограниченными возможностями изготавливаемых моделей ограничивают их популярность.

Наши образцы были изготовлены методом послойного наплавления на 3D-принтере Creality Ender 3 pro, а испытание образцов проводилось на испытательной машине INSTRON 3369 согласно ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Схема образца для испытания предоставлена на рисунке 1 [1].

Для определения механических характеристик предварительно были произведены замеры образцов штангенциркулем, и их нумерация. Для проведения испытаний была выбрана скорость нагружения 5 мм/мин. По-

лученные результаты при испытаниях на растяжение представлены в таблицах 1-3.

Из полученных результатов мы

видим, что структурное заполнение 90° является наиболее эффективным, так как заполнение приходится вдоль растягивающих нагрузок.

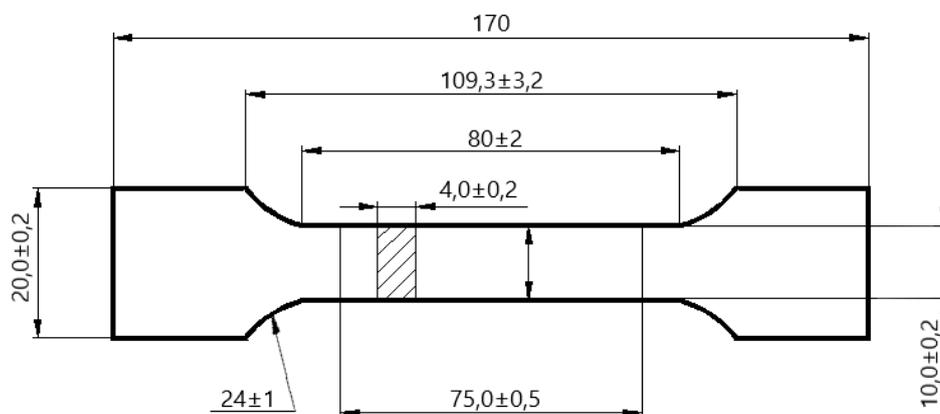


Рисунок 1 – Схема образца для испытания

Таблица 1 – Результаты испытаний на растяжение при структурном заполнении 0° и 90°

Тип армирования	Максимальная растягивающая нагрузка, Н	Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Модуль упругости E, МПа	Растяжение, мм
1	1285,82	36,24	1721,89	2,16
2	1133,03	31,76	1714,35	1,75
3	1195,35	33,61	1747,37	1,82
Среднее	1204,73	33,87	1727,87	1,91

Таблица 2 – Результаты испытаний на растяжение при структурном заполнении 45° и 120°

Тип армирования	Максимальная растягивающая нагрузка, Н	Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Модуль упругости E, МПа	Растяжение, мм
1	1316,00	34,81	1733,51	1,81
2	1291,03	35,59	1801,63	1,79
3	1449,09	40,59	1793,56	2,25
Среднее	1352,04	36,99	1776,23	1,96

Таблица 3 – Результаты испытаний на растяжение при структурном заполнении 90°

Тип армирования	Максимальная растягивающая нагрузка, Н	Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Модуль упругости E , МПа	Растяжение, мм
1	1584,18	43,88	2022,50	1,95
2	1730,05	48,38	2035,75	2,28
3	1563,83	43,24	2021,91	1,95
Среднее	1626,02	45,17	2026,72	2,06

Структурное заполнение 0°-90° и 45°-120° имеют меньшую прочность и модуль упругости из-за того, что не вся заполненная структура воспринимает растягивающие нагрузки. Тем самым мы показали, что используя один и тот же материал (полимер PLA) и разное структурное заполнение при использовании 3D-печати, можно влиять на механические свойства изделий. В настоящее время благодаря 3D-печати облегчается производство изделий из полимерных композиционных материалов, но и существуют и свои минусы данного метода.

Для очень многих образцов, изготовленных по технологии FDM, потребуется более или менее сложная финишная обработка, которую сложно или невозможно механизировать, поэтому в основном она производится вручную.

Есть и менее очевидные недостатки, например зависимость прочности от направления, в котором прикладывается усилие. Так, можно сделать образец достаточно прочным на сжатие в направлении, перпендикулярном расположению

слоев, но вот на скручивание он будет гораздо менее прочным: возможен разрыв по границе слоев.

Другой момент в той или иной мере присущ любой технологии, связанной с нагревом: это термусадка, которая приводит к изменению размеров образца после остывания. Конечно, тут много зависит от свойств используемого материала, но порой нельзя примириться даже с изменениями в несколько десятых долей процента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Композиционный мир [Электронный ресурс] URL: <https://compositeworld.ru/articles/tech/id602cd94647add2001217dfc2>
2. ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение».
3. Маркин В.Б. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных материалов: учебное пособие / В.Б. Маркин; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 144 с.

© Морозов С. В., Волченко Е. И., Макарьев А. Н.

УДК 666.022.1

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕПЛАСТИКА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

С. В. Морозов

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

Аннотация. *Возможность получения композиционных материалов (КМ) с заранее заданными свойствами способствует их активному использованию в различных отраслях промышленности. Такие материалы обладают свойствами необходимыми именно для изготовления конкретного изделия, обладающего своими уникальными свойствами и поэтому являются очень востребованными. В изделиях из углепластиков, работающих на растяжение и изгиб актуальной является задача повышения прочностных характеристик за счет увеличения адгезии углеродного наполнителя к полимерному связующему. Для повышения адгезии применяют различные методы обработки поверхности волокна. В настоящее время активно применяется метод электрохимической обработки волокон. При электрохимической обработке происходит удаление неактивного поверхностного слоя, что позволяет увеличить площадь удельной поверхности волокна и способствует формированию на поверхности волокна полярных функциональных групп. Все это приводит к активации поверхности углеродных волокон и способствует увеличению адгезионной прочности на границе раздела углеродный наполнитель/полимерное связующее.*

Ключевые слова: *электрохимическая обработка, электролит, углеродное волокно, полимерные композиционные материалы, адгезия, модификация поверхности волокна, поверхностная обработка*

Композиты на основе углеродных волокон (УВ) – углепластики, благодаря своим уникальным физико-механическим свойствам находят широкое применение в современной технике. Такие свойства как высокая прочность, высокий модуль упругости, тепло- и электропроводность, малый удельный вес заложены в армирующем наполнителе – углеродных волокнах, однако для наиболее полной реализации упругих и прочностных свойств волокон в композите необходимо обеспечить оптимальную прочность на границе раздела волокно/матрица. Слишком слабое взаи-

модействие между армирующими волокнами и матрицей приведет к расслоению композита и снижению его прочности. Слишком сильное взаимодействие приведет к формированию хрупкого композита [1].

Исходная поверхность углеродных волокон является неполярной и обладает слабой адгезией к полярным молекулам полимерного связующего. Для повышения адгезии проводится модификация поверхности углеродного волокна такими методами, как термохимическая или плазмохимическая обработка поверхности волокон в газообразных и жидких средах. Перечислен-

ные методы повышают прочность композиционных материалов (КМ) по сравнению с материалами, имеющими в качестве наполнителя необработанное волокно. Однако эти методы не нашли практического применения из-за плохой воспроизводимости результатов и большой продолжительности процесса, которая не позволяет синхронизировать его с другими стадиями изготовления препрегов, а также имеет высокую стоимость оборудования и расходов на их основе.

Наиболее перспективным на данный момент является электрохимический метод обработки волокон в водных аммоний и/или фосфат содержащих растворах, в процессе которого происходит деструкция и развитие поверхности волокна, вследствие неравномерного окисления углерода по поверхности. Кроме того, на поверхности углеродного волокна формируются функциональные группы ($-COOH$; $-OH$; $-CONH_2$ и др.), способные образовывать химические связи с полимерным связующим [3]. Преимуществом электрохимической обработки поверхности волокон является простота реализации данного метода, также он легко вписывается в технологические схемы изготовления препрегов и является экономически более выгодным по сравнению с другими методами обработки волокон. Все это обуславливает его практическое применение.

Однако существующие методы электрохимической обработки не могут пока соперничать с выше-

упомянутыми методами и достигать такого же увеличения прочностных характеристик материалов. Поэтому актуальной научно-технической задачей является разработка технологии модификации углеродного волокна электрохимическим методом, с целью увеличения его адгезии к полимерной матрице, что в конечном итоге приводит к увеличению физико-механических характеристик композиционных материалов на их основе.

Известно, что поверхностное окисление углеродной сажи превращает изначально гидрофобную поверхность в гидрофильную. При этом существенно увеличивается сила сцепления сажи с полимерными матрицами. Как выяснилось, это справедливо также и в отношении углеродных волокон. По этой причине для увеличения адгезии между волокнами и матрицей наиболее часто используется окисление поверхности волокон. Кроме деления на окислительные и неокислительные способы обработки последние классифицируются как:

- газофазные и жидкофазные;
- низкотемпературные ($<150\text{ }^\circ\text{C}$) и высокотемпературные (обычно выше $400\text{ }^\circ\text{C}$);
- плазмохимические;
- электрохимические.

Метод электрохимической обработки волокон позволяет легко контролировать степень окисления поверхности, а также регулировать развитость поверхности [4]. В результате проведенных исследований [5] подобраны различные пара-

метры электрохимической обработки УВ в водных растворах солей гидрокарбоната и оксалата аммония и найдены оптимальные условия, позволившие увеличить значение предела прочности при разрыве углепластиков до 10 % по сравнению с углепластиком, содержащим необработанное волокно. В процессе электрохимической обработки углеродных волокон протекают сложные физико-химические процессы, приводящие к травлению поверхности волокна и образованию продольных каналов и сшивок между волокнами. Нанесение на поверхность углеродных волокон слоев полимерного связующего открывает альтернативный путь модификации поверхностных свойств, который может быть использован в комбинации с электрохимической обработкой волокна или непосредственно как самостоятельный метод нанесения таких слоев при электрохимическом воздействии. Эффективность метода отражается в различных литературных источниках, посвященных улучшению адгезионного взаимодействия между углеродными волокнами и различными полимерными связующими.

В методе электрохимической обработки используется тот факт, что в результате окисления вытравливаются наименее упорядоченные участки поверхности углеродных волокон, поверхность становится более гладкой (удаляется поверхностный слой углерода толщиной 15-50 нм) и одновременно обнажаются атомы углерода, расположен-

ные в торцах базисных плоскостей, активность которых на 10-12 порядков выше активности атомов углерода, лежащих внутри плоскости [6].

Основными параметрами процесса электрохимической обработки волокна, кроме состава и концентрации раствора в сосуде, являются анодная плотность тока и разность потенциалов, обусловленные не только условиями электропитания, но и конструктивными особенностями самого сосуда. С помощью расчетов подобраны специальные формы электродов, которые исключают или минимизируют образование краевых эффектов, приводящих к неравномерности величины электростатического поля по ширине сосуда и, соответственно, к неравномерности обработки углеродных волокон. К минусам процесса электрохимической обработки углеродных волокон следует отнести недостаточно равномерную обработку элементарного волокна в мононити. Причина такой неравномерности обусловлена тем, что из-за поляризации раствора, окисление на наружной поверхности комплексной нити и внутри ее протекает с разной интенсивностью [1].

Процессы травления, протекающие при окислении поверхности углеродных волокон, связаны с образованием и последующим отщеплением кислородсодержащих групп [7]. В зависимости от метода активации содержание СО-групп на поверхности и прочность их связи с поверхностью могут изменяться.

Для оценки количества образующихся при активации функциональных групп можно использовать метод их термодесорбции с последующей идентификацией образующихся летучих продуктов. Содержание в газовой фазе монооксида углерода показывает, что количество кислородсодержащих групп на поверхности углеродных волокон после электрохимической обработки возрастает как в газообразной, так и в жидкой средах.

Образование наиболее прочных химических связей между волокном и матрицей обусловлено присутствием на поверхности волокна функциональных кислородсодержащих групп.

Углеродные волокна, используемые в качестве армирующего материала в углепластиках, активируют в относительно мягких условиях. В результате такой активации происходит частичное селективное травление поверхности волокна и заметный рост содержания на ней кислородсодержащих функциональных групп. Образование кислородсодержащих групп подтверждается исследованиями поверхности УВ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. В результате поверхностной обработки заметно возрастает соотношение интенсивностей полос, отвечающих за содержание на поверхности волокна атомов кислорода и углерода. Одновременно с образованием кислородсодержащих групп при активации происходит частичное вытравление поверхности волокна в

результате отрыва этих групп. В зависимости от условий обработки превалирует физическая или химическая активация. Характер образовавшихся групп может быть оценен по сорбции красителей с различными группами.

Объектом исследования было выбрано отечественное углеродное волокно марки УКН-12К. В качестве полимерного связующего использовалась композиция 5-211Б. В состав композиции входят эпоксидная (ЭД-20) и фенолформальдегидная (СФ-341А) смолы, этиловый спирт и ацетон.

Роль неподвижного анода в данной работе выполнял углеродный жгут, состоящий из 12000 элементарных волокон. В качестве токоподвода к аноду использовалась медный зажим. В качестве катода использовалась нержавеющая сталь марки 03Х18Н9Т, по всему периметру охватывающая анод.

В стакан заливали приготовленный электролит на 2/3 высоты стакана (2 литра). Углеродный жгут длиной около 2-х метров, содержащий 12000 элементарных волокон, плотно наматывали по спирали на цилиндр из ПВХ ($d=100$ мм), выводя оба конца волокна в верхнюю часть. Затем погружали цилиндр с волокном в ячейку так, чтобы избежать контакта с катодом при одинаковом расстоянии между ними (около 1 см).

После окончания обработки волокно промывали дистиллированной водой и сушили в сушильном шкафу при температуре 100 °С до

постоянного веса. При нанесении полимера сушка осуществлялась при 60 °С, чтобы избежать термической деструкции полимера.

После изготовления углепластиков были проведены испытания на растяжение. Предел прочности при растяжении углепластиков определяли на разрывной машине марки Р-5М. Предел прочности рассчитывали, как среднее значение по результатам разрыва 10 образцов углепластика.

Морфологию поверхности волокна исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi.

Структурные изменения в углеродных волокнах изучали методом рамановской спектроскопии. Согласно данному методу пучок углеродных волокон на специальной подложке облучали лазерным лучом, при этом специальный прибор регистрировал спектры комбинационного рассеяния света. В спектре рассеянного излучения появлялись спектральные линии, которых не было в спектре первичного света. По числу и расположению спектральных линий делались выводы о молекулярном строении исследуемого волокна, т. е. можно сделать вывод о соотношении аморфной и кристаллической фаз в углеродном волокне.

Площадь истинной поверхности образцов углеродных волокон определяли методом низкотемпературной адсорбции азота.

Основополагающим моментом исследования было нахождение оп-

тимального режима обработки УВ, при котором происходило максимальное увеличение прочностных характеристик углепластика. В результате были проведены исследования по выбору оптимальных параметров электрохимической обработки:

- нахождение оптимального состава электролита;
- нахождение оптимального времени электролиза.

Оптимальный состав электролита определялся следующим образом:

1. Обработка в электролите, содержащем в своем составе только соль гидрокарбонат аммония с концентрацией 0,5 моль/л при анодной плотности тока 0,157 А/м² во временном интервале 10-90 сек. показала непрерывное уменьшение предела прочности до 30 % относительно необработанного образца.

2. Обработка в электролите, содержащем в своем составе только соль оксалат аммония с концентрацией 0,6 моль/л при анодной плотности тока 0,157 А/м² во временном интервале 10-90 сек. не приводит к существенным изменениям предела прочности.

3. Результаты обработки при использовании электролита содержащего соли гидрокарбонат аммония и оксалат аммония при анодной плотности тока 0,157 А/м² и времени электролиза 25±5сек, представлены на рисунке 1.

При рассмотрении рисунка 1 делаем вывод, что оптимальным является соотношение в электроли-

те концентрации гидрокарбоната аммония 0,5 моль/л и оксалата аммония 0,6 моль/л. При такой концентрации солей достигается максимальный предел прочности углепластика и составляет 2350 МПа.

На основе выбранного оптимального состава электролита проведем зависимость предела прочности от времени электролиза. Данная зависимость изображена на рисунке 2.

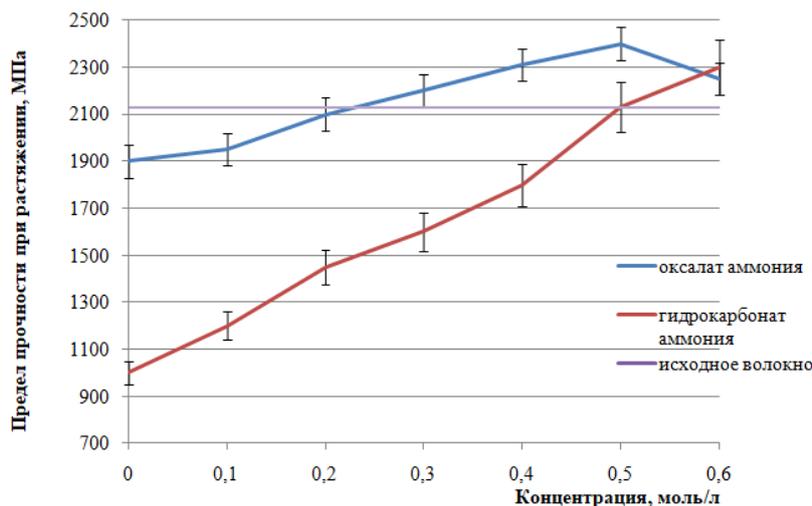


Рисунок 1 – График зависимости предела прочности от состава электролита

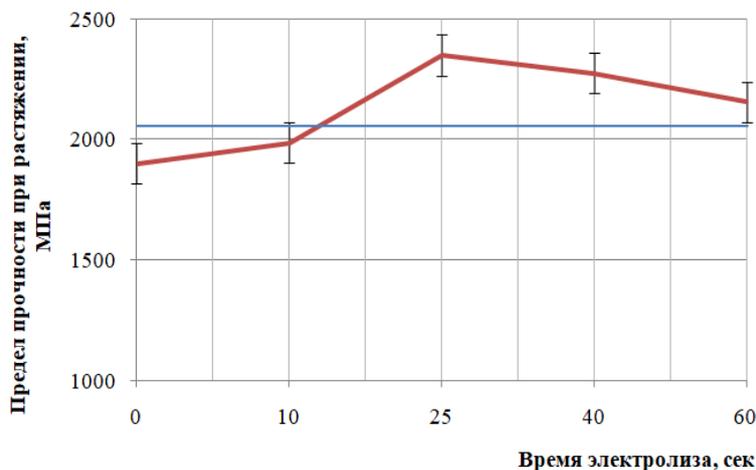


Рисунок 2 – График зависимости предела прочности от времени электролиза

По полученной зависимости видно, что оптимальная продолжительность электролиза составляет 25 ± 5 сек, так как при небольшом времени обработки углеродного волокна частичная деструкция приво-

дит к развитию его поверхности, что в свою очередь, ведет к улучшению адгезии со связующим и итоговому увеличению предела прочности углепластика. При возрастании времени обработки увели-

чивается степень деструкции поверхности волокна, что приводит к ухудшению прочностных характеристик углепластика [8].

На основе исследований [9, 10] был выбран оптимальный параметр анодной плотности тока составляющий $0,17 \pm 0,02$ А/м².

При исследовании поверхности обработанного углеродного волокна методом сканирующей электронной микроскопии можно отметить на полученных электронных фотографиях элементарных волокон, что при поверхностной обработке одновременно происходит уменьшение толщины волокна и развитие его поверхности. Так, наличие в растворе только оксалата аммония приводит к незначительному растворению углерода по поверхности волокна и сопровождается снижением его толщины с 6,0 до 5,6 мкм (рисунок 3б). В случае присутствия в растворе только гидрокарбоната аммония толщина волокна также незначительно уменьшается (с 6 до 5 мкм), но при этом наблюдается

весьма неравномерное травление поверхности волокна что приводит к образованию продольных каналов вдоль направляющей оси волокна и к сильному даже можно сказать деструктивному развитию его поверхности (рисунок 3в). Измерения показали, что величина удельной поверхности волокна в результате поверхностной обработки в таком растворе возросла в 6-10 раз ($0,96$ м²/г - $6,0$ - $9,0$ м²/г). Снимок волокна, обработанного в растворе обеих солей (рисунок 3г), свидетельствует о том, что оксалат аммония является ингибитором процесса развития поверхности волокна в ходе обработки. Удельная величина поверхности волокна в этом случае составляет $4,5$ м²/г, приводит к увеличению поверхности в 4-5 раз. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что основной вклад в развитие поверхности углеродного волокна вносит гидрокарбонат аммония, а оксалат аммония является ингибитором этого процесса [8].

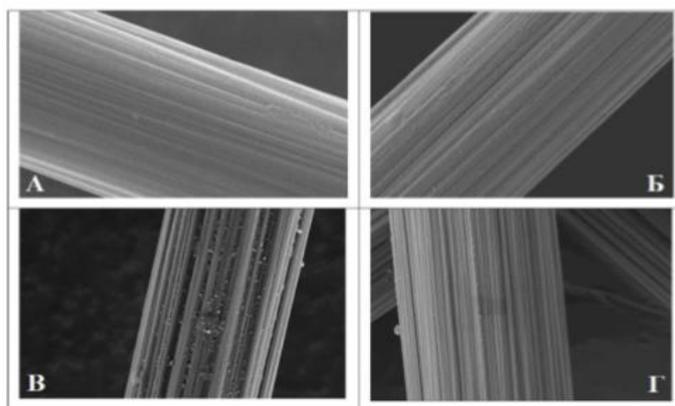


Рисунок 3 – Электронные снимки поверхности углеродного волокна, $\times 10000$: а) необработанное волокно; б) 0,6 моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$; в) 0,5 моль/л $(\text{NH}_4)\text{HCO}_3$; г) 0,5 моль/л $(\text{NH}_4)\text{HCO}_3 + 0,6$ моль/л $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$

Под ред. Дж. Гоулдстейна. М., 1978.

6. ГОСТ Р ISO 10618:2004. Волокно углеродистое. Определение свойств при растяжении нити, пропитанной смолой [Текст]//М.:2011, стр.23

7. Карпов Я.С. Авиационное материаловедение [Текст]/ учеб. пособие по лаб. практикуму/ Я.С. Карпов, В.В. Остапчук, Н.Д. Сазоненко, Н.И. Семишов. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2004. – 107 с.

8. Губанов А.А. Разработка процесса электрохимической модифи-

кации поверхности углеродного волокна с целью увеличения прочности углепластиков: Дис. ...канд. техн. наук: 05.17.03, 05.17.06 – Москва, 2018. – 148 с.

9. Применение композиционных материалов в технике, под ред. Б. Нотон, – Композиционные материалы [Текст] // М.: Машиностроение, 1978

10. Каданцева А.И. Углеродные волокна [Текст] / А.И. Каданцева, В.А. Тверской // Уч. Пособие, 2008, МИТХТ им. Ломоносова

© Морозов С. В.

УДК 620.22-419.8:621.642.17

ПРОИЗВОДСТВО МЕМБРАННОЙ ТКАНИ ДЛЯ СПОРТИВНОЙ ОДЕЖДЫ В АЛТАЙСКОМ КРАЕ

А. А. Белоусова, Н. А. Мягкова

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

Барнаул, Россия

Аннотация: Алтайский край имеет возможности развития малого предпринимательства в области изготовления мембранной ткани для спортивной одежды. Спрос формируется в результате развития туристской индустрии в регионе, открытием спортивных площадок для профессионального и любительского занятия спортом. В данной статье приведены результаты исследования конкурентов на региональном рынке среди производителей мембранной ткани из полимерных материалов для спортивной одежды; указаны типы применяемого оборудования; дано экономическое обоснование стартапа.

Ключевые слова: полимерные материалы, мембранная ткань, спортивная одежда, свойства мембранной ткани, свойства полимерных материалов.

Применение полимерных материалов в процессе изготовления ткани для спортивной одежды объясняется свойствами, которыми они обладают. Среди качеств полимерных материалов выделяются следующие:

- упругость, эластичность;
- низкая теплопроводимость (полимерный материал не проводит тепло)

- не поддается деформации при длительной нагрузке, способны восстанавливать свою первоначальную форму.

Качественное полимерное волокно по своим характеристикам не уступает натуральным тканям. Что касается обработки натуральных тканей, то она предполагает применение различных химических реагентов, которые смягчают ткань, подготавливают ткань к окраске,

закрепляют выбранный принт и т. д. Современные синтетические ткани – это высокотехнологичный продукт. Красивая и приятная ткань – таких характеристик современному потребителю недостаточно. Ткани из натуральных волокон отличаются непрактичностью и дороговизной материала. Трудно представить себе альпинистов в шубах из овечьей шерсти или футболистов, которые по полтора часа проводят на поле во время игры в футболке из хлопка [1].

Мембранная ткань – вид ткани, которая благодаря своей особой структуре обладает водоотталкивающими или ветрозащитными свойствами и в то же время пропускает через себя водяной пар. Мембранная ткань состоит из нескольких слоев: верхний износостойкий слой, нижний мягкий слой [2]. А между

ними несколько защитных слоев ткани и мембрана (рисунок 1).

Основные функции ткани: водонепроницаемость; паропроницаемость (характеризует массу пара в граммах, которую может вывести 1 м² материала в заданную единицу времени (обычно 24 часа), min паропроницаемости – 3000 г/м²). Мембрана не выполняет утепляю-

щие функции. Она оберегает от дождя, ветра, снега, обеспечивает «дыхание» телу, способствует обеспечению тепловых комфортных ощущений [2]. Одежда из такой ткани пользуется популярностью у спортсменов, занимающихся экстремальными видами спорта, а также у людей, которые любят активный отдых.

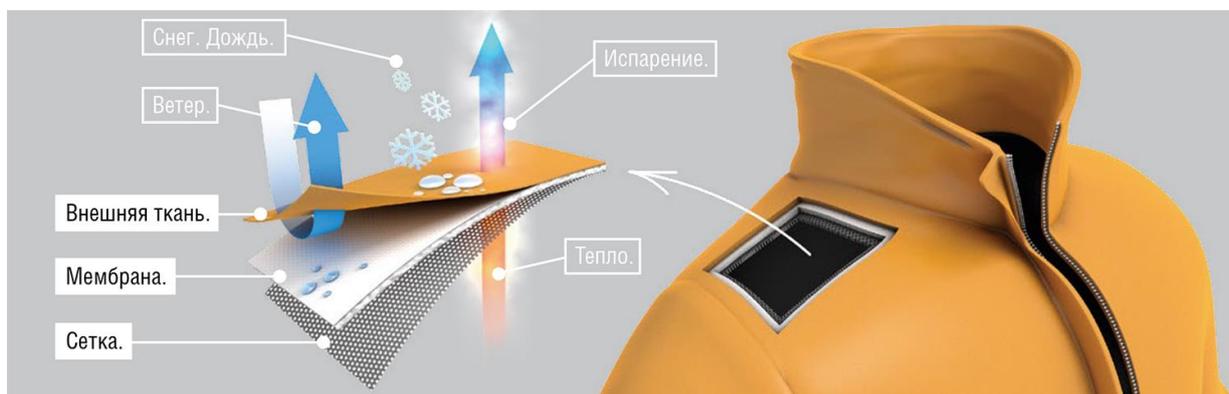


Рисунок 1 – Состав и свойства мембранной ткани из полимерных материалов для спортивной одежды

Для производства мембранной ткани потребуется следующее оборудование:

1. Ткацкий станок (рисунок 2);
2. Джиггер (аппарат для крашения тканей) (рисунок 3);
3. Станок для ламинации ткани (рисунок 4).



Рисунок 2 – Ткацкий станок Picanol



Рисунок 3 – Аппарат для крашения тканей



Рисунок 4 – Станок для ламинации полимерной ткани

Главным конкурентом данному производству в Алтайском крае является предприятие по изготовлению тканей из полимерных материалов ООО «БМК Текстиль» в сегменте спецодежды. В г. Барнауле пошивом спортивной одежды занимается ООО «АРГО-Эксклюзив». Приобретение мембранной ткани из полимерных материалов позволит данному предприятию расширить ассортимент, добавив новый вид спортивной одежды, увеличить объем производства.

Рассматриваемая ткань изготавливается из полиэстера и политетрафторэтилена, основными достоинствами которых являются износостойкость, за тканью из данных материалов легко ухаживать, они не теряют форму после длительной носки, на них не влияют кислоты и слабые щелочи, термостойкие, устойчивы к загрязнениям, отталкивают влагу, ткань не скатывается [4].



Рисунок 5 – Этапы изготовления мембранной ткани для спортивной одежды

Результаты расчета показали, что при стартовых расходах в размере 8,34 млн. руб., окупаемость составит 7 месяцев.

Учитывая вышеизложенные результаты исследований, можно сделать вывод о возможности освоения производства мембранной ткани в Барнауле и Алтайском крае.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полимерные материалы: что такое, основные виды, примеры изделий [сайт]: URL: <https://m-plast.ru/blog/sklad-obzor/polimernye-materialy-chto-takoe-osnovnye-vidy-prim/>
2. Мембранная ткань [сайт]: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Мембранная_ткань
3. Полиэстер: что за ткань, свойства, достоинства и недостатки: [сайт]: URL: <https://textile.life/fabrics/synthetic-fibers/poliester-chto-za-tkan-svoystva-dostoinstva-i-nedostatki.html>
4. Политетрафторэтилен: свойства и применение [сайт]: URL: <https://polimerinfo.net/politetraftoretile-n-svoystva/>
5. Мягкова, Н.А. Об экономической подготовке бакалавров направления «Материаловедение и технология материалов» [Текст] // Труды XIV Международной научной школы-конференции "Фундаментальное и прикладное материаловедение". – Барнаул: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2017. – С.83-86.

© Белоусова А.А., Мягкова Н.А., 2021

УДК 620.22-419.8:621.642.17

АНАЛИЗ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ СТАРТАПА ПРОИЗВОДСТВА КУЗОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМОБИЛЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. С. Герцен, Н. А. Мяжкова

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

Аннотация: В статье дано экономическое обоснование эффективности стартапа производства элементов кузова автомобиля из композиционных материалов. Рассмотрены две модели изготовления элементов кузова автомобиля.

Ключевые слова: матрица с использованием ручного формования, композиционные материалы, точка безубыточности, MVP.

Анализ конкурентоспособности стартапа производства элементов кузова автомобиля предполагает проведение SWOT-анализа, рас-

чет точки безубыточности по рассматриваемым моделям изготовления кузовных элементов.



Рисунок 1 – SWOT-анализ

Выполненный анализ позволяет выявить сильные стороны проекта, одной из которых является возможность ремонта элементов кузова, не только полной замены после повреждения.

Указанные возможности свидетельствуют о благоприятной ситуации на рынке Алтайского края для представленного стартапа.

В рамках данного проекта пла-

нируется применение двух моделей изготовления элементов кузова автомобилей:

- модель по типу закупки матрицы;
- модель по принципу доработки с помощью 3D принтера.

Поэтому построены два графика точки безубыточности для каждой модели, приведенные на рисунке 2 и 3.

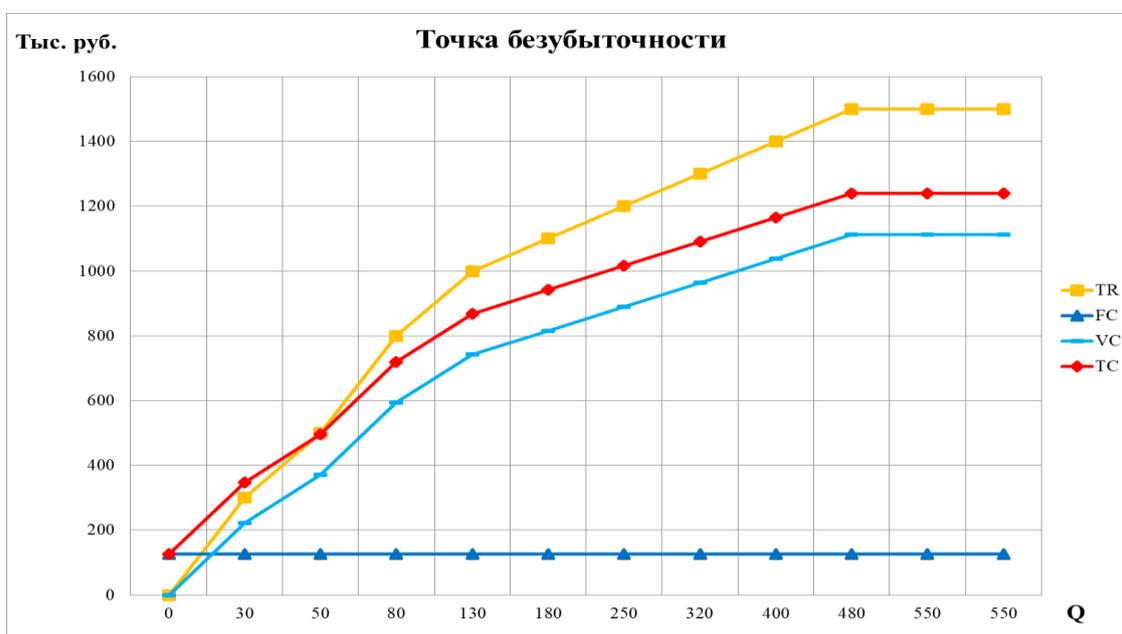


Рисунок 2 – График безубыточности при модели «закупка необходимых бамперов из АБС-пластиков под матрицу с использованием ручного формования».

Чтобы запустить производство была проведена оценка необходимого расходного материала и оборудования, с учётом привлечения квалифицированного персонала из которой следует, что стартовые расходы составят 5,5 млн. руб. Исходя из этого, был построен график зависимости общей суммы расходов, выручки, переменных и постоянных издержек от объёма выпускаемой продукции, что позволило оценить, при заданной тенденции точку безубыточности предприятия, выход на которую составит 7 месяцев. Минимальный перечень функционала продукта проекта включает: сохранение пропорционального и правильного внешнего вида машины, довершение ее стиля и дизайна; скрытие определенных функциональных деталей, таких как

каемой продукции, что позволило оценить, при заданной тенденции точку безубыточности предприятия, выход на которую составит 7 месяцев. Минимальный перечень функционала продукта проекта включает: сохранение пропорционального и правильного внешнего вида машины, довершение ее стиля и дизайна; скрытие определенных функциональных деталей, таких как

бачок омывателя фар, деталей кондиционера и так далее; защита навесного оборудования двигателя, а также радиатора охлаждения от повреждения на высокой скорости; увеличение пассивной безопасности

машины за счет улучшения поведения деталей кузова во время столкновения; удержание различных дополнительных средств оснащения, таких как подкрылки или задние брызговики.

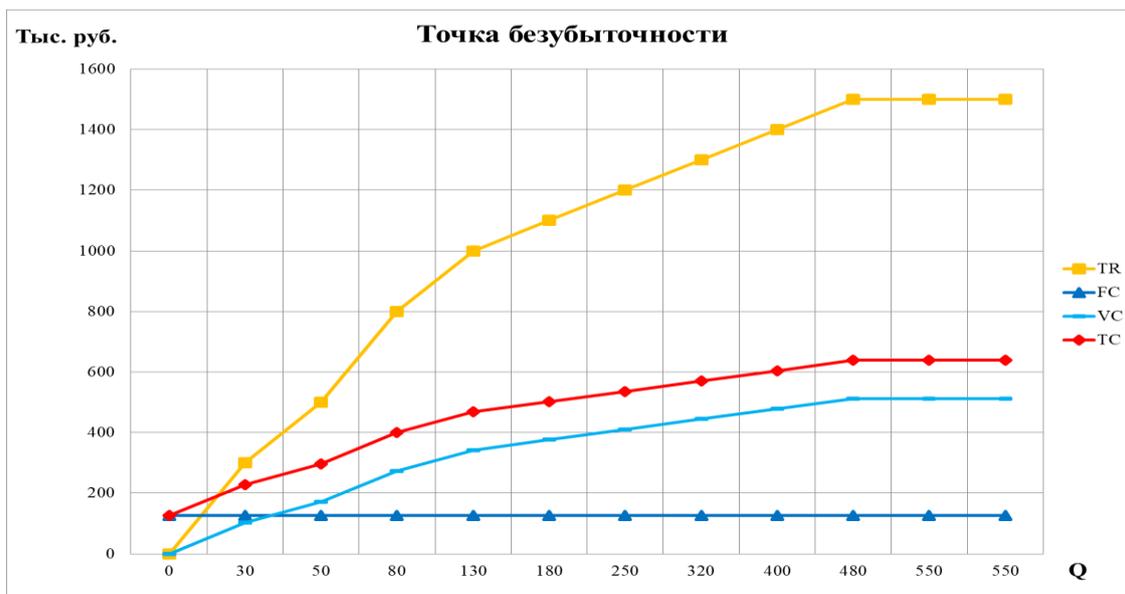


Рисунок 3 – График безубыточности при модели «снятие матрицы непосредственно с автомобиля и доработка с помощью 3D принтера».

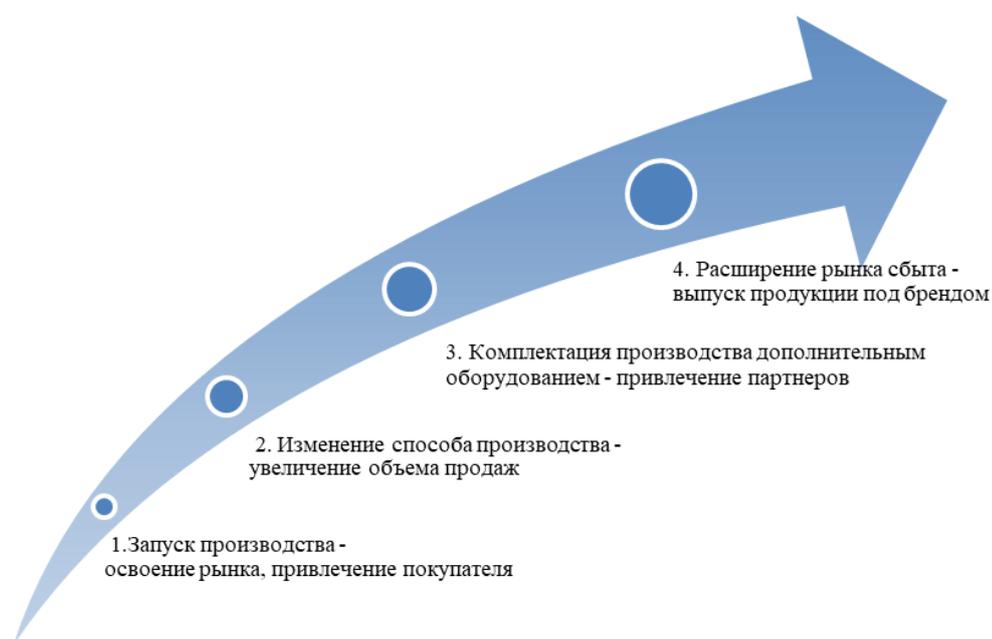


Рисунок 4 – Развитие MVP

На рисунке 4 отражены этапы развития MVP, последовательное прохождение которых позволит в перспективе расширять рамки выбранной деятельности по производству элементов кузова автомобиля из композиционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мягкова Н.А., Об организации наукоёмкого производства // Наука и практика организации про-

изводства и управления (Организация -2018). Материалы международной научно-практической конференции. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2019.- С.114-118.

2. Финансовый анализ. Точка безубыточности. Режим доступа: https://www.audit-it.ru/finanaliz/terms/analysis/tochka_bezubytochnosti.html

© Герцен В.С., Мягкова Н.А., 2021

УДК 620.22-419.8:621.642.17

СТАРТАП ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. В. Овечкин, Н. А. Мягкова

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

Аннотация: *Востребованность в восстановлении или тюнинге элементов кузова автомобилей среди автолюбителей, эксплуатирующих автомобиль в течение 10-20 лет, определили необходимость проанализировать потенциал стартапа по производству элементов кузова из композиционных материалов. В статье рассмотрены затраты при двух моделях: закупка матрицы и доработка с помощью 3D принтера.*

Ключевые слова: *элементы кузова из композиционных материалов, матрица, свойства стеклопластика.*

Содержание стартапа заключается в производстве элементов кузова из композиционных материалов для различных моделей автомобилей, высокого качества с минимально возможной стоимостью. Изготавливаемые изделия будут иметь

тот же функционал, что и аналоги, при более высоких прочностных характеристиках и меньших затратах на производство. Особенности технологии изготовления изделий требуемой формы из стеклопластика представлены на рисунке 2.



Рисунок 1 – Элементы кузова автомобиля, изготовленные из композиционных материалов

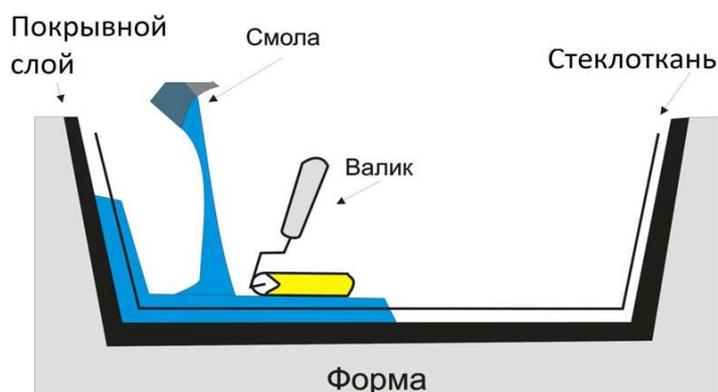


Рисунок 2 – Схема технологии изготовления требуемой формы из стеклопластика

Стеклопластик выбран в связи с тем, что его отличают следующие свойства:

1. Стеклопластик в отличие от АБС пластика, полиуретана или других материалов, можно восстанавливать практически бесконечное количество раз.

2. Стеклопластику, сделанному по технологии, абсолютно все равно какая температура на улице минус 50 или плюс. Благодаря правильной укладке армирующих волокон и сбалансированном содержании компонентов в слоях – композитные стеклопластики прекрасно чувствуют себя в лютый мороз или жару без изменения физических свойств.

3. Детали из стеклопластика имеют повышенную проч-

ность и жёсткость.

Для реализации данного стартапа необходимо привлечение различных источников финансовых средств. В качестве заёмных - рассматриваются инвесторы, программы для малого бизнеса. Что касается источников собственных средств, они представлены накоплениями участников проекта.

Рассматривается применение двух моделей изготовления элементов кузова автомобилей:

- модель по типу закупки матрицы;
- модель по принципу доработки с помощью 3D принтера.

Далее, в таблицах 1, 2 представлены расходы по каждой модели.

Таблица 1 – Затраты, сопровождающие модель расхода по типу закупки матрицы

Наименование	Затраты, тыс. руб.
Печать элемента	5
Закупка материала	35
Аренда помещения	10
Заработная плата	80
Итого	130

Таблица 2 – Затраты, сопровождающие модель по принципу доработки с помощью 3D принтера

Наименование	Затраты, тыс. руб.
Закупка бамперов (матрица)	15
Закупка материала	35
Аренда помещения	10
Заработная плата	80
Итого	140

Указанные результаты расчетов демонстрируют, что обе модели являются экономичными.

В качестве целевой аудитории выбраны автовладельцы, эксплуатирующие автомобиль в течение 10-20 лет.

Среди конкурентов в Алтайском крае можно отметить компанию ИП «GT22RU», которая занимается изготовлением кузовных элементов для автомобилей из стекловолокна в малых объемах по более простым методикам.

Предлагаемые модели изготовления элементов кузова автомобиля будут конкурентоспособными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свойства и характеристики стеклопластика [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.poliuretan.ru/stekloplastik/> – Загл. с экрана

2. Как сделать и покрасить своими руками бампер из стекловолокна [Электронный ресурс] – Ре-

жим доступа: <http://autozam.ru/tiuning-mashini-i-dopolnitelnoe-oborudovanie/bamper-iz-steklovolokna-svoimi-rukami.html> – Загл. с экрана

3. Мягкова, Н.А. Тенденции в мировых производственных технологиях малого бизнеса // Экономика. Менеджмент. Сервис. Туризм. Культура. (ЭМСТК-2017). XIX Международная научно-практическая конференция-Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017.- С.138-139.

4 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. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_36719252_94922616.pdf

© Овечкин С. В., Мягкова Н. А., 2021

ВОЗМОЖНОСТИ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПИСАНИЮ ВОЗБУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА

А. А. Розный¹, А. Е. Резванова², А. В. Попов¹

*¹Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия*

*²Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Томск, Россия*

Аннотация: Рассмотрены возможности компьютерного моделирования электронной структуры углеродных наноконпозитов с использованием оригинальной методики описания возбужденных состояний открытых наносистем в условиях внешнего воздействия.

Ключевые слова: углеродный наноконпозит, УНК, наноматериалы, компьютерное моделирование, электронная структура, возбужденные состояния.

В последние два десятилетия с продвижением технического прогресса потребности в материалах с широким спектром свойств набирают темпы роста. Одним из классов материалов, удовлетворяющих современным требованиям, является углеродный наноконпозит (УНК), обладающий уникальными свойствами, которые находят применение в самых разных сферах производства, электроники, а также медицины. Использование УНК позволило существенно улучшить показатели для литиевых элементов питания [1] и калиевых элементов питания [2]. Также УНК позволил создать конденсаторы с высокой емкостью и быстродействием [3].

УНК находят широкое применение в современном машиностроении, например, в качестве различных защитных покрытий от агрессивных сред или уплотнителей, позволяющих изделию работать в повышенных температурных усло-

виях. При высокой температуре, порядка 1500-1700 °С углеродный наноконпозит превосходит предел прочности различных конструкционных, искусственных графитных соединений и даже чистых графитов в 3-5 раз. Исследованы наноконпозиты на основе тонких пленок, способные изменять свою электрическую проводимость под влиянием внешних факторов [4] и магнитные свойства в зависимости от способа обработки наноконпозитов [5].

Основным способом получения УНК является одностадийная технология, в результате которой одновременно формируются наночастицы углерода и связывающая их углеродная матрица. Данная технология получения УНК является самой выгодной с экономической точки зрения по сравнению с технологиями получения обычных наноконпозитов, где процесс разделяется на различные производ-

ственные этапы формирования структур и получения самих наночастиц.

При создании нового УНК крайне важно знать свойства получаемого материала, т.к. основную характеристику материала определяют именно его свойства, от которых зависит область применения материала. Существенное количество физико-химических свойств вещества можно определить, исследуя электронное строение. Более того, использование расчетных методов позволяет получить достаточно полное представление о свойствах нового материала без проведения лабораторных испытаний.

Квантово-механический подход позволил достичь значительного успеха в исследовании электронной структуры атомов, молекул и даже твердых тел. Наиболее популярными являются методы расчета электронной структуры вещества в основном состоянии. Однако больший интерес представляют возбуждения, вызванные внешними воздействиями, в которых пребывают электроны синтезируемого материала. Не меньший интерес представляют метастабильные состояния, возникающие в ходе синтеза вещества в открытых системах в условиях сильного внешнего воздействия.

$$\left(\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta * \frac{\partial}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}\right) Y(\theta, \varphi) = -l(l+1)Y(\theta, \varphi) \quad (3)$$

Решение уравнения (3) в общем случае позволяет l принимать любые значения, в том числе, в комплексной области. Однако,

Электроны таких систем испытывают орбитальные переходы, приводящие к образованию возбужденных структур с различным временем жизни, что добавляет существенные трудности как при теоретическом описании, так и при экспериментальном изучении происходящих процессов.

В настоящей работе рассмотрена возможность описания возбужденных электронных состояний наноконпозитов на основе углерода с использованием предложенной ранее методики, учитывающий ширину энергетических уровней [6].

Опишем главную идею этого подхода на примере спектральной задачи многоэлектронного атома, основное состояние которого описывается с помощью стационарного уравнения Шредингера:

$$\mathbf{H}\psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где \mathbf{H} – гамильтониан системы.

Стандартное решение данной задачи сводится к разделению радиальных $R(r)$ и угловых $Y(\theta, \varphi)$ переменных, в результате которого волновая функция $\psi(\mathbf{r})$ представляется в виде:

$$\psi(\mathbf{r}) = R(r)Y(\theta, \varphi). \quad (2)$$

При этом угловая функция $Y(\theta, \varphi)$ удовлетворяет уравнению

стандартное решение спектральной задачи предполагает наложение граничных условий в виде регулярности решений на сфере при $0 \leq$

$\theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$, непрерывности при $\theta = 0, \theta = \pi$, а также периодичности $Y(\theta, \varphi + 2\pi) = Y(\theta, \varphi)$.

При рассмотрении возбуждений будем исходить из следующей логики: поскольку внешнее воздействие на электрон приводит к изменению его импульса и момента импульса, значит, и собственные значения соответствующих им операторов также изменяются, то можно говорить о квазинепрерывном спектре их изменения. Таким образом, при описании электронных возбуждений в атоме можно не ограничиваться только целочисленными значениями

орбитального квантового числа, а в общем случае рассмотреть всевозможные его значения, в том числе комплексные. Отсутствие каких-либо граничных условий по переменной θ снимает все ограничения на численные значения l орбитального квантового числа. Поэтому можно говорить о комплексных значениях орбитального квантового числа $L = l + x + iy$, где l – целочисленные. Область изменения такого расширенного орбитального квантового числа представлена на рисунке 1.

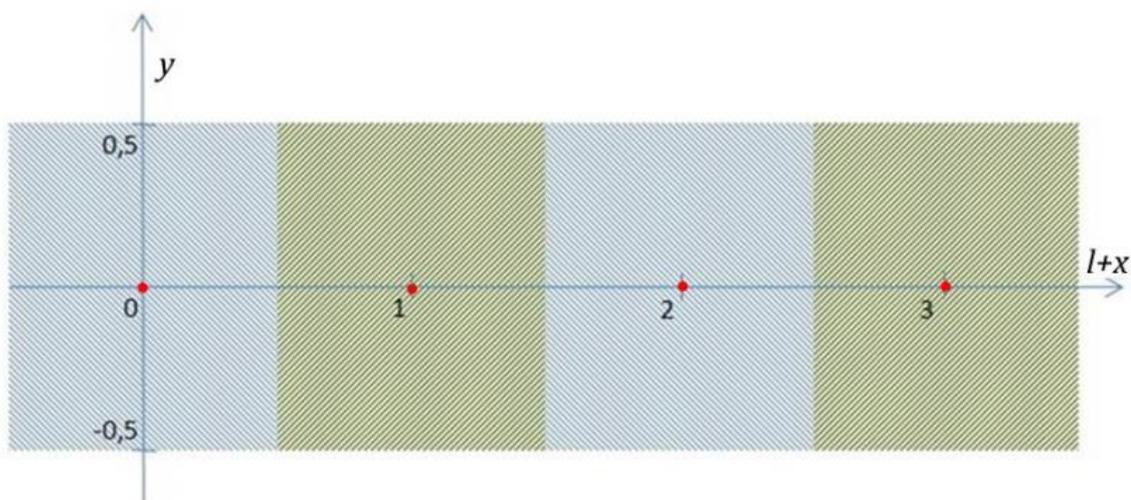


Рисунок 1 – Область изменения комплексного орбитального квантового числа в атоме $L = l + x + iy$. Для основного состояния допустимые значения l отмечены красными точками

Предложенный подход позволяет свести спектральную задачу к решению уравнения Шредингера следующего вида:

$$\left(\mathbf{H} + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{u + iv}{r^2} \right) \psi(\mathbf{r}) = \varepsilon \psi(\mathbf{r}), \quad (4)$$

где \mathbf{H} – оператор энергии для атома

в основном состоянии,

$$\begin{aligned} u &= x(x + 2l + 1) - y^2, \\ v &= y(2x + 2l + 1). \end{aligned} \quad (5)$$

Отметим, что при $y \neq 0$ решение уравнения (4) будет иметь комплексные значения энергии $\varepsilon = E -$

$i\Gamma/2$. По мнимой части полной энергии Γ можно оценить время жизни возбужденного атома τ , учитывая принцип неопределенностей Гейзенберга $\tau \sim \hbar/\Gamma$. Решая самосогласованно уравнения (4) путем перебора всевозможных значений $|x| \leq 0.5$ и $|y| \leq 0.5$ можно получить полное представление о всевозможных орбитальных переходах электронов. При этом данный подход не содержит предположений о типах возбуждений, что позволяет рассматривать возбуждения любой природы и мощности.

Численная реализация предложенного подхода была апробирована на примере кластеризации одиночных атомов углерода [7]. Были обнаружены метастабильные возбуждения в малых кластерах углерода. Также был смоделирован процесс формирования метастабильных малых кластеров углерода в плазменном потоке гелия [8].

При этом предлагаемый подход позволил включить в рассмотрение не только поле окружающих атомов, но и дал возможность учета дополнительного внешнего воздействия на систему, в частности, лазерного излучения. При этом рассматриваемая система остается открытой, что соответствует условиям практического синтеза материалов. Более того, предлагаемый подход позволяет исследовать условия возникновения новых метастабильных состояний, определить их время жизни, а также их роль в процессе образования стабильных структур.

Работа проводилась в рамках государственного Задания FZMM-2020-0002.

ЛИТЕРАТУРА

1. Feixiang W. Graphene–Li₂S–Carbon Nanocomposite for Lithium–Sulfur Batteries / W. Feixiang, T. L. Jung, Z. Enbo [and etc.] // ACS Nano. – 2016. – Vol. 10. – N 1. – P. 1333–1340.
2. Rakesh V. SnP₃/Carbon Nanocomposite as an Anode Material for Potassium-Ion Batteries / V. Rakesh, N. D. Pravin, K. Hyeong-Seo [and etc.] // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2019. – Vol. 11. – N 30. – P. 26976–26984.
3. Runyu Y. Porous nitrogen-doped carbon/carbon nanocomposite electrodes enable sodium ion capacitors with high capacity and rate capability / L. Karen, P. H. Jan [and etc.]. – Nano Energy. – 2020. – Vol. 67. – P. 104240.
4. Николайчук Г.А. Электрические свойства пленочных наноккомпозитов на основе аморфного гидrogenизированного углерода / Г.А. Николайчук, О. Ю. Мороз, С. М. Дунаевский // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88. – вып. 11. – С. 1672–1677.
5. Сырьева А. В. Получение наноккомпозитов на основе различных марок технического углерода с полиметилгидросилоксаном темплатным способом / А. В. Сырьева, Ю. В. Суровикин // Институт проблем переработки углеводородов СО РАН / Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6. –

№2. – С. 227–232.

6. Попов А. В. Решение спектральной задачи для электронов в атоме, учитывающей ширину энергетических уровней // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 93. – С. 5–7.

7. Попов А. В. Агрегация атомов углерода // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – Т.7 – С. 80–86.

8. Popov A. V. Small carbon clusters formation in a helium plasma stream / A. V. Popov, N. V. Melnikova // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2020. – Vol. 115. – P. 113657.

© А. А. Розный, А. Е. Резванова, А. В. Попов, 2021

УДК 621.742.4

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК ИЗ ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ

А. З. Исагулов¹, Св. С. Квон¹, В. Ю. Куликов¹

*¹Карагандинский государственный технический университет,
г. Караганда, Казахстан*

***Аннотация:** Рассмотрены свойства отливок из жаропрочных сплавов, полученных методами литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) и в песчано-глинистые формы (ПГФ). Проведен сравнительный анализ пористости и неметаллических включений таких образцов. Проведён микроструктурный анализ. Приведены результаты испытаний на длительную прочность. Определено, что несмотря на более высокую стоимость ЛГМ по сравнению с ПГФ стоит рекомендовать ЛГМ для получения отливок из сложнoleгированных сплавов, поскольку эксплуатационные свойства повышаются на 13-15%*

***Ключевые слова:** жаропрочность, длительная прочность, литье по газифицируемым моделям, неметаллические включения, сплав, структура, пористость, микроструктура.*

Как известно, ХТС (холодно-твердеющие смеси)-процесс позволяет изготавливать отливки, по технологиям на основе катализаторов и смол. К достоинствам технологии на основе смол является точная поверхность формы, регенерация смеси, так же высокая жидко-текучесть жидкого металла по форме. Кроме того, ХТС-процесс позволяет полностью управлять процессом заливки, контролем времени, производительностью и качеством литья. ХТС-процесс является более перспективным по сравнению с песчано-глинистыми смесями (ПГС) [1].

Для ускорения схватывания и твердения компонентов холодно-твердеющей смеси в его состав вводятся различные вещества.

Формы из ХТС делаются по

разным технологиям. На данный момент в мире используют ХТС с жидкостекольным наполнителем [1-2].

В данной работе рассматриваются связующие в виде смолы и глины. Введение в состав смесей различных глиен позволяет использовать их самопроизвольные затвердевание для регулирования в широких пределах свойств (длительность индукционного периода твердения, прочность форм и стержней).

В соответствии с технологией песок – это основа, эпоксидная смола и глина – связующие вещества. Эпоксидную смолу обязательно смешиваем с отвердителем. Эпоксидные смолы получают с помощью процесса синтеза полимеров

из эпихлоргидрина и многоатомных фенолов в щелочной среде. Эпоксидные смолы отличаются высокой теплостойкостью. В данном случае работу выполняли с помощью эпоксидной смолы ЭП-СМ-ПРО. Смола этой марки является прозрачной модифицированной не отвержденной в начальном составе. Динамическая вязкость составляет 500-1500 Мпа. В комплект к ней обязательно идет отвердитель. Только в комплекте с отвердителем состав принимает твердое состояние. Соотношение смеси эпоксидной смолы и отвердителя идет 2:1.

Отвердитель – это жидкое химическое вещество или же катализатор. После соединения с эпоксид-

ной смолой состав обретает твердое состояние. Отвердители бывают двух типов: кислые и аминные. Для отверждения эпоксидных смол с кислыми отвердителями требуется высокая температура, поэтому их называют горячими отвердителями. А в данном опыте использовались аминные отвердители 921 ОП, или по-другому их называют холодными отвердителями [3]. Отвердитель 921 ОП является низковязким средством. Они затвердевают при комнатной температуре. После отверждения они переходят в неплавкое и нерастворимое состояние. Изделия из аминных отвердителей обладают высокой стойкостью к повреждению и УФ-излучению.

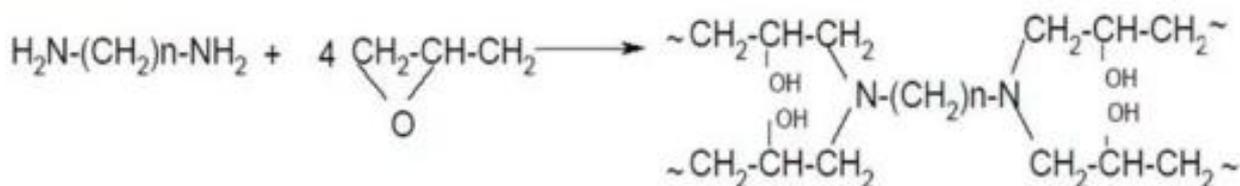


Рисунок 1 – Химический состав эпоксидной смолы

Этот состав обладает следующими достоинствами:

- полная герметичность
- отсутствие испарения вредных веществ после застывания
- высокая жидкотекучесть
- снижение себестоимости
- высокая стойкость к истиранию.

Эпоксидная смола широко применяется в быту, в строительстве. Из данного состава делают наливные полы, эпоксидные клеи, стеклопластиковые детали. Изго-

тавливают декорации из дерева, металла, бетона, а также их можно использовать как антикоррозионные покрытие для разных конструкции.

Для получения состава холодно-твердеющей смеси нам понадобятся различные тары, электронные весы, формы для образца, оборудование для трамбовки.

Пески отсеивали на лабораторном вибрационном сите, использовали стандартные металлические сито для литейного песка. Амплитуда 1,40 в течение 30 секунд. В

данных исследования использовали пески двух фракции 125 и 250 мкм.

Данные образцы из ХТС делаются следующим образом: сначала в тару 100 г помещается кварцевый песок, затем заливаем эпоксидная смола+ отвердитель (общая масса 15 г). А следующих двух образцах в состав включали белые глины. Образцы с белой глиной значительно отличается твердостью. Время перемешивания в первом случае составляет 2-3 минуты. А при использовании порошкообразного отвердителя, то есть, это глина, последний перемешивается в течение 2-4 мин с песком, затем вводится смола с отвердителем. Состав смеси для холоднотвердеющей формы пока-

зан в таблице 1.

В результате лабораторных испытаний получили 9 образцов холодно-твердеющей смеси. Структура образцов были исследованы на оптическом микроскопе Altami с увеличением $F=25, 0.25*10$.

Из данной смеси готовили образцы и уплотняли пуансоном на ручном прессе. После выдержки в течение заданного времени затвердевший образец выталкивали из гильзы металлическим стержнем.

Предпринята попытка с помощью современных методов исследования изучить механизм взаимодействия эпоксидной смолы с песком и глиной [3-5].

Таблица 1 – Состав смеси для форм из ХТС

Состав, №	Наполнитель (кварцевый песок)	Связующее (глина месторождения Белое Глинище)
1.	100 г (125 мм фракции)	10%
2.	100 г (125 мм фракции)	15%
3.	100 (250 мм фракции)	5 %
4.	100(250 мм фракции)	10 %
5.	100(250 мм фракции)	15 %

Исследования образцов на оптическом микроскопе показали (рисунок 1), что наличие глины (использовалась глина месторождения Белое Глинище) повышает соединение зерновой основы. Расстояние между частицами песка при использовании песка фракции 125 мм является значительно меньше, чем при использовании песка фракции 250 мм (рисунок 1, а,в).

Как мы видим на рисунке 1,в

зерновые основы очень хорошо соединены. Это в свою очередь обеспечивает ровную поверхность формы. Форма с низкой шероховатостью пропорционально высокой жидкотекучести сплава. Так как, мы рассматриваем литье тонкостенных изделий, такое свойство, как жидкотекучесть играет большую роль в данном виде литья.

Следующим этапом исследования является определение твердо-

сти образца. Определение твердости сырых форм, стержней модели проводилось твердомером для 04421 № 295, г. Усмань.

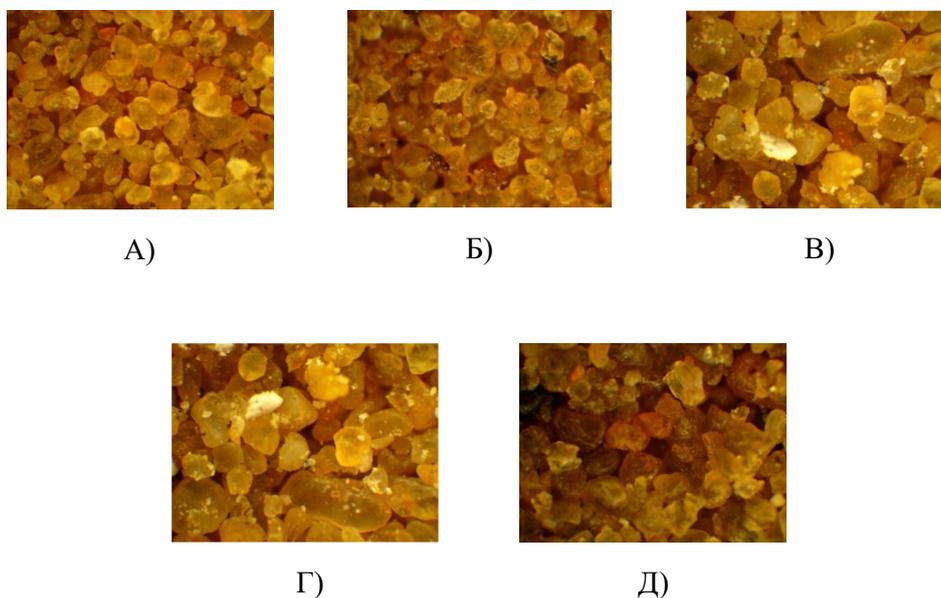


Рисунок 2 – Структура ХТС, где А - 100 г квар. песок (125)+ 10% белой глины; Б) – 100 г квар. песок (125)+ 15% белой глины; В) 100 г квар. песок(250) + 5 % белой глины; Г) - 100 г квар. песок(250) + 10% белой глины; Д) 100 г квар. песок(250) + 15% белой глины;

Измерение твердости одной и той же поверхности образца произведено три раза. В трех случаях твердомер дал одинаковые показатели (таблица 2).

Таблица 2 – Твердость образцов

Состав, №	Наполнитель (кварцевый песок)	Связующее (глина)	Эпоксидная смола ЭП-СМ-ПРО + Отвердитель 921ОП(2/1)	Время выдержки
				20ч
				Средняя твердость состава,
1.	100 (125 мм фракции)	10%	15	87
2.	100 (125 мм фракции)	15%	15	90
3.	100 (250 мм фракции)	-	15	94
4.	100(250 мм фракции)	5%	15	96
5.	100(250 мм фракции)	10%	15	90

По результатам исследования, видно, что твердость в образцах не значительно отличаются друг от друга. Так как, для изготовления тонкостенных отливок важна ее поверхность в качестве оптимального состава выбираем второй состав из исследуемых образцов, то есть состав следующий: 125 мм фракционный кварцевый песок, 15 г Эпоксидной смолы марки ЭМ ПР с отвердителем 921 РМ и в качестве связующего 15% глины от общего состава массы образца (месторождение Белое Глинище).

ЛИТЕРАТУРА

1. Инженерная экология литейного производства. Издательство "Машиностроение", 2010. 352 стр. ISBN:978-5-94275-523-2.

2. Куликов В.Ю., Достаева А.М., Алина А.А. Особенности холоднотвердеющей смеси и влияние компонентов на свойства смеси // *Материалы XIII всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: тра-*

диции и инновации (МТИ – 2020)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2020. – 42-44 с.

3. Alina A.A., Kulikov V.Y., Kovalev P.V., Dostayeva A.M. Study of thermal resistance of cold mixtures with clay addition // *Комплексное Использование Минерального Сырья.* №1 (316), 2021, 91-97.

4. Куликов В.Ю., Квон Св.С., Достаева А.М., Щербакова Е.П., Аринова С.К., Алина А.А. Влияние высокодисперсного наполнителя в составе холодно-твердеющих смесей на ее технологические свойства // *Литейщик России.* 2021. № 3. С. 15-17.

5. Куликов В.Ю., Еремин Е.Н., Ковалёва Т.В., Квон С.С., Исагулова Д.А. Разработка состава песчано-смоляной смеси для формообразования в условиях вариативного прессования // *Литейное производство.* 2019. № 4. С. 22-26.

© *Куликов В. Ю., Квон С. С., Достаева А. М., Алина А. А., 2021*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ВЫПЛАВКИ

А. З. Исагулов¹, Св. С. Квон¹, В. Ю. Куликов¹

¹Карагандинский государственный технический университет,

г. Караганда, Казахстан

Аннотация: Рассмотрены свойства отливок из жаропрочных сплавов, полученных методами литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) и в песчано-глинистые формы (ПГФ). Проведен сравнительный анализ пористости и неметаллических включений таких образцов. Проведён микроструктурный анализ. Приведены результаты испытаний на длительную прочность. Определено, что несмотря на более высокую стоимость ЛГМ по сравнению с ПГФ стоит рекомендовать ЛГМ для получения отливок из сложнoleгированных сплавов, поскольку эксплуатационные свойства повышаются на 13-15%

Ключевые слова: жаропрочность, длительная прочность, литье по газифицируемым моделям, неметаллические включения, сплав, структура, пористость, микроструктура

Известно, что способ выплавки отливок оказывает определяющее влияние на свойства готовой детали. Последующие технологические операции, такие как, например, прокатка, термическая обработка лишь способствуют проявлению потенциальных возможностей сплавов [1].

При литье жаропрочных сплавов используются различные способы выплавки: от ПГФ (песчано-глинистые формы) до направленной кристаллизации [2, 3]. Выбор технологии выплавки определяется как составом сплава, так и конфигурацией отливки. Для выплавки деталей несложной конфигурации, но работающей при высоких температурах в условиях постоянного нагружения, используются недорогие способы выплавки, в том числе и в ПГФ.

Литье в ПГФ характеризуется

низкой стоимостью и простотой технологии, что определяет широкую распространенность метода. Однако, низкий выход годного и невысокое металлургическое качество отливки при литье в ПГФ определяют применение других способов литья, даже при условии удорожания продукции [4].

С целью выявления оптимальной структуры и, следовательно, свойств готовой детали были проведены исследования по влиянию способа литья на микроструктуру готовой отливки. Отливка была получена двумя различными способами: литьем в разовые песчано-глинистые формы и литьем по газифицируемым моделям (ЛГМ). В качестве экспериментального сплава использовался опытный сплав, разработанный в НАО «Карагандинский технический университет», состав которого приведен в таблице

1. Микроструктура исследовалась на предмет неметаллических включений, определения балла зерна, наличия пористости.

Таблица 1 – Химический состав экспериментального сплава

Наименование	Содержание элементов, %											
	Al	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	S	P
Образец	0,062	0,49	0,94	1,01	16,6	0,07	0,09	2,10	1,30	2,2	0,016	0,047

Загрязненность неметаллическими включениями составляет 4 балла согласно ГОСТ 1778-80 [5]. Неметаллические включения представлены оксидами, нитридами и карбонитридами хрома, титана, ванадия, молибдена (рисунок 1).

Несмотря на традиционные представления о более низкой степени загрязненности неметаллическими включениями при ЛГМ [6-7], индекс загрязненности был практически одинаков как при литье в песчано-глинистые формы, так и при ЛГМ.

Исследования микроструктуры на наличие пористости показали, что при ЛГМ наличие и размер по-

ристости отличается от показателей при литье в песчано-глинистые формы.

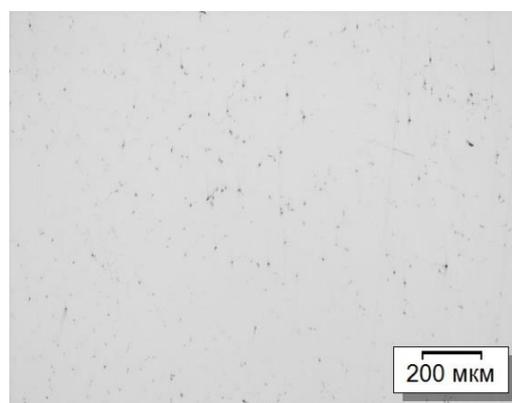


Рисунок 1 – Неметаллические включения в сплаве, $\times 100$



a



б

Рисунок 2 – Наличие пористости в структуре, где *a* – песчано-глинистая форма; *б* – ЛГМ ($\times 500$)

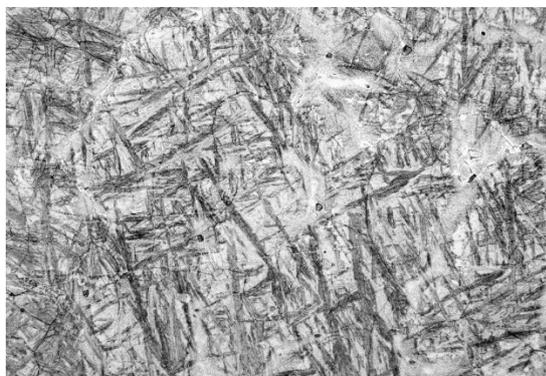
Структура при ЛГМ характеризуется меньшей объемной пористостью и более тонким и однород-

ным характером распределения пористости (рисунок 2).

Основная структура в обеих

отливках представлена бейнитоподобной матрицей с включениями комплексных карбидных фаз, твер-

дость матрицы составляет около 53 HRC (рисунок 3).



a



б

Рисунок 3 – Микроструктура отливки, где *a* – ЛГМ; *б* – песчано-глинистая форма ($\times 1000$)

На полученных образцах из разных отливок проводились испытания на длительную прочность при температурах 600 °С – 800 °С в течение 50 часов.

Испытания проводились на испытательной машине ТРМП-50-Э. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 4.

Таблица 2 – Результаты испытаний на длительную прочность

Номер образца	Предел прочности 600 °С, МПа	Предел прочности 700 °С, МПа	Предел прочности 800 °С, МПа
1 (ЛГМ)	345	312	296
2 (ПГФ)	302	286	275

Как видно из данных таблицы 2 и рисунка 4 результаты по длительной прочности в указанном диапазоне для образцов, полученных методом ЛГМ лучше, чем при ПГФ.

При комплексном анализе данных таблицы 2 и результатов металлографического исследования можно сделать определенный вывод: при ЛГМ структура отливки характеризуется большей однородностью, меньшей пористостью и более высокой дисперсностью основной матрицы. Поэтому, несмотря на одинаковый индекс загряз-

ненности в обеих отливках, уровень механических свойств в отливке, полученной ЛГМ, должен быть выше, что и подтверждено экспериментально.

Таким образом, несмотря на более высокую стоимость ЛГМ по сравнению с ПГФ стоит рекомендовать ЛГМ для получения отливок из сложнолегированных сплавов, т. к. наиболее значимые эксплуатационные свойства, в частности, длительная прочность, повышаются на 13-15% [8-10].

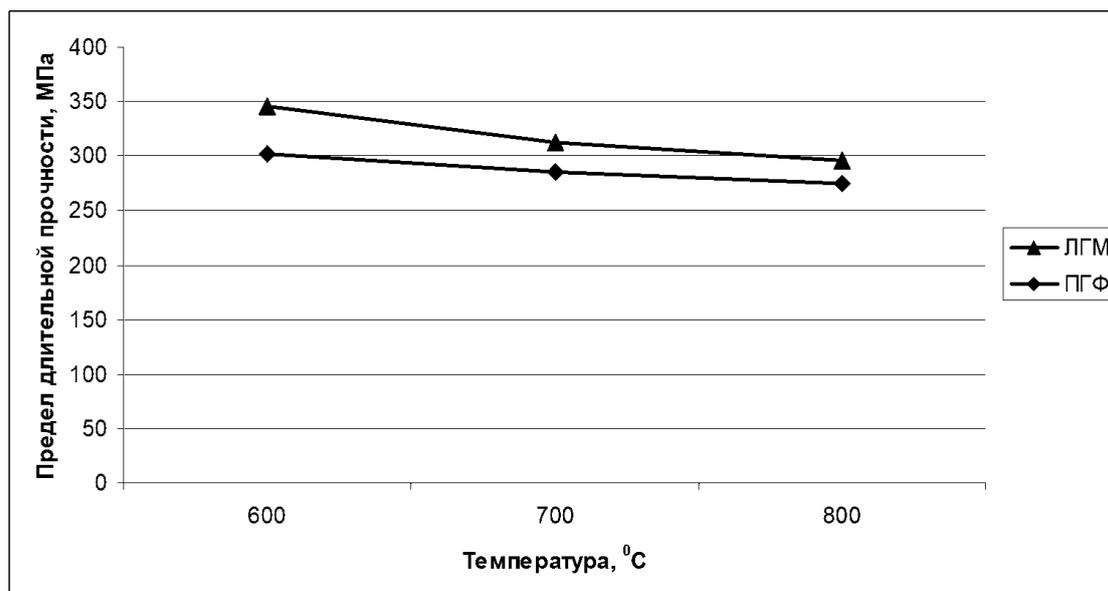


Рисунок 4 – Зависимость предела длительной прочности от температуры испытания

Технология ЛГМ является перспективным способом изготовления фасонных отливок, особенно тонкостенных и при использовании сплавов сложных составов. Литье с применением ЛГМ позволяет получить фасонные отливки сложной конфигурации с высокой чистотой поверхности и с меньшим количеством литейных дефектов по сравнению с классическим способом литья в песчано-глинистые формы. Способ ЛГМ является достаточно экономичным, т.к. при изготовлении моделей используется недорогой промышленный пенополистирол.

При разработке технологии изготовления отливок из экспериментального жаропрочного сплава приходится решать несколько задач:

- определить состав материала для изготовления моделей. Температу

ратура заливки жаропрочных сплавов обычно выше, чем температура заливки сталей и чугунов, а при использовании технологии ЛГМ температура заливки оказывает влияние на процесс выгорания модели;

- определить толщину антипригарной краски для покрытия моделей. Этот параметр влияет на газопроницаемость антипригарного покрытия и, соответственно, оказывает непосредственное влияние на процесс выгорания модели и, таким образом, определяет качество поверхности отливки.

- определить температуру заливки. Температура заливки, по сути, является определяющим фактором формирования первичной структуры отливки как на макроуровне (литейные дефекты, пористость, зональная ликвация), так и на микроуровне (балл зерна, неме-

таллические включения, дендритная ликвация).

ЛИТЕРАТУРА

1 Илларионов И.Е., Стрельников И.А., Бакиров Р.Б., Шалунов Е.П., Королев А.В., Моисеева О.В. Современное состояние получения стержней, форм и противопригарных покрытий для отливок из черных и цветных металлов и сплавов // Материалы II-ой международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве», Чебоксары, 2016, с. 36-47.

2. Кукуй Д.М., Николайчик Ю.А., Филимоненко Р.С. Закономерности формирования структурно-механических свойств противопригарных покрытий, модифицированных наноструктурированными материалами // Литье и металлургия. 2013. № 1 (69), с. 43-47.

3. Мелехин А.В. Производственный опыт получения отливок методом литья по газифицируемым моделям, перспективы развития // Литейщик России, 2012, № 12, с. 29-31.

4. Грузин В.Г. Температурный режим литья сталей. М, Металлургия, 1988, 245с

5. ГОСТ 1778-70 (ИСО 4967-79) Металлографические методы определения неметаллических включений.

6. ГОСТ 28250-89 Полистирол ударопрочный. Технические условия.

7. Пономарева К.В., Деев В.Б., Юдин А.С., Сметанюк С.В., Никитина А.А. Влияние плотности полистироловых моделей на качество отливок «крышка корпуса газоанализатора» // Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество», Новокузнецк, 14-15 октября 2014. С. 134-139.

8. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Твердохлебов Н.И., Ковалёва Т.В. Литье по газифицируемым моделям в опоках с боковым и нижним забором воздуха // Литейное производство. 2016. № 10. С. 22-25.

9. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Твердохлебов Н.И., Щербакова Е.П., Ковалёва Т.В. Влияние краски на качество чугунных и стальных отливок сложной конфигурации при ЛГМ // Литейное производство. 2015. № 7. С. 17-19.

10. Аринова С.К., Исагулов А.З., Квон С.С., Куликов В.Ю., Щербакова Е.П., Достаева А.М. Исследование структуры отливок из жаропрочных сплавов, полученных способом ЛГМ // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. № 39. С. 65-72.

© Исагулов А. З., Квон Св. С., Куликов В. Ю., 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА

А. З. Исагулов¹, Ибатов М.К. ¹, Св. С. Квон¹, В. Ю. Куликов¹

¹Карагандинский технический университет,

г. Караганда, Казахстан

Аннотация: Исследовано влияние бора на свойства жаропрочных сплавов. Для легирования использовали ферробор марки ФБ20. Определена зависимость предела длительной прочности от содержания бора. Приведены результаты испытаний на длительную прочность. Проведенные исследования показали, что введение микродобавок бора вплоть до 0,5% практически не влияют на предел длительной прочности сплава на основе Cr-Ni-Fe. Введение бора в качестве микролигатуры в сплавы на основе данной системы с повышенным содержанием хрома целесообразно вводить для улучшения качества сплава в целом.

Ключевые слова: жаропрочность, длительная прочность, ферробор, сплав, структура, микроструктура, раскислитель, фаза, легирование

В ранее проведенных исследованиях [1-4] исследовалось влияние бора на жаропрочные свойства сплава на основе системы Cr-Ni-Fe. Было показано, что увеличение содержания бора, начиная с 0,5 % до 1 % положительно влияет на предел длительной прочности при температуре 700 °С. Последующее увеличение содержания бора приводит к снижению предела длительной прочности и охрупчиванию сплава. Повышение предела длительной прочности связано с образованием фазы (Nb,Mo)₂B и комплексных карбо-боридных фаз.

Положительное влияние микродобавок бора на свойства сталей достаточно хорошо изучены. Введение бора в очень небольших количествах (0,001-0,02 %) значительно улучшает износостойкость и твердость, повышает прокаливаемость и жаропрочность, способствует измельчению зерна [5]. В некоторых работах также отмечается,

что микролегирование бором способствует также и повышению пластичности [6, 7] за счет образования тонкодисперсной структуры. Влияние бора можно классифицировать на две группы:

- в первом случае влияние бора проявляется в образовании комплексных упрочняющих фаз, выделяющихся по границам зерен и препятствующих движению границ, в результате чего улучшаются жаропрочность, износостойкость и др.

- во втором случае бор влияет на процесс кристаллизации, как гомофильный элемент, увеличивает скорость образования центров кристаллизации, повышает скорость кристаллизации, что приводит к образованию мелкозернистой структуры.

В работах [8, 9] показано, что увеличение бора в пределах от 0,85 до 1,15 % положительно влияет на предел длительной прочности сплава на основе системы Cr-Ni-Co

(0,40% С; 1,2% Mn; 0,40% Si; 20% Cr; 20% Ni; 4% Mo; 4% W; 4% Ni и Ta; 2% Fe; остальное – кобальт) за счет изменения микроструктуры сплава и образования новых фаз.

В работе [10] отмечается, что при микродобавках в сложнолегированных сплавах действие бора в количестве 0,001-0,0025% эквивалентно действию присадки 1,33% Ni + 0,31%Cr + 0,04% Mo; действие 0,002% В на прокаливаемость равнозначно влиянию 1,5% Ni .

Для проверки этого положения с целью уменьшения в сплаве дефицитного никеля и упрощения технологии выплавки сплава было изучено влияние микродобавок бора на предел длительной прочности опытного сплава. Количество бора в сплаве варьировалось от 0,005 до 0,5%. Состав начального сплава без введения бора указан в таблице 1. Сплав был разработан в Центре жаропрочных материалов при Карагандинском техническом университете (КарТУ) и показал достаточно хорошие результаты при испытаниях на длительную прочность при температурах 700-800⁰С.

Как известно, бор является химически активным элементом [5]. Он имеет очень высокое сродство к кислороду и азоту и поэтому легко вступает во взаимодействие с даже незначительными количествами этих элементов, образуя оксиды и нитриды при небольших концентрациях кислорода и азота. В связи с этим основная задача при легировании бором – повысить степень

его усвоения, т.е. создание условий, при которых бор не только образует комплексные фазы внедрения, но также и входит в состав твердого раствора.

Наиболее часто легирование бором проводят с помощью ферробора, который содержит значительные концентрации бора (ферробор марки ФБ20 содержит около 20% бора), но степень его усвоения в этом случае составляет около 30% [11]. Наиболее выгодно использовать комплексную лигатуру, содержащую алюминий и титан. Алюминий вводят как сильный раскислитель, титан вводят в сплав для предотвращения образования нитридов бора, причем отмечается, что оптимальное соотношение Ti:В должно составлять 15:1. Использование такой комплексной лигатуры позволяет повысить степень перевода бора в состав твердого раствора до 93-94%. Так как опытный сплав уже содержит достаточное количество алюминия и титана, то для легирования в данном случае использовали ферробор марки ФБ20, состав приведен в таблице 1.

Количество ферробора для легирования рассчитывалось, исходя из степени усвоения бора 85%. В данном случае имеется некоторое противоречие с данными [7], но т.к. жаропрочность, главным образом, достигается за счет образования фаз внедрения, то влияние бора проявляется не только в составе твердого раствора, но и в составе упрочняющих фаз, т.е. общее.

Таблица 1 – Химический состав ферробора ФБ20

Сплав	C	Cr	Ni	Fe	Mo	Nb	Ti	Al	Si	B	S
опытный сплав	0,065	44,9	35,94	ост.	0,95	1	4,145	3	-	-	0,015
ферробор	0,05	-	-	75,5	-	-	-	3	2	22	0,01

Опытную плавку проводили в индукционной печи УИП-25. Вес одной плавки составлял 4,5 кг. Температура разливки контролировалась с помощью платиновой термопары и поддерживалась на уровне 1600 °С. Перед загрузкой хрома и затем непосредственно перед разливкой добавлялся ферросилико-алюминий в качестве раскислителя. Бор вводился в виде ферробора ФБ20.

Точное литье образцов для испытания на длительную прочность производилось с помощью обычной

выплавляемой парафиновой модели. Для выплавления парафина изложницы прогревались и выдерживались при температуре 150 °С. Перед разливкой изложницы нагревались до 600 °С. Отливки охлаждались на воздухе до комнатной температуры. После очистки образцы проверялись на литейные дефекты, окончательная доводка поверхности образцов проводилась механической обработкой.

После плавки полученные образцы проверялись на химический состав (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав выплавленных образцов

Сплав	C	Cr	Ni	Fe	Mo	Nb	Ti	Al	Si	B	S
1 (эталон)	0,06	43,8	35,8	ост	0,85	0,98	3,65	3,2	0,94	-	0,015
2	0,062	43,7	35,95	ост	0,95	0,95	3,75	3,1	0,98	0,006	0,015
3	0,062	43,84	35,87	ост	0,86	1,01	3,89	3,22	0,96	0,022	0,015
4	0,063	43,7	35,96	ост	0,92	0,97	3,88	3,25	0,94	0,087	0,016
5	0,063	43,67	35,89	ост	0,94	0,98	3,92	3,28	0,96	0,215	0,016
6	0,063	43,75	35,82	ост	0,96	0,995	3,94	3,21	0,956	0,495	0,016

Готовые образцы подвергались термической обработке по режиму: выдержка продолжительностью 2 часа при 1100 °С с последующим старением в течение 4 часов при 700 °С.

После термообработки образцы испытывались на длительную прочность при температуре 700 °С в течение 100 часов. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний на длительную прочность

Номер образца	Содержание бора, %	Предел длительной прочности, σ_{100}^{700} , МПа
1	-	469
2	0,006	465
3	0,022	470
4	0,087	466
5	0,215	476
6	0,495	498

На графике показана экспериментальная линия регрессии (рисунок 1, кривая 1).

Расчётная линия регрессии (рисунок 1, кривая 2) построена по уравнению $y = 2,6786x^2 - 13,779x + 481,6$ с коэффициентом достоверности $R^2 = 0,9143$.

Как видно из данных табли-

цы 3, введение микродобавок бора вплоть до 0,5 % практически не влияет на предел длительной прочности. Лишь при увеличении содержания бора до 0,495 % приводит к заметному повышению предела длительной прочности на 9,4 %, с 469 до 498 МПа по сравнению с эталоном.

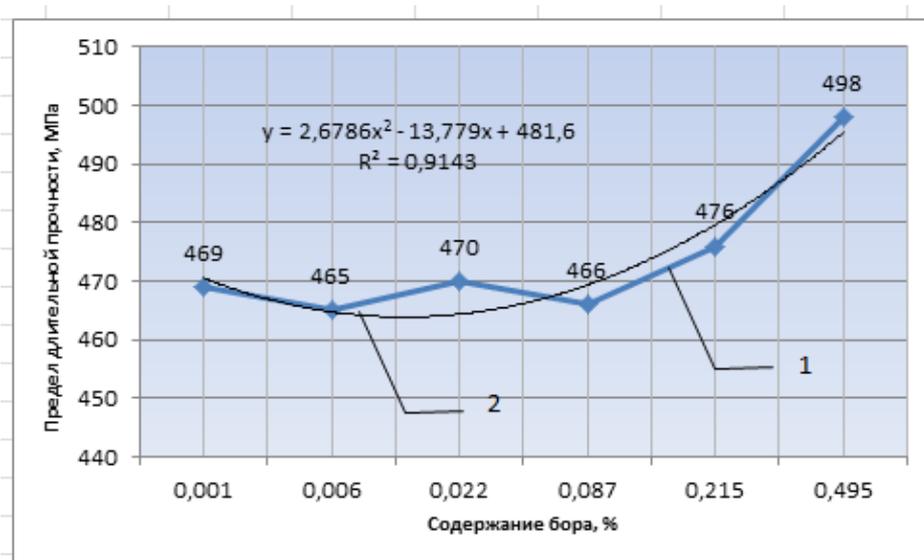


Рисунок 1 – Зависимость предела длительной прочности от содержания бора

Отсутствие эффекта при введении микродобавок бора в данный сплав можно объяснить следующими обстоятельствами. В рассмотренных исследованиях благотвор-

ное влияние микродобавок бора проявлялось, в основном, на сталях. В опытном сплаве присутствует большое содержание хрома, также присутствуют другие элементы, об-

разующие комплексные упрочняющие фазы – Ti, Nb, Mo, Al, содержание которых в несколько раз превышает количество вводимого бора. По всей видимости, в данном сплаве эффект влияния микродобавок бора на предел длительной прочности незначителен по сравнению с эффектом воздействия упрочняющих фаз. Лишь в случае увеличения содержания бора почти до 0,5 % наблюдается заметное увеличение предела длительной прочности. Увеличение содержания бора до 0,5 % почти в 5 раз превышает предел растворимости бора в железе, соответственно при таком избыточном по сравнению с предельной растворимостью содержании бора неизбежно образование борсодер-

жащих фаз внедрения, которые и способствуют повышению предела длительной прочности.

В связи с этим исследовалась микроструктура сплавов с содержанием бора 0 %, 0,006 %, 0,215 % и 0,495 % (образцы 1, 2, 5 и 6 соответственно). Микроструктура эталона, т. е. образца без легирования бором представлена аустенитной матрицей с включениями комплексной карбидной фазы типа $(Fe,Cr)_{23}C_6$, $(Nb,Mo)C$, Ti_3Al [1, 6]. Эти фазы являются фазами – упрочнителями, которые и определяют предел длительной прочности сплава.

На рисунке 2 представлены фотографии микроструктур сплавов с различным содержанием бора.

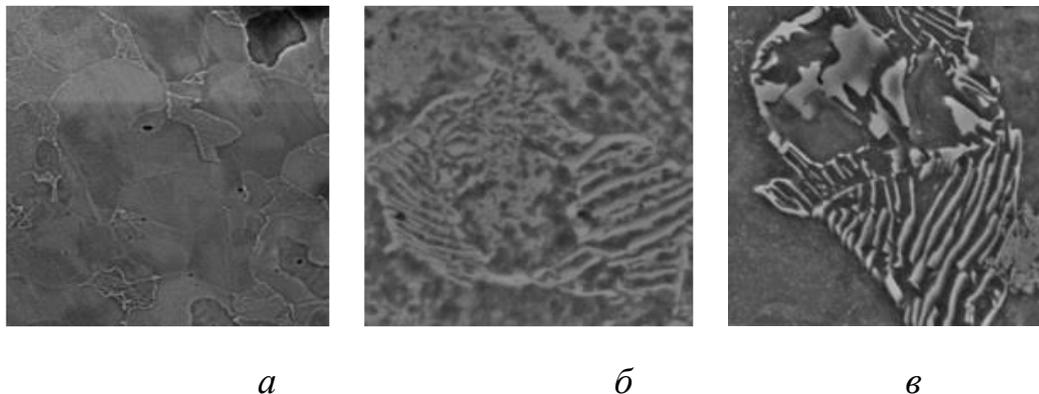


Рисунок 2 – Микроструктура сплавов с различным содержанием бора (а – 0%; б – 0,006%; в – 0,215%, $\times 5000$)

В сплавах с 0,006 % и 0,215 % бора микроструктура не носит принципиально новый характер, матрица представлена аустенитоподобной фазой с включениями фаз внедрения. Небольшое отличие наблюдается в более отчетливой структуризации, что уже отмеча-

лось ранее [12-14]. В этом очевидно проявляется влияние бора, который, как известно, способствует зарождению центров кристаллизации. Этим можно объяснить пластинчатое строение по типу перлита в отдельных участках микроструктуры.

Структура образца № 6, со-

держание бора 0,495 % (рисунок 3) носит несколько иной характер. Наблюдается достаточно большое количество фаз внедрения (а), ярко выраженная структуризация, четко выраженные границы, что обусловлено скоплением фаз внедрения.

Предварительный анализ природ фаз идентифицировал некоторые фазы как $(\text{Nb},\text{Mo})_2\text{B}$, также можно предположить образование борсодержащей эвтектики на основе железа и комплексные карбоборидные фазы на основе хрома.

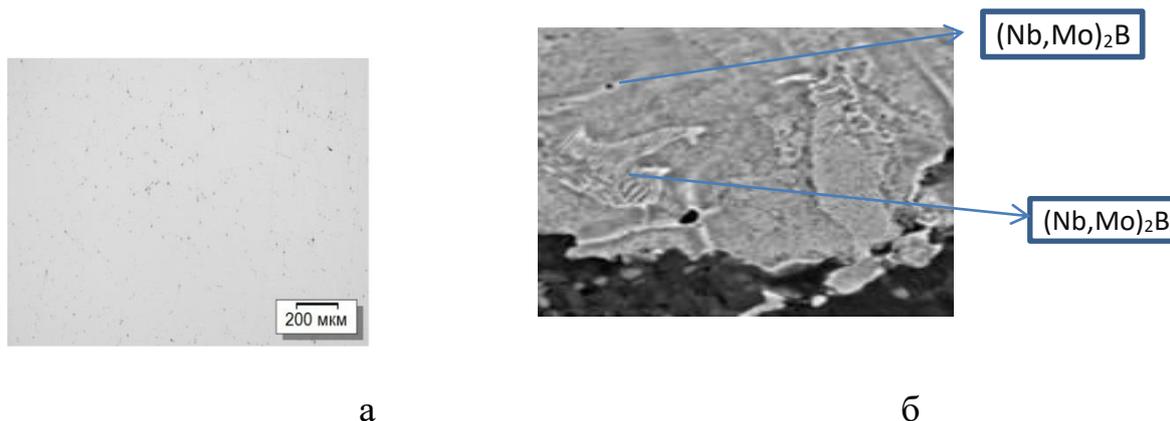


Рисунок 3 – Микроструктура сплава с 0,495 % В, где (а – $\times 200$, нетравленный; б – $\times 500$ после травления)

Проведенные исследования показали, что введение микродобавок бора вплоть до 0,5 % практически не влияют на предел длительной прочности сплава на основе Cr-Ni-Fe. Введение бора в качестве микролигатуры в сплавы на основе данной системы с повышенным содержанием хрома целесообразно вводить для улучшения качества сплава в целом, при этом не следует ожидать повышения улучшения жаропрочности, как в случае с жаропрочными сталями.

ЛИТЕРАТУРА

1 Issagulov A.Z., Kvon Sv.S., Kulikov V.Yu., E.A.Sidorina / Studying the effect of boron on heat-resistant properties of Ni-Cr alloys/

Metallurgija 56(2017) 3-4, 399-400.

2. Kovalev P., Riaboshuk S., Issagulov A., Kvon S., Kulikov V. Improving shipbuilding steel grade quality at stages of smelting, secondary refining, and continuous casting // Metals. 2019. Т. 9. № 2. С. 203.

3. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Твердохлебов Н.И., Ковалёва Т.В. Литье по газифицируемым моделям в опоках с боковым и нижним забором воздуха // Литейное производство. 2016. № 10. С. 22-25.

4. Kvon S.S., Kulikov V.Y., Issagulov A.Z., Ibatov M.K., Dostayeva A.M. Vibration impact on properties and parameters of steel ingot porous structure // Metallurgija (Zagreb, Croatia). 2019. Т. 58. № 1. С. 155-157.

5. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Борсодержащие стали и сплавы – М.: Металлургия, 1986. 280 с.

6. Дергач Т.А. Влияние бора на микроструктуру и свойства труб из низкоуглеродистой аустенитной хромоникелевой стали. "Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение", 2005, № 5. С. 92-96.

7. Тарасов А.М. Влияние бора на кинетику роста зерна аустенита и величину действительного зерна // МиТОМ. – 2008.- №1.

8. Kamada Y., Kusayasu H., Watanabe S. Relation between hardenability and segregation to austenite grain boundaries of boron atom // Tetsu to hagane., ISIJ.- 1988.- vol.74.- №11. P. 124-128.

9. Мирошник, Евгений Семенович. Механизм влияния бора и технологических параметров термической обработки на прокаливаемость низколегированных конструкционных сталей: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.16.01 / РГБ ОД, 9 90-11/617-6.

10. Шатохин И.М., Манашев И.Р., Зиатдинов М.Х. Патент РФ № 2375486.

11. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаро-

стойкие покрытия и жаростойкие стали для теплозащитных покрытий. Авиационные материалы и технологии. 2013, № 1. С. 17-12.

12. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Твердохлебов Н.И., Щербакова Е.П., Ковалёва Т.В. Влияние краски на качество чугунных и стальных отливок сложной конфигурации при ЛГМ // Литейное производство. 2015. № 7. С. 17-19.

13. Исагулов А.З., Квон С.С., Куликов В.Ю. Повышение износостойкости стали легированием в ковше // В сборнике: Инновационные технологии в литейном производстве. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета "Машиностроительные технологии" и кафедры "Технологии обработки материалов! МГТУ им. Н.Э. Баумана. Под общей редакцией К.А. Батышева, К.Г. Семёнова. 2019. С. 166-169.

14. Kvon S., Issagulov A., Kulikov V., Medvedeva I., Arinova S. Studying heat treatment impact on heat resisting properties of Cr-Ni – a.e. system alloy // Metalurgija (Zagreb, Croatia). 2017. T. 56. № 3-4. С. 382-384.

© Исагулов А. З., Ибатов М. К., Квон Св. С., Куликов В. Ю., 2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕТОНАЦИИ ПЛОСКИХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАРЯДОВ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ВВ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Л. Б. Первухин¹, А. А. Бердыченко²

¹ООО «Битруб Интернэшнл», 141292, Московская обл. г. Красноармейск, пр-т Испытателей дом 21, помещение 18

²Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова

Аннотация: Исследована зависимость образования дефектов сварного соединения при сварке взрывом от разлёта заряда взрывчатого вещества. Выявлено, что свободная поверхность заряда существенно влияет на скорость детонации ВВ и её устойчивость, и, как следствие, на стабильность параметров процесса сварки взрывом. Для стабилизации процесса детонации крупногабаритных плоских зарядов необходимо размещать на их поверхности слой инертного материала, что снижает вероятность появления непроваров и других дефектов.

Ключевые слова: сварка взрывом, плакирование крупногабаритных заготовок, ударная волна, засыпка.

В отечественной и зарубежной практике для сварки взрывом используются в основном низкоскоростные аммиачно-селитренные взрывчатые вещества (ВВ), в том числе смеси аммиачной селитры с дизельным топливом. Скорость детонации этих ВВ зависит от толщины заряда, содержания дизельного топлива и гранулометрического состава. Толщина заряда, как правило, близка к критическому диаметру и не превышает предельный для данного ВВ, то есть лежит в диапазоне нестабильного режима детонации. В работе [1] потерю стационарности и устойчивости детонации крупногабаритных плоских зарядов связывают с появлением движущихся поперечно фронту детонации возмущений, в результате взаимодействия которых образуются локальные области повышенных дав-

лений и температуры. Было высказано предположение о влиянии на стабильность детонации плоских крупногабаритных зарядов из ВВ на основе аммиачной селитры его свободной поверхности. Следует отметить, что влияние боковых поверхностей заряда всегда учитывается путём создания нависаний, для расчёта которых созданы методики [2]. На влияние поверхности заряда указывают результаты работы [3], в которой показано, что наличие прочных и массивных оболочек увеличивает время разброса ВВ, уменьшает потери газов в боковых направлениях и увеличивает ту часть газов, которая идёт на поддержание детонации.

Методика проведения исследований предусматривала анализ собственных данных по серийному производству сваркой взрывом би-

металла и опубликованных работ, построение теоретической модели и её экспериментальную проверку.

Обобщение накопленных данных о характере детонации крупногабаритных плоских зарядов низкоскоростных аммиачно-селитренных ВВ, в том числе смеси аммиачной селитры с дизельным топливом, и их влияние на качество сварки проводили:

- путём анализа представительного массива данных по плакированию крупногабаритных заготовок на Гилёвском опытно-экспериментальном заводе НПО АНИТИМ (с. Гилёво, Алтайского края) по следующим параметрам: толщина заряда, скорость детонации (расчётная и измеренная), сплошность сварки по результатам ультразвукового контроля, а также механические свойства и структура сварного соединения;

- выборочного анализа результатов сварки взрывом в ТОО «Биметалл» (п. Темир-Тау, Кемеровской области) по тем же параметрам;

- анализа данных, опубликованных в материалах симпозиумов и конференций по сварке взрывом, а также монографий и статей в журналах ФГВ, "Автоматическая

$$\begin{cases} PV^n = P_n V_n, & \text{при } P_k \leq P \leq P_n; \\ PV^k = P_k V_k^k, & \text{при } P \leq P_k; \end{cases}$$

где $P_n V_n$ – параметры продуктов детонации во фронте детонационной волны; $P_k V_k$ – параметры продуктов детонации в точке сопряжения; n – показатель изоэнтропы, $k =$

сварка", "Сварочное производство" и др.

В результате анализа качества крупногабаритных листов, сваренных по хорошо отработанной технологии, выявлены различные дефекты сварного соединения, появление которых связано с нестабильностью детонации заряда ВВ, проведена их классификация и показано, что наиболее распространённым дефектом является непровар. Появление непроваров обычно связано с изменением скорости детонации или её затуханием. В тоже время не обнаружено значительных колебаний прочности соединения и размеров волн по площади крупногабаритных сварных соединений, хотя пробег детонационной волны достигал 7,5 м, а площадь – 16 м².

При построении теоретической модели процесса детонации плоского заряда исходили из предположения, что ударная волна скользит по поверхностям, ограниченным с одной стороны металлической поверхностью плакирующего листа, а с другой некоторой поверхностью из металла, песка или воздуха. Для решения поставленной задачи использовали известные зависимости [4]:

1,2÷1,4. Преобразование и решение этой системы уравнений позволило получить зависимости при отсутствии забойки (1) и при её наличии (2)

$$\left\{ \begin{aligned} U_x &= \frac{D}{n+1} \left\{ \frac{2n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_k}{P_n} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \right] + \frac{2n}{k-1} \left(\frac{P_k}{P_n} \right)^{\frac{n-1}{2n}} \left[1 - \left(\frac{P_x}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \right\}; \\ U_x &= \sqrt{\left(\frac{2}{k_\alpha + 1} \right) \frac{P_x}{\rho_0}}; \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где ρ_0 – начальная плотность среды, P_x – давление в волне разрежения,

U_x – массовая скорость, D – скорость детонации.

$$\left[1 - \frac{n-1}{2} \left(\frac{U_x}{C_n} \right)^{\frac{2n}{n-1}} \right] P_n = D_x U_x \rho_0; \quad (2)$$

где $C_n = 0,75D_n$ – начальная скорость звука в продуктах детонации, D_x – ударная адиабата среды. По результатам расчётов были построены зависимости, которые позволили сделать вывод о том, что наличие инертной засыпки выравнивает давление по всей толщине заряда и обеспечивает полноту детонации. При разлёте продуктов детонации в воздух детонирует примерно половина толщины заряда ВВ, а при наличии забойки – детонирует весь слой ВВ. Очевидно, что при наличии забойки увеличивается длительность действия давления.

При разработке методики экспериментального исследования процесса детонации крупногабаритных плоских зарядов, имеющих толщину близкую к критической для данного ВВ, исходили из следующего положения: верхний слой заряда не участвует в реакции, его замена на инертную засыпку той же толщины, не должна влиять на энергию, выделяющуюся при детонации заряда, скорость детонации и качество сварки. Для экспериментального подтверждения этого положения провели три серии опытов:

1. При сварке взрывом пластин верхнюю часть заряда заменяли песком, при этом общая толщина заряда оставалась постоянной. Толщину песчаной засыпки изменяли от $d_{кр}/2$ до $d_{кр}$ ($d_{кр}$ – критический диаметр заряда). В качестве ВВ использовали аммонит 6ЖВ в смеси с аммиачной селитрой в соотношении 1:1 и смесь аммиачной селитры с дизельным топливом (3%). Поверхность пластин зачищалась до $R_z \sim 10-15$ мкм. Производили измерение скорости детонации. Определяли сплошность сварки ультразвуковым контролем, прочность соединения на отрыв и размеры волн.

2. Посредством измерения деформаций замкнутой оболочки взрывной камеры оценивали изменение энергии, выделяющейся при детонации зарядов. Деформацию оболочки измеряли в трёх точках методом тензометрирования по специальной методике, которая опробована при исследовании взрывных камер [5]. Образцы для сварки размещали в центре камеры, остальное производили как в предыдущем пункте.

3. При плакировании крупногабаритных заготовок (4200×1200×120 мм) в полигонных условиях параметры ударной волны оценивали по её акустическому воздействию на окружающую среду. Измерение уровня звука производили шумомером. Величина заряда без инертной засыпки составляла 400 кг смеси аммиачной селитры с дизельным топливом. Подготовка зарядов производилась аналогично п. 1.

Анализ результатов опытов показывает, что, если толщина песчаной засыпки равна половине критического диаметра, то не изменяются напряжённо-деформированное состояние взрывной камеры, скорость детонации ВВ, размеры волн, сплошность и прочность соединения. Следовательно, слой ВВ равный половине критического диаметра разлетается не участвуя в реакции, а оставшееся ВВ реагирует полностью. Это согласуется с результатами работы [3], где для количественного учёта этих потерь предложено вводить определённый эквивалентный слой, постоянный для данного ВВ, который совершенно не участвует в реакции. Для удлинённых зарядов цилиндрической формы толщину разбрасываемого слоя принимают равной половине критического диаметра.

Увеличение толщины песчаной засыпки пропорционально изменению величины напряжений в оболочке и при толщине засыпки равной четырём толщинам заряда напряжения в стенках взрывной ка-

меры снижаются в четыре раза. Аналогичные данные получены при измерении давления в воздушной ударной волне на расстоянии 200÷4000 м при взрыве зарядов ВВ с инертной засыпкой и без неё.

Проведенные исследования показали, что свободная поверхность заряда существенно влияет на скорость детонации ВВ и её устойчивость, и, как следствие, на стабильность параметров процесса сварки взрывом. Для стабилизации процесса детонации крупногабаритных плоских зарядов необходимо размещать на их поверхности слой инертного материала, что снижает вероятность появления непроваров и других дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даниленко В. А., Кудинов В. М. Особенности детонации крупногабаритных смесевых зарядов – Физика горения и взрыва, 1980, №5. – С. 56-63.
2. Деформация металлов взрывом / А. В. Крупин, В. Я. Соловьёв, Н. И. Шефтель, А. Г. Кобелев // М.: Металлургия, 1975. – 416 с.
3. Беляев А. Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем / М.: Наука, 1968. – 256 с.
4. Физика взрыва / А. Ф. Баум, П. П. Орленко и др. // М.: Наука, 1975. – 704 с.
5. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова М.: Машиностроение. 1987. – 216с.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ТВЕРДОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. А. Хапёрских, Е. С. Ананьева

ФБГОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, e-mail: snezhana_v@mail.ru

Аннотация. В статье анализируется влияние дисперсных наполнителей на твердость композита на основе эпоксидного связующего. Физико-механические процессы на границе раздела «матрица – наполнитель» подтверждают наличие межфазного слоя, который представляет собой недеформируемое тело. В связи с чем, поставлена задача – проанализировать не только наполнители, но и их объемную долю в матрице.

С использованием методики определения твердости на основе Бринелля выполнен анализ полученных данных. В результате чего было установлено, что большинство дисперсных наполнителей с увеличением их объемной доли повышают твердость композита. Это вызвано в первую очередь тем, что в дисперсно-наполненных композиционных материалах наполнитель упрочняет матрицу, а степень упрочнения зависит от формы частиц наполнителя, их количества и распределения. Исключением являются некоторые наполнители с высокой гигроскопичностью и низкой адгезией к матрице.

Автором было изучено влияние дисперсных наполнителей на конечные свойства полимерного композита с использованием растворителя – ацетона (с целью снижения вязкости композиции) и без него. На основании полученных данных было выявлено, что образцы без использования ацетона имеют значение показателя твердости на порядок выше, чем с добавлением ацетона. Кроме того, у образцов с ацетоном увеличился временной интервал отверждения.

В результате отбора проб, проведена сравнительная характеристика образцов. В результате чего дан анализ частиц наполнителя, выступающих в качестве центров кристаллизации, о взаимодействии с эпоксидной матрицей и отсутствии адгезионного взаимодействия. Стоит отметить, что данная статья обобщает практический опыт и требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: композит, полимерная матрица, наполнитель, твердость, адгезия.

Твердость полимерного материала – это способность сопротивляться вдавливанию в него других тел. По сути, она характеризует механические свойства поверхности материала. На нее влияют температура, величина и скорость приложенного усилия и другие внешние факторы. Мягкие и эластичные полимерные материалы, имеющие низкую твердость, могут быть использованы в качестве герметиков, уплотнительных и прокладочных материалов [1, с. 35]. В противовес

эластикам, твердые полимерные материалы применяются для изготовления конструктивных деталей, а именно, тормозных систем, зубчатых колес и подшипников, деталей резьбовых соединений, покрытий на режущий инструмент для сельскохозяйственных нужд.

Кроме того, полимерные композиционные материалы определенного типа и состава могут использоваться для защиты поверхностей металлических изделий, используемых в различных отраслях

производства. Особое распространение в производстве получили полимерные покрытия на основе термопластов, используемых для защиты внешней или внутренней поверхности изделий из стали (например, трубопроводов, оболочки проводов) работающих в разных климатических условиях.

Использование оборудования в сельскохозяйственной отрасли подразумевает износ деталей, пребывающих в постоянном внешнем трении материала о другие поверхности, которое сопровождается потерей массы. Но так, как испытания на износ требуют значительного времени для наиболее быстрого контроля качества полученных образцов, возможно использование показателя твердости. Кроме того, известно, что от твердости материала зависит истираемость: чем вы-

ше твердость, тем меньше истираемость.

Анализ твердости полимерных материалов производится по методу Шора [2]. Ряд полимерных материалов предполагает измерение твердости образцов по методу Бринелля [3].

Авторами данной статьи разработаны и изготовлены полимерные композиционные материалы, наполненные различными наполнителями. Каждый из которых был испытан на твердость методом вдавливания шарика в поверхность. Полированный закаленный шарик диаметром 10 мм вдавливали в поверхность испытуемого образца, толщиной не менее 10 мм с усилием 100 кгс (10 Н). Через 30 сек. после приложенной нагрузки измеряли глубину отпечатка. Значение твердости определяли по методу Бринелля [4]:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1)$$

где P – нагрузка на шарик, кгс; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

Для исследования были изготовлены образцы на основе эпоксидной смолы ЭД-22 и полиэтиленполиамины (таблица 1) в различном соотношении и с различными наполнителями.

Были изготовлены образцы с различным содержанием отвердителя от 8 до 12 массовых частей смолы ЭД-22 в количестве 5 шт. Образцы исследовали на твердость связующего после отверждения (таблица 2).

Таблица 1 – Свойства полиэтиленполиамины (ПЭПА), ТУ 2413-214-00203312-2002

Характеристика	Значение
Внешний вид	Светло-желтый
Плотность, г/см ³	0,956
Динамическая вязкость, мПа·с	250
Время желатинизации, ч.	1,5

Таблица 2 – Характеристика смол холодного отверждения

Наименование показателя	Массовая доля отвердителя в смоле, %				
	8	9	10	11	12
Твердость по Бринеллю, НВ	12,6	13,0	16,6	20,1	24,3

Стоит отметить, что не все образцы были исследованы на твер-

дость. Часть из них разрушилась на предварительной нагрузке (рисунок 1б), а некоторые не до конца отвердились (рисунок 1в). На неотвержденных образцах индентор практически весь погружался в образец, а на протяжении небольшого количества времени (порядка 45-60 минут) образец восстанавливал свою форму. Результаты исследования на определение твердости по методу Бринелля представлены на рисунке 2.



а)

б)

в)

Рисунок 1 – Внешний вид образцов для испытаний на твердость: а) эпоксино-диановая смола ЭД-22 с отвердителем ПЭПА (100:10); б) образцы с высокой хрупкостью; в) образцы с высокой пластичностью

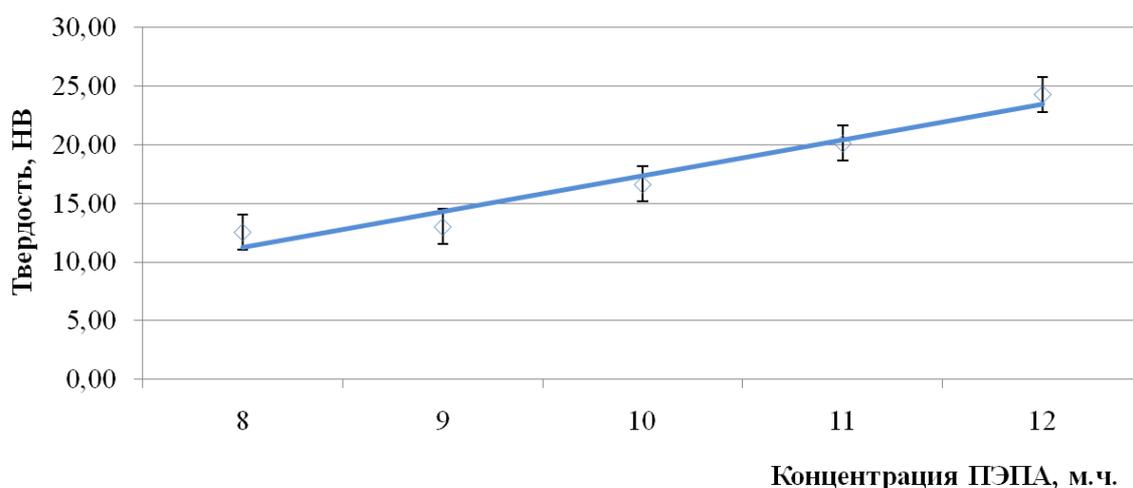


Рисунок 2 – Значение показателей твердости смолы ЭД-22 от концентрации ПЭПА

Образцы с массовой долей 11-12 % ПЭПА имеют высокую хрупкость, а с долей 8-9 % – слишком пластичны. Поэтому оптимально соотношение смолы и отвердителя 100:10.

В качестве наполнителей использовались: минеральный порошок, оксид алюминия, кварцевый песок, графит, волластонит, стекловолокно и прочие. Наполнители в композите будут являться центрами кристаллизации, что ускорит процесс отверждения композиции. Использование наполнителей предполагалось с различной объемной долей. Для каждого наполнителя эта доля имеет свое значение и зависит в основном от плотности наполнителя, зернистости и гигроскопичности. Основные характеристики

наполнителей приведены в таблице 3.

Смешение компонентов производилось до получения состава «густой пасты», именно поэтому появилась необходимость в снижении вязкости смолы посредством растворителя (в нашем случае это ацетон с объемной долей не более 2,5%). Поэтому, параллельно проведено исследование идентичных образцов, но с добавлением ацетона. Доля растворителя выбрана благодаря исследованиям, которые показали, что увеличение ацетона в связующем снижает твердость образца, а при концентрации более 2,5 % – определение твердости невозможно из-за повышения его пластичности и увеличения времени на его отверждение.

Таблица 3 – Характеристика наполнителей

Наименование показателя	Значение показателя	
	Истинная плотность, г/см ³	Зернистость/ фракция, мкм
Минеральный порошок	2,4	300
Алюминия окись	3,99	50-150
Песок кварцевый	1,6	300-600
Микросферакерамическая	0,64	40-120
Карбид кремния зеленый	3,21	13
Графит ГЛ-1	2,2	-
Волластонит	2,9	8-13
Волокно стеклянное	2,55	-

Полученные опытным путем образцы были исследованы на твердость. Графическая интерпре-

тация показателей твердости наполненных образцов КМ представлена на рисунке 3.

Дисперсно-наполненные полимерные композиции на макроуровне являются изотропными и однородными материалами в силу осреднения параметров состояния. В итоге независимо от направления

деформирования свойства материала получаются одинаковыми, так же, как и от выбора конкретной области для анализа (при расчетах) или испытаний (в эксперименте) [5].

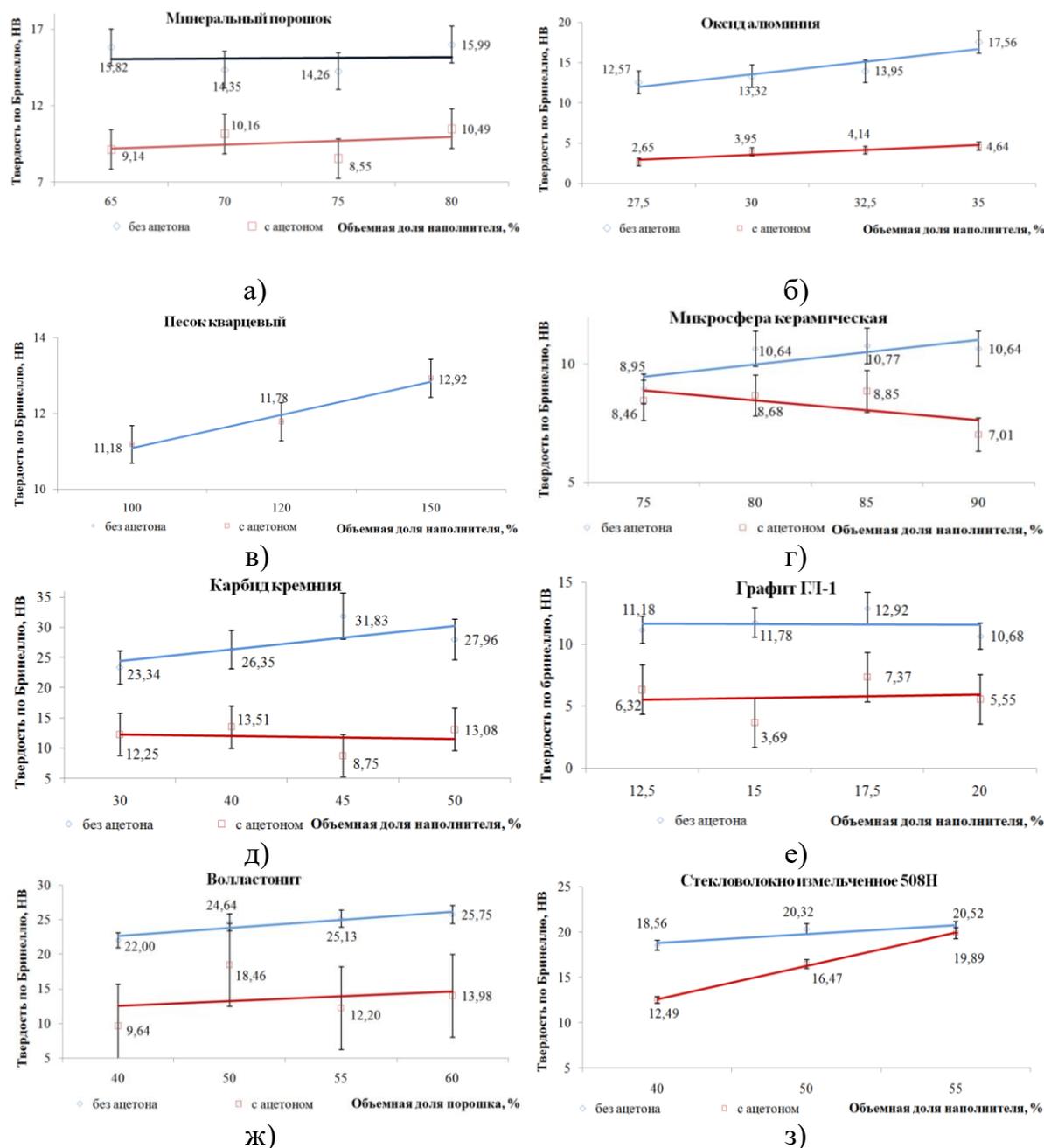


Рисунок 3 – Исследование модифицированных образцов на твердость по методу Бринелля

Анализируя рисунок 3, можно отметить, что твердость образца на основе стекловолокна с увеличением объемной доли возрастает.

И чем больше доля стекловолокна, тем больше твердость по Бринеллю. Причем объемная доля стекловолокна в размере 55 % характеризуется одинаковыми показателями твердости образцов с ацетоном и без. То есть, чем больше наполнение образца стекловолокном, тем больше его твердость и меньше влияния ацетона на структуру связующего.

При изготовлении образцов с кварцевым песком необходимо учесть осаждение песка на дно формы (например, с объемной долей песка равной 50-80%) будут соответствовать показателям отвержденной смолы без наполнителя.

Исходя из проведенных исследований по отбору проб, были отобраны рецептуры с наилучшими показателями твердости по Бринеллю (таблица 4).

Таблица 4 – Основные результаты отбора проб дисперсно-наполненных композитов на основе полимерной матрицы

Наполнитель	Объемная доля наполнителя	Твердость композита при отверждении	
		без ацетона	с ацетоном
Минеральный порошок	0,8	17,0	10,5
Песок кварцевый	1,5	12,9	12,9
Микросфера керамическая	0,9	10,8	8,8
Карбид кремния зеленый	0,5	31,8	13,5
Волластонит	0,6	25,7	18,5
Стекловолокно	0,4	20,5	19,9

В целом эти показатели соответствуют максимальным значениям концентраций порошка в связующем, что в свою очередь обеспечит внешний вид раствора в виде пасты и упростит процедуру нанесения ее на пластину.

По результатам испытаний дисперсно-наполненных образцов видно, что максимальное значение твердости выявлено у образцов без ацетона. Наилучшими результатами обладают образцы, наполнен-

ные карбидом кремния (100:45) без ацетона. С добавлением ацетона показатель падает в 2,4 раза. Стоит отметить, что для образцов наполненных кварцевым песком наличие ацетона не играет никакой роли, твердость остается одинаковой – 12,9 НВ. Огромную роль ацетон играет для образцов, наполненных оксидом алюминия, здесь снижение показателя составило практически в 4 раза, что может быть обусловлено структурой фракции

наполнителя и его гигроскопичностью. Вместо испарения в композите ацетон буквально впитывается в порошок оксида алюминия, а смола практически «закрывает» поры и не дает ему улечься. В результате чего – большое содержание влаги в изделии, низкое адгезионное взаимодействие на границе «матрица – наполнитель» и, как следствие, низкая твердость. Графическая интерпретация основных результатов отбора проб представлена на рисунке 4.

Анализируя рисунок 4, наблюдается следующее: полимерная матрица, наполненная кварце-

вым песком и микросферой керамической в отвержденном состоянии имеет показатели твердости ниже исходных (без наполнителя – 16,6 НВ, табл.2); а минеральный порошок, карбид кремния зеленый, волластонит и стекловолокно имеют показатель твердости выше исходной. В связи с чем, можно считать, что первая группа наполнителей снижает твердость композита. Частицы наполнителя, выступающие в качестве центров кристаллизации, практически не взаимодействуют с эпоксидной матрицей – отсутствует адгезионное взаимодействие «матрица – наполнитель».

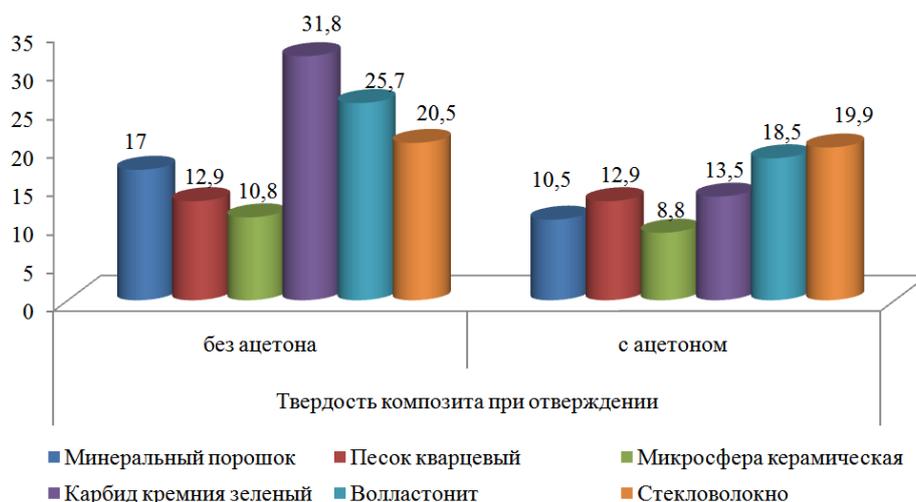


Рисунок 4 – Твердость образцов полимерного дисперсно-наполненного композиционного материала в результате отбора проб

Обратная картина наблюдается у второй группы образцов, где адгезионное взаимодействие на порядок выше.

Таким образом, сложные физико-механические процессы на границе раздела «матрица – наполнитель» в композиционных материалах на основе полимеров подтверждают обусловленность воз-

никновения межфазного слоя, характеристики которого существенно отличаются от характеристик блочного полимера. Как правило, параметры прочности (например, твердость, модуль Юнга) наполнителя во много раз превышают прочностные параметры матрицы, именно поэтому принято, что межфазный слой, так же как и армиру-

ющие включения, представляет собой недеформируемое тело.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сутягин В. М. Основные свойства полимеров: учебное пособие / В. М. Сутягин, О. С. Кукурина, В.Г. Бондалетов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 96 с.

2. Тихомирова Т.С. Твердость полимерных антикоррозионных покрытий как характеристика их качества // Т.С. Тихомирова, А.Н. Рассоха/ – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tverdo-st-polimernyh-antikorrozionnyh-pokrytiy-kak-harakteristika-ih-kachestva/viewer> (Дата обращения 20.09.2021).

3. Исследование физико-механических свойств полимеров и

полимерных композитов: Лабораторные работы / Авт.-сост.: А.Г. Воронков, В.П. Ярцев. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 28 с.

4. Бердыченко А. А. Методические указания к практическим занятиям по курсу «Материаловедение и технология современных и перспективных материалов». АлтГТУ им. И. И. Ползунова – Барнаул: АлтГТУ, 2015. – 76 с.

5. Новиков В.С. Математическая модель зависимости износостойкости материалов от химического состава и твердости // В.С. Новиков, А.Н. Самойленко // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. - №3. – 2008. – с. 124-129.

© С. А. Ханёрских, Е. С. Ананьева, 2021

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ И ТВЕРДОСТИ НА ИСТИРАЕМОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. А. Хапёрских, Е. С. Ананьева

ФБГОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, e-mail: snezhana_v@mail.ru

Аннотация. В данной статье исследуется влияние дисперсных наполнителей на твердость и истираемость полимерного композита на основе эпоксидного связующего. Опираясь на ранее проведенные исследования, автором были отобраны образцы дисперсно-наполненных композитов на основе эпоксидной матрицы, были учтены их показатели твердости. Используя натурный метод проведения испытаний, также были получены результаты на истираемость композитов.

Известно, что истираемость материала напрямую зависит от его твердости, поэтому автором проведен анализ в прикладном пакете Excell, который доказывает некоторую зависимость показателей твердости и объемной доли наполнителя. В результате чего, выведено корреляционное уравнение, которое позволяет в определенном приближении предположить конечный результат показателя истираемости композита в рамках проведенного исследования.

Изучаемые вопросы могут заинтересовать специалистов, занимающихся разработкой материалов на основе дисперсно-наполненных композитов с целью снижения истираемости поверхности трущихся элементов техники, в том числе и сельского хозяйства. Стоит отметить, что статья обобщает практический опыт и требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: дисперсно-наполненный композит, полимерная матрица, твердость, истираемость, наполнитель.

Полимерные композиционные материалы определенного типа и состава могут использоваться для защиты поверхностей металлических изделий, используемых в различных отраслях производства. Особое распространение в производстве получили полимерные покрытия на основе термопластов, используемых для защиты внешней или внутренней поверхности изделий из стали (например, трубопроводов, оболочки проводов) работающих в разных климатических условиях.

Использование оборудования в сельскохозяйственной отрасли под-

разумеет износ деталей, пребывающих в постоянном внешнем трении материала о другие поверхности, которое сопровождается потерей массы. Но так, как испытания на износ требуют значительного времени для наиболее быстрого контроля качества полученных образцов, возможно использование показателя твердости. Кроме того, известно, что от твердости материала зависит истираемость: чем выше твердость, тем меньше истираемость [1].

Проблеме износостойкости уделялись исследования группы авторов [2, 3], но направлены они на

оценку износостойкости трубных марок полиэтилена. В данной статье будут рассмотрены полимерные материалы на основе эпоксидной матрицы.

Авторами данной статьи разработаны и изготовлены полимерные композиционные материалы, наполненные различными наполнителями. Каждый из которых был испытан на твердость методом вдавливания шарика в поверхность (закаленный шарик диаметром 10 мм, толщина образца не менее 10 мм, усилие 100 кгс (10 Н), время выдержки 30 сек).

Выбрано оптимальное соотношение смолы ЭД-22 и отвердителя ПЭПА в соотношении 100:10. В качестве наполнителей использовались: минеральный порошок, оксид алюминия, кварцевый песок, графит, волластонит, стекловолокно и прочие (таблица 1). Наполнители в композите будут являться центрами кристаллизации, что ускорит процесс отверждения композиции. Смешение компонентов производилось до получения состава «густой пасты».

Таблица 1 – Характеристика наполнителей

Наименование показателя	Значение показателя	
	Истинная плотность, г/см ³	Зернистость/ фракция, мкм
Минеральный порошок	2,4	300
Песок кварцевый	1,6	300-600
Микросферакерамическая	0,64	40-120
Карбид кремния зеленый	3,21	13
Волластонит	2,9	8-13
Волокно стеклянное	2,55	-

Полученные опытным путем образцы с различным объемным наполнением были исследованы на твердость.

Стоит отметить, что дисперсно-наполненные полимерные композиции на макроуровне являются изотропными и однородными материалами в силу осреднения параметров состояния. В итоге независимо от направления деформирования свойства материала получаются одинаковыми, так же, как и от выбора конкретной области для ана-

лиза (при расчетах) или испытаний (в эксперименте) [4].

Исходя из проведенных исследований по отбору проб, были отобраны рецептуры с наилучшими показателями твердости по Бригеллю (рисунок 1). В целом, эти показатели соответствуют максимальным значениям концентраций порошка в связующем, что в свою очередь обеспечит внешний вид раствора в виде пасты и упростит процедуру нанесения ее на пластину.



Рисунок 1 – Твердость дисперсно-наполненных композиционных материалов

По результатам испытаний дисперсно-наполненных образцов видно, что наилучшими результатами обладают образцы наполненные карбидом кремния (использована пропорция «связующее – наполнитель» - 100:45). Твердость композита с кварцевым песком – 12,9 НВ.

Сложные физико-механические процессы на границе раздела «матрица – наполнитель» в композиционных материалах на основе полимеров обусловлено возникновением межфазного слоя, характеристики которого существенно отличаются от характеристик блочного полимера. Как правило, параметры прочности (например, твердость, модуль Юн-

га) наполнителя во много раз превышают прочностные параметры матрицы [4], именно поэтому принято, что межфазный слой, так же как и армирующие включения, представляет собой недеформируемое тело.

С учетом того, что рабочие органы почвообрабатывающих машин работают в условиях абразивного износа, то их долговечность можно определить такими показателями, как износостойкость и истираемость. Истираемость – это потеря первоначальной массы образца материала, отнесенной к площади поверхности истирания, можно рассчитать посредством формулы (1):

$$И = \frac{(m_1 - m_2)}{F}, \quad (1)$$

где m_1 и m_2 – масса образца до и после истирания; F – площадь поверхности.

Ниже представлен испытательный стенд для испытаний на истираемость эталонных и модифицированных пластин (рисунок

2а). Внешний вид пластин, закрепленных в установке, представлен на рисунке 2б. Стоит отметить, что расположение пластин учитывает центры тяжести пластин и расположены равномерно.



Рисунок 2 – Испытательный стенд для проведения натуральных испытаний на истираемость (а) и закрепленные пластины в установке (б)

В качестве абразивного материала применяли отсев, щебень и песок в одной смеси. Длительность испытаний образцов составила 90 ч.

Результаты испытаний на истираемость стандартного (эталон-

ного) образца из стали и образцов с наполненным полимерным покрытием представим в таблице 2 в виде относительной истираемости, где за 1 взят эталонный образец.

Таблица 2 – Зависимость истираемости образцов от их твердости

Матрица	Наполнитель	Твердость, HRB	Истираемость, г/см ²	Истираемость относительно стандартного образца
Стандартный образец на металлической основе	-	89,9	0,013	1
Эпоксидная смола ЭД-22 + отвердитель ПЭПА (100:10)	минеральный порошок	17,0	0,096	7,2
	кварцевый песок	12,9	0,1	7,5
	микросфера керамическая	10,8	0,058	4,4
	карбид кремния зеленый	31,8	0,98	7,4
	воластонит	25,7	0,111	8,3
	стеклянное волокно	20,5	0,131	9,9

Анализируя таблицу 2, стоит отметить достаточно высокую ис-

тираемость полимерных компози- тов (рисунок 3) с различными

наполнителями, что в принципе не удовлетворяет условию: истираемость поверхности на основе КМ должна быть менее, либо соответствовать той же величине, что и стандартный образец-эталон. В

нашем случае эталон имеет наивысшие показатели твердости и истираемости. Тем не менее, имея данные величины, проведем их анализ.



Рисунок 3 – Относительная истираемость и твердость образцов дисперсно-наполненных композитов

Основное влияние на износостойкость сталей в условиях абразивного износа оказывает влияние содержание в них углерода, хрома и их твердость. Для их определения

$$\varepsilon = 0,24X_1 + 0,07X_2 + 0,11X_3 - 3,54, \quad (2)$$

где X_1 – содержание углерода, %; X_2 – содержание хрома, %; X_3 – твердость, HRC.

Используя данную математическую модель, определим зависимость относительной истираемости полимерных композиционных материалов и их твердости, используя прикладной пакет по анализу полученных данных в Excel.

В отличие от металлов истираемость полимерных композиционных материалов будет зависеть от ряда прочих факторов, а именно от:

группа авторов [5] использовало корреляционное уравнение зависимости относительной износостойкости сталей:

объемной доли наполнителя, размера фракции, твердости и прочих факторов. При создании КМ на основе ЭД-22, авторами данной статьи оценивались два фактора – объемная доля наполнителя и твердость композита. В результате чего было выведено корреляционное уравнение зависимости значений истираемости (I_{KM}) дисперсно-наполненных композитов (только на основе ЭД-22 и ПЭПА в соотношении 100:10):

$$I_{KM} = -0,6x_1 + 0,1x_2 + 6,2, \quad (3)$$

где x_1 – объемная доля наполнителя; x_2 – твердость отвержденного композита.

Производя расчеты по формуле (3), стоит отметить, что данная зависимость актуальна в момент проведения данного эксперимента. Кроме того, необходимо адекватно подходить к выбору того или иного дисперсного наполнителя. Например, такой наполнитель, как оксид алюминия, графит и другие наполнители имеет высокую гигроскопичность и низкую адгезию со связующим, что в свою очередь не позволит применять данную зависимость.

В целом, если наполнитель обладает низкой гигроскопичностью и хорошей адгезией, то вполне целесообразно использование формулы (3). Результаты, полученные в ходе проверки, соответствуют полученным опытным путем данным, погрешность измерений составляет не более 5%.

ЛИТЕРАТУРА

Тихомирова Т.С. Твердость полимерных антикоррозионных покрытий как характеристика их качества // Т.С. Тихомирова, А.Н. Рассоха // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2008. – С.

77-79. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16451024_77991311.pdf (Дата обращения 07.02.2021).

Ратнер С.Б., Ярцев В.П. Физическая механика пластмасс. – М.: Химия, 1992. – 186 с.

Двуглова Л.Я., Лурье Е.Г., Радюкевич О.В., Ратнер С.Б., Фарберова И.И. Износ (истирание) пластмасс и методы его оценки // Пластические массы, 1962. №1, с. 60-66.

Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин [и др.]; отв. ред. А.В. Герасимов; Рос.акад. наук, Сиб. отделение, Ин-т физики прочности и материаловедения; М-во образования и науки РФ, Нац. исслед. Том.политехн. ун-т, Том. гос. ун-т сист. упр. и радиоэлектр. [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017 – 311 с.

Новиков В.С. Математическая модель зависимости износостойкости материалов от химического состава и твердости // В.С. Новиков, А.Н. Самойленко // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. - №3. – 2008. – с. 124-129.

© С. А. Ханёрских, Е. С. Ананьева, 2021

ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СОПЛА РДТТ

И. В. Лунегов, Е. А. Головина

ФБГОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», г. Барнаул

Аннотация. В статье проведен термогазодинамический расчет параметров продуктов сгорания на виртуальной модели сопла ракетного двигателя, из которых следует что зоной максимальных температурных напряжений служит критическая часть сопла РДТТ. На полученных кривых отчетливо видны зависимости поведения параметров газового потока при прохождении сопла. Зависимости изменения параметров потока полностью соответствуют термогазодинамической теории течения, что и подтверждает правильность проведенного расчета.

Ключевые слова: сопло ракетного двигателя твердого топлива, раструб, углерод-углеродные композиционные материалы, термогазодинамический расчет.

Для определения граничных условий проведения температурных испытаний выполнен расчет параметров газового потока при входе в сопло РДТТ (входное сечение) и термогазодинамический расчет течения газов.

Для упрощения расчета параметров течения продуктов сгорания будем считать газ идеальным, а течение одномерное адиабатическое. В результате расчета для входного сечения сопла РДТТ находятся следующие параметры: термодинамическая температура T_n , давление p_n , скорость течения в м/с (U_n) и в Махах [1].

Газодинамическая функция расходонапряженности $q(\lambda)$ описывает плотность газового потока в случае неизменного расхода в сопле $q(\lambda) = \frac{(\rho U)}{(\rho U)_{кр}} = \frac{F_{кр}}{F_n}$ и определяется зависимостью [1]:

$$q(\lambda) = \lambda_n \left(1 - \frac{\lambda_n^2 (k-1)}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (1)$$

Имея площадь входного сечения находим значения газодинамической функции и из формулы (1) любым из имеющихся способов (математическим, графическим или табличным) определяется $\lambda = f(q_\lambda)$ – приведенная скорость.

$$\frac{0,059 \text{ м}^2}{0,31 \text{ м}^2} = \lambda_{вх} \left(1 - \frac{\lambda_{вх}^2 (1,17-1)}{1,17+1} \right)^{\frac{1}{1,17-1}} \left(\frac{1,17+1}{2} \right)^{\frac{1}{1,17-1}};$$

Решая получившиеся уравнение получим: $\lambda_{вх} = 0,12$.

По значению приведённой скорости во входном сечении определим газодинамические функции давления $\pi(\lambda)$ и температуры $\tau(\lambda)$ [1].

$$\pi(\lambda) = \frac{p_n}{p_k} = \left[1 - \lambda_n^2 \left(\frac{k-1}{k+1} \right) \right]^{\frac{k}{k-1}}; \quad (2)$$

$$\tau(\lambda) = \frac{T_n}{T_k} = \left[1 - \lambda_n^2 \left(\frac{k-1}{k+1} \right) \right]; \quad (3)$$

– определение газодинамической функции давления:

$$\pi(\lambda)_{\text{ВХ}} = \frac{p_{\text{ВХ}}}{p_k} = 0,93;$$

– определение газодинамической функции температуры:

$$\tau(\lambda)_{\text{ВХ}} = \frac{T_{\text{ВХ}}}{T_k} = 0,998;$$

По значениям гидродинамических функций рассчитаем точные значения давления и температуры во входном сечении сопла:

– определение давления:

$$p_{\text{ВХ}} = 9,3 \text{ МПа};$$

– определение температуры:

$$T_{\text{ВХ}} = 3352 \text{ К}.$$

Скорость течения продуктов сгорания вычислим по формуле:

$$U_n = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot R_T \cdot T_K \cdot \lambda_n}; \quad (4)$$

$$U_{\text{ВХ}} = 361 \text{ м/с};$$

Скорость потока продуктов сгорания в числах Маха определим по формуле:

$$M_n = \frac{U_n}{a}; \quad (3.24)$$

где $a = \sqrt{kRT}$ – местная скорость звука ($R=R_T$).

$$M_{\text{ВХ}} = 1,2.$$

Термогазодинамический расчет проводится при помощи модуля инженерного анализа SolidWorks Flow Simulation. Данный вычислительный комплекс позволяет моделировать потоковые процессы газовой или жидкой среде (CFD – анализ), который максимально приближает испытания к полевым условиям [2].

1. Анализ плотности и траектории движения газового потока продуктов сгорания в основных сечениях сопла РДТТ.

Траектория газовых потоков продуктов сгорания представлена на рисунке 1.

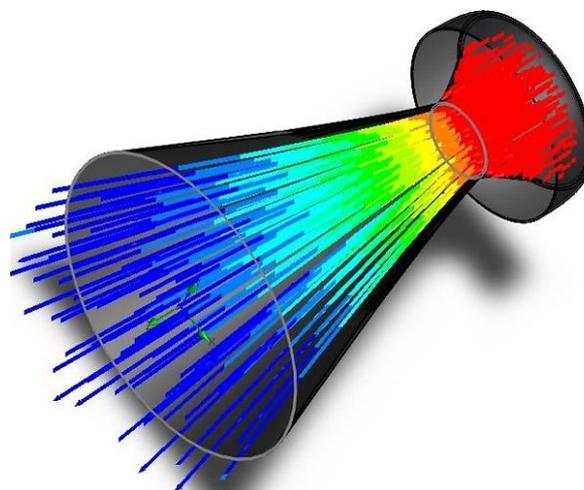


Рисунок 1 – Траектория течения газов в сопле РДТТ

Из рисунка видно, что плотность газового потока увеличивается при уменьшении площади сечения. Таким образом при протекании газов по критическому сечению сопла РДТТ становится максимальным, а при прохождении сверхзвуковой части (раструба) уменьшается пропорционально увеличению площади сечения раструба и на срезе раструба становится минимальным.

Газовый поток центральной части проходит критическое сечение по прямой без изменения траектории, остальные частицы в потоке движутся вдоль стенки раструба сопла РДТТ (угол вылета частиц равен углу раствора раструба сопла) и «завихряются» на кромке выходного сечения раструба сопла (рисунок 2).

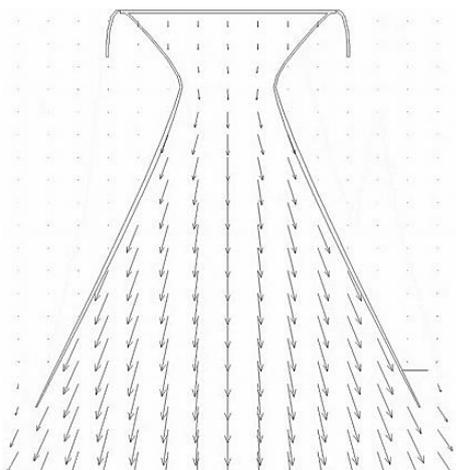


Рисунок 2 – Вектора течения продуктов сгорания

2. Анализ температуры, давления и скорости газового потока в различных сечениях сопла РДТТ:

Эпюра распределения скорости потока представлена на рисунке 3.

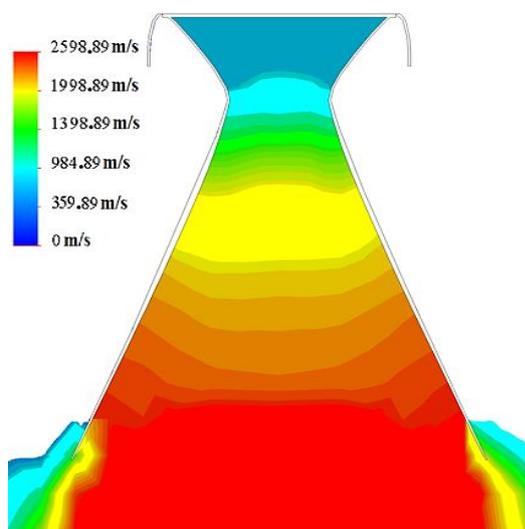


Рисунок 3 – Эпюра распределения скорости газового потока в м/с

В тракте сопла РДТТ происходит увеличение скорости течения продуктов сгорания и на выходе она в разы превышает местную скорость звука. Ускорение потока происходит благодаря геометрической форме канала и

имеет следующую зависимость: во входной части скорость потока не достигает скорости звука, в критической части сопла поток разгоняется до звуковой скорости после чего за счет расширения растрюба сопла происходит резкое ускорение потока во многом превышающее скорость звука [3].

Помимо скорости потока в м/с скорость измеряется также в числах Маха (рисунок 4).

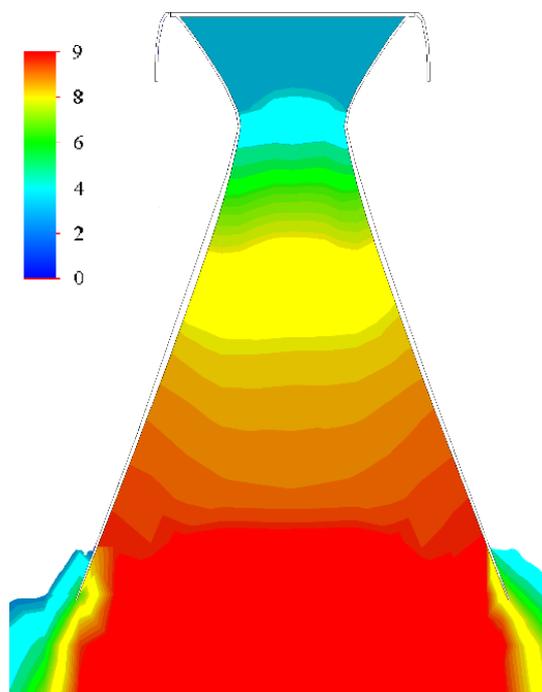


Рисунок 4 – Эпюра распределения скорости газового потока в числе Маха

Результаты расчетов скорости потока на виртуальной модели представлены в таблице 3.

3. Анализ распределения внутреннего давления газов на стенки тракта сопла РДТТ:

Для обеспечения соплу необходимой скорости и соответственно тяги двигателя РДТТ одной геометрической формы недостаточно, важно

также обеспечения необходимого перепада давления. В случае, когда не обеспечивается необходимый перепад давления, в критической части скорость потока не разгоняется до скорости звука, как следствие противодействие становится больше давления и

сверхзвуковая часть вместо разгона потока тормозит его, т.е. работает как диффузор [3].

Эпюра распределения и величина давления отображена на рисунке 5, а численные результаты анализа давления в таблице 1.

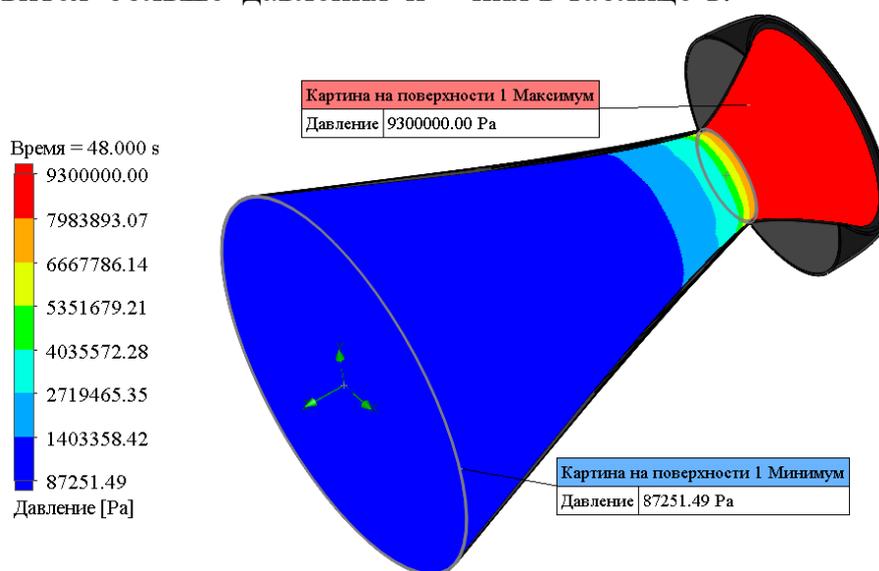


Рисунок 5 – Эпюра распределения давления по тракту сопла РДТТ

4. Анализ температуры продуктов сгорания при протекании по тракту сопла РДТТ.

При сжигании заряда твердого топлива образуется огромное количество потенциальной энергии, которая накапливается в газах и нагревает их до высоких температур. При дальнейшем движении потока по тракту сопла в связи с прекращением процесса горения и высокой скорости происходит снижение температуры.

Эпюра распределения температуры газового потока при их протекании по различным сечениям тракта сопла представлены на рисунке 6, а числовые значения температур в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты термогазодинамического расчета виртуальной модели сопла РДТТ

Сечение	Параметры			
	Температура среды T, К	Давление p, МПа	Скорость газового потока U, м/с	Скорость газового потока в числах Маха, М
Входное	3359,0	9,300	360	1,2
Критическое	3333,0	6,250	985	3,3
Выходное	3183,0	0,087	2599	8,7

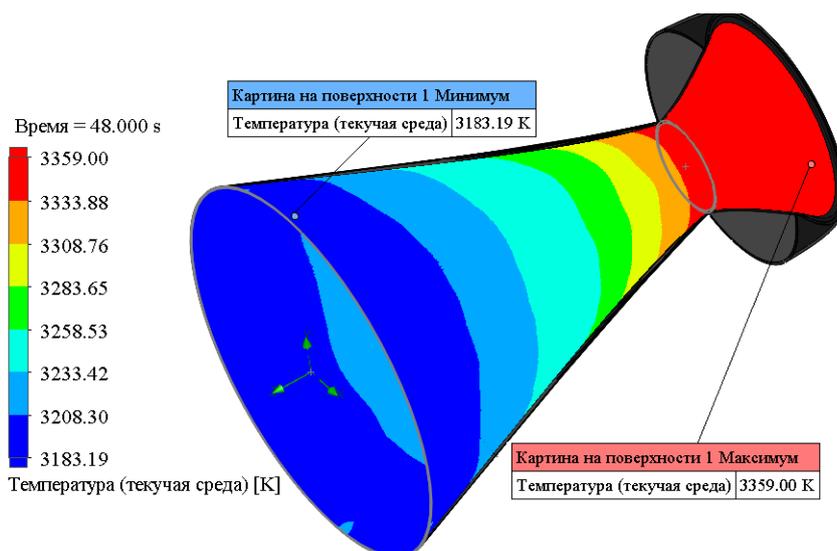


Рисунок 6 – Эпюра распределения температуры газового потока

Рассмотрим зависимости изменения термогазодинамических параметров при прохождении газов по

всей длине сопла рисунок 7.

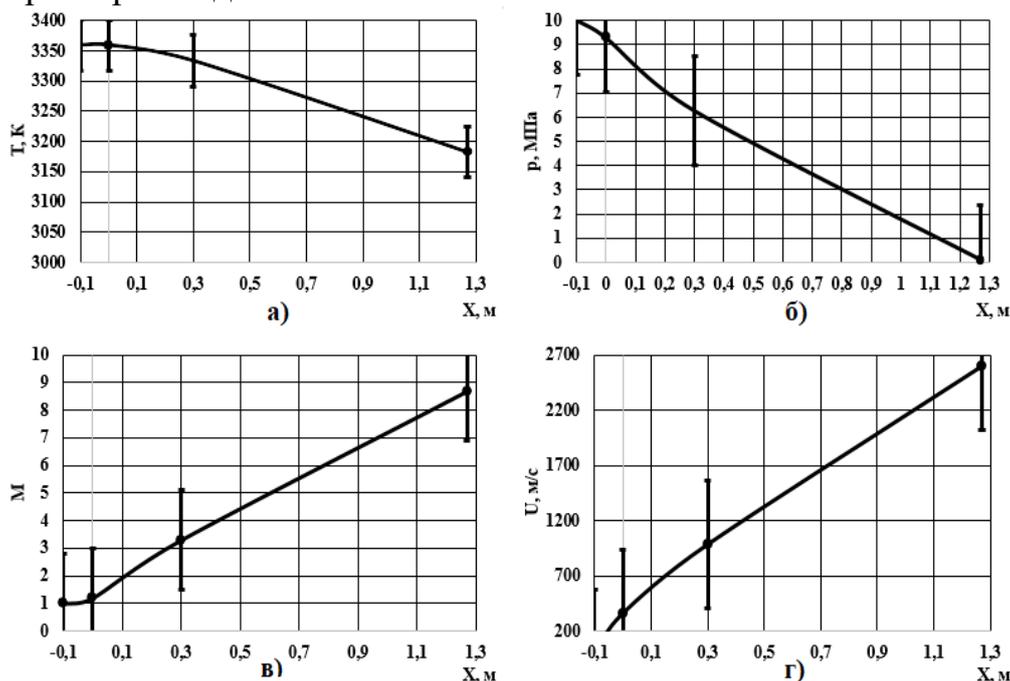


Рисунок 7 – Распределение основных параметров газового потока по длине сопла, полученные в результате виртуальных испытаний: а) термодинамическая температура; б) давление; в) число Маха; г) скорость ПС

На полученных кривых отчетливо видны зависимости поведения параметров газового потока при про-

хождении сопла. Зависимости изменения параметров потока полностью соответствуют термогазодинамиче-

ской теории течения, что и подтверждает правильность проведенного расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александренков В. П., Ягодников Д.А. Расчет коэффициентов тепло-массообмена в сопле Лавалья РДТТ / Электронное учебное издание. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2014. – 19 с.

2. Алямовский А. А. SolidWorks

Simulation. Как решать практические задачи. – СПб: БХВ–Петербург, 2012. – 448 с.

3. Ерохин Б. Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ: учебник для высших технических учебных заведений. – М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.

© И. В. Лунегов, Е. А. Головина, 2021

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА НА ОСНОВЕ АНГИДРИДНОГО ОТВЕРДИТЕЛЯ ХТ-152 Б

З.Г. Сакошев¹, А.Н. Блазнов^{1,2}, Н.В. Бычин¹, В.В. Фирсов¹,
И.С. Хабазин¹, Д.В. Чащилов¹, Е.Г. Сакошев^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, г. Бийск

²Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Бийск,

Аннотация: В данной работе было исследовано эпоксидное связующее на основе смолы ЭД-20 и отвердителя ангидридного типа ХТ-152 Б. Основными характеристиками исследования являлись: жизнеспособность (реологические характеристики), степень отверждения, прочность на растяжение и температура стеклования. Связующее показало высокую жизнеспособность и может перерабатываться при комнатной температуре более 30-ти часов. Выявлена неполная степень отверждения связующего при температуре 90 °С в течение 6 ч. Достигнута максимальная прочность на растяжение связующего 74,96 МПа – после отверждения 2 ч при температуре 200 °С. Максимальная температура стеклования 115 °С получена при температурном режиме отверждения 140 °С в течение 2 ч.

Ключевые слова: компаунд, эпоксидное связующее, ангидридный отвердитель, прочность на растяжение, температура стеклования, жизнеспособность связующего.

Компаундами называются полимерные материалы, которые применяются для заливки или пропитки различных элементов и конструкций с целью выполнения определенных функций: нести механическую нагрузку, играть роль диэлектрика, защищать от воздействия коррозионных агрессивных сред и т.п. Состав эпоксидных компаундов может быть довольно разнообразным, но необходимыми компонентами являются эпоксидная смола и отвердитель [1, с.155].

В данной работе был исследован эпоксидный компаунд на основе смолы ЭД-20 и отвердителя эпоксидных смол ХТ-152 Б. ХТ-152 Б – это моди-

фицированный отвердитель Изо-МТГФА ангидридного типа, имеющий в своем составе ускоритель [2]. Рекомендуемая температура отверждения эпоксидных связующих с отвердителем Изо-МТГФА составляет 120-150 °С. В работах [3, 4] было исследовано связующее ЭДИ на основе Изо-МТГФА, в работах [5-7] – базальтопластики и стеклопластики на основе этого связующего при температуре отверждения 150 °С. Исследуемый в настоящей работе тип отвердителя (ХТ-152 Б) может снизить температуру отверждения до 85-100 °С [2].

С целью изучения свойств эпоксидного компаунда на основе отвердителя ХТ-152 Б определены: жизне-

способность, степень отверждения, прочность на растяжение образцов (лопаток), температура стеклования при различных режимах отверждения образцов. Компоненты связующего в данном исследовании были смешаны в соотношении 100:85 масс. (100 м.ч. – смола ЭД-20, 85 м.ч. – отвердитель ХТ-152 Б).

Живучесть компаунда определялась посредством измерения динами-

ческой вязкости на ротационном вискозиметре при определенной температуре в ячейке измерения – 25 °С, 40 °С и 60 °С. Начальная вязкость связующего при температуре 25 °С составила 3,0 Па·с, при 40 °С – 1,1 Па·с, при 60 °С – 0,7 Па·с. Динамика изменения вязкости связующего при различной температуре представлена на рисунке 1.

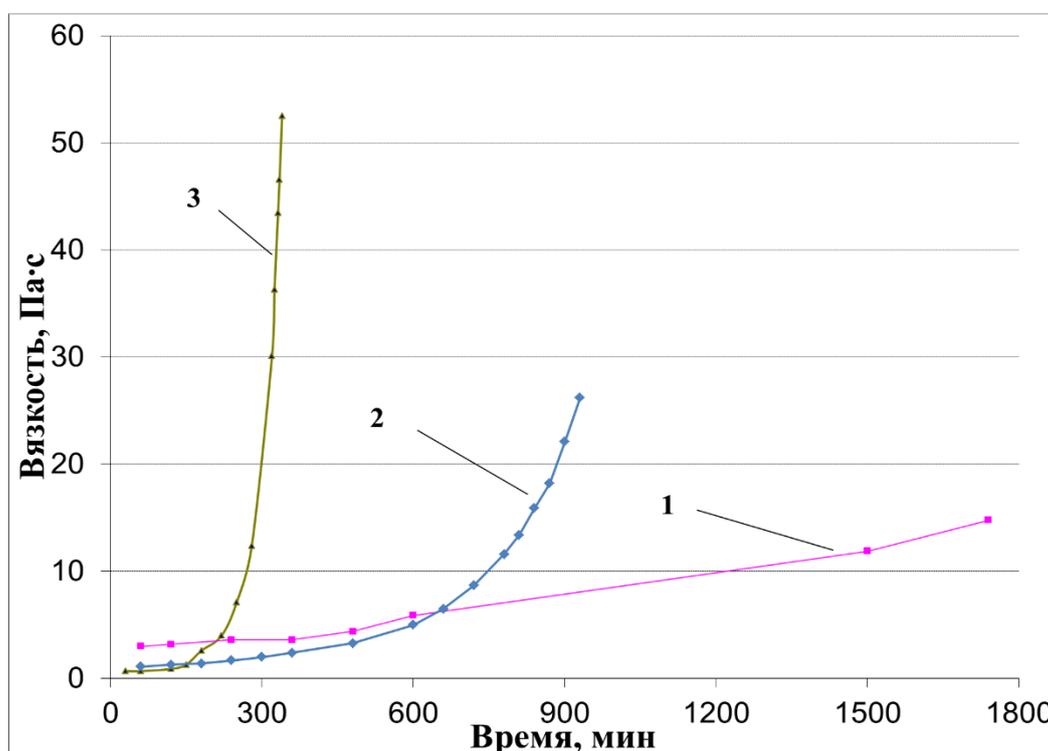
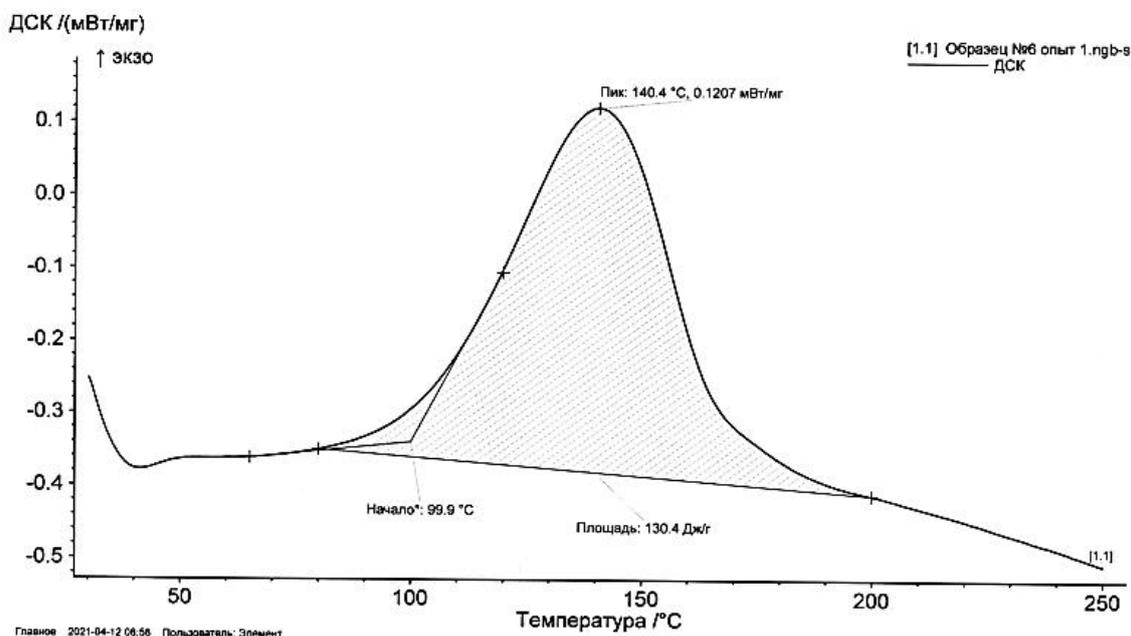


Рисунок 1 – Динамика изменения вязкости связующего компаунда при температурах измерения: 1 – 25 °С; 2 – 40 °С; 3 – 60 °С

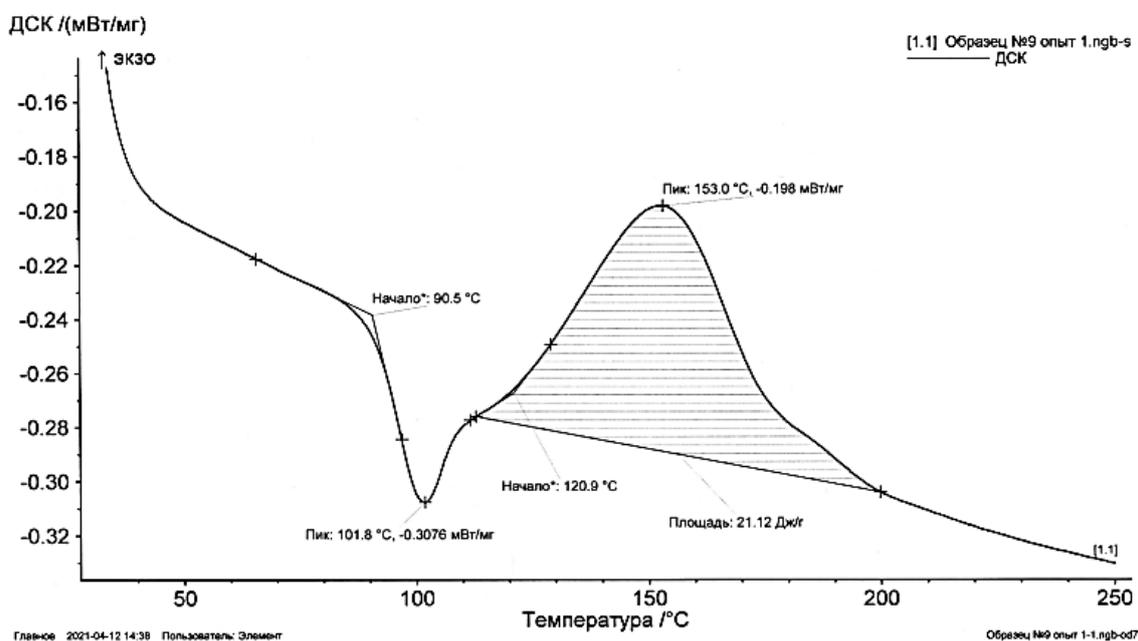
На основе данных рисунка 1 видно, что связующее довольно живучее и при температуре 60 °С может перерабатываться 5 часов, 40 °С – 15 часов, 25 °С – более 30-ти часов.

Степень полимеризации связующего компаунда была определена методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) по ГОСТ Р 57687-2017 [8] с помощью анализато-

ра NETZSCH DSC 204 F1. Степень недоотвержденности образца определяется по размеру площади экзоэффекта на ДСК-кривых. С увеличением температуры выдержки образцов на ДСК-кривых площадь экзоэффекта значительно уменьшается (образец № 6 – 19 °С и образец № 7 – 90 °С), что говорит об увеличении степени отверждения (рисунок 2).



а



б

Рисунок 2 – ДСК-кривые образцов связующего: а – образец № 6; б – образец № 7

Начиная с образца № 9 (температура отверждения 120 °C) площадь экзоэффекта на ДСК-кривых полностью пропадает, что говорит о полной

полимеризации образцов связующего компаунда после отверждения (рисунок 3).

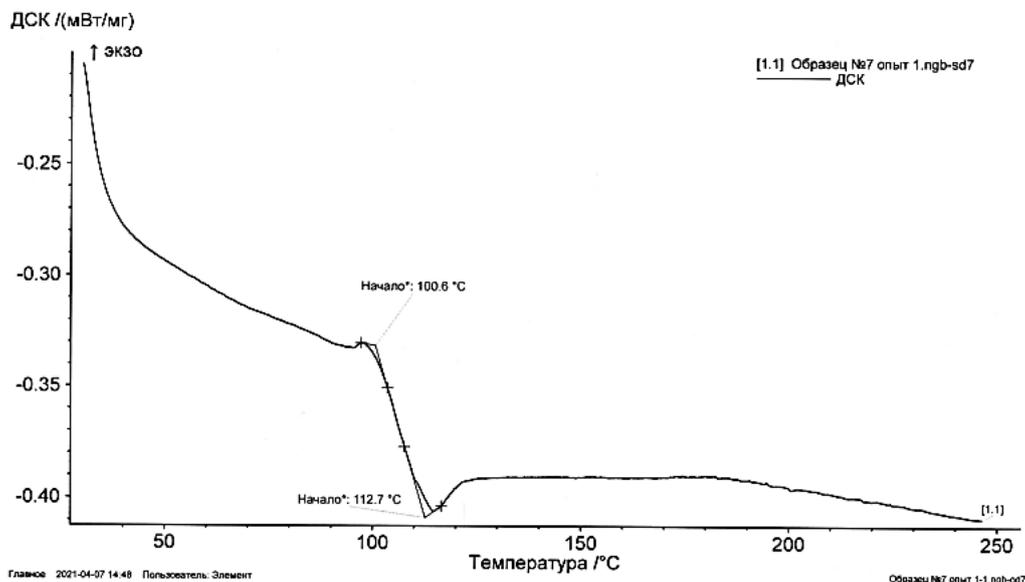


Рисунок 3 – ДСК-кривая образца связующего № 9

Подобная картина наблюдается у образцов отвержденных при высоких температурах – 140 °С, 160 °С, 180 °С, 200 °С, 220 °С. Результаты определения степени отверждения образцов занесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты ДСК-анализа образцов связующего

№ Образца	Режим выдержки (отверждения)	Фазовое состояние образца	ДСК-анализ, Q (Дж/г)
1	0 часов – 19 °С	Ж	298,8
2	3 часа – 19 °С	Ж	287,1
3	24 часа – 19 °С	Ж	272,9
4	5 суток – 19 °С	Ж	180,6
5	10 суток – 19 °С	Ж	167,3
6	12 суток – 19 °С	Ж	131,8
7	30мин – 60 °С + 6 часов – 90 °С	Тв	22,2
8	9 дней – 19 °С + 30мин – 95 °С + 2 часа – 120 °С	Тв	1,65
9	30мин – 95 °С + 2 часа – 120 °С	Тв	-
10	30мин – 95 °С + 2 часа – 140 °С	Тв	-
11	30мин – 95 °С + 2 часа – 160 °С	Тв	-
12	30мин – 95 °С + 2 часа – 180 °С	Тв	-
13	30мин – 95 °С + 2 часа – 200 °С	Тв	-
14	30мин – 95 °С + 2 часа – 220 °С	Тв	-
Примечание		Ж – жидкое, Тв – твердое	

У связующего, выдержанного при комнатной температуре, также уменьшается площадь экзоэффекта с продолжительностью выдержки от 298,8 Дж/г (0 часов выдержки) до 131,8 Дж/г (12 суток выдержки), что говорит о процессе полимеризации связующего при комнатной температуре.

Для исследования прочности связующего были изготовлены образцы на растяжение (лопатки) по ГОСТ 11262-2017 [9]. С помощью разрыв-

ной машины модели Р-0,5 определена прочность образцов на растяжение. От каждой партии (номера образца) испытаны 5 лопаток до их полного разрушения. Образцы связующего были отверждены при различных температурах: 90 °С, 120 °С, 140 °С, 160 °С, 180 °С, 200 °С, 220 °С. После обработки данных в таблицу 2 занесены средние значения прочности на растяжение исследуемых образцов и соответствующие им режимы отверждения.

Таблица 2 – Результаты определения прочности образцов связующего по ГОСТ 11262-2017

№ Образца	Режим выдержки (отверждения)	Прочность на растяжение, МПа
8	9 дней – 19 °С + 30мин – 95 °С + 2 часа – 120 °С	25,76
7	30мин – 60 °С + 6 часов – 90 °С	40,03
9	30мин – 95 °С + 2 часа – 120 °С	43,57
10	30мин – 95 °С + 2 часа – 140 °С	56,02
11	30мин – 95 °С + 2 часа – 160 °С	56,98
12	30мин – 95 °С + 2 часа – 180 °С	69,49
13	30мин – 95 °С + 2 часа – 200 °С	74,96
14	30мин – 95 °С + 2 часа – 220 °С	63,73

По результатам приведенной таблицы можно сделать вывод, что:

1) прочность на растяжение образцов увеличивается по мере увеличения температуры выдержки, вплоть до 74,96 МПа (образец, отвержденный при 200 °С);

2) выдержка свыше 200 °С приводит к снижению прочности на растяжение: 63,73 МПа показал образец, отвержденный при 220 °С;

3) образец № 9, отвержденный при 120 °С, показал большую прочность чем образец № 8, предварительно выдержанный при комнатной температуре в течение 9-ти дней и отвержденный при 120 °С. Это говорит о негативном влиянии выдержки образца при комнатной температуре для последующего отверждения при более высокой температуре – механизм сшивки был запущен при комнатной

температуре, и последующий нагрев ситуацию не исправил;

4) образцы, отвержденные при 140 °С и выше, имели более хрупкий характер разрушения (разрушались на мелкие осколки), чем другие образцы, имевшие четкую границу разрушения.

Определение температуры стеклования проводилось методом термомеханического анализа (ТМА) по ГОСТ 32618.2-2014 [10] и ДСК, который упомянут выше. Для проведения ТМА для каждой партии были отлиты образцы в виде кубиков с размером грани 10 мм.

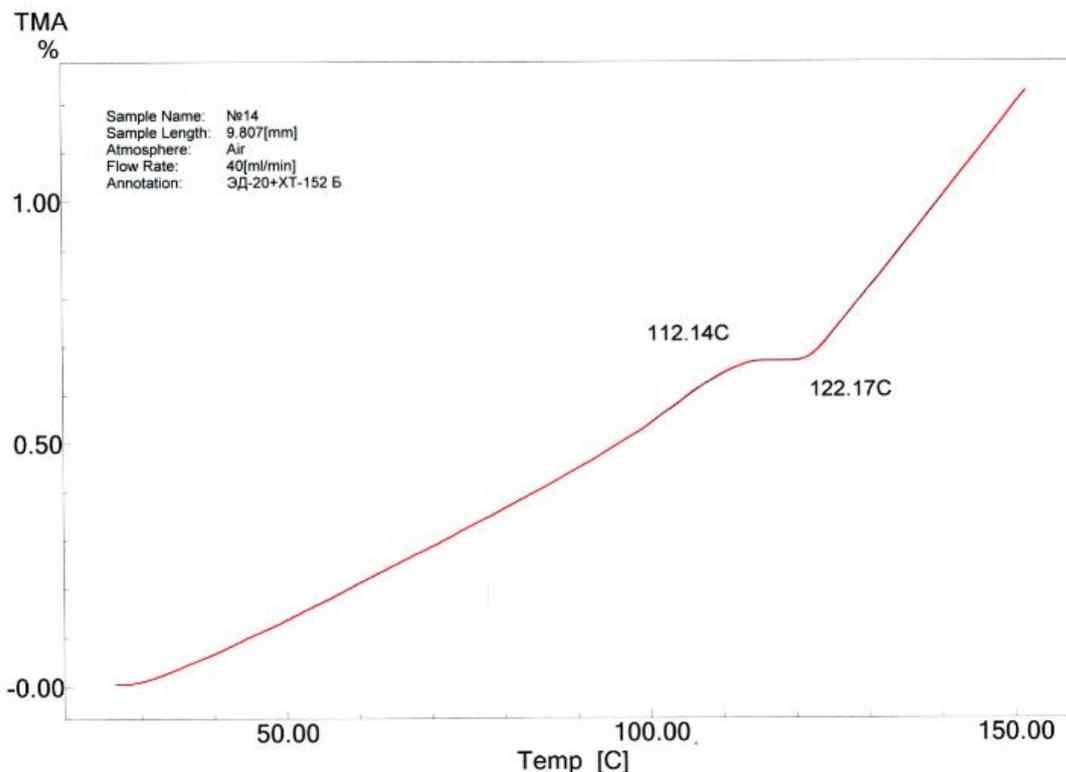


Рисунок 4 – ТМА-кривая образца № 14

В качестве примера на рисунке 4 показана ТМА-кривая образца №14 отвержденного по режиму: 30 мин – 95 °С + 2 часа – 220 °С. По результатам ТМА-анализа видно, что при увеличении температуры отверждения увеличивается температура стеклования образцов. Результаты полученных данных ТМА и ДСК анализов представлены в таблице 3.

Из полученных данных, занесенных в таблицу 3 видно, что имеется

небольшое отличие в результатах ДСК и ТМА анализов, но более предпочтительным методом для оценки температуры стеклования принимаем ДСК-анализ, как более точный. Кроме того, образцы отвержденные свыше 140 °С показывают тенденцию к снижению температуры стеклования, исключения составляют образец № 12, метод ДСК – 115,6 °С и образец №14, метод ТМА – 112,14 °С.

Таблица 3 – Результаты ДСК и ТМА анализов отвержденных образцов

№	Режим отверждения	Температура стеклования методом ДСК, °С	Температура стеклования методом ТМА, °С
7	30мин – 60 °С + 6 часов – 90 °С	91,2	98,09
8	9 дней – 19 °С + 30мин – 95 °С + 2 часа – 120 °С	104,0	111,01
9	30мин – 95 °С + 2 часа – 120 °С	106,6	111,43
10	30мин – 95 °С + 2 часа – 140 °С	115,0	112,03
11	30мин – 95 °С + 2 часа – 160 °С	114,0	108,20
12	30мин – 95 °С + 2 часа – 180 °С	115,6	108,93
13	30мин – 95 °С + 2 часа – 200 °С	101,9	105,31
14	30мин – 95 °С + 2 часа – 220 °С	103,5	112,14

Выводы. В результате исследования свойств эпоксидного компаунда на основе смолы ЭД-20 и отвердителя ХТ-152 Б можно сделать следующие выводы.

1. Связующее имеет достаточно высокую живучесть и при температуре 60 °С может перерабатываться 5 часов, 40 °С – 15 часов, 25 °С – более 30-ти часов.

2. Полимеризация при температуре 90 °С в течение 6-ти часов не обеспечивает полного отверждения (площадь экзоэффекта 22,2 Дж/г).

3. Прочность на растяжение образцов связующего возрастает при увеличении температуры отверждения (120 °С – 43,6 МПа; 200 °С – 74,96 МПа), а отверждение при более высокой температуре отрицательно влияет на прочность.

4. Температура стеклования увеличивается при увеличении температуры отверждения до 140 °С, от-

верждение свыше 140 °С уменьшает температуру стеклования.

Исследования выполнены при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Работа выполнена в рамках госзадания на тему "Фундаментальные основы создания интегрированной технологии переработки легковозобновляемого непищевого растительного сырья в востребованные экономикой РФ продукты", № госрегистрации 121061500030-3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М., Химия, 1982. – 232 с. ил.
2. Сайт «ХИМЭКС Лимитед» [Электронный ресурс] – Элетрон. Дан.

- Режим доступа: <https://www.chimexltd.com/>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Ходакова, Н.Н. Оптимизация рецептуры эпоксидного связующего для базальтопластиковых намоточных изделий / Н.Н. Ходакова, В.В. Самойленко, Д.Е. Зимин, Т.К. Углова, В.В. Фирсов, А.Н. Блазнов // Ползуновский вестник. – 2016. – № 4. – Т.1 – С. 195-199.
4. Blaznov A.N. Thermomechanical characterization of BFRP and GFRP with different degree of conversion / A.N. Blaznov, E.V. Atyasova, I.K. Shundrina, V.V. Samoilenko, V.V. Firsov, A.S. Zubkov // Polymer Testing. – 2017. – Vol. 60. – P. 49-57.
5. Samoilenko V.V. Thermomechanical Characterization of Glass Fiber and Basalt Fiber-Reinforced Plastics / V.V. Samoilenko, A.N. Blaznov, D.E. Zimin, N.V. Bychin, V.V. Firsov, M.E. Zhurkovsky // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 1003. – P. 196-204. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1003.196
6. Blaznov A.N. Basalt plastic properties under climatic aging conditions / A.N. Blaznov, V.B. Markin, A.S. Krotov, V.V. Firsov, N.V. Bychin, Z.G. Sakoshev // Smart Composite in Construction. – 2021. – V. 2. – No 1. – P. 29-39. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N1_2021
7. Блазнов А.Н. Изменение физико-механических и термомеханических свойств базальтопластика в результате климатического старения / А.Н. Блазнов, А.С. Кротов, В.Б. Маркин, В.В. Фирсов, М.Е. Журковский, Н.В. Бычин, З.Г. Сакошев // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 3(27). – С. 116-120. DOI [10.25699/SSSB.2019.27.3723](https://doi.org/10.25699/SSSB.2019.27.3723).
8. ГОСТ Р 57687-2017 Пластмассы. Эпоксидные смолы. Определение степени отверждения эпоксидных смол с применением дифференциальной сканирующей калориметрии. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
9. ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
10. ГОСТ 32618.2-2014. Пластмассы. Термомеханический анализ (ТМА). Часть 2. Определение коэффициента линейного теплового расширения и температуры стеклования. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.
- © З. Г. Сакошев, А. Н. Блазнов, Н. В. Бычин, В. В. Фирсов, И. С. Хабзин, Д. В. Чащилов, Е. Г. Сакошев, 2021

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СОПЛА РДТТ НА ПРОЧНОСТЬ

И. В. Лунегов, Е. А. Головина

ФБГОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Аннотация. Данная работа посвящена поиску оптимальной толщины стенки сопла РДТТ при которой конструкция выдерживает все механические и температурные напряжения, а также сохраняет свою работоспособность на протяжении всего времени работы, то есть без образования областей критического уменьшения толщины стенки во всех ее областях в следствии уноса массы вещества.

По результатам анализа определена критическая скорость уноса массы вещества с поверхности и требуемую оптимальную толщину стенок критической и концевой части сопла РДТТ.

Ключевые слова: сопло ракетного двигателя твердого топлива, раструб, углерод-углеродные композиционные материалы, оптимизация толщины.

Предел прочности материала – механическое напряжение при превышении значения которого происходит разрушение материала (конструкции). Прочность – ключевое значение при проектировании конструкций. Испытание материала на прочность является обязательным испытанием при конструировании ракетного двигателя.

При работе двигателя РДТТ испытывает огромные значения давления газов на внутреннюю стенку сопла. К материалу, из которого изготовлено сопло РДТТ предъявляют требования по пределу прочности 160–200 МПа [1]. Выполнение прочностного расчета состоит из нескольких этапов: задание ограничений и прилагаемых нагрузок, разбиение конструкции на множество конечных элементов, решение задачи и анализ полученных результатов.

1. Выбор ограничений и действующих нагрузок.

Ограничения исключают перемещения конструкции и определяют условия ее эксплуатации.

Креплением конструкции является закладной элемент критической части и внешняя сторона сопла РДТТ которая частично утоплена в камеру сгорания двигателя (рисунок 1).

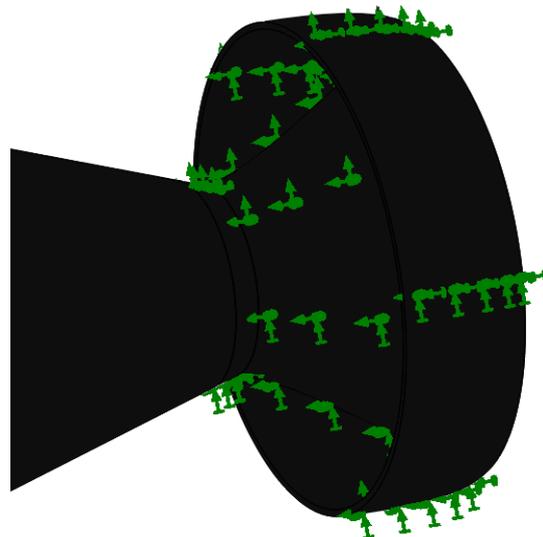


Рисунок 1 – Крепления сопла в камере сгорания РДТТ

В качестве крепления выбрана зафиксированная геометрия поверхности исключая перемещения по осям Y и Z. Перемещения по оси X допускаются в небольших пределах, так как при пуске двигателя ракеты происходит резкое повышение давления, а также происходит температурное расширение материала.

В качестве действующих нагрузок выбрано давление газового потока, равномерно распределенное по внутренней поверхности сопла РДТТ (рисунок 2), рассчитанное в результате термогазодинамического расчета.

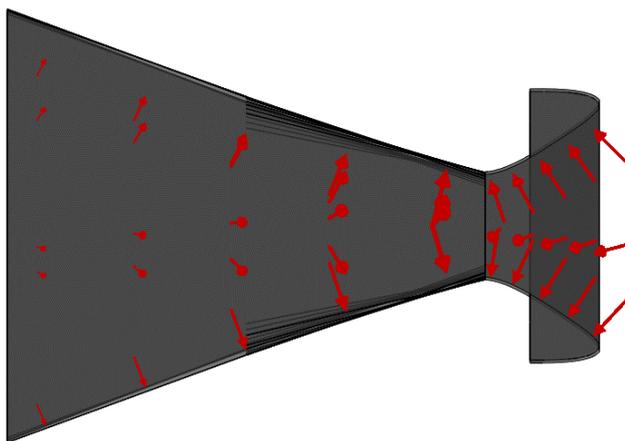


Рисунок 2 – Нагрузки, действующие на сопло РДТТ

2. Построение сетки.

Как уже было сказано выше испытания проводятся методом конечных элементов, который производит расчет при помощи анализа прилагаемых параметров каждого элемента модели. Разбиение модели на элементы является важным этапом анализа конструкции. Программа создает сет-

ку с учетом глобального размера элемента и допусков (рисунок 3).

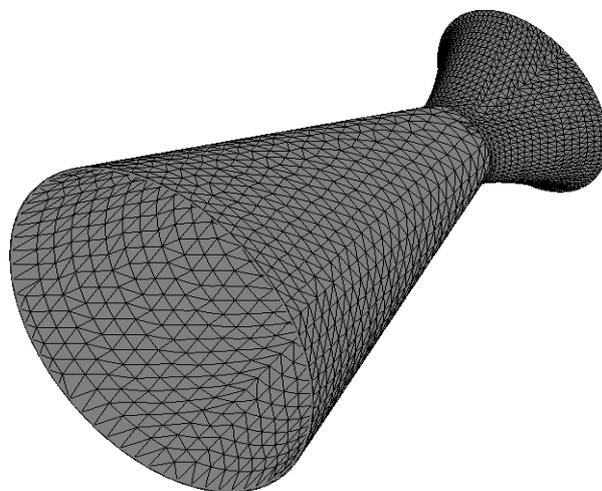


Рисунок 3 – Построение сетки конечных элементов

Изменяя размеры элементов можно повышать или понижать точность проведения эксперимента. Чем меньше элемент, тем выше плотность сетки и точность результатов эксперимента.

3. Построение эпюр напряжения и коэффициента запаса прочности.

Эпюра напряжения отображает результирующие напряжения по всей длине сопла (рисунок 4). Расчет эпюр напряжения является основной задачей сопротивления материалов. Сущность расчета заключается в сравнении полученных значений напряжения в каждом узле сетки конечных элементов с пределом текучести материала, который для УУКМ является пределом прочности (предел временного сопротивления).

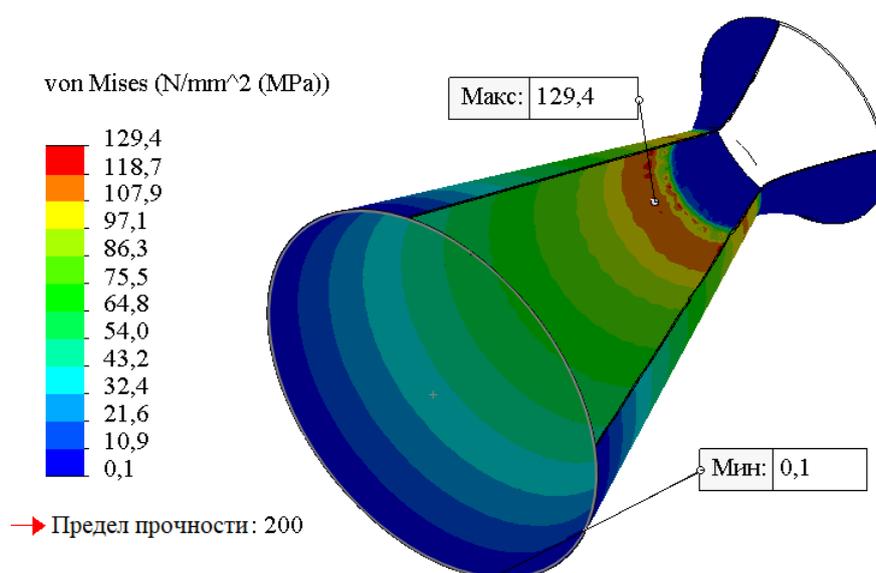


Рисунок 4 – Графическое отображение распределения напряжений

Расчеты эпюры в зависимости от толщины раструба сопла РДТТ представлены в таблице 1. В качестве начального значения толщины стенки выбран 1 мм.

Сопло не должен значительно утяжелять конструкцию ракетного двигателя поэтому при увеличении толщины стенки также учитывается масса конструкции сопла.

Способность материала сопла выдерживать прилагаемые к ней напряжения определяется коэффициентом запаса прочности (k), который представляет собой отношение предельно допустимых нагрузок к прилагаемым нагрузкам и всегда должен быть равен больше единицы [2].

Построение эпюры запаса прочности (рисунок 5) наглядно показывает его значение в каждом узле сетки и позволяет выявить наиболее слабые зоны раструба сопла РДТТ и наоборот области в которых можно утончить толщину стенки тем самым сэкономить материал.

Таблица 1 – Результаты прочностного расчета материала сопла РДТТ

Толщина стенки, мм	Напряжения, МПа	Коэффициент запаса прочности	Масса сопла, кг
1	543	0,4	6,3
2	321	0,6	12,6
3	208	1,0	19,4
4	158	1,3	25,3
5	129	1,6	31,9
6	105	1,9	37,9
7	92	2,2	44,4
8	81	2,5	50,8
9	72	2,8	57,2
10	65	3,1	63,6

Пояснение значений коэффициентов запаса прочности:

- $k < 1$ – указывает область в которой произошло разрушение;
- $k = 1$ – область в которой разрушение только начинается;

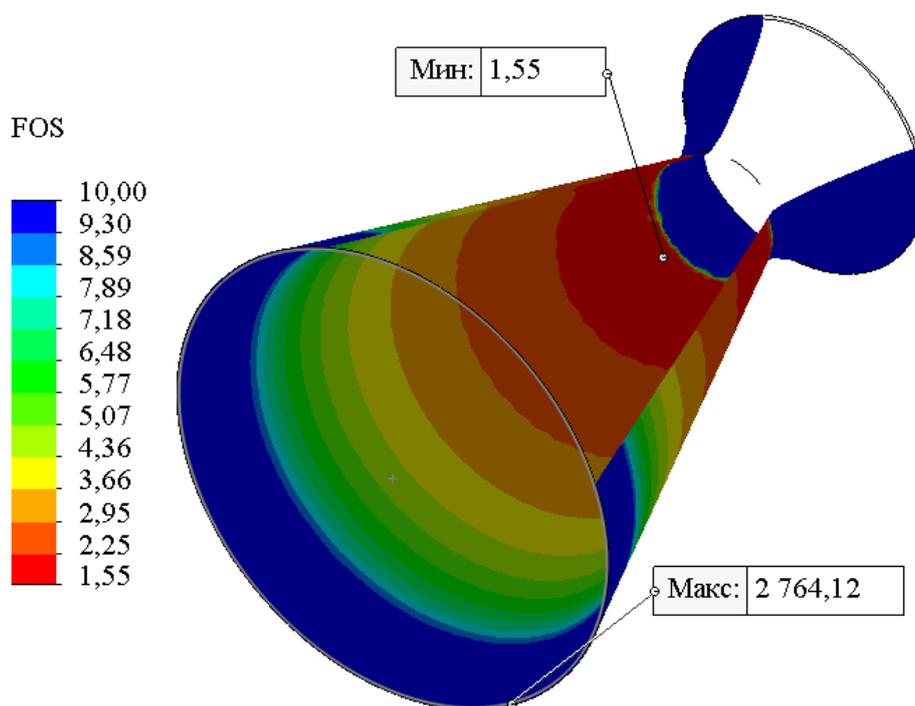


Рисунок 5 – Эпюра распределения коэффициента запаса прочности

– $k > 1$ – область в которой материал выдерживает приложенную нагрузку (достаточно прочный).

При рассмотрении эпюр распределения напряжений и запаса прочности видно, что наиболее опасной областью сопла является участок выхода сопла из камеры сгорания. Для предотвращения разрушения материала, производится утолщение стенки раструба сопла в данной области. Концевая часть раструба сопла наоборот обладает высоким коэффициентом запаса прочности, для облегчения конструкции и повышения энергомассовых характеристик двигателя толщину стенки концевой части уменьшают до предельно возможной, однако следует учитывать возможность откалывания кромки выходного отверстия.

Полученные результаты коэф-

фициентов запаса прочности отображены в таблице 1. Для наглядного представления результатов строятся кривые распределения напряжений, коэффициентов запаса прочности и массы раструба (рисунок 6).

Анализируя полученный график напряжений видно, что напряжения не превышающие предельно допустимые (предел прочности материала) образуются при толщине стенки раструба свыше 3 мм, что подтверждается кривой распределения коэффициентов запаса прочности. Для материалов раструба сопла РДТТ коэффициент запаса прочности должен находиться в пределах от 1,5–3,0. Из чего следует что для обеспечения необходимых прочностных параметров, оптимальная толщина стенки в наиболее нагруженной области конструкции равна 5 мм.

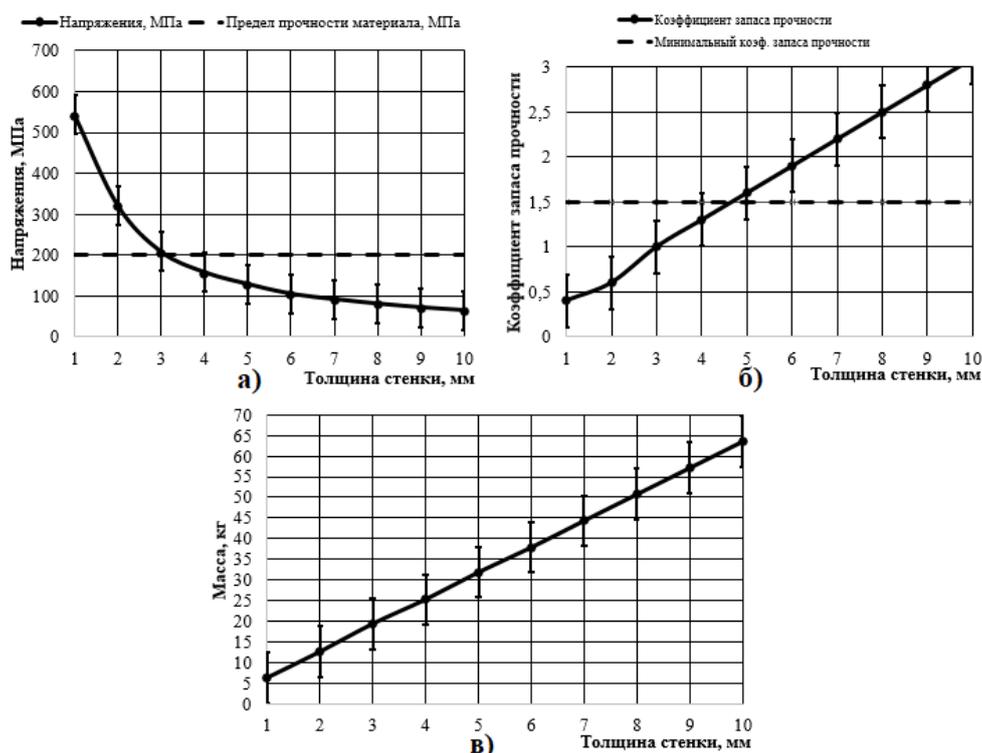


Рисунок 6 – Кривые распределения: а) напряжений; б) коэффициента запаса прочности; в) массы

Как уже было сказано выше главной задачей современного ракетостроения является совершенствование ее энергомассовых характеристик, для чего стараются максимально облегчить конструкцию РДТТ без потерь по тяге.

Масса раструба сопла РДТТ увеличивается пропорционально увеличению толщины стенки (см. рисунок 6, в). Поэтому наиболее целесообразно выбирать минимальную толщину, которая при этом бы обеспечивала всеми прочностными параметрами без заметного утяжеления конструкции РДТТ.

Исследования температуры стенки сопла РДТТ. Перед проведением исследования необходимо определить область, которая наиболее подвержена эрозионному уносу материала.

Частицы продуктов сгорания (окись алюминия) движутся по тракту сопла под некоторым углом к его оси с отставанием как в дозвуковой, так и в сверхзвуковой части сопла. Это служит тем что частицы сталкиваются со стенками сопла и происходит вынос частиц на края сопла. В зависимости от близости траектории частицы к оси критического сечения и от размера этой частицы (следовательно, массы) происходит вынос частицы на наибольший угол [3].

Сопло РДТТ в зависимости от эрозионного уноса делится на несколько зон (рисунок 7). В случае, когда траектория частиц происходит в наибольшей близости к критическому сечению эту зону, называют – зона чистого газа [3].



Рисунок 7 – Предельная траектория конденсированных частиц [3]

Вынос конденсированных частиц окиси алюминия в сочетании со сверхзвуковой скоростью и высокой температурой текучих газов вызывает в концевой части раструба сопла РДТТ максимальный унос материала – зона эрозионного уноса [3].

В связи с этим наибольшее значение расчета температуры нагрева конструкции сопла РДТТ в концевой части раструба.

Расчет начинается с задания начальных термодинамических пара-

метров окружающей среды и потока продуктов сгорания (рисунок 8). Начальные параметры потока определяются из газотермодинамического расчета во входном сечении сопла РДТТ и составляют: скорость газового потока – 361 м/с; температура на входе в сопло – 3359 К; давление – 9,3 МПа. Начальные параметры окружающей среды приняты идеальными, а течение газов по тракту сопла адиабатическим.

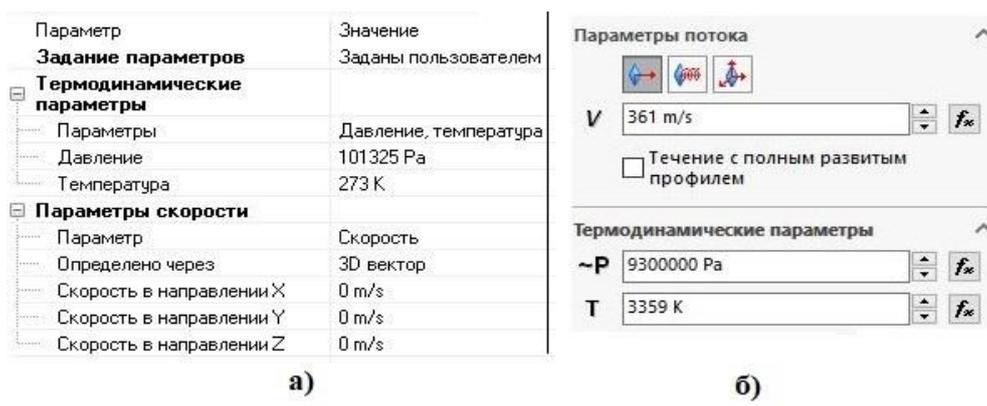


Рисунок 8 – Начальные термодинамические условия: а) окружающей среды; б) потока продуктов сгорания

После чего моделируется течение газов по тракту сопла в течение 48 физических секунд (время работы двигателя) и производится расчет искомых параметров. И в результате расчетный

модуль SolidWorks Flow Simulation строит эпюры распределения температуры стенки сопла РДТТ по всей длине конструкции (рисунок 9).

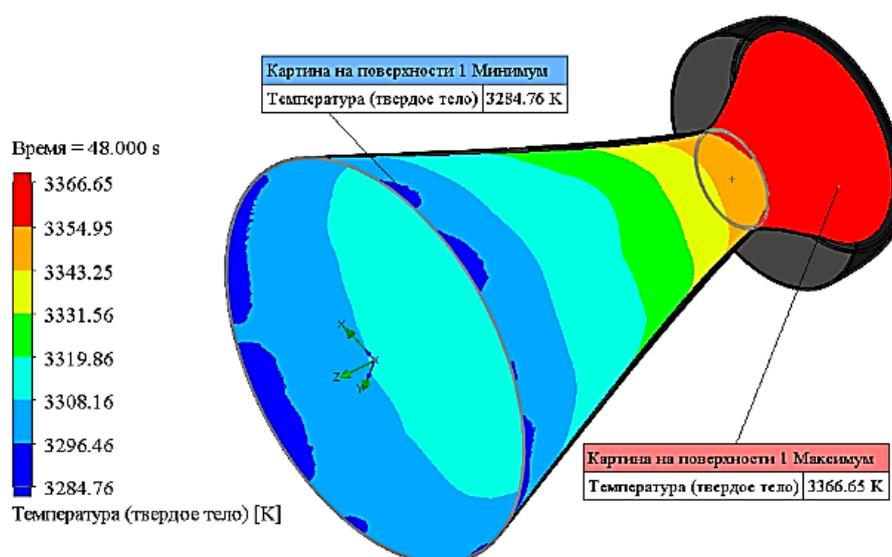


Рисунок 9 – Эпюра распределения температуры стенок сопла РДГТ

Полученные результаты сравниваются с температурой начала деформации материала. Для УУКМ данная температура порядка 3300 К, именно при этой температуре начинается, отрыв частиц материала от стенки сопла РДГТ. Чем выше температура перегрева материала, тем выше скорость отрыва частиц (скорость поверхностного уноса материала).

Испытание проводилось для интервала толщины стенки 1–10 мм. Средние значения температуры в зоне выходного и критических сечений сопла РДГТ отображены в таблице 2. По полученным результатам строятся зависимости температуры в зоне эрозийного уноса от толщины стенки концевой части раструба сопла РДГТ (рисунок 10).

Из полученной зависимости можно сделать предварительные предположения: значения толщины в которых температура сопла достигает наивысших и наименьших значений

не целесообразно использовать при конструировании сопла РДГТ, так как

Таблица 2 – Результаты температурного исследования

Толщина стенки, мм	Температура концевой части, К	Температура критической части, К
1	3420	3487
2	3388	3455
3	3351	3417
4	3322	3388
5	3285	3350
6	3260	3325
7	3229	3292
8	3196	3259
9	3177	3239
10	3143	3205

в одном случае происходит слишком быстрый поверхностный унос, и конструкция не выдерживает и наоборот медленный унос вещества приводит к неэффективному использованию материала.

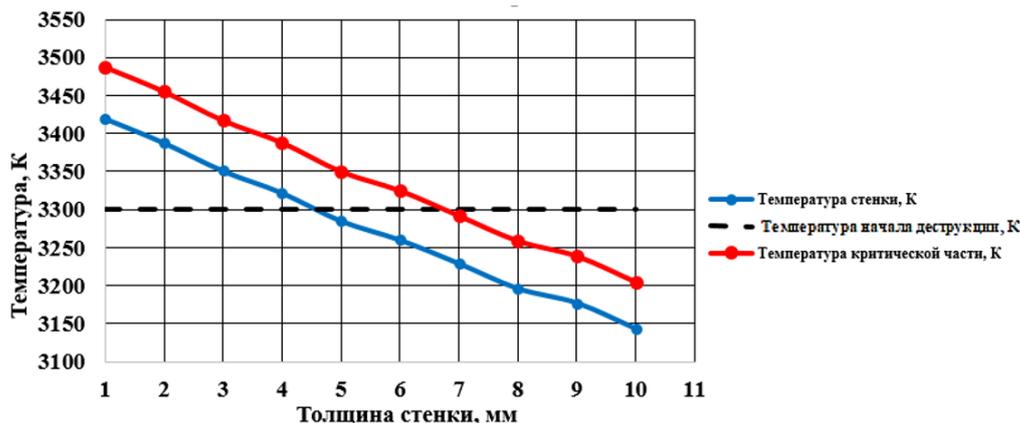


Рисунок 10 – Зависимость температуры стенки сопла от толщины

Из полученной зависимости можно сделать предварительные предположения: значения толщины в которых температура сопла достигает наивысших и наименьших значений не целесообразно использовать при конструировании сопла РДТТ, т.к. в одном случае происходит слишком быстрый поверхностный унос, и конструкция не выдерживает и наоборот медленный унос вещества приводит к неэффективному использованию материала. Поэтому при оптимальной толщине стенки сопла температура нагрева материала должна находиться в наибольшем приближении к температуре разрушения материала.

Расчет скорости уноса массы

вещества. В случае использования УУКМ в качестве материала сопла, унос массы вещества с поверхностного слоя происходит в результате химического взаимодействия углерода и его продуктов с газами (кислород, оксид углерода, вода и т.д. На протекание таких реакций температура корпуса не оказывает никаких влияний (диффузионный режим) и зависит только от интенсивности теплообмена корпуса с газовым потоком. Для дальнейших расчетов примем унос равномерным по всему течению сопла. Схематическое изображения уноса массы вещества с твердого тела под действие газового потока отображено на рисунке 11 [4].

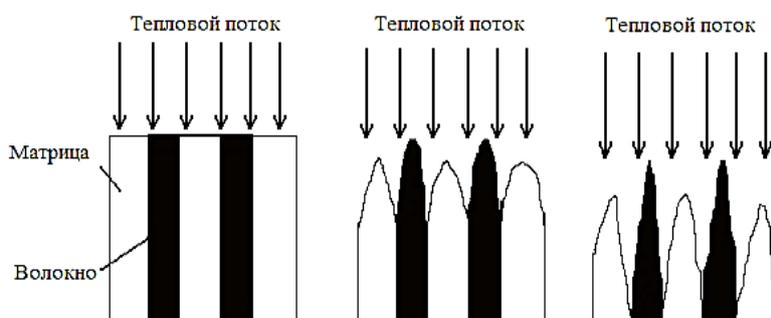


Рисунок 3.20 – Схематическое изображение уноса массы вещества с поверхности УУКМ [4]

При высоких температурах в реакциях газа с углеродом образуются CO, CO₂, H₂O. [4].

Тепловые эффекты сопровождающие реакции взаимодействия углерода УУКМ с активными веществами газового потока определяются при помощи формулы Гесса:

$$Q_i = \sum_a v_a DH_a - \sum_b v_b DH_b \quad (1)$$

где DH_a, DH_b – теплоты образования продукта реакции и β-исходного вещества; v_a, v_b – стехиометрические коэффициенты.

Полученные в результате расчета тепловых эффектов данные собраны в таблицу 3.

Таблица 3 – Тепловые эффекты реакций углерода с активными компонентами продуктов сгорания [4].

№ п/п	Реакция	Тепловой эффект Q _i , кДж/(кг·с)
1	C+O→CO	9210
2	C+O ₂ →CO ₂	32792
3	C+CO ₂ →2CO	14371
4	C+H ₂ O→CO+H ₂	14625

Теплота химического уноса которое входит в граничное условие, рассчитывается по формуле:

$$Q_x = (\sum_{i=1}^4 m_i Q_i) / (\sum_{i=1}^4 m_i); \quad (2)$$

где Q_i – тепловой эффект химической реакции компонента с углеродом; m_i – мольная доля компонентов продуктов газового потока.

В результате расчета получим: $\sum_{i=1}^4 m_i = 0,678$ и $Q_x = 14452$ кДж/кг·с.

Для оптимизации толщины стенки раструба и исследования работоспособности УУКМ в качестве материала сопла определяется скорость уноса вещества с поверхности конструкции.

С учетом догрева УУКМ корпуса до температуры начала разрушения и фазовых превращений компонентов при уносе вещества применяют следующее балансовое уравнение [5]:

$$q_r = \rho_{п} u_s c_{p,п} (T_s - T_{и}) + \rho_{п} u_s Q_i; \quad (3)$$

где ρ_п = 1850 кг/м³ – плотность материала корпуса; c_{p,п} = 0,66 кДж/кг·К – удельная теплоемкость материала корпуса; u_s – скорость распространения отрыва; T_и – измеренная температура корпуса (см. таблицу 2); T_s = 3300 К – температура деструкции материала покрытия.

Из уравнения 3 выражаем скорость линейного (u_s) и массового (m_y) уноса вещества с поверхности стенки раструба сопла РДТТ [5]:

$$u_s = \frac{q_r}{\rho_{п} c_{p,п} (T_s - T_{и} + \frac{Q_i}{c_{p,п}})}; \quad (4)$$

$$m_y = u_s \rho_{п}; \quad (5)$$

– подставив известные значения в формулу 3.31 найдем скорость линейного уноса вещества в концевой и критической части сопла РДТТ: u_{s вых} = 0,07 · 10⁻³ м/с, u_{s кр} = 0,09 · 10⁻³ м/с;

– массовая скорость уноса:

$$m_{y \text{ вых}} = 0,07 \cdot 10^{-3} \text{ М/с} \cdot 1450 \text{ кг/м}^3 = 101,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

$$m_{y\text{ кр}} = 0,09 \cdot 10^{-3} \text{ М/с} \cdot 1850 \text{ кг/м}^3 = 166,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)};$$

– требуемая толщина стенки:

$$\delta_{\text{ст вых}} = u_{\text{л}} \cdot t = 0,07 \text{ мм/с} \cdot 48 \text{ с} = 3,4 \text{ мм};$$

$$\delta_{\text{ст кр}} = 0,09 \text{ мм/с} \cdot 48 \text{ с} = 4,3 \text{ мм}.$$

По результатам, полученным из прочностных, температурных и энергомассовых расчетов, а также расчета уноса вещества можно сделать вывод что оптимальной толщиной стенки в зоне критического сечения сопла является – 5 мм. При данной толщине стенки критическая часть сопла выдерживает все прилагаемые на нее нагрузки (давление газовой среды) без разрушения, коэффициент запаса прочности $> 1,5$ что соответствует требуемым значениям. За время работы двигателя (48 с) толщина унесенного слоя материала не превышает толщину стенки сопла и составляет 4,3 мм, из чего следует что для работы двигателя нет необходимости использовать большое количество теплозащитного материала. Сопло с толщиной стенки 5 мм обладает массой в 32 кг благодаря чему не происходит заметного утяжеления конструкции РДТТ и уменьшение его энергетических характеристик.

Толщина стенки концевой части раструба отличается от критической. Давление газовой среды в данной области минимально за счет увеличения угла раствора сопла, и как следствие коэффициент запаса прочности материала превосходит требуемые значения во много раз. Однако, как показы-

вает расчет толщины унесенного слоя материала, за время работы двигателя в данной области происходит унос слоя толщиной 3,4 мм из чего можно сделать вывод что минимальной толщиной стенки концевой части раструба является – 4 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Г. В. Композиционные материалы в двигателях летательных аппаратов / Г.В. Белов, Б.Т. Ерохин, В.П. Киреев. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 344 с.
2. Шабурова Н.А. Материаловедение: часть II: Неметаллические материалы: учебное пособие / Н.А. Шабурова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 82 с.
3. Соколовский М. И, Нельзина Т.В. Предельная линия эрозионного уноса концевой части сопла РДТТ: науч. статья/ Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, 2015. – с.82–86.
4. Воробей В. В., Маркин В. Б. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей. – Новосибирск: Наука, 2003. – 164 с.
5. Александренков В. П., Ягодников Д.А. Расчет коэффициентов теплообмена в сопле Лавалья РДТТ / Электронное учебное издание. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2014. – 19 с.

© И. В. Лунегов, Е. А. Головина, 2021

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭНДОПРОТЕЗА КОЛЕННОГО СУСТАВА

Л. А. Матюхина, Е. А. Головина

*ФБГОУ ВО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова», г. Барнаул*

Аннотация. В результате работы был подобран оптимальный компонентный состав применяемого имплантата, позволяющий получить прочностные свойства, необходимые для имплантирования материала; даны рекомендации по технологическому процессу изготовления вкладыша эндопротеза коленного сустава. Произведён анализ с помощью программы *SolidWorks Simulation* напряженно-деформированного состояния эндопротеза, были получены данные, подтверждающие его работоспособность.

Разработанный объект может использоваться в медицинских целях в качестве материала для имплантации с целью замещения хрящевых дефектов коленного сустава.

Ключевые слова: композиционный материал, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, биосовместимость, эндопротезирование, имплантаты хрящевой ткани.

Введение имплантата в живой организм предполагает действие нагрузок, поэтому при разработке имплантата важно учитывать нагрузки, которые будет испытывать материал. Неуспехи протезирования часто связаны с недостаточной схожестью имплантата со структурой естественной хряща, поскольку протез помимо химических и биологических свойств должен выполнять механические функции. Функциональность биоимпланта во многом зависит от физико-механических характеристик применяемого материала [1].

Имплантаты, близкие по форме к коленному суставу (максимально соответствующие форме бедренного и большеберцового компонентов) оптимально распределяют функциональные нагрузки на прилежащие хрящевые ткани. Функционирование подобных имплантатов дает наилучшие лечебно-реабилитационные результаты и характеризуется хорошей биосовместимостью [2].

В последнее время всё чаще ис-

пользуются прикладные программы ПК для проектирования различных конструкций из КМ. Целью таких программ является облегчение и упрощение процесса проектирования конструкций из КМ. В данной работе применяется программа, основанная на методе конечных элементов, способная выполнять множество задач, которые касаются курсов сопротивления материалов, механики КМ и строительной механики композитных конструкций [3].

Проектирование и изготовление индивидуальных эндопротезов коленного сустава является достаточно сложной задачей. Требуется учитывать анатомические особенности не только поврежденного сустава, но и параметры большеберцовой и бедренной кости. От этого зависит конфигурации всех элементов эндопротеза. На основании многочисленных клинических исследований, в восстановительной ортопедии и травматологии были разработаны стандарты, обеспечивающие получение элементов эндопротезов, способные за-

менить поврежденный коленный сустав [1].

В настоящее время эндопротезирование коленного сустава, выполняется с помощью компьютерных технологий, позволяющим учитывать множество нюансов, которые впоследствии способны значительно влиять на конечный результат (уровень костных резекций, расположение компонентов эндопротеза, баланс мягких тканей и имплантировать протез с максимальной точностью. Компьютерная программа создает индивидуальную модель конечности каждого отдельного пациента. Хирург с использованием компьютерной навигации способен осуществлять манипуляции с точностью до 0,1 мм и 0,1 градуса, что значительно позволяет увеличить срок работы эндопротеза [4].

Моделирование является одним из популярных способов познания биологических объектов.

Посредством применения всевозможных, хорошо разработанных методов, моделирование даёт возможность освоить и объяснить функциональные зависимости в коленном суставе в норме и при патологии, изучить взаимосвязь с другими системами организма, оценить количество характеристик процесса [5].

В стандарте ГОСТ Р ИСО 7207-1-2005 (Имплантаты для хирургии. Бедренный и большеберцовый компоненты частичных и тотальных эндопротезов коленного сустава. Часть 1. Классификация, определения и обозначение размеров) [6] приведены классификации и обозначения размеров модульного эн-

допротеза коленного сустава.

Имплантат (система тотального эндопротеза) должен содержать следующие элементы (рисунок 1):

- компонент бедренный;
- компонент большеберцовый;
- вкладыш ПЭ.

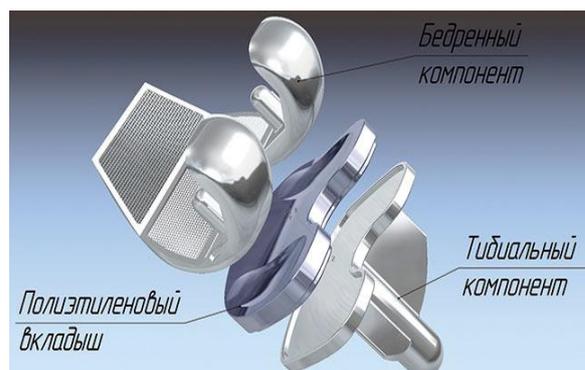


Рисунок 1 – Конструкция эндопротеза коленного сустава

Каждая модель эндопротеза имеет несколько вариантов типоразмеров бедренного и большеберцового компонентов и полиэтиленового вкладыша.

На рисунках 2, 3, 4 изображены обозначения размеров бедренного, большеберцового компонентов и вкладыша эндопротеза коленного сустава.

При проектировании конструкции эндопротеза коленного сустава в первую очередь учитываются анатомические особенности опорно-двигательного аппарата (ОПА) каждого пациента [4].

На основе анализа анатомических особенностей ОПА определили условия для трех положений бедренного компонента ЭКС: в исходном положении сустава (0°), при частичном перемещении (45°) и полном сгибании ноги в колене (90°), как показано на рисунке 5.

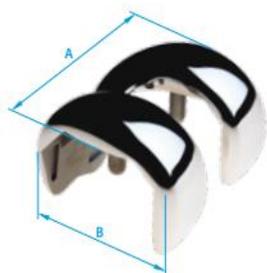


Рисунок 2 – Обозначения размеров бедренного компонента эндопротеза коленного сустава [6], где А – длина бедренного компонента, В – ширина бедренного компонента



Рисунок 3 – Обозначения размеров большеберцового компонента эндопротеза коленного сустава [6], где А – длина большеберцового компонента, В – ширина большеберцового компонента

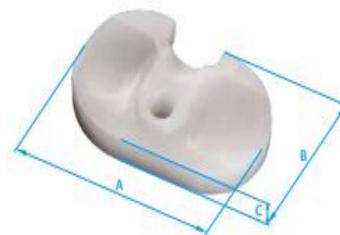


Рисунок 4 – Обозначения размеров суставного вкладыша эндопротеза коленного сустава [6], где А – длина суставного вкладыша, В – ширина суставного вкладыша, С – толщина суставного вкладыша

При учете этих условий строится модель распределения сил трения в паре сопряжения импланта. Максимальное значение сила трения принимает при значениях угла, близких к 0° . При значениях угла, близких к полному сгибанию, она существенно меньше за счет компенсации биомеханической нагрузки мышцами и связками.

В результате моделирования построена конфигурация платформы, которая вместе с бедренным компонентом способна образовать пару сопряжения. Бедренный компонент,

вкладыш и большеберцовый компонент изображены на рисунке 6.

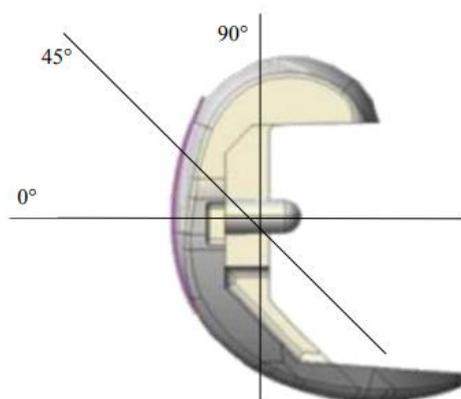


Рисунок 5 – Определение условий для трех положений бедренного компонента ЭКС

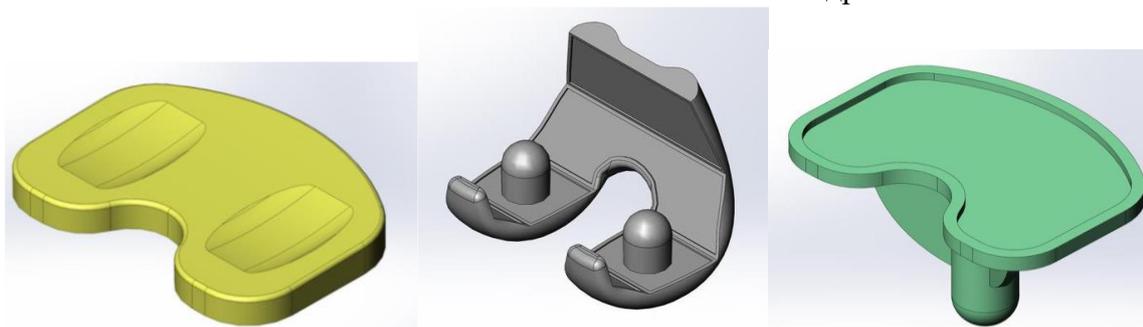


Рисунок 6 – Конструкция вкладыша, бедренного и большеберцового компонентов эндопротеза коленного сустава

При максимальном сгибании в коленном суставе выполняется перемещение в переднее – заднем направлении до 10 мм. Перемещение мыщелков большеберцовой кости относительно мыщелков бедра при максимальном сгиба-

нии в коленном суставе изображено на рисунке 7.

Описание метода испытания эндопротеза коленного сустава. Для испытания конструкции эндопротеза тазобедренного сустава был выбран про-

граммный пакет SolidWorks 2019, базирующийся на методе конечных элементов. [5]

Методы оценки износа суставных и других поверхностей описаны в стандартах ИСО 14242-2 и ИСО 14243 (часть 1, 2 и 3).

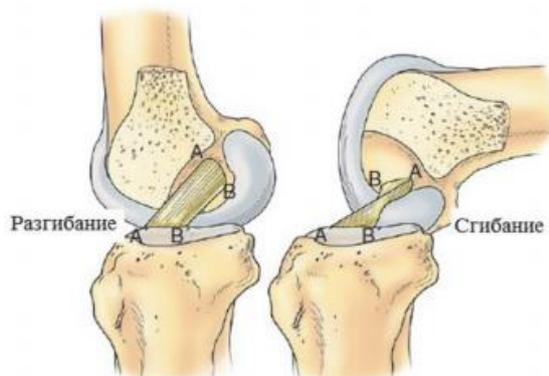


Рисунок 7 – Перемещение мыщелков большеберцовой кости относительно мыщелков бедра при максимальном сгибании в коленном суставе [2]

Плато большеберцовых компонентов протеза коленного сустава, предназначенные для использования с костным цементом либо без него, следует подвергать испытанию для оценки их прочности под воздействием циклической нагрузки при соответствующих параметрах нагрузки согласно методам испытаний, которые определены стандартом ИСО 14879-1. Каждый из пяти образцов должен быть подвергнут испытанию при максимальной нагрузке 900 Н на протяжении 10x10 циклов, и при этом не выйти из строя [7]. Все большеберцовые компоненты, на которые распространяются требования данного Международного стандарта, должны соответствовать этим минимальным техническим характеристикам.

Смещение считается равным нулю, когда тотальный протез коленного су-

става находится в исходном положении, и считается положительным, когда ось осевой силы находится впереди от него, а тотальный протез коленного сустава - в исходном положении.

На рисунке 8 представлено правило знаков для сил, моментов и перемещений, показанных для системы тотального замещения левого коленного сустава.

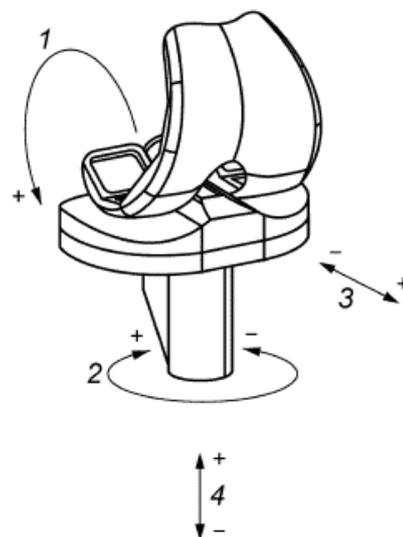


Рисунок 8 – Правило знаков для сил, моментов и перемещений, показанных для системы тотального замещения левого коленного сустава. 1 – сгибание (бедренного компонента); 2 – большеберцовая ротация, момент большеберцовой ротации; 3 – переднезаднее смещение большеберцовым компонентом, переднезадняя сила, прикладываемая к большеберцовому компоненту; 4 – осевая сила ("+" - положительная; "-" - отрицательная)

Переднезадняя сила – сила, прикладываемая к большеберцовому компоненту вдоль линии действия, перпендикулярной и к большеберцовой оси, и к оси сгибания/разгибания, которая проходит через ось осевой силы. Сила считается положительной, когда действует в заднепереднем

направлении на большеберцовый компонент [8].

Осевая сила: сила, приложенная к большеберцовому компоненту протеза коленного сустава в направлении, па-

раллельном большеберцовой оси.

Отметим, что сила считается положительной, когда действует в нижне-верхнем направлении.

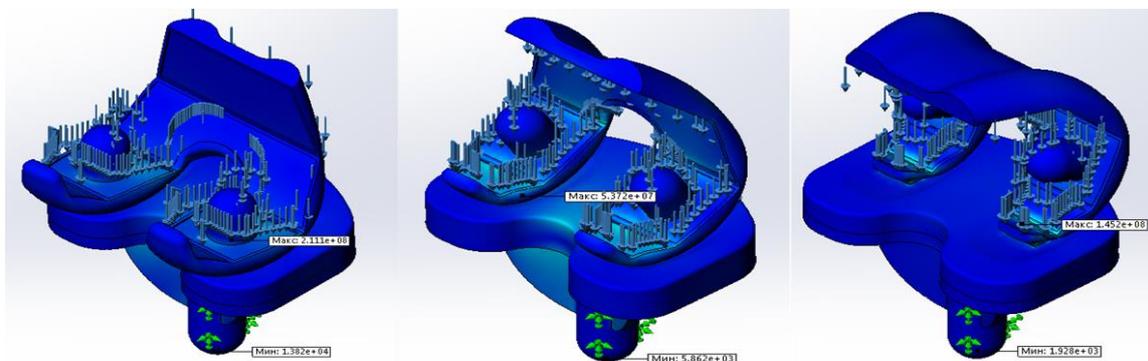


Рисунок 9 – Распределение напряжений в эндопротезе коленного сустава с толщиной вкладыша 8, 10, 12, 15, 18 мм в положениях №1, 2, 3

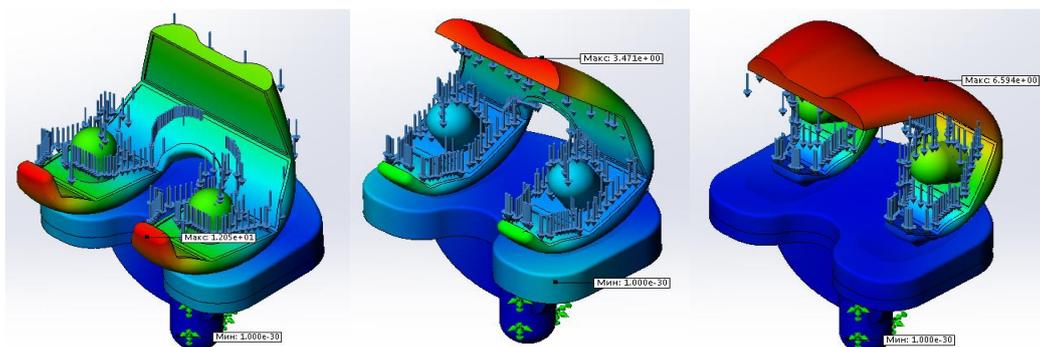


Рисунок 10 – Перемещения эндопротеза коленного сустава с толщиной вкладыша 8, 10, 12, 15, 18 мм в положениях №1, 2, 3

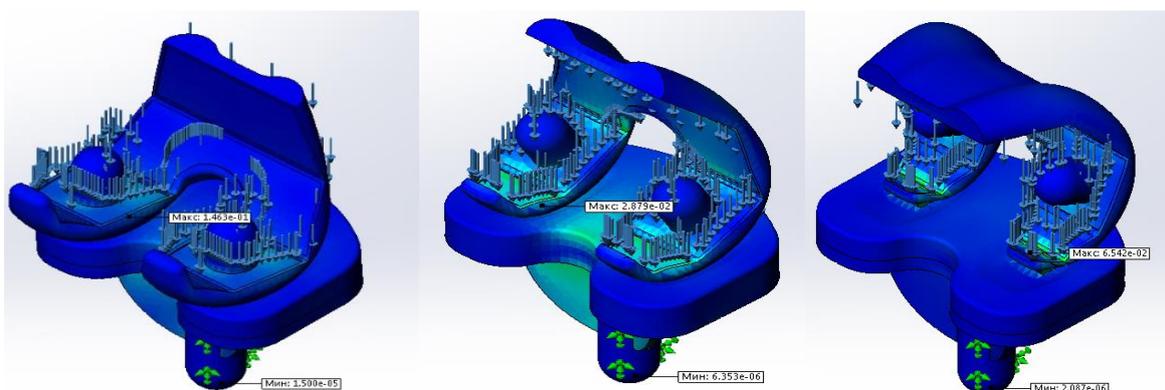


Рисунок 11 – Деформация эндопротеза коленного сустава с толщиной вкладыша 8, 10, 12, 15, 18 мм в положениях №1, 2, 3

Анализ напряжённо-деформированного состояния в программе SolidWorks. Условия проведения испытания эндопротеза тазобедренного сустава в программе SolidWorks следующие:

- Три крайних положений нагрузений (№1 – угол сгибания (α) равен 0° ;
- №2 – угол сгибания (α) равен 45° , №3 – угол сгибания (α) равен 90° ;
- Действующая нагрузка (P) равна 900 Н.

Далее на рисунках 9 – 11 отображены результаты статических нагрузений типоразмеров эндопротеза коленного сустава при различных положениях.

Проведя серию экспериментов, были получены следующие данные по напряженно-деформированному состоянию эндопротеза коленного сустава:

При нагрузке в 900 Н, возникающие напряжения не превышают предельно допустимых значений и локализуются в участках соприкосновения вкладыша с бедренным компонентом. Их значения колеблются от 4 до 21 МПа, во всех 5 типоразмерах. Достижение максимальных напряжений наблюдается в положении, где угол (α) 0° и толщина вкладыша 8 мм. Минимальные значения напряжения наблюдаются в положении, где угол (α) 90° и толщина вкладыша 18 мм (15 МПа) в данном случае вся нагрузка ложится на связки и мышечную ткань. Значения перемещений соответствуют допустимым значениям перемещения при сгибании-разгибании

сустава и составляет максимум 9 мм при положении №3 и толщине вкладыша, равном 15 мм. Значения деформаций в ходе всех испытаний не превысили допустимых значений, что говорит о положительном результате проектирования эндопротеза.

Выводы. 1 Для эндопротеза коленного сустава, состоящего из СВМПЭ, были применены геометрические параметры эндопротеза фирмы «Zimmer» модель M/L. Данная модель хорошо себя зарекомендовала в восстановительной хирургии и ортопедии.

2 Испытания трехмерной модели эндопротеза проводились в программе SolidWorks Simulation, базирующиеся на методе конечных элементов. Нагружение модели проводилось согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 14243-1, ГОСТ Р ИСО 14243-2, ГОСТ Р ИСО 14243-3.

3 По полученным данным анализ напряженно-деформированного состояния можно сделать вывод, что данный эндопротез, состоящий из СВМПЭ, способен выдержать эксплуатационные нагрузки в 900 Н, при различных анатомических положениях. Во всех пяти типоразмерах возникающие напряжения не превышают 21 МПа. Перемещение находится в пределах нормы и составляет не более 9 мм в положении, где угол (α) 90° .

ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяков, Ю. Д. Новые поколения неорганических функциональных материалов [Текст] / Ю.Д. Третьяков, О.А. Брылев. Ж. Росс. хим. им. Д.И.Менделеева. 2000. – Т.44 – №4 (часть1) С. 10 – 20.
2. Хлусов, И. А Основы био-

механики биосовместимых материалов и биологических тканей [Текст]: учебное пособие / И. А. Хлусов, В. Ф. Пичугин, М. А. Рябцева. – Томск: Томский политехнический университет, 2007. – 149 с.

3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Машиностроение, 1979. – 392 с.

4. Мовшович, И. А. Полимеры в травматологии и медицине [Текст] / И.А Мошовик, В.Я. Виленский – М.: Медицина, 1978. – 320 с.

5. Вересов, А. Г. Достижения в области биоматериалов [Текст] // Рос. хим. журн. А.Г.Вересов, 2008. Т. 25, – № 45. С. 65 – 73 с.

6. Буланов, Е. Н. Получение и исследование наноструктурированных биосовместимых материалов на основе полиэтилена [Текст] / Электронное учебно – методическое пособие / Е.Н. Буланов, Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 103 с.

7. Кононович, Н. А. Оценка биосовместимости имплантационных материалов в зависимости от их минерального состава [Текст]: учебное пособие / Н.А. Кононович, И. А.Талашова, Т.А. Силантьева. – Курган /, г. Курган, 2007. Изд-во: ФГУ «Российский научный центр „Восстановительная травматология и ортопедия“ им. академика Г.А. Илизарова Минздравсоцразвития» Бюллетень сибирской медицины – 270 с.

8. Андреева. И. Н. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности [Текст] / И.Н. Андреева, Е.В. Веселовская, Е.И. Наливайко, А.Д. Печенкин, В.И. Бухгалтер, А.В. Поляков – М: Химия, 1982. – 80 с.

© Л. А. Матюхина, Е. А. Головина
2021

ABSTRACT

HYBRID COMPOSITE MATERIAL OF INCREASED STRENGTH AND HEAT RESISTANCE

V. B. Markin¹, M.D. Zhumadilov²

¹Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Barnaul, Russia

²Altai Geophysical Plant LLC, Barnaul, Russia

Abstract. A hybrid composite material has been developed that can be used for the manufacture of shelters for conveyor conveyors operating in conditions of elevated temperatures and humidity, containing active corrosive components. An example of the use of such products can be coke conveyors from batteries to storage, in which composite shelters can replace used stainless steel products, the life of which does not exceed a year.

Key words: hybrid composite material, polymer binder, strength, deformability, reinforcement, fiberglass, basalt fabric, expanded mesh.

INVESTIGATION OF DEFECTS OF LARGE-SIZED COMPOSITE STRUCTURES

V. B. Markin

Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Barnaul, Russia

Abstract: the main types of structural defects of large-size winding structures made of composite materials, leading to the loss of continuity of the load-bearing shell, its deformation, which significantly affects the normal operation of products without further repair ensuring tightness and corresponding strength characteristics on the example of the construction of a composite container, the main external factors and influences are shown that lead to the appearance of macrodefects that affect the integrity of the multilayer composite shell and a decrease in its operational characteristics. The use of the solid works program for calculating the stress-strain state of composite structures made it possible to assess the possible level of

defectiveness of the load-bearing shell and draw conclusions on their operation.

Key words: fiberglass, winding, large-sized structures, structural defects, strength.

STUDY OF THE DEPENDENCE OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS ON THE STRUCTURE OF PRODUCTS OBTAINED BY THE METHOD OF 3D PRINTING

S. V. Morozov, E. I. Volchenko, A. N. Makariev

Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Barnaul, Russia

Abstract: Modern approaches to creating a volumetric copy of a physical object are greatly simplified using a virtual model and rapid prototyping devices, also known as 3D printers. With each new stage in the development of 3D printing technologies, vast areas of its application appear, such as: construction, medicine, mechanical engineering, electronics, etc. In all these areas, the use of various new materials has become widespread: thermoplastic polymers, concrete, gypsum, acrylic, metal powders and many others. Based on this, the problem arises of determining the mechanical characteristics of products and developing methods for strengthening the structure by means of reinforcement. The purpose of this work is to study the influence of the filling structure, as well as the spatial orientation of internal structures on the final characteristics of products obtained by 3D printing.

Key words: 3D printer, filling structure, spatial orientation.

INCREASING THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF CARBON PLASTICS BY THE METHOD OF ELECTROCHEMICAL TREATMENT

S.V. Morozov

Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Barnaul, Russia

Abstract. The possibility of obtaining composite

materials (CM) with predetermined properties contributes to their active use in various fields of industry. Such materials have the properties necessary specifically for the manufacture of a specific product, which has its own unique properties and therefore are in great demand. In products made of carbon plastics, working in tension and bending, the urgent task is to increase the strength characteristics by increasing the adhesion of the carbon filler to the polymer binder. Various methods of fiber surface treatment are used to increase adhesion. Currently, the method of electrochemical processing of fibers is actively used. Electrochemical treatment removes the inactive surface layer, which makes it possible to increase the specific surface area of the fiber and contributes to the formation of polar functional groups on the fiber surface. All this leads to the activation of the carbon fiber surface and contributes to an increase in the adhesion strength at the carbon filler / polymer binder interface.

Key words: electrochemical treatment, electrolyte, carbon fiber, polymer composite materials, adhesion, fiber surface modification, surface treatment

PRODUCTION OF MEMBRANE FABRIC FOR SPORTS CLOTHES IN ALTAI REGION

A. A. Belousova, N. A. Myagkova

Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Barnaul, Russia

Abstract: Altai Territory has opportunities for the development of small businesses in the production of membrane fabric for sportswear. The demand is formed because of the development of the tourism industry in the region, the opening of sports grounds for professional and amateur sports. This article presents the results of a study of competitors in the regional market among manufacturers of membrane fabrics made of polymeric materials for sportswear; the types of equipment used are indicated; the economic substantiation of the start-up is given. *Key words:* polymeric materials, membrane fabric, sportswear, properties of membrane fabric, properties of polymeric materials.

ANALYSIS OF THE COMPETITIVENESS OF THE STARTUP OF PRODUCTION OF CAR BODY ELEMENTS FROM COMPOSITE MATERIALS

V.S. Herzen, N.A. Myagkova

Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Barnaul, Russia

Abstract: The article provides an economic substantiation of the effectiveness of a startup in the production of car body elements from composite materials. Two models of car body elements manufacturing are considered.

Key words: matrix using hand molding, composite materials, break-even point, MVP.

START-UP OF PRODUCTION OF CAR BODY ELEMENTS FROM COMPOSITE MATERIALS

C. V. Ovechkin, N. A. Myagkova

Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Barnaul, Russia

Abstract: The demand for restoration or tuning of car body elements among car owners who have been operating a car for 10-20 years has determined the need to analyze the potential of a startup to produce body elements from composite materials. The article discusses the costs for two models: the purchase of a matrix and revision using a 3D printer.

Key words: body elements made of composite materials, matrix, properties of fiberglass.

POSSIBILITIES OF THE QUANTUM-MECHANICAL APPROACH TO THE DESCRIPTION OF EXCITED ELECTRONIC STATES OF NANOCOMPOSITES BASED ON CARBON

A.A. Rozny¹, A.E. Rezvanova², A.V. Popov¹

¹Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Barnaul, Russia

²Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

Abstract: The possibilities of computer model-

ing of the electronic structure of carbon nanocomposites using an original technique for describing excited states open nanosystems under external influence.

Key words: carbon nanocomposite, UNC, nanomaterials, computer simulation, electronic structure, excited states.

DEVELOPMENT OF THE OPTIMUM COMPOSITION OF THE CASTING FORM FOR THIN-WALLED CASTINGS FROM COLD-HARDENING MIXES

A. Z. Isagulov¹, St. S. Kvon¹, V. Yu. Kulikov¹

¹Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Abstract: The properties of castings from heat-resistant alloys obtained by casting methods according to gasified models (LGM) and into sandy-clay molds (SGF) are considered. A comparative analysis of the porosity and non-metallic inclusions of such images is carried out. Microstructural analysis has been carried out. The results of long-term strength tests are presented. It has been determined that, despite the higher cost of LFM in comparison with FGF, it is worth recommending LFM for producing castings from complex alloyed alloys, since the operational properties increase by 13-15%.

Key words: high-temperature strength, long-term strength, gasified casting, non-metallic inclusions, alloy, structure, porosity, microstructure.

STUDY OF THE INFLUENCE OF ALLOYING ADDITIVES ON THE PROPERTIES OF THE HEAT RESISTANT ALLOY

A. Z. Isagulov¹, Ibatov M.K.¹, St. S. Kwon¹, V. Yu. Kulikov¹

¹ Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Abstract: The effect of boron on the properties of heat-resistant alloys is investigated. Ferroboron grade FB20 was used for alloying. The dependence of the long-term strength limit on

the boron content has been determined. The results of long-term strength tests are presented. Studies have shown that the introduction of boron microadditives up to 0.5% practically does not affect the long-term strength of the Cr-Ni-Fe-based alloy. The introduction of boron as a microligature into alloys based on this system with an increased chromium content is advisable to introduce to improve the quality of the alloy.

Key words: high-temperature strength, long-term strength, ferroboron, alloy, structure, microstructure, deoxidizer, phase, alloying

STUDY OF DETONATION OF PLANE LARGE-SIZED CHARGES OF LOW-SPEED EXPLOSIVES IN EXPLOSIVE WELDING

Pervukhin L.B.¹, Berdychenko A.A.²

¹Bitrub International LLC, region 141292, Moskovskaya Krasnoarmeysk, Prospect Testing House 21, room 18

²Altai State Technical University named after I.I. Polzunova

Abstract: The dependence of the formation of defects in a welded joint during explosion welding on the expansion of an explosive charge is investigated. It was revealed that the free surface of the charge significantly affects the detonation velocity of the explosive and its stability, and, consequently, the stability of the parameters of the explosion welding process. To stabilize the detonation process of large-sized flat charges, it is necessary to place a layer of inert material on their surface, which reduces the likelihood of lack of penetration and other defects.

Key words: explosion welding, cladding of large-sized blanks, shock wave, backfill.

STUDY OF THE INFLUENCE OF DISPERSED FILLERS ON THE HARDNESS OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

S. A. Khaperskikh, E. S. Ananyeva

"Altai State Technical University named after II Polzunova", Barnaul

Abstract. The article analyzes the effect of dispersed fillers on the hardness of a composite based on an epoxy binder. Physicomechanical processes at the "matrix - filler" interface confirm the presence of an interfacial layer, which is a non-deformable body. In this connection, the task was set - to analyze not only fillers, but also their volume fraction in the matrix.

Using the method of determining the hardness based on Brinell, the analysis of the data obtained was carried out. As a result, it was found that most dispersed fillers increase the hardness of the composite with an increase in their volume fraction. This is primarily because in dispersed-filled composite materials, the filler strengthens the matrix, and the degree of hardening depends on the shape of the filler particles, their amount and distribution. The exception is some fillers with high hygroscopicity and low adhesion to the matrix.

The author has studied the effect of dispersed fillers on the final properties of a polymer composite with the use of a solvent - acetone (to reduce the viscosity of the composition) and without it. Based on the data obtained, it was found that the samples without the use of acetone have a hardness index an order of magnitude higher than with the addition of acetone. In addition, acetone samples had a longer cure time.

As a result of sampling, a comparative characteristic of the samples was carried out. As a result, the analysis of filler particles acting as crystallization centers on the interaction with the epoxy matrix and the absence of adhesive interaction is given. It should be noted that this article summarizes practical experience and requires further study.

Key words: composite, polymer matrix, filler, hardness, adhesion.

**STUDY OF THE INFLUENCE OF
DISPERSED FILLERS AND HARDNESS
ON THE ABRASION OF POLYMERIC
COMPOSITE MATERIALS**

S. A. Khaperskikh, E. S. Ananyeva

*"Altai State Technical University named after
I.I. Polzunova ", Barnaul*

Annotation. This article examines the effect of dispersed fillers on the hardness and abrasion of a polymer composite based on an epoxy binder.

Based on previous studies, the author selected samples of dispersed-filled composites based on an epoxy matrix and considered their hardness values. Using the full-scale test method, results on the abrasion of composites were also obtained.

It is known that the abrasion of a material directly depends on its hardness, therefore the author carried out an analysis in the application package Excell, which proves some dependence of the hardness indices and the volume fraction of the filler. As a result, a correlation equation has been derived, which allows, in a certain approximation, to assume the result of the abrasion index of the composite within the framework of the study. elements of technology, including agriculture. It should be noted that the article summarizes practical experience and requires further study.

Key words: dispersed-filled composite, polymer matrix, hardness, abrasion, filler.

**THERMOGASDYNAMIC CALCULATION
OF PARAMETERS OF COMBUSTION
PRODUCTS ON A VIRTUAL MODEL OF A
RDTT NOZZLE**

I. V. Lunegov, E. A. Golovina

*"Altai State Technical University named after
I.I. Polzunova ", Barnaul*

Abstract. The article presents a thermogasdynamic calculation of the parameters of combustion products on a virtual model of a rocket engine nozzle, from which it follows that the zone of maximum temperature stresses is the critical part of a solid propellant rocket nozzle. The curves obtained clearly show the dependences of the behavior of the parameters of the gas flow when passing through the nozzle. The dependences of the change in the flow parameters are fully consistent with the thermogasdynamic theory of flow, which confirms the correctness of the calculation.

Key words: solid fuel rocket engine nozzle, bell, carbon-carbon composite materials, thermo-

gasdynamic calculation.

DETERMINATION OF PROPERTIES OF EPOXY COMPOUND BASED ON ANHYDRIDE HARDENER HT-152 B

Z.G. Sakoshev¹, A.N. Blaznov^{1,2}, N.V. Bychin¹,
V.V. Firsov¹, I.S. Khabazin¹,
D.V. Chashchilov¹, E.G. Sakoshev^{1,2}

¹Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Chemical and Energy Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk

²Biysk Technological Institute (branch) of the Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, Biysk

Abstract: In this work, an epoxy binder based on ED-20 resin and an anhydride type hardener HT-152 B was investigated. The main characteristics of the study were: viability (rheological characteristics), degree of cure, tensile strength, and glass transition temperature. The binder has shown a high pot life and can be processed at room temperature for more than 30 hours. An incomplete degree of curing of the binder was revealed at a temperature of 90 ° C for 6 hours. The maximum tensile strength of the binder was reached 74.96 MPa - after curing for 2 hours at a temperature of 200 ° C. The maximum glass transition temperature of 115 ° C was obtained at a curing temperature of 140 ° C for 2 hours.

Key words: compound, epoxy binder, anhydride hardener, tensile strength, glass transition temperature, binder viability.

TESTING THE MATERIAL OF THE VIRTUAL MODEL OF THE RDTT NOZZLE FOR STRENGTH

I. V. Lunegov, E. A. Golovina

"Altai State Technical University named after I.I. Polzunova", Barnaul

Abstract. This work is devoted to the search for the optimal wall thickness of the solid propellant rocket nozzle at which the structure withstands all mechanical and temperature stresses, and also maintains its operability throughout the entire operation time, that is, without the formation of areas of critical decrease in the wall thickness in all its areas as a result of the removal of the mass of the substance. { {1}} Based on the results of the analysis, the critical velocity of material mass carryover from the surface and the required optimal wall thickness of the critical and end part of the solid propellant rocket nozzle were determined.

Key words: solid propellant rocket engine nozzle, bell, carbon-carbon composite materials, optimization thickness.

VIRTUAL TESTS OF THE CONSTRUCTION OF KNEE ENDOPROSIS

L. A. Matyukhina, E. A. Golovina

"Altai State Technical University named after I.I. Polzunova", Barnaul

Abstract. As a result of the work, the optimal component composition of the used implant was selected, allowing to obtain the strength properties necessary for the implantation of the material; recommendations are given on the technological process of manufacturing the knee endoprosthesis insert. The analysis of the stress-strain state of the endoprosthesis was performed using the SolidWorks Simulation software, data confirming its performance were obtained.

The developed object can be used for medical purposes as a material for implantation to replace cartilaginous defects of the knee joint.

Key words: composite material, ultra-high molecular weight polyethylene, biocompatibility, endoprosthetics, cartilage implants.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Маркин В. Б., Жумадилов М.Д.	Гибридный композиционный материал повышенной прочности и теплостойкости	4
2.	Маркин В. Б.	Исследование дефектности крупногабаритных композитных конструкций	12
3.	Морозов С. В., Волченко Е. И., Макарьев А. Н.	Исследование зависимости физико-механических характеристик от структуры изделий, полученных методом -печати	19
4.	Морозов С. В.	Повышение прочностных характеристик углепластика методом электрохимической обработки	23
5.	Белоусова А. А., Мягкова Н.А.	Производство мембранной ткани для спортивной одежды в Алтайском крае	32
6.	Герцен В. С., Мягкова Н. А.	Анализ конкурентоспособности стартапа производства кузовных элементов автомобиля из композиционных материалов	36
7.	Овечкин С. В., Мягкова Н. А.	Стартап производства элементов кузова автомобиля из композиционных материалов	40
8.	Розный А. А., Резванова А. Е., Попов А. В.	Возможности квантово-механического подхода к описанию возбужденных электронных состояний нанокompозитов на основе углерода	43
9.	Исагулов А. З., Квон Св. С., Куликов В. Ю.	Разработка оптимального состава литейной формы для тонкостенных отливок из холоднотвердеющих смесей	48
10.	Исагулов А. З., Квон Св. С., Куликов В. Ю.	Сравнительный анализ свойств отливок из жаропрочного сплава, полученных по разным технологиям выплавки	53
11.	Исагулов А. З., Ибатов М.К., Квон Св. С., Куликов В. Ю.	Исследование влияния легирующих добавок на свойства жаропрочного сплава	58

12.	Первухин Л. Б., Бердыченко А. А.	Исследование особенности детонации плоских крупногабаритных зарядов низкоскоростных ВВ при сварке взрывом	65
13.	Хапёрских С. А., Ананьева Е. С.	Изучение влияния дисперсных наполнителей на твердость полимерных композиционных материалов	69
14.	Хапёрских С. А., Ананьева Е. С.	Изучение влияния дисперсных наполнителей и твердости на истираемость полимерных композиционных материалов	77
15.	Лунегов И. В., Головина Е. А.	Термогазодинамический расчет параметров продуктов сгорания на виртуальной модели сопла РДТТ	83
16.	Сакошев З. Г., Блазнов А. Н., Бычин Н. В., Фирсов В. В., Хабазин И. С., Чащилов Д. В., Сакошев Е. Г.	Определение свойств эпоксидного компаунда на основе ангидридного отвердителя ХТ-152 Б	89
17.	Лунегов И. В., Головина Е. А.	Испытание материала виртуальной модели сопла РДТТ на прочность	97
18.	Матюхина Л. А., Головина Е. А.	Виртуальные испытания конструкции эндопротеза коленного сустава	107
		Abstract	114