

УДК 534.014:539.4:621.9

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ СКОЛЬЖЕНИИ****П.Н. БОГДАНОВИЧ, А.А. БАЙДАК, Е.И. КУЗЬМЕНКОВА, А.А. КРИВЕНКОВ**  
(Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель)

*Представлены результаты экспериментальных исследований явления предварительного смещения в парах трения металл – полимер. Обсуждаются закономерности влияния механических и триботехнических свойств полимерного материала на условия перехода от статического к динамическому фрикционному контакту. Рассмотрены материаловедческие методы снижения предварительного смещения и его последствий при создании композитов для восстановления изношенных деталей узлов трения, работающих в режиме предварительного смещения.*

**Введение.** Материалы для восстановления изношенных направляющих станин станков, тормозных цилиндров и других деталей узлов трения, работающих при реверсивном скольжении, должны обладать не только низким коэффициентом трения и высоким сопротивлением изнашиванию. Одно из основных требований – снижение эффекта предварительного смещения, являющегося причиной неравномерного распределения износа вдоль пути трения, возникновения автоколебаний и, как следствие, снижения эксплуатационных характеристик восстановленной детали и трибосистемы в целом [1, 2]. Отсюда очевидно, что при создании новых материалов для восстановления изношенных деталей, необходимо изучение закономерностей проявления предварительного смещения при их фрикционном нагружении.

Явление предварительного смещения достаточно полно исследовано при трении пар металл – металл [3, 4]. В частности, установлены закономерности влияния нагрузочно-скоростных параметров, шероховатости и направления следов обработки поверхностей трения на величину предварительного смещения ( $\delta$ ), определены положение и размеры зон сцепления и проскальзывания на контакте при различных режимах нагружения. Применительно к полимерным и металлополимерным парам трения этот вопрос менее изучен [5 – 7]. В связи с тем, что при восстановлении деталей узлов трения широко применяются полимеры и композиты на их основе, обладающие ярко выраженными реологическими свойствами, важно изучить влияние их свойств на трение и изнашивание в условиях перехода от статического к динамическому контакту.

**Цель исследований** – выявить закономерности предварительного смещения в контакте полимерный композит – сталь и рассмотреть возможности управления этим явлением.

**Методика эксперимента.** Для восстановления изношенных деталей широко применяются композиты на основе термореактивных смол. Поэтому исследования проводились на образцах из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, а также из композитов на ее основе, содержащих фурфуролацетоновый мономер (ФАМ), олигомерстиролсодержащую полиэфирную смолу (ПН-1), органический модификатор и отвердитель полиэтиленполиамин. Для улучшения антифрикционных характеристик в состав композиции вводились графит, комплексная добавка, содержащая соли непредельных жирных кислот, порошкообразный полиэтилен и фторопласт. В качестве контртела был выбран цилиндр диаметром  $D = 24,5$  мм и высотой  $h = 32$  мм, выполненный из стали ШХ-15 или чугуна СЧ-12. Испытания несмазанных поверхностей проводились на машине трения, реализующей возвратно-поступательное движение цилиндра со скоростью  $0,001 \dots 1$  мм/с. Деформации, предварительное смещение и коэффициент трения измерялись тензометрическим способом.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Предварительное смещение и разница между величинами статического и динамического коэффициентов трения в значительной степени определяются механическими свойствами полимерного материала. Для выявления этих закономерностей были выполнены исследования на образцах из эпоксидного полимера, механические свойства которого изменялись содержанием пластификатора – дибутилфталата, отвердителя и режимами отверждения.

Установлено, что с повышением упругости контакта условию перехода от статического к динамическому фрикционному контакту соответствует меньшее предварительное смещение (рис. 1). Причем зависимость  $\delta$  от модуля упругости  $E$  более существенна для низко модульных материалов. В области малых давлений, при которых реализуется преимущественно упругий контакт, получена близкая к линейной зависимость  $\delta(E)$  (рис. 1, кривая 1). Нелинейная зависимость  $\delta(E)$  характерна для давлений 10 МПа и более (рис. 1, кривая 2), т.е. при условии, когда контактные деформации становятся вязкоупругими, а модуль упругости представляет собой функцию времени действия нормальной и касательной нагрузок.

Одним из основных факторов, определяющих контактные деформации и сопротивление изнашиванию композита, а также условия перехода от трения покоя к трению скольжения, является твердость (НВ) композита. Установлено, что с повышением твердости эпоксидного полимера предварительное смещение уменьшается, при чем в области низких значений нормальной нагрузки и твердости эта зависимость выражена менее

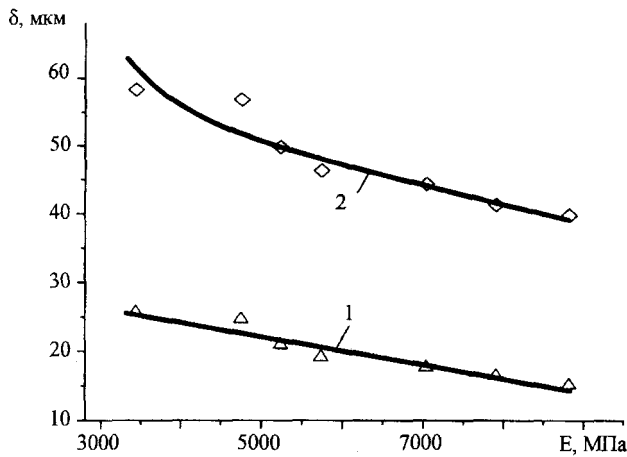


Рис. 1. Влияние модуля упругости эпоксидного полимера на предварительное смещение:  
1 –  $p_0 = 1,55$  МПа; 2 – 10 МПа

заметно (рис. 2). Это обусловлено конкурирующим влиянием нескольких факторов. С одной стороны, повышение НВ приводит к уменьшению контактных деформаций, глубины относительного внедрения неровностей стального контртела в поверхностный слой эпоксидного полимера, размеров и числа фрикционных связей, толщины интенсивно деформируемого слоя. В результате это обеспечивает снижение предварительного смещения. С другой стороны, по мере увеличения твердости полимера возрастает сопротивление адгезионных связей срезу, что приводит к повышению  $\tilde{\delta}$

Таким образом, для снижения предварительного смещения, автоколебаний и неравномерности износа поверхностей трения необходимо повышение твердости эпоксидного композита. Решение этой задачи возможно введением в состав композита моди-

фикаторов. Установлено, что введение в ЭД-20 полиэфирной смолы вызывает незначительный рост твердости композита, а фурфуролацетонного мономера – повышает твердость на 10...15 % (рис. 3). Наибольший эффект достигается при использовании органического модификатора, образующего собственную пространственную сетку и формирующего дополнительные физические и химические узлы с полярными группами ЭД-20.

Существенное влияние на  $\delta$  оказывает молекулярная составляющая коэффициента трения. В экспериментах ее изменение достигалось нанесением спиртового раствора канифоли различной концентрации на поверхность трения эпоксидного образца. Установлено, что увеличение молекулярной составляющей коэффициента трения ( $f$ ) сопровождается ростом  $\delta$ . В области малых нагрузок (максимальное давление на контактной площадке соответствует 1,5...4,0 МПа) зависимость предварительного смещения от коэффициента трения при статическом контакте ( $f_{st}$ ) слабо выражена и подчиняется линейному закону в интервале  $f_{st} = 0,17...0,55$ . По-видимому, в этой области нагрузок увеличение  $f_{st}$  не вызывает заметного повышения доли пластической деформации и смещение обусловлено в основном упругим деформированием полимера.

По мере роста нормальной нагрузки предварительное смещение увеличивается, а влияние  $f_{st}$  на  $\delta$  становится более существенным. При максимальном давлении на контактной площадке  $p_0$ , превышающем 4,5 МПа, наблюдается переход от линейной к степенной зависимости  $\delta(f_{st})$ . Здесь имеет место увеличение глубины внедрения неровностей и толщины интенсивно деформируемого слоя эпоксидного полимера, приводящее к росту сопротивления перемещению трущихся тел и изменению условий перехода от динамического к статическому контакту. Кроме того, повышение максимального давления и  $f_{st}$  вызывает увеличение доли пластической деформации полимера.

Анализ влияния коэффициента трения и давления на величину  $\delta$  при одинаковой удельной силе трения ( $f_{st} p_0$ ) показывает следующее. Несмотря на ряд сопутствующих факторов (рост площади фактического

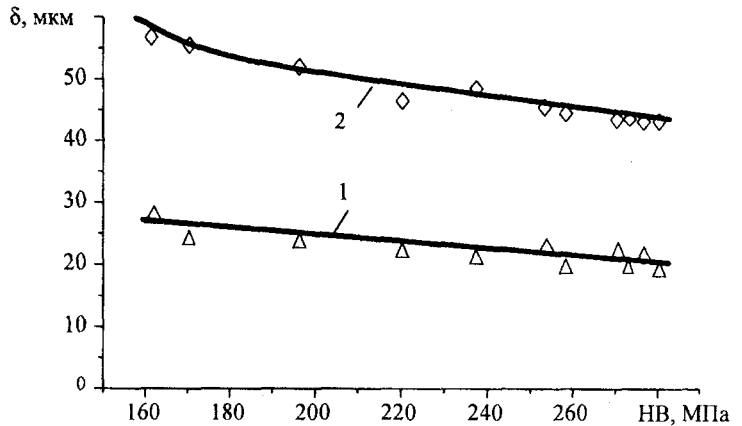


Рис. 2. Влияние твердости эпоксидного полимера на предварительное смещение:  
1 –  $p_0 = 1,55$  МПа; 2 – 10 МПа

контакта трущихся тел, упрочнение и повышение сопротивления адгезионных связей срезу), роль которых возрастает с увеличением  $\rho_0$ , более существенный вклад в повышение  $\delta$  вносит молекулярная составляющая

коэффициента трения. Так, при увеличении коэффициента трения с 0,4 до 0,62 и поддержании неизменным значения  $f_{ст} \rho_0 = 50$  МПа предварительное смещение не остается постоянным, а возрастает с 44 до 52 мкм. Аналогичный результат наблюдается при других значениях удельной силы трения.

Из приведенных результатов следует, что создаваемые для восстановления изношенных деталей узлов трения, работающих в режиме предварительного смещения, композиты должны обеспечивать возможно более низкую молекулярную составляющую коэффициента трения. Снижения коэффициента трения можно достичь изменением содержания органического модификатора ( $C_m$ ) в полимерной матрице (рис. 4, кривая 2). Так, увеличение  $C_m$  до 45 мас. ч. приводит к снижению коэффициента трения. Это объясняется ростом твердости композиции и, как следствие, уменьшением глубины относительного внедрения неровностей контртела в полимерный материал. Дальнейшее

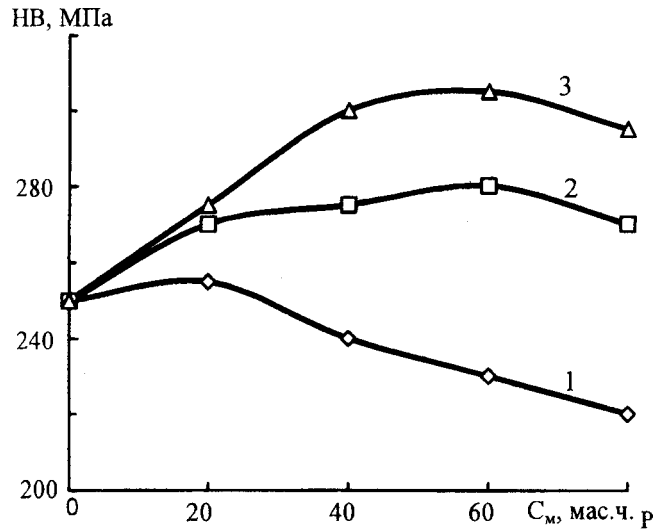


рис. 3. Зависимость твердости от количества модификатора: 1 – эпоксиполиэфирная смола; 2 – фурфуролацетоновый мономер; 3 – органический модификатор

увеличение содержания органического модификатора приводит к снижению твердости композиции и, соответственно, к росту коэффициента трения. Кривая 1 на рис. 4, свидетельствует о том, что увеличение содержания органического модификатора в композиции приводит к снижению интенсивности изнашивания материала вследствие возрастания его прочностных характеристик и падения коэффициента трения. Падение износостойкости композита при  $C_m > 50$  мас. ч. вызвано уменьшением прочности композиционного материала.

Введение в состав композиции дисперсного фторопласта и полиэтилена вызывает снижение коэффициента трения. Минимальное значение  $f = 0,12 \dots 0,14$  достигается при содержании наполнителя  $C_n = 3$  мас. ч. Это можно объяснить формированием пленки переноса из материала наполнителя в процессе фрикционного нагружения. Наполнение композиции комплексной добавкой, содержащей соли непредельных жирных кислот, позволяет снизить коэффициент трения  $f$  до 0,12 при содержании  $C_n = 1 - 1,5$  мас. ч., обеспечивающем формирование пленки, обладающей низким сдвиговым сопротивлением. При этом значительно снижается предварительное смещение и разница между динамическим и статическим коэффициентами трения.

Линейная интенсивность изнашивания композитов, содержащих дисперсный полиэтилен и фторопласт, снижается до  $1,1 \cdot 10^{-8}$ , а композитов, содержащих комплексную добавку, до  $0,7 \cdot 10^{-8}$  при скорости скольжения  $v = 0,1$  м/с и нагрузке  $N = 37,5$  Н.

Таким образом, очевидна эффективность применения комплексной добавки при создании композитов на основе эпоксидно-диановой смолы для узлов трения, работающих в режиме предварительного смещения.

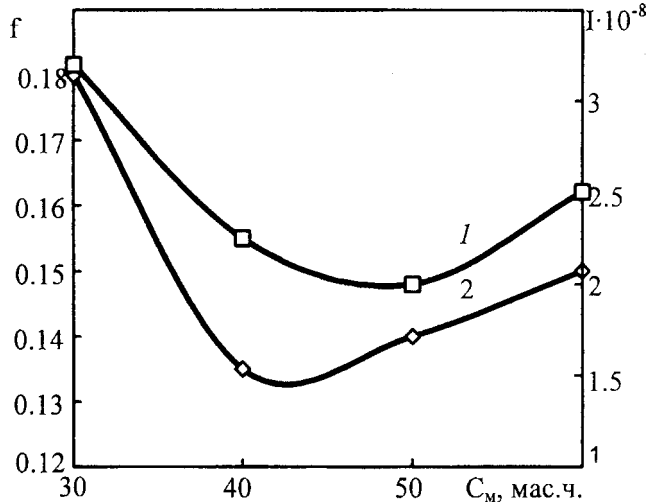


рис. 4. Зависимость линейной интенсивности изнашивания эпоксидных покрытий (1) и коэффициента трения (2) от содержания органического модификатора

**Заключение.** Предварительное смещение в металлополимерных парах трения определяется физико-механическими и триботехническими свойствами полимерного материала. Уменьшения предварительного смещения и его отрицательных последствий можно достичь увеличением модуля упругости и твердости полимера и снижением коэффициента трения. Необходимое сочетание этих характеристик обеспечивается при введении в состав композита на базе эпоксидной смолы ЭД-20 органического модификатора и комплексной добавки, включающей соли непредельных жирных кислот.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.А., Лисицын Н.М. Основные факторы, влияющие на равномерность перемещений столов и суппортов станков при смешанном трении // Станки и инструмент. – 1962. – № 2. – С. 1 – 5.
2. Амосов А.П. Об условиях возникновения релаксационных колебаний при внешнем трении // Машиноведение. – 1975. – № 5. – С. 82 – 89.
3. Петров В.В., Сладковский А.В. Влияние коэффициента Пуассона на микроскольжение при сдвиге упругого прямоугольника // Трение и износ. – 1989. – Т. 10, № 2. – С. 350 – 353.
4. Olofsson U., Hagman L. Cyclic micro-slip under unlubricated conditions // Tribology International. – 1995. – Т. 28, № 4. – С. 207 – 217.
5. Авдеев Д.Т. Предварительное смещение антифрикционных материалов на основе полиэтилена // Трение и износ. – 1984. Т. 5, № 5. – С. 896 – 901.
6. Богданович П.Н., Байдак А.А. Предварительное смещение в металлополимерных парах трения // Трение и износ. – 2000. Т. 21, № 6. – С. 623 – 627.
7. Богданович П.Н., Байдак А.А. Предварительное смещение в парах трения металл – полимер // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 3. – С. 281 – 285.