

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ПРИСУТСТВИИ ПЛАСТИЧНОЙ СМАЗКИ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

**П.А. Витязь**

*Президиум НАН Беларуси, Минск;*

**В.И. Жорник, В.А. Кукареко, Я.С. Сачивко**

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», Минск*

**Введение.** Современные тенденции в развитии техники требуют создания материалов, обладающих качественно новыми свойствами. Это стимулировало в последние годы интенсивные исследования в новом научном направлении, связанном с получением, изучением свойств и применением разнообразных ультрадисперсных материалов (наноматериалов), позволяющих благодаря увеличенной поверхностной энергии и размерным эффектам получать консолидированные композиции с уникальными теплофизическими, физико-механическими, триботехническими и другими свойствами [1, 2]. В технологиях получения наноструктурных материалов все более заметную роль играют кластеры углерода, в частности, ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза (УДА) или ультрадисперсная алмазографитовая шихта (УДАГ). Одним из наиболее эффективных направлений использования УДАГ являются антифрикционные и противозносные смазочные композиции [3].

Антифрикционные полимерные композиты (АПК) представляют собой обширную группу современных материалов, находящих все более широкое применение в различных отраслях машиностроения. Способность ряда полимерных матриц к самосмазыванию, а, главное, хорошие антифрикционные свойства многих армирующих наполнителей в совокупности с твердыми смазками позволили разработать полимерные композиты антифрикционного назначения, успешно сочетающие высокие прочностные свойства и триботехнические характеристики, что обеспечило их работоспособность при повышенных (30 – 40 МПа) удельных нагрузках [4 – 6].

Оценка триботехнических характеристик полимерных материалов с целью поиска оптимального варианта для использования в высоконагруженных узлах трения в среде смазок различного состава, в том числе модифицированных твердыми наноразмерными компонентами, является задачей данной работы.

**Методы исследования.** Испытывались образцы трехслойного металлопластмассового композита (МПК) типа DX1 и FR.EX (фирма Clacier Garlock Bearings, Словакия), полимерного композита (ПК) «Оксафен» (ООО «НИЦ «Вискоза», Россия), полимерного композита на основе фенольной смолы с добавками синтетических волокон и графита типа ИММС-А, разработанного в Институте механики металлополимерных систем НАН Беларуси, и полимерного композита на основе эпоксидной смолы с добавками синтетических волокон и наноразмерных частиц типа ИОНХ-1, разработанного в Институте общей и неорганической химии НАН Беларуси. Испытания проводились на машине трения МТВП по схеме возвратно-поступательного перемещения образца относительно контртела при значениях номинальной удельной нагрузки 25, 50 и 75 МПа. Максимальная скорость возвратно-поступательного перемещения составляла  $\cong 0,2$  м/с. В качестве контртела использовались пластины из термообработанной стали 40XH (52 – 54 HRC). Шероховатость поверхности  $Ra$  0,32. В качестве смазочных материалов использовались литиевая смазка Литол-24 стандартного состава и комплексная литиевая смазка ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок, включая УДА1.

**Результаты и обсуждение.** На рис. 1 приведены изображения поперечного сечения и поверхности металлопластмассового композита DX1 перед испытанием и на одном из его этапов.

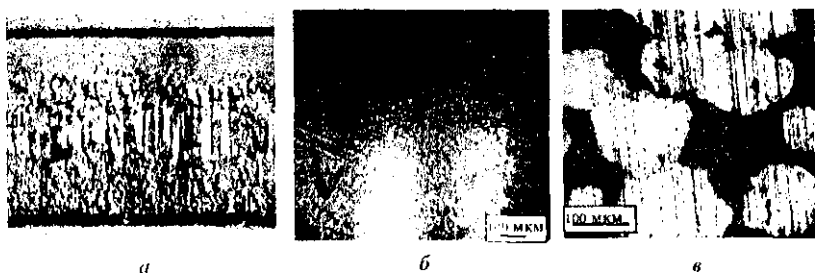


Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения металлопластмассового композита DX1 (а) и поверхности трения в исходном состоянии (б) и после пути трения 2200 м (в)

Коэффициент трения на стадии приработки металлопластмассовых композитов DX1 и FR.EX составляет  $f = 0,08...0,09$ , на стадии установившегося изнашивания коэффициент трения уменьшается до уровня  $f = 0,06...0,07$ . По мере уменьшения толщины полимерного слоя (путь трения 1000...5000 м) на поверхности трения выступают частицы бронзы. После пути трения  $\cong 5000$  м для МПК DX1 и  $\cong 6000$  м для МПК FR.EX на по-

верхность трения выходит бронзовая подложка, в которой присутствуют вкрапления полимера (рис. 2).

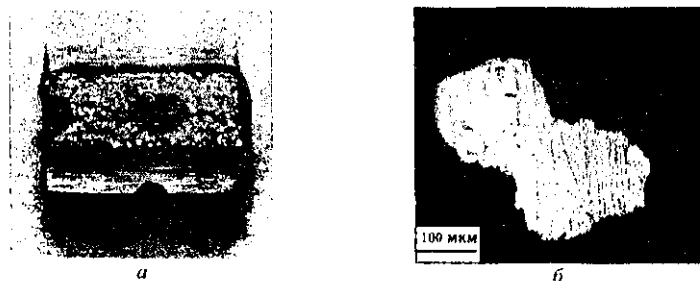


Рис. 2. Изображение поверхности трения (а) и микроструктура (б) образца МПК DX1 после пути трения 6300 м при удельной нагрузке 75 МПа

Коэффициент трения при этом сохраняется на уровне  $f = 0,07$ . Микротвердость бронзовой подложки на поверхности трения МПК DX1 составляет  $H_{0,08} = 2200$  МПа, а на поверхности трения МПК FR.EX –  $H_{0,08} = 2150$  МПа. Коэффициент трения полимерных композитов Оксафен, ИММС-А и ИОНХ-1 находится примерно на одном уровне и составляет  $f = 0,07...0,08$ . Твердость по Виккерсу для композита «Оксафен» равна  $HV_{10} = 260$  МПа, для композита ИММС-А –  $HV_{10} = 290$  МПа, а для композита ИОНХ-1 –  $HV_{10} = 480$  МПа.

На рис. 3 представлены данные по линейному износу образцов металлопластмассовых композитов DX1 и FR.EX, а также полимерных композитов «Оксафен», ИММС-А и ИОНХ-1 при испытаниях со смазками Литол-24 и ИТМОЛ-150Н+УДАГ при удельных нагрузках 25, 50 и 75 МПа.

Наиболее ярко эффект от замены смазочного материала проявился для образцов МПК FR.EX, для которых при использовании стандартной смазки Литол-24 зафиксировано сравнительно быстрое разрушение полимерного слоя, особенно при удельной нагрузке 50 и 75 МПа. Применение смазки ИТМОЛ-150Н+УДАГ позволило существенно замедлить этот процесс (в 1,45 – 2,42 раза), что подтверждается приведенными на рис. 3 изображениями рабочих поверхностей испытываемых образцов.

Как видно из рис. 4, остатки полимерного слоя присутствуют на образце FR.EX после пути трения 6200 м с использованием смазки ИТМОЛ-150Н, тогда как у образца FR.EX, испытывавшегося со смазкой Литол-24, полимерный слой полностью отсутствует уже после пути трения 3000 м (испытания проводились при удельной нагрузке 50 МПа).

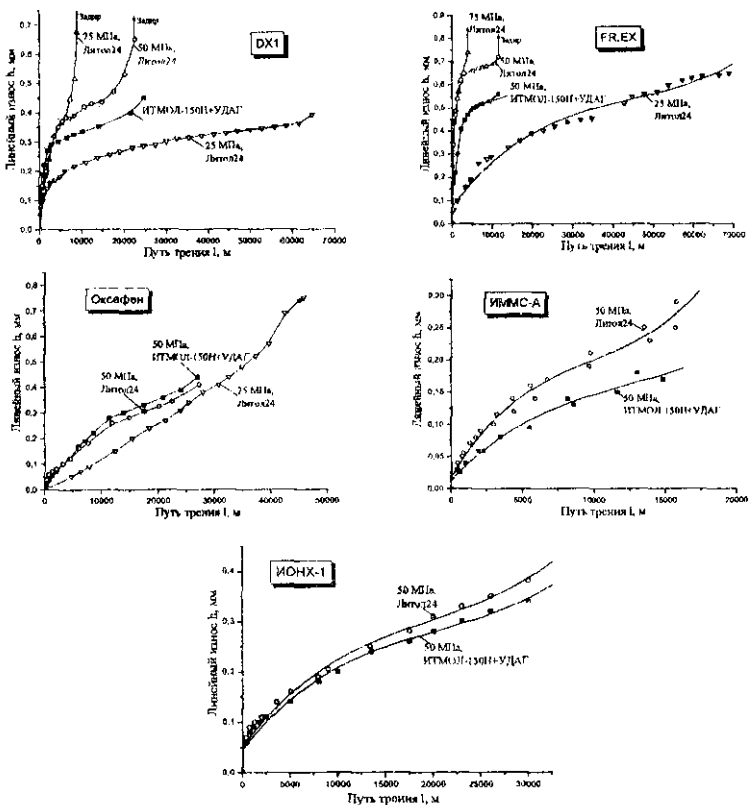


Рис. 3. Зависимость величины линейного износа образцов полимерных композитов от пути трения при различных нагрузках в присутствии смазок Литол-24 и ИТМОЛ-150Н+УДАГ

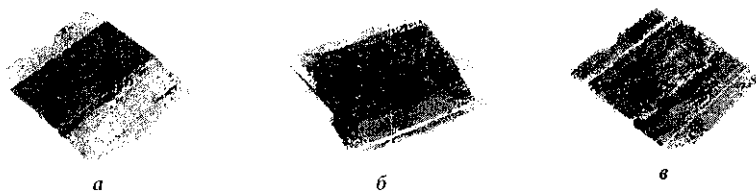


Рис. 4. Внешний вид поверхности трения образца FR.EX после пути трения 3000 м в смазке Литол-24 (а), после пути трения 3000 (б) и 6200 м (в) в смазке ИТМОЛ-150Н+УДАГ (давление 50 МПа)

Аналогичный эффект снижения интенсивности изнашивания наблюдается и при испытаниях в среде ИТМОЛ-150Н образца МПК DX1, хотя и в несколько меньшей степени (в 1,41 – 2,03 раза) (см. рис. 3). Последнее можно объяснить, по-видимому, тем, что металлопластмассовый композит DX1 обладает изначально более высокой твердостью и износостойкостью по сравнению с композитом типа FR.EX, отчего влияние перечисленных выше факторов несколько меньше. Внешний вид образцов металлопластмассового композита типа DX1, испытанных в среде смазок Литол-24 и ИТМОЛ-150Н+УДАГ, после примерно 6500 м пути показан на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид поверхности трения образца МПК DX1 после пути трения 6500 м в смазке Литол-24 (а) и смазке ИТМОЛ-150Н+УДАГ (б)

Наиболее высокие характеристики износостойкости при испытаниях с удельной нагрузкой 50 МПа показали образцы полимерных композитов «Оксафен», ИММС-А и ИОНХ-1. Стадия приработки этих материалов сравнительно невелика, и процесс фрикционного взаимодействия вступает в линейную стадию установившегося трения уже после пути  $l \approx 500 - 1000$  м. Величина интенсивности изнашивания на этой стадии трения составляет  $I_k = (0,9...1,1) \cdot 10^{-8}$ , что несколько превышает соответствующие значения интенсивности изнашивания для металлопластмассовых композитов. Однако процесс трения трибопар «ПК «Оксафен» – сталь 40Х», «ПК ИММС-А – сталь 40Х» «ПК ИОНХ-1 – сталь 40Х» не вступает в стадию адгезионного взаимодействия вследствие отсутствия контактирующих металлических поверхностей и замедленной деградации смазочного материала. В связи с этим ресурс работоспособности полимерных композитов «Оксафен», ИММС-А и ИОНХ-1 существенно превышает ресурс металлопластмассовых лент FR.EX и DX1.

Из приведенных на рис. 3 данных видно, что наиболее низкие значения накопленного весового износа регистрируются для полимерных композитов «Оксафен», ИОНХ-1 и ИММС-А. Например, при удельной нагрузке 50 МПа в смазке Литол-24 средняя интенсивность изнашивания для материалов «Оксафен», ИОНХ-1 и ИММС-А составляет соответственно  $I_h = 1,42 \cdot 10^{-8}$ ;  $I_h = 1,36 \cdot 10^{-8}$  и  $I_h = 1,60 \cdot 10^{-8}$ .

На рис. 6 приведено изображение поверхности трения образцов полимерных композитов после триботехнических испытаний в среде смазки Литол-24. Можно видеть, что образцы композитов, продемонстрировавших высокую износостойкость, имеют гладкую поверхность без расслаивания и сколов.

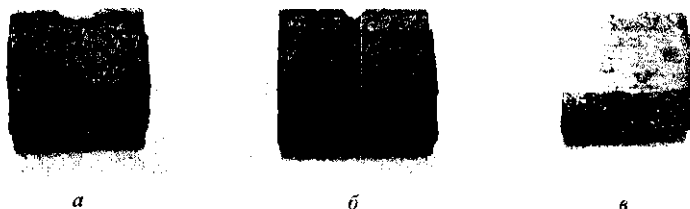


Рис. 6. Изображение поверхности трения образцов полимерных композитов «Оксафен» (а), ИММС-А (б), ИОНХ-1 (в) после триботехнических испытаний в среде смазки ИТМОЛ 15011 (давление 50 МПа)

Приведенные данные по величине износа поверхности металлопластмассовых композитов показывают, что использование смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными твердыми частицами различной природы, в диапазоне нагрузок 25 – 50 МПа снижает интенсивность изнашивания испытываемого материала, причем эффективность действия этих добавок увеличивается по мере повышения удельной нагрузки в зоне трибоконтакта. При нагрузке 75 МПа положительный эффект от применения модифицированной смазки проявляется даже в случае использования ее только на начальной стадии испытаний, по сути, на стадии приработки.

Повышение износостойкости металлопластмассовых композитов при использовании смазочного материала с ультрадисперсными твердыми добавками можно объяснить совместным действием ряда факторов, способствующих повышению трибологических свойств самого смазочного материала и изменяющих структуру поверхности трения за счет эффектов дисперсного упрочнения и трибомеханического модифицирования. Включенные в состав дисперсной фазы смазочного материала наноразмерные частицы повышают коллоидную стабильность смазочного материала, увеличивают маслоудерживающую способность структурного каркаса смазки, придают смазочному материалу противозадирные свойства, что в совокупности приводит к повышению стабильности и несущей способности смазочного слоя. Обеспечение регулярного смазочного режима в зоне трибоконтакта способствует снижению термической нагруженности металлополимерного композита в зоне трения и повышению его структурной устойчивости. Имеющиеся в составе смазочного материала твердые наноразмерные частицы форми-

руют в металлической поверхности износостойкую ячеистую структуру за счет процессов интенсивного пластического деформирования и обеспечивают дисперсное упрочнение контактирующих поверхностей за счет их шаржирования в процессе трения [3].

Снижение интенсивности изнашивания полимерных композитов ИММС-А и ИОНХ-1 может объясняться фактором повышения нагрузочной способности смазки с наноразмерными компонентами. В случае перехода от смазки Литол-24 к модифицированной смазке ИТМОЛ-150Н+УДАГ для ПК «Оксафен» отмечено снижение износостойкости, что, вероятно, обусловлено особенностями структуры его связующего и требует более детального изучения.

Прогнозная оценка ресурса пар трения с различным сочетанием материалов применительно к вкладышу шаровой опоры цилиндра подвески карьерного самосвала БелАЗ может быть проведена в сравнении с базовым вариантом пары трения по значениям средней интенсивности изнашивания в процессе испытаний (табл.).

Таблица

**Прогнозный ресурс различных пар трения по результатам испытаний**

Материал образца	Смазочный материал	Удельная нагрузка, МПа	Средняя интенсивность изнашивания, мкм/км	Допустимая величина износа, мм	Прогнозный ресурс, км	
МПК «DX1»	Литол-24	25	5,9	0,4	67,8	
		50	26,2		15,3	
	ИТМОЛ-150Н	25	2,9		137,9	
		50	18,5		21,6	
МПК «FR.EX»	Литол-24	25	9,3		1,0	43,0
		50	65,2			6,1
	ИТМОЛ-150Н	25	3,84			104,1
		50	44,9			8,9
ПК «Оксафен»	Литол-24	25	3,4	1,0		294,1
		50	14,2			70,4
	ИТМОЛ-150Н	25	3,7			108,1
		50	16,2			61,7
ПК «ИММС-А»	Литол-24	50	16,0		62,5	
	ИТМОЛ-150Н	50	10,6		94,3	
ПК «ИОНХ-1»	Литол-24	50	13,6		73,5	
	ИТМОЛ-150Н	50	10,4		96,1	

В качестве базового варианта взята пара трения «МПК DX1 – сталь 40ХН», для сравнения выбраны результаты триботехнических испытаний при удельных нагрузках 25 и 50 МПа.

Анализ приведенных данных показывает, что три варианта состава полимерных композитов имеют примерно одинаковые характеристики по интенсивности изнашивания и прогнозируемому ресурсу узла трения. В частности, при трении с удельной нагрузкой 50 МПа в среде смазки Литол-24 средняя интенсивность изнашивания для материалов «Оксафен», ИОНХ-1 и ИММС-А составляет соответственно  $I_h = 1,42 \cdot 10^{-8}$ ,  $I_h = 1,36 \cdot 10^{-8}$  и  $I_h = 1,60 \cdot 10^{-8}$ , что обеспечивает прогнозный ресурс трибосопряжения для ПК «Оксафен», равный 70,4 км пути трения, для композита ИОНХ-1 – 73,5 км и для композита ИММС-А – 62,5 км при полученном показателе ресурса для металлопластмассовой ленты ДХ-1, равном 15,3 км. При этом использование смазки с наноразмерными твердыми добавками обеспечивает снижение интенсивности изнашивания металлопластмассовых лент в 1,4 – 2,4 раза, а полимерных композитов ИММС-А и ИОНХ-1 в 1,2 – 1,5 раза, что обусловлено повышением несущей способности смазочного слоя модифицированной смазки, а также эффектом упрочнения металлической компоненты в металлопластмассовых композитах. С учетом увеличения величины допустимого линейного износа с 0,4 до 1,0 мм при переходе от трехслойных металлопластмассовых композитов к полимерным композитам и более низкой интенсивностью изнашивания последних прогнозный ресурс вкладыша шаровой опоры цилиндра подвески карьерного самосвала БелАЗ при использовании исследованных полимерных композитов может быть увеличен в 5,9 – 6,2 раза.

**Выводы.** Результаты проведенных исследований триботехнических свойств полимерных композиционных материалов свидетельствуют о том, что три варианта состава полимерных композитов («Оксафен», ИОНХ-1 и ИММС-А) имеют примерно одинаковые характеристики по интенсивности изнашивания и прогнозируемому ресурсу узла трения. В частности, при трении с удельной нагрузкой 50 МПа в среде смазки Литол-24 средняя интенсивность изнашивания для материалов «Оксафен», ИОНХ-1 и ИММС-А составляет соответственно  $I_h = 1,42 \cdot 10^{-8}$ ,  $1,36 \cdot 10^{-8}$  и  $1,60 \cdot 10^{-8}$ , что обеспечивает прогнозный ресурс трибосопряжения для «Оксафена», равный 70,4 км пути трения, для композита ИОНХ-1 – 73,5 км и для композита ИММС-А – 62,5 км при показателе ресурса для металлопластмассового композита ДХ-1, равном 15,3 км. При этом использование смазки с наноразмерными твердыми добавками обеспечивает снижение интенсивности изнашивания металлопластмассовых композитов в 1,4 – 2,4 раза, а полимерных композитов ИММС-А и ИОНХ-1 в 1,2 – 1,5 раза, что обусловлено повышением несущей способности смазочного слоя модифицированной смазки, а также



эффектом упрочнения металлической компоненты в металлопластмассовых композитах.

Применение полимерных композитов ИММС-А и ИОНХ-1 для изготовления вкладыша шаровой опоры цилиндра подвески карьерного самосвала БелАЗ взамен МПК ДХ-1 в сочетании с использованием пластичной смазки с наноразмерными добавками позволит увеличить ресурс узла в 5,9 – 6,2 раза.

#### Литература

1. Витязь, П.А. Наноструктурные материалы и перспективы их применения // Наноструктурные материалы – 2004: Беларусь – Россия: Мат. III Междунар. семинара. Минск 12 – 14 октября 2004 г. / П.А. Витязь. – Минск: ИТМО, 2004. – С. 7 – 10.
2. Наноматериалы и нанотехнологии для машиностроения (обзор) / В.А. Струк [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2002. – Т. 7. – № 3. – С. 53 – 65.
3. Применение наноразмерных алмазодрафитовых присадок для повышения триботехнических свойств элементов пар трения / П.А. Витязь [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 10. – С. 19 – 22.
4. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс / под ред. Г.В. Сагалаева, Н.Л. Шембель. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 64 с.
5. Цеев, Н.А. Материалы для узлов сухого трения, работающих в вакууме: справ. / Н.А. Цеев, В.В. Козелькин, А.А. Гурьев. – М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.
6. Полимерные материалы для подшипников скольжения, смазываемых водой (обзор) / Б.М. Гинзбург [и др.] // ЖИХ. – 2006. – Т. 79. – № 5. – С. 705 – 716.

УДК 621.762:71

### ВЛИЯНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВА Fe-Al

**А.В. Белый**

*ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», Минск;*

**В.А. Кукареко**

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», Минск;*

**Н.Н. Попок**

*УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк;*

**К.Й. Чой**

*ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», Могилев*

**Введение.** Интерметаллиды системы Fe-Al являются перспективным триботехническим материалом для узлов трения, работающих в экстремальных условиях высоких контактных давлений и агрессивных сред. Вместе с тем в исходном состоянии сплав FeAl наряду с хорошей коррозионной стойкостью и жаростойкостью не обладает требуемыми прочност-