

УДК 621.003.13

Разработка полимерного композиционного материала не обладающего «СТОП-ЭФФЕКТОМ» для изготовления направляющих прецизионного и особо точного оборудования авиационных предприятий.

Смирнов М.М., Малюгин А.С.

Аннотация

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.

Задача создания пастообразных композиционных материалов холодного отверждения для узлов трения машин и механизмов общего назначения распределяются на три самостоятельных раздела:

- выбор оптимального связующего для композиционного материала;
- создание антифрикционного многокомпонентного наполнителя, придающего антискачковые свойства композиционному материалу;
- создание технологии нанесения на изношенные детали оборудования.

В результате комплекса научных исследований, проведённых авторами, были разработаны новые композиционные пастообразные самосмазывающиеся материалы холодного отверждения на основе высокомолекулярных связующих, отличающиеся малыми релаксационными автоколебаниями при пониженных скоростях скольжения, а также методы нанесения этих материалов на изношенные направляющие и другие детали оборудования.

Ключевые слова

высокомолекулярные связующие; направляющие; эпоксидные смолы; антифрикционный наполнитель

Все возрастающие требования, предъявляемые к современным станкам с числовым программным управлением и многооперационным станкам с автоматической сменой инструмента, в свою очередь, повышают требования к покрытиям скользящих поверхностей.

Традиционные материалы, используемые в узлах трения станков, не удовлетворяют возросшим к ним требованиям.

Пары металлических рабочих поверхностей, изготовленные из чугуна, стали или бронзы, склонны к заеданию в следующих случаях:

- а) при высоких поверхностных давлениях и скоростях подач;
- б) при незначительном засорении направляющих поверхностей стружкой;
- в) при недостаточной смазке трущихся поверхностей или в случае работы по сухой поверхности. Эти причины сужают сферу применения традиционных материалов.

Применение ЧПУ в металлорежущих станках требует внесения существенных изменений в конструкцию станка и, в частности, в конструкции направляющих. Обеспечение точности перемещения и стабильности положения узлов, устойчивое движение узлов, повышение долговечности направляющих осуществляется применением специальных направляющих и специальных материалов (скользящих покрытий), а также, специальной технологией их изготовления.

Одним из критериев, влияющих на повышение точности перемещения и стабильности положения узлов, являются силы трения в направляющих. Неравномерность медленных движений определяется в основном разностью трения покоя и движения, жесткостью привода и в значительной мере демпфированием колебаний.

Уменьшить силу трения, снизить релаксационные автоколебания при выходе рабочего органа станка на заданную позицию, увеличить ресурс за счет уменьшения интенсивности изнашивания можно, применив антифрикционные материалы на полимерной основе, имеющие низкий коэффициент трения и минимальную разницу между трением покоя и движения.

Эта задача в станкостроении решается в настоящее время тремя путями: разработкой и применением закладных направляющих из наполненного фторопласта, пастообразных композиционных материалов на полимерной основе холодного отверждения и литевых компаундов.

Наклеиваемые направляющие из материала Ф4К15М5 обладают меньшими релаксационными автоколебаниями, чем направляющие качения, а также повышенной несущей способностью.

Трудоемкость технологии изготовления: раскрой, подготовка склеиваемых поверхностей, приготовление клеевой композиции, нанесение клеевой композиции, сборка, контроль, шабровка, дефицит самого материала не дает возможности широкого применения накладных направляющих из Фторопласта в станкостроении.

Упрощенная технология изготовления антифрикционных пастообразных композиций, их более низкая себестоимость позволяет широко применять эти материалы в станкостроении. Антифрикционные материалы на полимерной основе обладают хорошей «прирабатываемостью», в процессе которой снижается коэффициент трения; отсутствием задиrow и заеданий, что обеспечивает работу трущихся поверхностей.

В настоящее время разработаны и применяются в промышленности различные антифрикционные самосмазывающиеся пастообразные материалы. Их применение возможно как в условиях сухого трения, так и с применением жидких смазок.

Исследование было направлено на поиск оптимального высокомолекулярного связующего материала, обладающего необходимой прочностью, адгезионными свойствами, износостойкостью; на выбор качественного и количественного состава антифрикционного наполнителя, обеспечивающего низкие значения коэффициента трения и амплитуды релаксационных колебаний; на улучшение технологических свойств композиционного материала, предусматривающих простоту изготовления композиции и ее нанесение на поверхность детали. В качестве высокомолекулярного связующего были рассмотрены эпоксидные смолы, фенольная смола, фторопластовые лаки и их смеси в разном весовом соотношении, в присутствии разбавителя, модификатора и без них. Антифрикционный наполнитель был представлен дисульфидом молибдена, графитом, медью, алюминием, алюмосиликатом, никелем, фторопластом-4 в виде порошков, часть из них с разной дисперсностью и фторопластом Ф-32 Л в виде лака.

В ходе экспериментов варьировался композиционный состав наполнителя, его количественный состав и дисперсность отдельных компонентов наполнителя. Кроме того, определялся оптимальный порядок смешивания компонентов наполнителя, очередность введения компонентов наполнителя в высокомолекулярное связующее. Было испытано более 60 композиций пастообразного самосмазывающегося материала холодного отверждения.

Методом математического планирования эксперимента были получены уравнения регрессии, связывавшие значения коэффициента трения, интенсивности изнашивания, амплитуды релаксационных колебаний с качественным и количественным составом антифрикционных композиций. Методом крутого восхождения были определены оптимальные составы пастообразных компаундов холодного отверждения, в которых

минимизировались величины коэффициентов трения при страгивании и движении, интенсивности изнашивания, амплитуды релаксационных колебаний.

Одновременно с этим велся отбор по технологическому фактору, который распадался на две задачи:

- влияние технологии изготовления пастообразных компаундов на фрикционные свойства и износостойкость твердых смазочных покрытий;
- влияние качественного и количественного состава пастообразного компаунда на технологичность его изготовления и нанесения на изделие.

Разработанные пастообразные компаунды наряду с хорошими фрикционными свойствами обладают хорошими технологическими качествами:

- они просты в изготовлении;
- снижают трудоемкость подготовки поверхности детали под покрытие;
- уменьшают число финишных операций при окончательной доводке поверхности покрытия;
- не требуют дополнительного оборудования для нанесения твердого смазочного материала и его последующей обработки;
- разработанные компаунды являются материалами холодного отверждения и не нуждаются в термическом оборудовании и обработке.

Из пастообразных компаундов можно изготовить антифрикционные самосмазывающиеся покрытия толщиной 0,4-6мм и площадью до 2 м² и более на плоских и криволинейных поверхностях, монолитные детали с размерами меньше Ø 60x60. Разработанные материалы могут быть использованы в ремонтных работах при восстановлении крупногабаритных изделий и изделий сложной формы.

Задача создания пастообразных композиционных материалов холодного отверждения для узлов трения машин и механизмов общего назначения распределяются на три самостоятельных раздела:

- выбор оптимального связующего для композиционного материала;
- создание антифрикционного многокомпонентного наполнителя, придающего антискачковые свойства композиционному материалу;
- создание технологии нанесения на изношенные детали оборудования.

Природа полимера, его химический состав и структура определяют весь комплекс физико-химических и механических свойств полимерного антифрикционного покрытия.

В отделе полимерных композиционных материалов проводились работы по созданию и исследованию антифрикционных составов холодного отверждения на основе эпоксидной

смолы ЭД - 20 с фторопластовым лаком и тонкодисперсными наполнителями, а также исследовалась технология восстановления изношенных направляющих станин и кареток металлообрабатывающего оборудования методом заливки под давлением или вакуумом.

В настоящее время наблюдается тенденция к замене материалов с высоким содержанием органических растворителей жидкими композициями и обусловлено это как стремлением к улучшению условий труда, так и требованиями по охране окружающей среды.

Решение такой проблемы возможно с использованием эпоксидных смол и созданием жидких композиций, в которых в качестве разбавителей используют активные соединения, участвующие в образовании пространственной сетки, такие как ТЭГ-1 и фторопластовый лак.

Подтверждена возможность использования в качестве связующего для антифрикционных материалов эпоксидной смолы марки ЭД-20. Метод ИК - спектроскопии применен как метод анализа при разработке полимерного связующего и как метод контроля при выборе оптимального режима полимеризации, окончательного процесса отверждения новых составов антифрикционных композиций.

Эпоксидные смолы обладают способностью совмещаться с продуктами на основе фторопластов Ф-32, Ф-26 введенных в них в качестве низковязких лаков, например, марки ФПР, а также с другими низковязкими эпоксидными смолами, такими как ТЭГ-1. При смешении скорость отверждения ниже, чем для чистых эпоксидных смол при равных количествах введенного отвердителя.

Новый положительный эффект увеличения термостабильности и как следствие из этого увеличение износостойкости, ресурса работы антифрикционной пасты (высоковязкой жидкости) достигается за счет введения в эпоксидную смолу фторопластового лака, что подтверждено комплексом исследований.

Таблица 1

Время, сутки	Предел прочности при сжатии МПа при 80°С в течении времени	
	ЭД-20 + ПЭПА	ЭД-20 + ФПР+ТЭГ-1 + ПЭПА
исх.	120	126
30	115	121
60	83	103
90	52	79
120	43,5	53

Трибологические показатели композиций, в которых в качестве связующего использовались эпоксидные, эпоксидно-фенольные и эпоксидно-фторопластовые смолы, разбавители ТЭГ-1 и ДТГИ, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Влияние типа связующего на фрикционные свойства композиционного материала. Машина трения И-47-К-54, $P = 2 \times 10^5$ Па.

№ п/п	Состав связующего смолы	Соотношение смол соответственно	Коэффициент трения		Амплитуда колебаний
			n=1 об/мин	n=50 об/мин	A, коэфф. трения для n=1 об/мин
1	Э-40 + фенольн.	1:1	0,961	0,85	38,5
2	ЭД-20 + фенольн.	0,5:1	0,563	0,7	36
3	ЭД-20 + фенольн.	1:1	0,933	1,02	27
4	Э-40 + фенольн.	0,5:1	0,817	0,912	38
5	Э-40 + ДТГИ	1:1	0,685	0,73	48,3
6	Э-40	–	0,708	0,662	41
7	ЭД-20		0,56		53
8	ЭД-20+ФПР	3:1	0,575	0,763	39
9	ЭД-20+ФПР	3:0,5	0,569	0,758	42
10	ЭД-20+ФПР+ТЭГ-1	3:1:1	0,552	0,68	38

В указанных режимах испытания лучшие трибологические показатели у материала, в котором связующее представляет смесь эпоксидной смолы, фторопластового лака и ТЭГ-1, взятых в соотношении 3:1:1. В дальнейшем разработка пастообразных композиционных материалов холодного отверждения проводилась с использованием эпоксидно-фторопластового связующего.

Методом ИК - спектроскопии проведены исследования органосуспензии полиэтиленполиамин и алюмосиликата с целью выявления активного взаимодействия между частицами наполнителя и ПЭПА. ИК - спектры регистрировались на спектрофотометре Specorol – 75 IR в диапазоне волновых чисел $400-4000 \text{ см}^{-1}$. Условия регистрации спектра (ширина щели монохроматора, уровень усиления, скорость сканирования, время пробега пера самописца) подбирали таким образом, чтобы была обеспечена правильная запись контура полос поглощения.

Предварительные ИК - измерения показали, что основные изменения происходят в ИК - спектре в диапазоне частот 2000-500 см^{-1} , полоса 1600 см^{-1} в области деформационных колебаний сдвигается до 1580 см^{-1} , что указывает на образование водородной связи между компонентами по схеме $-\text{Si}-\text{OH}\dots\text{N}-\text{H}$, а также область (3300-2400 см^{-1}) - сильно размытое плечо валентных колебаний группой OH указывает на образование водородных связей.

Ослабление интенсивности полос эпоксидцикла в присутствии суспензии позволяет сделать заключение о сравнительно более эффективном отверждении эпоксидной смолы модифицированным отвердителем.


Знание механизма отверждения является основой для рационального выбора отверждающей системы и создания принципов регулирования структуры образующейся трехмерной сетки.

Процесс отверждения связующих на основе эпоксидных смол исследовали методом ИКС. На рис.1. приведены ИК - спектры эпоксидно-фенольного связующего, эпоксидной смолы Э-40, разбавленной ацетоном (2 спектра), отличающиеся сроками хранения.

Приведены основные полосы поглощения, важные в аналитическом отклонении:

3520 - ν колебания OH - групп

830, 920, 1180, 1250 см^{-1} - колебания $\text{CH} - \text{CH}_2$

1460 - δ колебания CH_2 -групп 

3330, 1370, 1220 см^{-1} - колебания фенольных OH - групп

2930, 2850, 1460 см^{-1} - колебания CH_2 -групп

1610, 1510 см^{-1} - колебания фенольного кольца

Изучение механизма отверждения эпоксидных связующих возможно на основании информации ИК - спектров поглощения по интенсивности полос. Количественная обработка ИК - спектров приведена в табл.3; 4.

Произошли изменения оптических плотностей полос при 910, 1130, 1230 и 1600 см^{-1} , принадлежащих эпоксидным и фенольным группам. Рост интенсивности полос поглощения 3400, 1110 см^{-1} свидетельствует о повышении содержания OH - групп и групп простого эфира в системе. Смещение максимума полос 3500 на 110 см^{-1} в области низких волновых чисел иллюстрирует ассоциацию вновь образующихся OH - групп через водородную связь.

Эпоксидно-фенольные составы отличаются высокими скоростями отверждения, что хорошо видно по данным таблиц. 3 и 4. Высокие скорости отверждения значительно ухудшают технологические параметры композиций, что в свою очередь, сказывается на качестве восстановления направляющих.

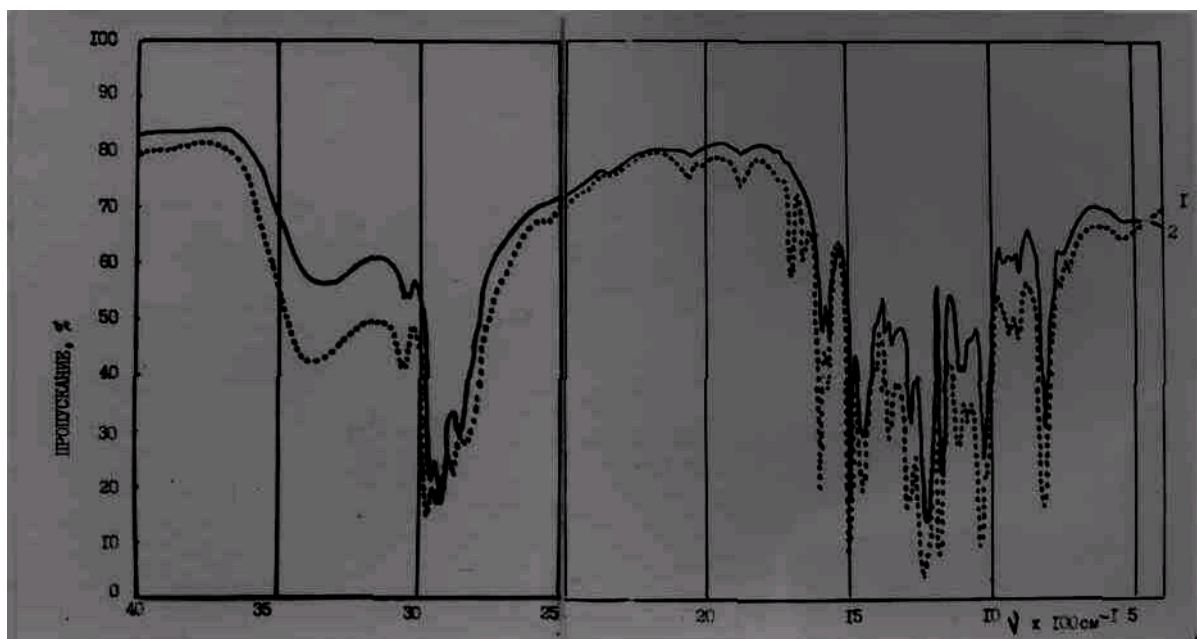


Рис. 1. ИК - спектры связующего: 1 - эпоксиодно-фенольное связующее с ПЭПА; 2 - смола Э-40 с ацетатом и ПЭПА.

Зависимость отношения оптических плотностей полос поглощения в ИК - спектрах от времени отверждения эпоксиодно-фенольного связующего (табл. 3) и эпоксиодной смолы Э-40 с ацетоном (табл. 4).

Таблица 3

Время отвержде	Отношение оптических плотностей $D_{cm^{-1}} / D_{1600cm^{-1}}$				
	820	910	1110	1350	3300
2	1,23	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$
24	1.0	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$6,8 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-1}$
96	1.0	$2,7 \cdot 10^{-1}$			

Таблица 4

Время отвержде ния, час	Отношение оптических плотностей $D_{cm^{-1}} / D_{1600cm^{-1}}$						
	820	910	1110	1370	1650	1700	3300
2	1.24	$4,1 \cdot 10^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	--
24	1,12	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$6,4 \cdot 10^{-1}$	$6,5 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	--
96	1,06	$2,7 \cdot 10^{-1}$			$1,7 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	--

* - полоса, выбранная в качестве внутреннего стандарта.

В ИК - спектрах разбавленной ацетоном смолы Э40 полосы поглощения С-0 групп 1650 и 1701 см⁻¹ в ходе отверждения меняют свою интенсивность, но не исчезают и после 96 часов отверждения. Таким образом, в отверждённой композиции это приведет к образованию дефектов, пор и другим несплошностям. Ранее установлено изменение физико-механических свойств отвержденных эпоксидных смол с ацетоном: (растворителем) происходит увеличение модуля упругости (E), который непосредственно влияет на механические свойства и триботехнические характеристики.

В результате проведенного исследования предложено для антифрикционных пастообразных составов эпоксидно-фторопластовое и эпоксидно-фенольное связующие, не содержащие растворитель.

В таблице 5 приведены сравнительные данные фрикционных испытаний пастообразных композиционных материалов холодного отверждения, разработанные ранее в НИАТ и ИМАШ (вариант А и Б), и вновь созданного на основе эпоксидно-фторопластового связующего в отделе ПКМ (ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют») при P = 2кгс/см и скорости скольжения 0,06 м/с.

Таблица 5.

Фрикционные показатели	Наспан-1	Иаспан-2	ЭФС вариант А	ЭФС вариант Б	«САЛЮТ АФЗ»
Коэффициент сухого трения	0,25	0,28	0,185	0,18	0,17
Линейный износ	10*10 ⁻⁹	2,8*10 ⁻⁹	1,0*10 ⁻⁹	1,0*10 ⁻⁹	0,9*10 ⁻⁹

Данные испытания дают основания утверждать, что увеличение износостойкости, ресурса работы достигается за счет введения в антифрикционную пасту на основе эпоксидной смолы и MoS₂ дополнительно фенольную смолу, а для наилучших триботехнических характеристики достигаются при введении в эпоксидную смолу фторопластового лака (ФПР) и триэтиленгликоля (ТЭГ-1).

Материал Салют АФЗ наиболее целесообразно применять для узлов трения с малой скоростью перемещения. Области применения:

- направляющие суппортов,
- направляющие станин,
- направляющие прессов,
- направляющие разных поверхностей,

- изготовление втулок зубчатых колес и других деталей. Наряду с применением скользящего покрытия «Салют АФЗ» в процессе выпуска новых станков данный состав можно использовать при ремонте станков, что приводит к значительной экономии металла.

При нанесении покрытий «Салют АФЗ» отпадают высокие требования, предъявляемые к структуре основного рабочего материала. Материал «Салют АФЗ» химически устойчив к воде, слабым щелочам и кислотам, синтетическим маслам, охлаждающим эмульсиям, нефти и спирту.

Используемый в работе стенд на базе станка ФП-7 позволяет при применении указанных выше измерительных приборов по заданным и измеренным параметрам оценить:

1. Удельное номинальное давление подвижного стола на неподвижные направляющие: $D_n = P_n / S$ (МПа), где P_n - вес стола с дополнительными грузами, S - площадь направляющих стола (площадь опоры).

2. Коэффициент трения покоя и скольжения: $f = F_{тр} / P_n$, где $F_{тр}$ - сила трения, усилие, необходимое для страгивания стола и его давления, P_n - вес стола с дополнительными грузами.

За счет изменения давления масла в гидросистеме и при применении дросселя скорость движения стола (скорость скольжения) изменялась в пределах от 1 мм/мин до 1000 мм/мин.

При изменении давления и скорости, коэффициент трения меняется от 0,114 до 0,123.

В дальнейшем, опробование и внедрение самосмазывающихся материалов «Салют АФЗ» проводилось на ряде металлообрабатывающего оборудования в цехах предприятия (ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»).

Для выпуска опытных партий новых литьевых композиций и дальнейших разработок антифрикционных самосмазывающихся тиксотропных паст на полимерной основе в ОПКМ создан участок полимерных компаундов, занимающийся ремонтом технологического оборудования с применением ПКМ (ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»).

По результатам НИР установлено:

- материал «Салют АФЗ» не уступает по эксплуатационным и технологическим характеристикам иностранным и отечественным материалам класса транкилитов, а по многим параметрам и превосходит их;

- «Салют АФЗ» можно использовать в различных узлах трения, где постоянная эксплуатационная температура не превышает 130 °С;

- в ходе экспериментов разработаны схемы нанесения антифрикционного материала на изношенные направляющие;

- «Салют АФЗ» можно применять не только в качестве ремонтного материала, но и устанавливать в узлы трения нового оборудования, с целью увеличения срока службы, может быть легко приготовлен в производственных условиях;

узлы оборудования, восстановленные материалом «Салют АФЗ» успешно эксплуатируются на станках предприятия. Нареканий и изменения физико - механических характеристик нет;

- при выходе из строя отремонтированного оборудования, материал «Салют АФЗ» не был причиной отказа, т. е. материал может сохранять свои свойства без изменений на несколько межремонтных пробегов оборудования.

Библиографический список

1. Руководство по применению самосмазывающихся материалов «Бельзона», М, 1999 г.
2. Отчёт по триботехническим материалам промышленного назначения, М.,НИАТ, 1990 г.
3. Руководство по применению твёрдых смазок Честер Молекуляр, М., 2003 г.
4. Смирнов М. М., Малюгин А. С., Шевченко А. А., Бухаров С. В., Статья «Ремонтные материалы на основе ПКМ» журнал «Коррозия металлов и сплавов», стр. 31-35, М., машиностроение, 2004 г.
5. Заявка на патент РФ «Способ защиты оборудования ПКМ», Смирнов М. М., Малюгин А. С., 2003 г.
6. Заявка на патент РФ «Материал для защиты оборудования», Смирнов М. М., Малюгин А. С., 2003 г.
7. Энциклопедия полимеров, т. 1-3, Химия, М., 1972 г.
8. Химическая энциклопедия, т. 1-5, Химия, НИБРЭ, М., 1998 г.
9. Свойства композиционных материалов, справочное пособие, Казань, 2000

г.Сведения об авторе

Смирнов Михаил Михайлович, заместитель начальника отдела полимерных композиционных материалов (ОПКМ(114)) федерального государственного унитарного предприятия «научно-производственный центр газотурбостроения «Салют» (ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»), тел.:/факс 8 (499) 785-88-08

Малюгин Алексей Сергеевич, начальник отдела полимерных композиционных материалов (ОПКМ(114)) федерального государственного унитарного предприятия «научно-производственный центр газотурбостроения «Салют» (ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»), тел./факс 8 (499) 785-88-08