

УДК 629.7

## **Разработка гибридных композитов на основе синтетических смол, модифицированных наночастицами металлов и керамики. Создание опытного производства**

М. М Смирнов, Малюгин А. С.

### **Аннотация**

Полимерные композиционные материалы, выбранные авторами работы в качестве модельных сред для внедрения твёрдых наночастиц в качестве целевых модификаторов, кардинально меняющих свойства композита, являются наиболее предпочтительными для современных макро конструкционных материалов.

Полученные в работе материалы, могут найти применение не только в разработке ремонтных компаундов, но и при проектировании специальных полимерных композиционных материалов конструкционного назначения, в том числе и со сверхвысокими свойствами.

Предложенный подход к компоновке полимерного композиционного материала, содержащего наночастицы углерода, металлов и керамики, а также аналогичные микропорошки, существенно снижает затраты на проведение исследований в области распределения частиц в вязких средах.

### **Ключевые слова**

Полимерный композиционный материал; наночастицы; ремонтный компаунд; модификация связующих

### **Введение**

Как известно, полимерные композиционные материалы (ПКМ) сочетают в себе все свойства входящих в них компонентов, при формировании которых можно получить конструкционный материал в заданном диапазоне эксплуатационных и технологических параметров оборудования.

Для приближения свойств ремонтных ПКМ к свойствам материала ремонтируемой детали, были выбраны связующие на органической основе, в состав которых были введены наноразмерные порошки углерода, металлов и керамики, а также мелкодисперсные порошки керамики, металлические «порошки-аналоги», технологические и эксплуатационные модификаторы, аэросил. Целью работы было: получение материалов с требуемыми характеристиками по прочности и долговечности, обладающих такими технологическими свойствами как тиксотропность, высокая адгезия к материалу ремонтируемой детали и др. Для каждого вида однотипных деталей были получены свои рецептурные составы компаундов, разработаны типовые технологические процессы нанесения, подобраны режимы обработки и оборудование для этого.

Качественным изменением при компоновке композита было применение наноразмерных частиц углерода, металлов и керамики в качестве системных наполнителей. Как известно, разработчики современных полимерных материалов, содержащих наноструктуры в качестве наполнителя, исходят из теории стехиометрической пропорции в химической реакции прivityтия наночастиц в молекулах полимера. Это вызывает определённые технические трудности с однородностью материала – при стехиометрическом использовании, т.е. в минимально необходимом количестве очень трудно доставить каждую частицу в зону реакции, создаются агломераты. Для более тщательного распределения в вязких смолах применяют ультразвуковые, резонансные и магнитные методы перемешивания частиц.

В данной работе используют наночастицы для получения составов ПКМ в количестве, при котором достигается необходимая технологическая вязкость и тиксотропность. То есть, на начальной стадии разработки ПКМ с наногетерогенной структурой, авторы проекта не стремятся сразу структурировать и химически привить наночастицы в цепочку полимера, а вводят их по расчётной поверхности смачивания.

Этот подход позволил авторам получить прочные композиционные материалы на эпоксидной основе со значительно более низким удельным весом, чем в системах с микро размерным наполнением. В материале снизились характерные пограничные микродефекты, способные распространять и развивать раннюю усталость.

Проводя анализ полученных результатов испытаний свойств ПКМ содержащих дисперсные наноструктуры с аналогами, имеющими в составе только микропорошки, получены положительные данные по значительному улучшению характеристик материалов. В результате проведённой работы, повысилась динамическая прочность ПКМ. Применяя подход максимального «нанонаполнения», авторы работы не исключают возможность

дополнительной обработки полями ТВЧ, резонансными колебаниями и др. для получения химически связанного шарнирного «скелета» из наночастиц с заданными свойствами. Такие материалы целесообразно использовать в условиях действующего производства: в авиационном двигателестроении, при изготовлении деталей планера ЛА и ракетно-космической техники, а также, могут найти применение в энергетике, химическом машиностроении, станкостроении, специальной технике и ремонтных работах изношенного оборудования и авиационного парка.

В настоящее время, на предприятиях авиационной отрасли и эксплуатирующих авиатехнику компаниях накопилось большое количество изношенного станочного оборудования, нуждающегося в капитальном ремонте. К такому оборудованию относятся металлообрабатывающие станки, специальная оснастка и приспособления, гидравлическое и пневматическое оборудование, насосы и трубопроводы, а также многое другое. На практике, в условиях серийного производства, станочный парк многих предприятий эксплуатируется практически до полного износа всех деталей и узлов, отвечающих за механику и геометрию оборудования. Планово-предупредительные работы проводятся несвоевременно, а зачастую просто отсутствуют. При обнаружении потери точности или изменении технологических параметров оборудование выводится из производства. При этом увеличивается время простоя конвейера и цикл сборки продукции.

Анализ видов разрушения и снижения точности различного оборудования показывает, что эти негативные явления возникают по многим причинам. К ним относятся:

1. Коррозионное и кавитационно-эрозионное разрушение оборудования, имеющего контакт с жидкими средами под давлением, износ, вызванный эксплуатационными факторами (падение тяжёлых предметов на оборудование, примеси в смазывающих и охлаждающих жидкостях, нарушение правил транспортировки и мн. др.), а также брак при изготовлении деталей.

2. Износ трущихся частей с низкой скоростью скольжения, вследствие больших поперечных нагрузок и вибраций (суппорт и станина), попадания стружки в зазор, ударов при остановках.

3. Износ подшипников скольжения, из-за высоких поперечных нагрузок и примесей в СОЖ.

4. Износ подшипниковых опор и шеек по причине осевых биений, связанных с выработкой посадочных мест.

5. Разрушение деталей оборудования при имеющих место превышающих предельно допустимых нагрузках, температур и режимах работы оборудования.

Проводя дефектацию изношенных и разрушенных узлов (деталей), специалисты по восстановлению оборудования приходят к выводу, что более 50 % из них не поддаются ремонту традиционными способами. При этом, решение о целесообразности ремонта на многих предприятиях, принимается исходя из экономических, технологических и материально-технических показателей. Встаёт вопрос, что эффективней? Закупить новое оборудование или провести полный капитальный ремонт? Большинство специалистов выбирают второй вариант, так как выделить средства из бюджета предприятия на закупку нового оборудования представляется в большинстве случаев проблематичным, а выпускать продукцию необходимо.

На предприятиях производящих непосредственно авиационную технику, часто встаёт вопрос о текущем ремонте основных видов продукции специальными полимерными композиционными материалами, например деталей из магниевых сплавов ГТД (газотурбинный двигатель), сотовых панелей, клеевых и клееклепанных соединений, валов приводных устройств ГТД и др.

Как известно, композиционные материалы сочетают в себе все свойства входящих в них компонентов, при формировании которых можно получить практически любой ремонтный или конструкционный материал в определённом диапазоне эксплуатационных и технологических параметров оборудования, газотурбинного двигателя, панели планера и мн. др.. Ремонтные компаунды характеризуются высокими прочностными свойствами, коррозионной стойкостью, прочностью в условиях длительной эксплуатации, ударной вязкостью и вибростойкостью, хорошей адгезией к металлам и сплавам, реактопластам, наполненным термопластам. При этом специалист не ограничен в номенклатурном выборе ПКМ, так как их свойства формируются в процессе производства при определенном рецептурном составе, в том числе и в зависимости от наполнения определённым видом или видами наноразмерных частиц.

Для изготовления ремонтных компаундов чаще всего используются смолы холодного отверждения, наполняемые порошками металлов и минералов различной дисперсности. Наиболее применяемыми являются эпоксидные диановые и фенольные смолы, отверждаемые аминными отвердителями и их комбинациями, реже используются полиэфирные смолы. Поэтому, имея в «ремонтной аптечке» авиационного изделия или оборудования комплект, состоящий всего лишь из смолы с заранее введёнными наночастицами, отвердителя и нескольких фракций различных микро порошков можно получить ремонтные материалы с различными прочностными, трибологическими, эксплуатационными и технологическими свойствами.

В настоящее время на рынке ремонтных ПКМ появилось большое количество продуктов, изготавливаемых отечественными и импортными производителями. Среди импортных материалов можно выделить такие компаунды как Бельзона, Диамант, Локтайт, среди отечественных - Дексан, Ремохлор. Широко рекламируемые, эти материалы представляют много преимуществ технологам в выборе вида ремонта оборудования, в том числе и авиационной техники. К ним относятся низкая цена, простота и малое время проведения работ, возможность полного восстановления разрушенных деталей, которые сложны в изготовлении или дороги при закупке новых. Однако эти материалы не лишены ряда существенных недостатков. В таблице 1 приведена общая сравнительная характеристика отечественных и импортных компаундов, интересующая специалистов и механиков машиностроительных предприятий.

### **Сравнительная характеристика отечественных и импортных компаундов.**

Таблица 1.

<b>№ п./п.</b>	<b>Характеристика материала</b>	<b>Импортные материалы</b>	<b>Отечественные материалы</b>
1.	Цена материала за 1 кг, руб.	3500-8500	600-3500
2.	Прочностные характеристики	высокие	высокие
3.	Температурная стойкость, °С	До 180-200	До 350
4.	Технологичность и простота при нанесении	Технологичны	Не технологичны (по сравнению с импортными)
5.	Стабильность свойств материалов из различных партий	Постоянные (редко встречаются небольшие отклонения)	Не постоянны (часто встречаются значительные отклонения при входном контроле)
6.	Упаковка и специальные технологические приспособления (инструмент)	В полимерной, плотно закрывающейся таре с комплектом необходимых	В полимерной, плотно закрывающейся таре

<b>№ п./п.</b>	<b>Характеристика материала</b>	<b>Импортные материалы</b>	<b>Отечественные материалы</b>
		инструментов	
7.	Номенклатура выпускаемых материалов	Холодные сварки, гелькоуты, эластомеры	В основном холодные сварки
8.	Посудное время	Низкое, до 30 минут	Высокое более 1 часа.
9.	Тиксотропность в слое толщиной 20 мм	Тиксотропны	Не тиксотропны
10.	Вид инструмента, при обработке в размер с допуском	Реже с алмазным напылением, обычно эльборное покрытие кромки. Шлифовальные круги	Реже с алмазным напылением, обычно эльборное покрытие кромки. Шлифовальные круги
11.	Вид инструмента при грубой обработке	Любой слесарный инструмент	Любой слесарный инструмент
12.	Срок хранения в закрытой таре	Не ограничен для гелькоутов и холодных сварок, до 1 года для эластомеров.	Не ограничен
13.	Минимальная толщина слоя при наращивании тела детали, мм	Минимум 0,5	Минимум 1,2

Анализируя данные, приведённые в сравнительной таблице, видно, что и отечественные, и импортные материалы не могут удовлетворять комплексу свойств, предъявляемых к ремонтным материалам. Основным руководством к выбору компаунда, является оптимальное соотношение эксплуатационных и технологических параметров материала, при относительно невысокой цене.

Провести оптимизацию среди готовых материалов практически невозможно, так как будут ущемлены те или иные свойства. Например, при отличных эксплуатационных

свойствах пастообразных антифрикционных ПКМ, предлагаемых производителями и применяемых при ремонте пар трения с низкой скоростью скольжения, невозможно провести качественные работы по восстановлению без специального оборудования и приспособлений, а также потребуется дополнительная, сложная обработка трущихся поверхностей. Это усложняет работы и значительно повышает их стоимость. И, наоборот, при отличных технологических свойствах материала (текучесть, вязкость, тиксотропность, время желатинизации и др.), его эксплуатационные свойства не удовлетворяют эксплуатационным требованиям (удельный вес, чистота поверхности, фрикционные свойства, срок службы при данных условиях эксплуатации, теплостойкость и др.).

Многие детали и узлы авиационной техники и оборудования длительно эксплуатируются при повышенных температурах от 200°C до 450°C (данный диапазон представлен исходя из принципиальных возможностей полимеров). Износ при таких температурах, делает их практически не ремонтируемыми, так как для восстановления детали потребуется ремонтный материал со свойствами аналогичными материалу детали. Среди представленных на рынке материалов, такие попросту отсутствуют.

Практически все производители ремонтных компаундов, в своих технических инструкциях и памятках не приводят точные данные о сроках эксплуатации отремонтированных узлов, а также режимы обработки материалов. Из всей гаммы производимых той или иной фирмой компаундов, нельзя найти ни одного типового ряда материалов с плавно изменяемой температурой эксплуатации, без потери других свойств, т.е., например, при выборе «холодных сварок» чаще всего температура их эксплуатации не превышает 200°C. Выше этой температуры, рекомендуются материалы на другой основе, например кремнийорганической, что не допустимо в условиях больших нагрузок в авиационной технике и для высокоточного и прецизионного оборудования. Начиная с 200°C, предлагаются в основном термостойкие герметики и покрытия.

Многие производители, стремясь удешевить свои продукты и повысить прибыль, не проводят исследований в области создания одноступенчатых рядовых материалов, с плавно регулируемыми или взаимозаменяемыми свойствами, в широких температурных и технологических диапазонах за счёт введения современных наноразмерных дисперсий. Зачастую, производители предлагают дорогостоящие материалы, с узким набором свойств, изменяющихся в малых пределах, наполненных только микрочастицами.

Остановившись на восстановлении авиационных агрегатов и технологического оборудования с помощью ПКМ, требуется выбрать материал, который позволит провести такие работы, и получить результаты, отвечающие эксплуатационным данным.

Среди большой гаммы представленных ремонтных компаундов, очень трудно выбрать наиболее подходящий, определить его технологичность и подобрать режимы обработки, тем более при ремонте.

Для увеличения экономической отдачи, снижения времени простоя оборудования и агрегатов ГТД в ремонте, повышения качества и долговечности проведённых работ, специалистами «Салюта» создан ряд собственных композиционных материалов, содержащих целевые наномодификаторы и микропорошки. Для приготовления ремонтных полимерных компаундов с наночастицами применяли: вакуумные смесители с подогревом, ультразвуковые диспергаторы, печи ТВЧ, магнитные мешалки, термостаты. Все компоненты компаундов готовились из отечественного сырья. По оценкам ремонтных служб этого предприятия, сданное в эксплуатацию оборудование полностью отвечает паспортным требованиям, надёжно и долговечно, многие агрегаты ГТД были отремонтированы и прошли ресурсные испытания в составе стендов и лётных машин, что подтверждается пунктами «карт – решений».

С использованием ПКМ содержащих наночастицы, общая стоимость ремонтных работ сократилась на 2-4%, время простоя в ремонте на 10-12%. Высокая технологичность проводимых работ позволила разгрузить оборудование, занятое в основном производстве, отвлекаемое на изготовление новых деталей для ремонта станков и ГТД.

В таблице 2 приведена краткая техническая характеристика некоторых ремонтных ПКМ, разработанных ФГУП ММПШ «Салют», условное название «Экстрем»:

Таблица 2.

<b>Оцениваемый параметр</b>	<b>Экстрем 1</b>	<b>Экстрем 2</b>	<b>Экстрем 3</b>	<b>Экстрем 4</b>	<b>Экстрем 5</b>
Назначение	Ремонт оборудования, эксплуатирующегося при повышенных температурах	Ремонт оборудования, эксплуатирующегося при нормальных условиях	Восстановление трущихся пар с низкими и высокими скоростями скольжения	Восстановление оборудования, эксплуатирующегося в условиях абразивного	Изготовление и ремонт фрикционных, создание кавитационноустойчивых гелькоутов.

Оцениваемый параметр	Экстрем 1	Экстрем 2	Экстрем 3	Экстрем 4	Экстрем 5
				износа, эрозии и кавитации	
Состав	Клей ТПК-2, жидкое стекло, керамические и металлические порошковые наполнители, КО-пластификаторы, мел, тальк, сажа	Эпоксидная смола, отвердитель аминного типа, керамические и металлические порошковые наполнители, пластификаторы, ускорители, аэросил	Эпоксидная смола, отвердитель аминного типа, порошковая медь, латунь, графит, дисульфид молибдена, ТЭГ-1, ФПР-лак пластификаторы, ускорители, замедлители, аэросил.	Эпоксидная смола, отвердитель аминного типа, корунд различного фракционного состава, порошковые твердосплавные наполнители, пластификаторы, ускорители, аэросил	Эпоксидная смола, отвердитель аминного типа, корунд различного фракционного состава, порошковые твердосплавные наполнители, ДБФ, ТЭГ-1, ускорители, замедлители, аэросил
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,7-4,5	2,5-2,7	1,7-2,2	2,7-3,6	2,5-2,8
Состояние	Тиксотропная паста (один компонент)	Тиксотропная паста (база, отвердитель)	Тиксотропная паста, вязко - текучая жидкость (база, отвердитель	Тиксотропная паста (база, отвердитель)	Тиксотропная паста, вязко - текучая жидкость (база, отвердитель

Оцениваемый параметр	Экстрем 1	Экстрем 2	Экстрем 3	Экстрем 4	Экстрем 5
Удельный объём, см <sup>3</sup> /кг	270-225	398 - 370	555-454	370-280	398-357
Время полимеризации, при толщине слоя 5 мм и T=25°C, до обработки, час.	48	2-2,5	2,5-6	2-2,5	2-2,5
«Посудное» время, при T=25°C, мин	180	30-35	35-60	30-35	30-35
Адгезионная прочность на отрыв, средняя, кг/см <sup>2</sup>					
К стали	65	187	160	183	183
К меди	47	129	112	124	118
К алюминию	48	132	117	127	121
К нержавеющей стали	71	195	171	184	177

<b>Оцениваемый параметр</b>	<b>Экстрем 1</b>	<b>Экстрем 2</b>	<b>Экстрем 3</b>	<b>Экстрем 4</b>	<b>Экстрем 5</b>
Прочность на сжатие, кг/см <sup>2</sup>	1348	1100	870	1250	1177
Прочность на изгиб, кг/см <sup>2</sup>	473	946	840	1033	989
Температурная стойкость, °С	700	150	200	250	200
Модуль упругости, кг/см <sup>2</sup>	3,1*10 <sup>4</sup>	6,4*10 <sup>4</sup>	7,2*10 <sup>4</sup>	5,9*10 <sup>4</sup>	6,0*10 <sup>4</sup>
Ударная прочность, Дж/м					
Без деформации		70	78	85	83
Обратимая деформация		35	40	49	48
Усадка, %	≤0, 08	≤0, 026	≤0, 020	≤0, 025	≤0, 025
Обработка	Эльборным или алмазным инструментом, удовлетворительное	Обычными резцами, высокое качество	Обычными резцами, высокое качество	Эльборным или алмазным инструментом, высокое качество	Эльборным или алмазным инструментом, высокое качество

Оцениваемый параметр	Экстрем 1	Экстрем 2	Экстрем 3	Экстрем 4	Экстрем 5
	качество, шлифовка, обдирка				
Твёрдость, Шор А	-----	87	85	90	89
Стойкость к истиранию, см <sup>3</sup> /1000 циклов, влажное	-----	-----	0,872	-----	-----
Ориентировочный срок службы, час	До 10000	До 8500	До 10000 (20000 после повторного шабрения)	25000	40000

## **Заключение**

Результаты проведенной на ФГУП ММПШ «Салют» работы по разработке и созданию ремонтных компаундов содержащих наночастицы углерода, металлов и керамики могут быть рекомендованы для использования на многих авиационных предприятиях и предприятиях энергетики и общего машиностроения. Применение в ремонтном деле таких материалов, значительно повысит технологическую и экономическую отдачу. На основе наработанных данных по изготовлению, технологии нанесения, обработке и эксплуатационным параметрам, в дальнейших разработках «Салюта» планируется создать базу - классификатор по всем компаундам, выпускаемым на предприятии, а также ввести в неё данные по отечественным и импортным ПКМ, что окажет помощь в создании новых материалов и поможет технологам выбрать требуемый ремонтный состав.

## **Библиографический список**

[1] Малюгин А.С., Смирнов М.М., Кузнецов И.Е., Сухарев С.Н. Разработка изделий из композиционных материалов для авиационной промышленности. // Новые материалы и технологии – НМТ-2002. Т. 2, с. 33-34.

[2] Малюгин С.В., Смирнов М.М., Давыдкин Н.В., Малюгин А.С. Использование полимерных композиционных материалов для обеспечения производства на предприятии авиадвигателестроения. // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ) – 2003.

[3] Полимерный композиционный ремонтный материал, №2008118394 от 12.05.2008

## **Сведения об авторе**

Смирнов Михаил Михайлович, заместитель начальника отдела ФГУП ММПШ «Салют», телефон/факс 8 (499) 785-88-08

Малюгин Алексей Сергеевич, начальник отдела ФГУП ММПШ «Салют».  
телефон/факс 8 (499) 785-88-08