

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПОКСИКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Букетов А.В., Браило Н.В.

*Херсонская государственная морская академия, г. Херсон, Украина*

### РЕЗЮМЕ

Установлена зависимость трибологических свойств эпоксидных композитов от режима эксплуатации материалов, природы и количества введенных в связующее ингредиентов. Экспериментально установлено влияние двухкомпонентного бидисперсного наполнителя на трибологические свойства эпоксидных композитов. Доказано, что улучшенными свойствами отличается эпоксикомпозитный материал с частицами антифрикционного графита марки АГ-1500 (дисперсность 63...80 мкм) и перлита (дисперсность 5...10 мкм) в соотношении 60:20 соответственно. Впервые предложено для улучшения трибологических свойств добавлять в термореактивное связующее на основе эпоксидной матрицы в виде наполнителя термопласт – гранулы полиамида ПА-6. Предложены комбинации расположений гранул полиамида ПА-6 в композите. Обосновано, что при расположении гранул полиамида ПА-6 в матрице боковой поверхностью к области трения трибологические свойства композитов значительно улучшаются по сравнению с характеристиками композитов, где гранулы расположены торцевой поверхностью к области трения. Обоснован механизм изнашивания термореактивных эпоксидных композитов, наполненных термопластичными гранулами полиамида ПА-6. Методом оптической микроскопии исследована поверхность трения и подтверждены полученные экспериментальные данные.

**Ключевые слова:** трение; трибологические свойства; эпоксидная матрица; композиты

## STUDY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS

Buketov A.V., Brailo N.V.

*Kherson state maritime academy, Kherson, Ukraine*

### SUMMARY

The dependence of tribological properties of epoxy composites from the mode of operation of materials, the nature and quantity entered in the binder ingredients. Experimentally the influence of two bidisperse fillers on the tribological properties of epoxy composites. It is proved that the improved properties differs epoxy composites material with anti-friction particles of graphite AG-1500 (dispersion 63...80  $\mu\text{m}$ ) and perlite (dispersion of 5 to 10  $\mu\text{m}$ ) in the ratio of 60:20, respectively. First proposed for improving tribological properties add to thermosetting binder epoxy oligomer in the form of filler injection – molding the pellets of polyamide PA-6. The proposed combination of the locations of pellets of polyamide PA-6 composite. It is proved that at the location of the pellets of polyamide PA-6 matrix lateral surface area of friction tribological properties of the composites significantly improved compared with the characteristics of the composites, where the granules are front surface to the area of friction. Justified wear thermosetting epoxy composites filled thermoplastic pellets

of polyamide PA-6. By optical microscopy, the surface friction and confirmed by experimental data.

**Key words:** friction; tribological properties; epoxy matrix; composites

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной промышленности предусматривает решение проблемы разработки новых материалов, технологий и конструкций с улучшенными свойствами и сниженной себестоимостью. Поэтому актуальной задачей современного материаловедения является создание конструкционных материалов [1] (в том числе и полимерных) с заранее заданными и прогнозируемыми свойствами в критических условиях эксплуатации. Одной из важных эксплуатационных характеристик таких материалов являются высокие показатели их износостойкости и обеспечение минимальных энергетических затрат на трение [2,3]. Трение поверхностей деталей приводит к значительным финансовым и временным затратам при ремонте. Поэтому перспективным и актуальным является создание материалов не только с повышенными показателями физико-механических характеристик, но и с улучшенными трибологическими свойствами.

Вопросами разработки материалов с улучшенными трибологическими свойствами и оптимизацией технологических режимов их формирования занимается ряд ученых (см. работы [4-13]). Разработка технологий и создание материалов с незначительной себестоимостью и высокими показателями трибологических и физико-механических характеристик является на сегодняшний день актуальной задачей.

Целью данной работы было исследование трибологических свойств материалов и разработка композитов с повышенной износостойкостью для деталей и механизмов, которые эксплуатируются в узлах трения, в том числе и в дейдвудном комплексе судов.

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе для исследования трибологических свойств были использованы предварительно разработанные матрицы следующего состава [14]:

1. Матрица на основе эпоксидной смолы CHS-Ероху 525 ( $q=100$  масс.ч.) и отвердителя полиэтиленполиамина (ПЭПА) ( $q=10$  масс.ч.), сформированная при температуре сшивания  $T=433$  К (матрица 1). CHS-Ероху 525 – низкомолекулярный эпоксидный олигомер, который не имеет модификаторов и является аналогом эпоксидного дианового олигомера ЭД-20. ПЭПА – отвердитель для сшивания эпоксидных композиций (ТУ 6-05-241-202-78).

2. Матрица на основе эпоксидной смолы CHS-Ероху 525 ( $q=100$  масс.ч.) и отвердителей: ПЭПА+Telalit 410 ( $q_1+q_2=5+5$  масс.ч.), сформированная при температуре сшивания  $T=433$  К (матрица 2). Telalit 410 – модифицированный аминокативный отвердитель на основе алифатического полиамиона.

Дополнительно исследовали трибологические свойства разработанных эпоксидных КМ с повышенными показателями физико-механических свойств. Композиты формировали на основе матрицы 2, добавляя в эпоксидный олигомер двухкомпонентные бидисперсные наполнители двух следующих составов:

1. Материал, наполненный частицами антифрикционного графита (АГ) с дисперсностью 63...80 мкм и перлита (П) с дисперсностью 5...10 мкм в соотношении, соответственно, 60:20 (материал АГП) [15]. Антифрикционный графит марки АГ-1500 (ТУ 48-20-4-87) – материал, изготовленный из непрокаленного нефтяного кокса, каменноугольного пека с добавкой естественного графита. Используют для изготовления деталей и узлов, которые работают в условиях сухого, полусухого и жидкостного трения. Перлит – материал, полученный в результате термической обработки водовместительной алюмосиликатной перлитовой породы вулканического происхождения. Химический состав перлита согласно ГОСТ 25226-96: оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) – 65...77%, оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – 11...16%, оксид железа ( $\text{Fe}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) – 0,5...6,0%, оксид кальция (Ca) – 0,1...3,5%, оксид калия и натрия ( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ ) – 3...10%.

2. Материал, наполненный частицами серого шлама (СШ) с дисперсностью 63...80 мкм и перлита (П) с дисперсностью 5...10 мкм в соотношении 50:50 (материал СШП) [16]. Серый шлам – твердая или пастообразная смесь отходов (шлам) процесса Байера – технологии удаления и очищение оксида алюминия (сырьё для добычи алюминия) из бокситов. Состоит из смеси оксидов (масс.ч.): железа – 32...35, алюминия – 6...9, кремния – 13...14, кальция – 14...16, титана – 5...6, ванадия – 1,0...2,0, олова – 1,0...1,3, остальное – другие оксиды.

Кроме того, композиты формировали на основе матрицы 2, добавляя в эпоксидный олигомер однокомпонентный термопластичный наполнитель полиамид ПА-6 первичный (ОСТ 06-С9-93), при этом рассматривались материалы с различным количеством гранул и с разным расположением гранул по отношению к области контакта с контртелом. Полиамид ПА-6 является полимером на основе синтетических высокомолекулярных соединений, которые содержат в основной цепи амидные группы  $-\text{CONH}-$ . Размеры гранул: диаметр  $d=3,2\pm 0,1$  мм, длина  $l=3,5\pm 0,1$  мм.

Следует отметить, что расположение гранул боковой или торцевой поверхностью к области контакта с контртелом, а также их количество при формировании эпоксидных композитов контролировали, используя накладной кондуктор. Это дало возможность равномерно распределить гранулы в материале матрицы и дополнительно контролировать равномерность их расположения.

Схемы расположения гранул ПА-6 в КМ показаны на рис.1.

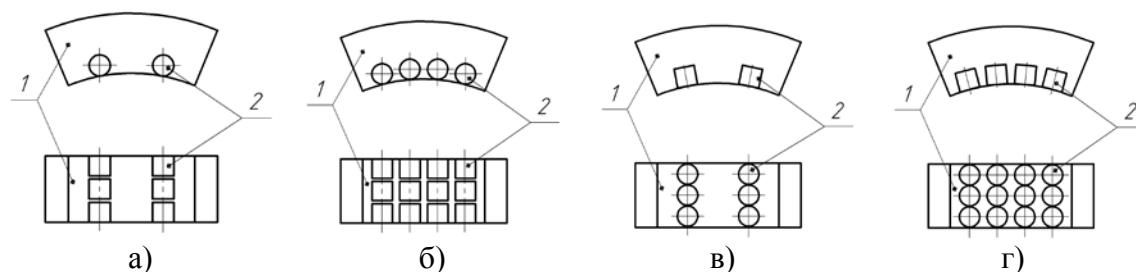


Рис.1. Схемы расположения гранул наполнителя полиамида ПА-6 в КМ: 1 – композитный материал; 2 – гранулы наполнителя полиамида ПА-6; а), б) расположение гранул в виде цилиндра боковой поверхностью (БП) к области контакта с контртелом, количество полиамида ПА-6  $q=30$  масс.ч. и  $q=60$  масс.ч., соответственно, (материал МП-БП); в), г) расположение гранул в виде цилиндра торцевой поверхностью (ТП) к области контакта

с контртелом, количество полиамида ПА-6  $q=30$  масс.ч. и  $q=60$  масс.ч., соответственно, (материал МП-ТП).

Исследовали трибологические свойства материалов на испытательной машине серийного производства 2070 СМТ-1 по схеме «диск-колодка» и по методике соответственно ГОСТ 23.224-86. Размеры элементов пары трения показано на рис.1. Расчеты параметров проводили соответственно работе [17].

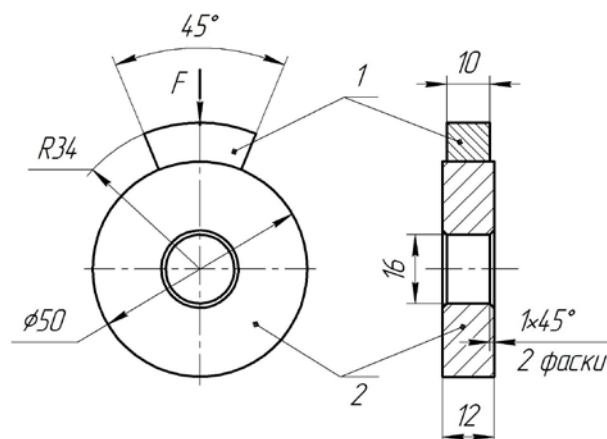


Рис.2. Схема исследования трибологических свойств материалов («диск-колодка»): 1 – исследуемый материал (колодка); 2 – контртело (диск).

Массовую интенсивность износа определяли по формуле [17]

$$I_m = \frac{\Delta m}{\Delta L}$$

где  $\Delta m$  – разность массы образца до и после трения, мг;  $\Delta L$  – испытательный путь трения материала, км.

Коэффициент трения рассчитывали в соответствии с ГОСТ 11629-75

$$f = \frac{M}{Fr}$$

где  $M$  – среднеарифметическое значение момента трения,  $H \times m$ ;  $F$  – нагрузка на колодку,  $H$ ;  $r$  – радиус металлического контртела (плеча),  $m$ .

Диск (контртело) изготавливали из материала сталь 45 термообработанная до твердости 45...48 HRC с шероховатостью поверхности  $R_a=0,16...0,32$  мкм.

Исследования проводили в условиях сухого трения при удельной нагрузке  $p=1$  МПа и скоростях скольжения  $v=0,5$  м/с и  $v=1,0$  м/с. Максимальный испытательный путь трения материалов составлял  $\Delta L_{\max}=10000$  м при  $v=0,5$  м/с и  $\Delta L_{\max}=20000$  м при  $v=1,0$  м/с. Температуру исследуемых образцов определяли с помощью термодпары «хромель-копель», сигнал от которой регистрировали измерительной аппаратурой. Располагали термодпару на расстоянии  $l=2$  мм от области контакта образца с контртелом. Режимы испытаний выбраны соответственно условиям использования КМ. Массу образцов определяли весовым методом на аналитических весах с точностью  $\pm 0,0001$  г. Структуру КМ после трения исследовали на металлографическом микроскопе модели XJL-17AT, оборудованном камерой Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Диапазон увеличения изображения изменяли в пределах от  $\times 100$  до  $\times 1600$  раз. Непосредственно в работе образцы исследовали при увеличении в  $\times 100$  и  $\times 200$  раз. Для обработки цифровых изображений использовали программное обеспечение «Levenhuk ToupView».

Отверждали материалы при экспериментально установленном режиме [5]: формирование образцов и их выдерживание в течение времени  $t=12,0\pm 0,1$  ч при температуре  $T=293\pm 2$  К, нагревание со скоростью  $v=3$  К/мин до температуры  $T=433\pm 2$  К, выдерживание образцов при данной температуре в течение времени  $t=2,0\pm 0,05$  ч, медленное охлаждение до температуры  $T=293\pm 2$  К. С целью стабилизации структурных процессов в матрице образцы выдерживали в течение времени  $t=24$  ч на воздухе при температуре  $T=293\pm 2$  К с последующим проведением экспериментальных испытаний.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

### 2.1. Исследование трибологических свойств матриц.

На первом этапе исследовали трибологические свойства матрицы на основе эпоксидного олигомера Ероху 525, сшитой отвердителем ПЭПА (рис.3а,в), и матрицы с добавлением отвердителей в комплексе (ПЭПА+Telalit 410) (рис.3б,г) [14,15]. Результаты трибологических исследований приведены на рис.3 и в табл.1.

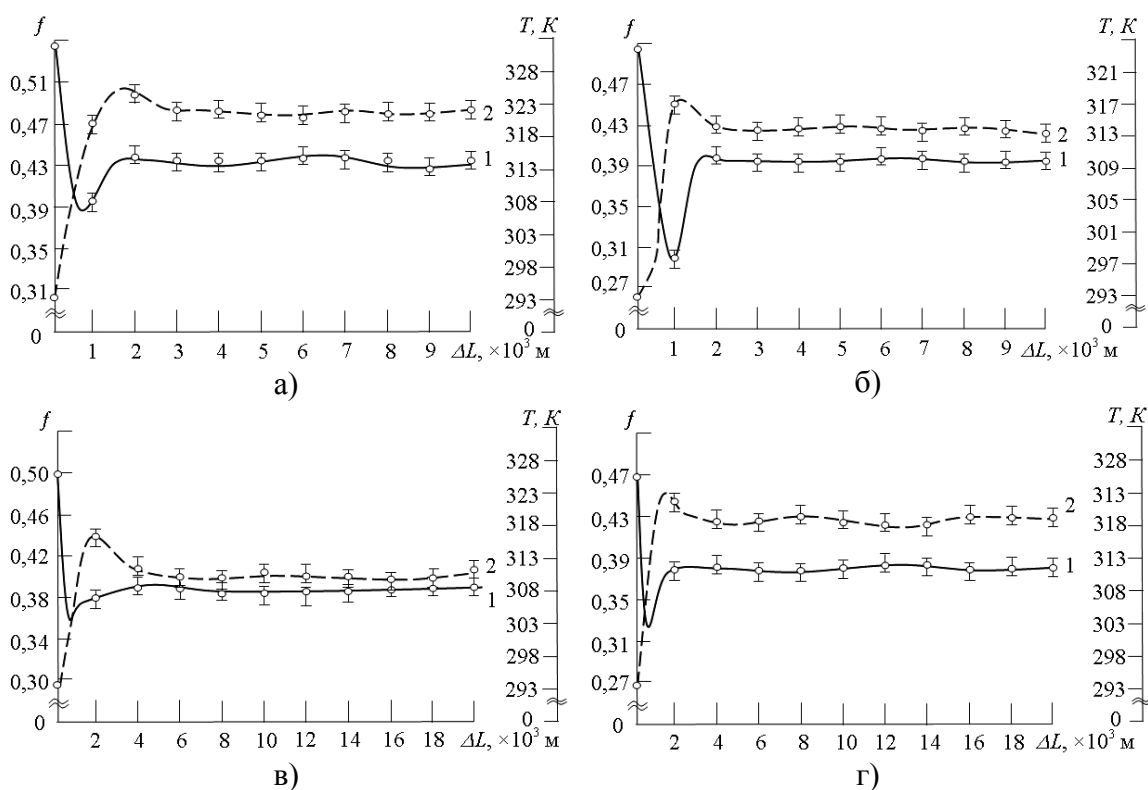


Рис.3. Зависимость коэффициента трения (1) и температуры в области трения (2) от испытательного пути трения материалов: а), в) матрица 1 при скоростях скольжения  $v = 0,5$  м/с и  $v = 1,0$  м/с, соответственно; б), г) матрица 2 при скоростях скольжения  $v = 0,5$  м/с и  $v = 1,0$  м/с, соответственно.

Полученные экспериментальные данные показали, что при скорости скольжения  $v=0,5$  м/с матрица 2, сформированная на основе эпоксидного олигомера и двух отвердителей в комплексе, имеет коэффициент трения ниже ( $f=0,39$ ) (рис.3б) по сравнению с матрицей 1, которая сформирована на основе эпоксидного олигомера и отвердителя ПЭПА ( $f=0,43$ ) (рис.3а). Предварительно установлено, что матрица 2 отличается более высокими, по сравнению с матрицей

1, показателями физико-механических свойств, в том числе пластичностью материала [14]. Вместе с тем известно [3,10,11], что способность материала к пластической деформации позволяет изменять структуру поверхностного слоя в области трения. При этом частицы пластического КМ заполняют микронеровности поверхностей трибопары, что приводит к улучшению приработки, вследствие чего уменьшаются показатели рабочего момента, коэффициента трения и рабочей температуры, а, соответственно, уменьшается интенсивность износа материала (табл.1).

Таблица 1.

## Трибологические свойства матриц.

Параметры	Материал			
	Матрица 1		Матрица 2	
	$v=0,5$ м/с	$v=1,0$ м/с	$v=0,5$ м/с	$V=1,0$ м/с
Рабочий момент $M$ , Н×м	2,1...2,3	1,9...2,1	2,0...2,1	1,8...1,9
Рабочий коэффициент трения $f$	0,41...0,45	0,39...0,41	0,39...0,41	0,35...0,37
Рабочая температура $T$ , К	320...323	310...313	312...313	317...319
Путь приработки $l$ , м	1850...2000	3900...4100	1800...2000	1950...2100
Интенсивность изнашивания $I_m$ , мг/км	1,9...2,0	1,7...1,9	1,6...1,8	1,3...1,4

Следует отметить, что под термином «приработка» подразумевали процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания [18]. Поэтому путь приработки – это расстояние от начала трения образца, при котором параметры момента и коэффициента трения изменяются и имеют более высокие значения, до начала стабилизации рабочих параметров трения. Момент трения равен моменту прижимающей силы на плечо, длина которого равна коэффициенту трения. Коэффициент трения – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу [18]. Рабочий момент, рабочий коэффициент трения – это показатели трибологических свойств композитов в период стабилизации параметров трения после процесса притирания. Рабочая температура – температура в области трения в период стабилизации параметров трения после процесса притирания.

Названные выше характеристики получены экспериментально путем анализа результатов исследования, показанных на графиках (рис.3).

Аналогичную тенденцию наблюдали, анализируя результаты исследования тех же материалов при скорости вращения контртела  $v=1,0$  м/с. При этом установлено уменьшение показателей исследуемых характеристик обеих матриц по сравнению с аналогичными свойствами, полученными при трении материалов со скоростью  $v=0,5$  м/с (табл.1).

Исходя из молекулярно-механической теории изнашивания [4,6,12], результаты исследования можно объяснить следующим образом.

1. Снижение показателей трибологических свойств материалов при условии повышения скорости скольжения происходит вследствие уменьшения межмолекулярного взаимодействия при контакте. Кроме того, повышенная скорость скольжения уменьшает влияние сил Ван-дер-Ваальса в области трения,

а, следовательно, и время взаимодействия между молекулами контактирующих тел [4].

2. При повышенной скорости вращения контртела деформация микронеровностей на поверхности образцов происходит интенсивно, поэтому приработка поверхности КМ характеризуется относительно коротким периодом времени. Вместе с тем значительная удельная нагрузка на микронеровности приводит к быстрому выравниванию шероховатости и волнообразности поверхности, что обуславливает снижение коэффициента трения трибопары [12]. Интенсивность износа после периода приработки стабилизируется, при скорости скольжения  $v=1$  м/с наблюдается уменьшение показателей износа по сравнению с аналогичными показателями для образцов, исследованных при скорости скольжения  $v=0,5$  м/с (табл.1).

Необходимо отметить, что после приработки стабилизируется рабочая температура трения материалов. Установлено (рис.3), что при скорости скольжения  $v=1$  м/с температура образцов на  $\Delta T=10$  К ниже по сравнению с температурой КМ, исследованных при скорости скольжения  $v=0,5$  м/с.

Вместе с тем следует заметить, что путь приработки матрицы 1 при скорости скольжения  $v=1$  м/с составляет  $l=3900...4100$  м, что в два раза больше, чем аналогичное расстояние для матрицы 2 ( $l=1800...2000$  м). Это свидетельствует о стойкости данного материала к упругим деформациям, что увеличивает период приработки. При этом повышается интенсивность износа и температура образца, что отрицательно будет влиять при использовании его в паре трения.

Для подтверждения полученных результатов дополнительно исследовали поверхность контакта материалов после трения методом оптической микроскопии при увеличении в  $\times 100$  и  $\times 200$  раз. При анализе поверхности контакта образцов матрицы 1 (рис.4а,б,в,г) отмечено наличие включений микрочастиц контртела, которые образуются во время приработки материала. Это подтверждает приведенное выше предположение о том, что материал имеет повышенную прочность, вследствие чего в процессе трения происходит износ материала контртела. В результате срезанные микрочастицы переносятся в область трения, которое приводит к повышению интенсивности износа, увеличению рабочего коэффициента трения и повышению рабочей температуры в области контакта. Кроме того, на рис.4г заметны образованные в процессе трения задиры на поверхности КМ, которые также влияют на повышение перечисленных выше показателей свойств. Это делает невозможным использование данного материала в парах трения.

Анализ фотографий поверхности образцов матрицы 2, сформированной на основе эпоксидного олигомера и отвердителей в комплексе (ПЭПА+Telalit 410) (рис.4д,е,ж,з), позволяет констатировать, что при скорости скольжения  $v=0,5$  м/с также заметны включения частиц контртела, однако за счет повышенной пластичности данного материала их количество незначительное. При анализе поверхности образцов, исследованных при скорости скольжения  $v=1$  м/с (рис.4ж,з), выявлено, что за счет быстрой приработки формируется равномерная поверхность контакта без заметных задиры и включений. Результаты исследований методом оптической микроскопии подтверждают приведенные выше теоретические предположения и экспериментальные испытания, которые предусматривают в дальнейшем при разработке КМ с улучшенными трибологическими свойствами необходимость использования матрицы 2

на основе эпоксидной смолы CHS-Ероху 525 ( $q=100$  масс.ч.) и отвердителей: ПЭПА+Telalit 410 ( $q_1+q_2=5+5$  масс.ч.).

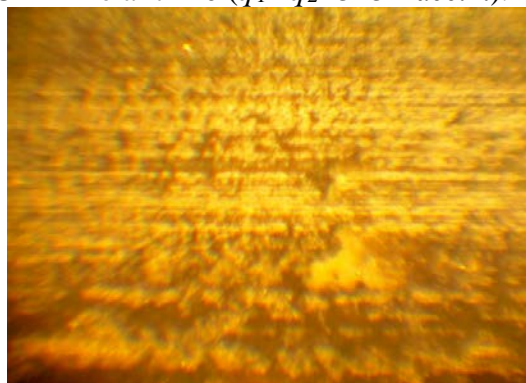
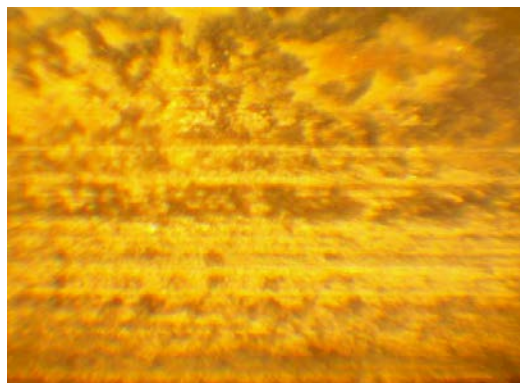
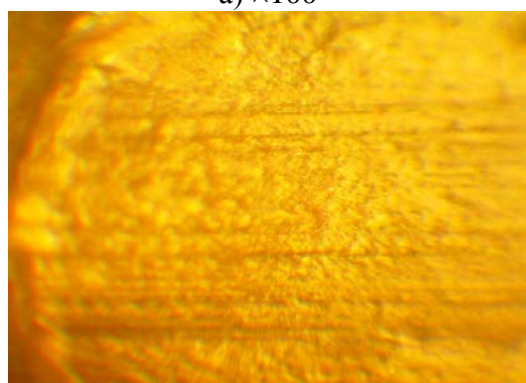
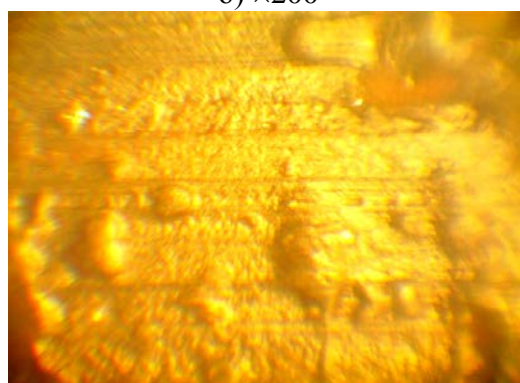
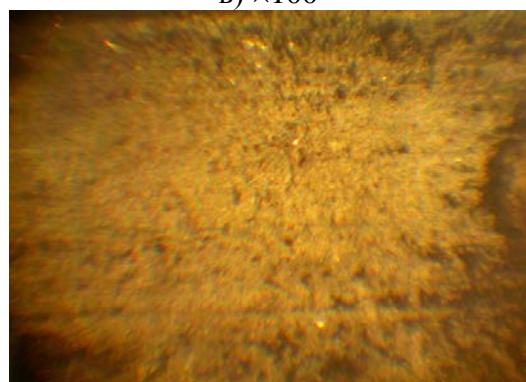
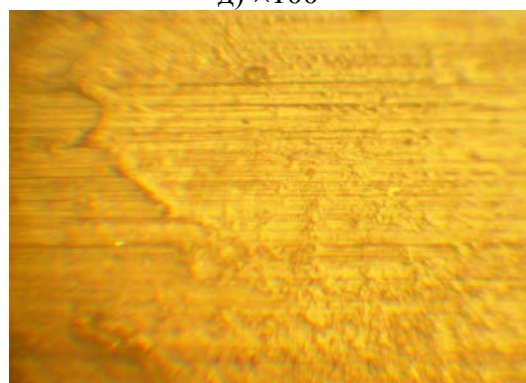
а)  $\times 100$ б)  $\times 200$ в)  $\times 100$ г)  $\times 200$ д)  $\times 100$ е)  $\times 200$ ж)  $\times 100$ з)  $\times 200$



Рис.4. Вид поверхности в области контакта после фрикционного испытания следующих материалов: а), б) матрица 1 ( $v=0,5$  м/с); в), г) матрица 1 ( $v=1,0$  м/с); д), е) матрица 2 ( $v=0,5$  м/с); ж), з) матрица 2 ( $v=1,0$  м/с).

## 2.2. Исследование трибологических свойств материалов на основе эпоксидного олигомера с двухкомпонентными бидисперсными наполнителями.

На следующем этапе исследовали трибологические свойства материалов АГП (рис.5а,в) и СШП (рис.5б,г), которые содержат двухкомпонентные бидисперсные наполнители.

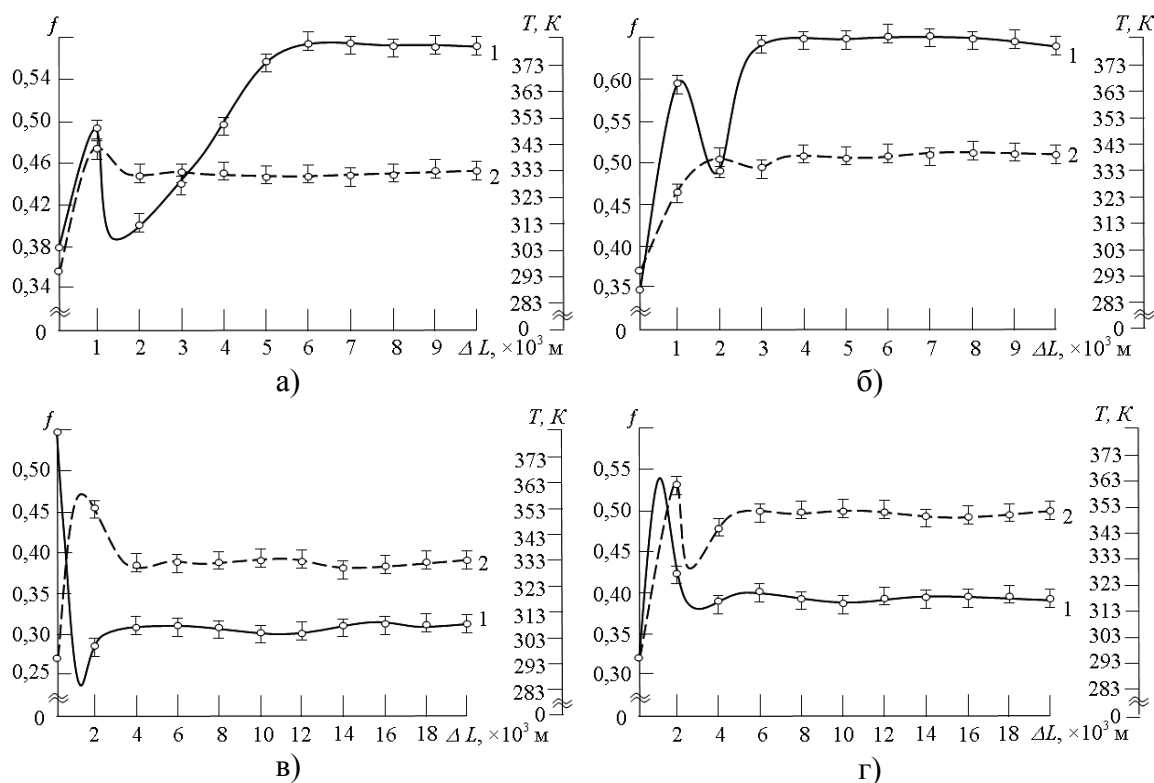


Рис.5. Зависимость коэффициента трения (1) и температуры в области трения (2) от испытательного пути трения материалов: а), в) материал АГП при скоростях скольжения  $v=0,5$  м/с и  $v=1,0$  м/с, соответственно; б), г) материал СШП при скоростях скольжения  $v=0,5$  м/с и  $v=1,0$  м/с, соответственно.

Установлено, что наполнение эпоксидного связующего частицами АГ-1500 и перлитом существенно влияет на трибологические свойства КМ. В частности, следует отметить, что при скорости скольжения  $v=0,5$  м/с рабочий момент и коэффициент трения (рис.5а) композитов существенно повышаются по сравнению с матрицей 2 с  $M=2,0...2,1$  Н×м и  $f=0,39...0,41$  до  $M=2,8...3,0$  Н×м и  $f=0,54...0,58$ , соответственно (табл.2). Это можно объяснить тем, что сформированный материал имеет улучшенные физико-механические свойства, что непосредственно обуславливает ухудшение трибологических свойств. Сила срезания микронеровностей контртелом недостаточная, что приводит к увеличению сопротивления притиранию поверхности образцов. В свою очередь это приводит к ухудшению трибологических показателей КМ

в выбранном диапазоне исследования. Подтверждением этого является то, что путь приработки при данных условиях возрастает относительно аналогичного показателя матрицы и составляет  $l=5300...5500$  м (рис.5а, табл.2). При анализе фотографий таких материалов после трения установлено наличие на поверхности КМ частиц наполнителя и ярко выраженные дорожки трения по всей рабочей площади образцов (рис.6а,б). Причем на рис.6б заметна дорожка трения с углублением, что подтверждает приведенные выше предположения и полученные результаты исследований.

Таблица 2.

Трибологические свойства композиционных материалов, наполненных двухкомпонентными бидисперсными наполнителями.

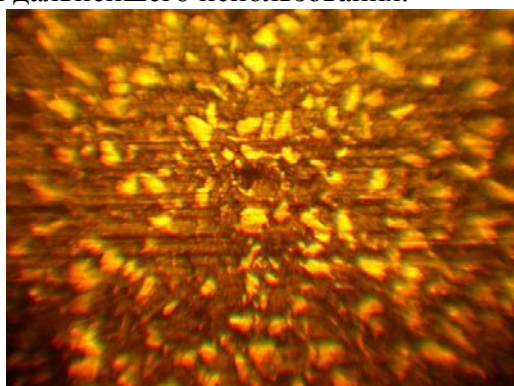
Параметры	Материал			
	АГП		СШП	
	$v=0,5$ м/с	$v=1,0$ м/с	$v=0,5$ м/с	$v=1,0$ м/с
Рабочий момент $M$ , Н×м	2,8...3,0	1,5...1,6	3,2...3,4	1,9...2,1
Рабочий коэффициент трения $f$	0,54...0,58	0,29...0,31	0,62...0,66	0,39...0,41
Рабочая температура $T$ , К	332...334	310...313	340...342	351...354
Путь приработки $l$ , м	5300...5500	2200...2300	2900...3100	3850...4100
Интенсивность изнашивания $I_m$ , мг/км	0,8...0,9	0,5...0,6	3,1...3,3	2,6...2,8

Вместе с тем, следует обратить внимание, что повышение скорости скольжения до  $v=1,0$  м/с существенно уменьшает показатели рабочего момента и коэффициента трения до  $M=1,5...1,6$  Н×м и  $f=0,29...0,31$  соответственно (табл.2). Можно утверждать, что сила разрушения микронеровностей материалов при увеличении скорости скольжения повышается и интенсифицируется процесс приработки. Следствием этого является уменьшение показателя пути приработки КМ до  $l=2200...2300$  м (рис.5в). Полученные данные подтверждены оптическим исследованием поверхности таких материалов после фрикционного испытания (рис.6в,г). Линии, образованные микронеровностями в области контакта, имеют равномерно распределенный характер. Кроме того, на фотографиях отсутствуют ярко выраженные царапины и задиры. Однако, необходимо указать, что рабочая температура при разных скоростях скольжения изменяется несущественно и находится в допустимых границах, что объясняется высокой теплопроводностью наполнителя АГ-1500 и передачей тепла от образца к окружающей среде.

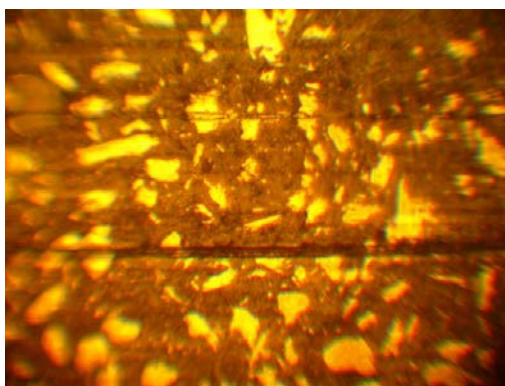
Аналогичную тенденцию наблюдали при испытании материала СШП. При этом были установлены (табл.2) более высокие показатели рабочего момента и коэффициента трения по сравнению с материалом АГП. На наш взгляд это обусловлено тем, что графит АГ-1500 является антифрикционным материалом и дополнительно интенсифицирует процессы смазывания при трении, а частицы СШП лишь улучшают физико-механические свойства разработанных КМ. В соответствии с этим на поверхности трения материала СШП (рис.6д,е,ж,з) наблюдали незначительные задиры, которые являются следствием контактного взаимодействия микронеровностей поверхности образцов и контртела, а также образование области перенесения частиц материала во время трения.

Следует заметить, что улучшенные показатели физико-механических свойств материала АГП и его способность к самосмазыванию, за счет наличия

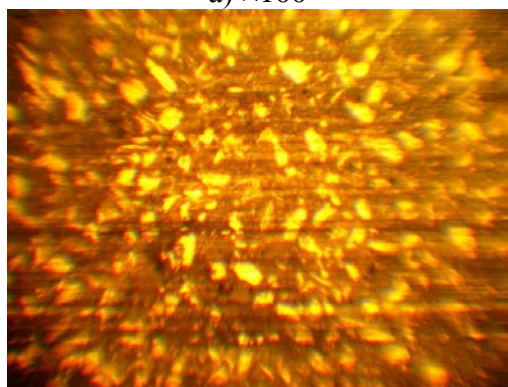
наполнителя АГ-1500, обеспечивают повышение износостойкости КМ, а, соответственно, и уменьшение его интенсивности износа до  $I_m=0,5...0,9$  мг/км (табл.2). Данная характеристика существенно влияет на выбор КМ для дальнейшего использования.



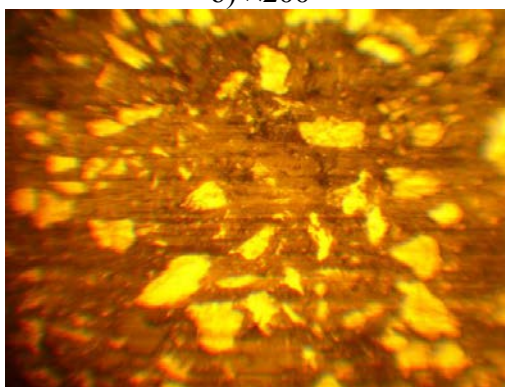
а)  $\times 100$



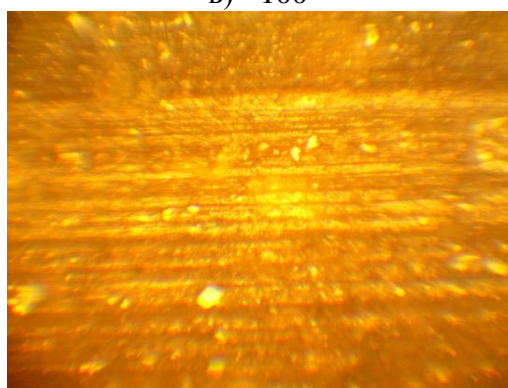
б)  $\times 200$



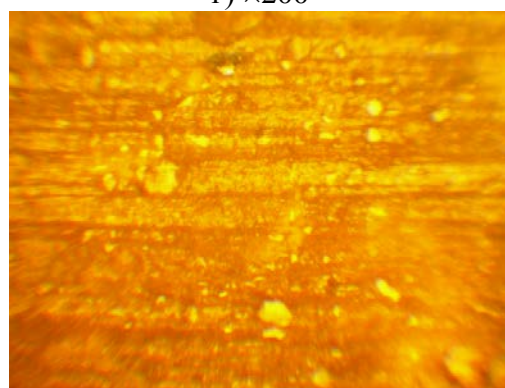
в)  $\times 100$



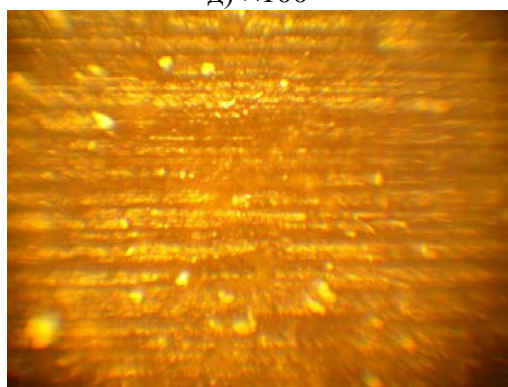
г)  $\times 200$



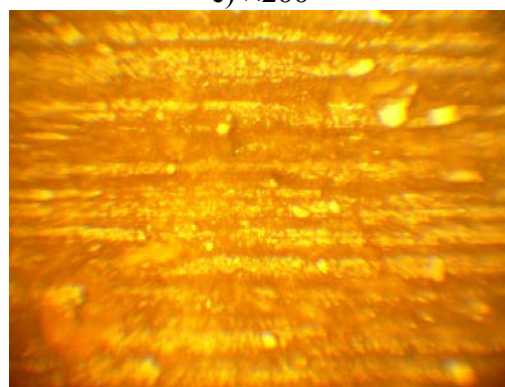
д)  $\times 100$



е)  $\times 200$



ж)  $\times 100$



з)  $\times 200$

Рис.6. Вид поверхности в области контакта после фрикционного испытания следующих материалов: а), б) АГП ( $v=0,5$  м/с); в), г) АГП ( $v=1,0$  м/с); д), е) СШП ( $v=0,5$  м/с); ж), з) СШП ( $v=1,0$  м/с).

В дальнейшем для уменьшения рабочего момента и коэффициента трения и, как следствие, для повышения износостойкости КМ впервые предложено добавлять в терморепактивное связующее на основе эпоксидного олигомера в виде наполнителя термопласт – гранулы полиамида ПА-6.

### 2.3. Исследование трибологических свойств материалов на основе эпоксидного олигомера с полиамидом в качестве наполнителя.

Для установления влияния на трибологические свойства КМ на основе терморепактивной матрицы 2 термопластичной добавки использовали два варианта расположения гранул наполнителя ПА-6 в связующем, как показано на рис.1 (МП-ТП и МП-БП). Количество наполнителя ( $q=30$  масс.ч. и  $q=60$  масс.ч.) выбрано в соответствии с возможностью расположения в КМ гранул определенного размера, которые серийно выпускаются промышленностью, и согласно полученным в предыдущих работах [15,16] результатам исследования физико-механических свойств материалов с данным наполнителем.

Результаты исследования трибологических свойств КМ, наполненных гранулами ПА-6, показаны на рис.7, рис.9 и в табл.3, табл.4. Скорость скольжения аналогично предыдущим исследованиям составляла  $v=0,5$  м/с и  $v=1$  м/с при удельной нагрузке  $p=1$  МПа.

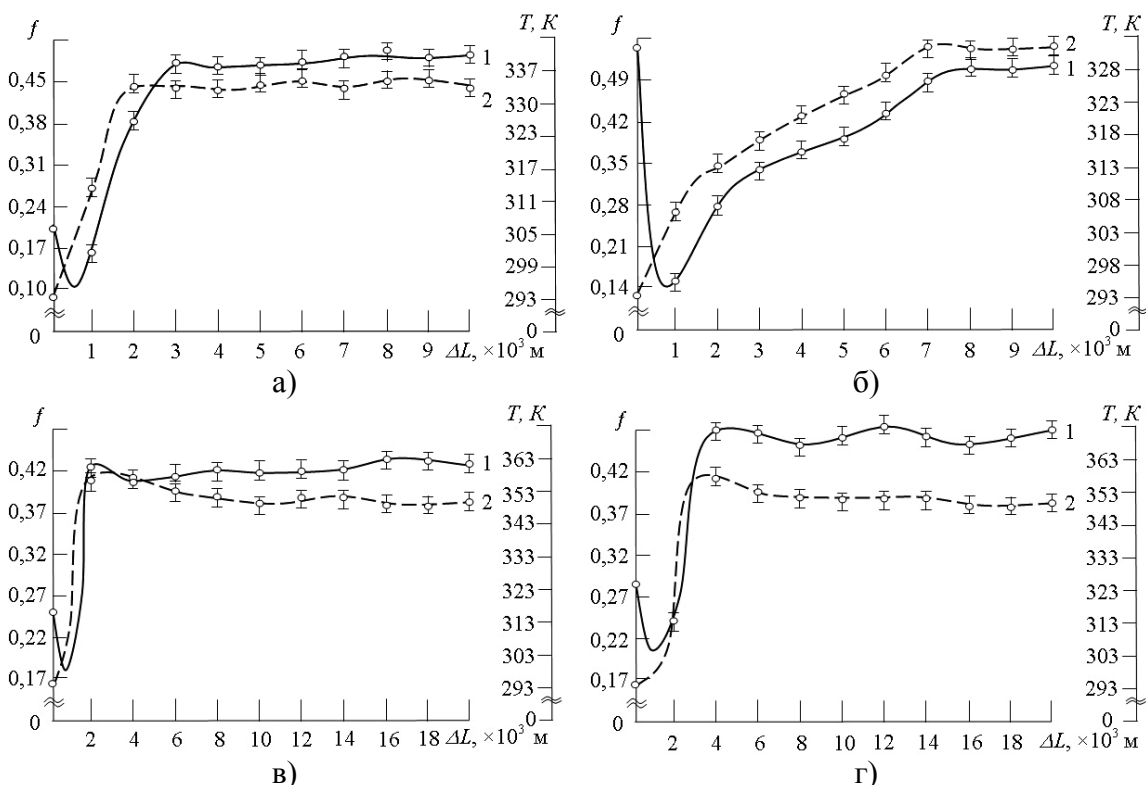


Рис.7. Зависимость коэффициента трения (1) и температуры в области трения (2) от испытательного пути трения материалов: а), в) материал МП-ТП (количество гранул полиамида  $q=30$  масс.ч) при скоростях скольжения  $v=0,5$  м/с и  $v=1,0$  м/с, соответственно; б), г) материал МП-ТП (количество

гранул полиамида  $q=60$  масс.ч) при скоростях скольжения  $v=0,5$  м/с и  $v=1,0$  м/с, соответственно.

Экспериментально установлено, что материалы МП-ТП имеют повышенные показатели рабочего момента и коэффициента трения ( $M=2,1...2,6$  Н×м,  $f=0,41...0,50$ ) (рис.7, табл.3) и достаточно большой путь приработки (до  $l=8000$  м).

Таблица 3.

Трибологические свойства композиционного материала МП-ТП.

Параметры	Материал			
	МП-ТП $q=30$ масс.ч		МП-ТП $q=60$ масс.ч	
	$v=0,5$ м/с	$v=1,0$ м/с	$v=0,5$ м/с	$v=1,0$ м/с
Рабочий момент $M$ , Н×м	2,4...2,5	2,1...2,2	2,4...2,6	2,3...2,4
Рабочий коэффициент трения $f$	0,47...0,49	0,41...0,43	0,48...0,50	0,46...0,47
Рабочая температура $T$ , К	332...335	348...350	329...332	350...352
Путь приработки $l$ , м	2900...3100	1800...2000	7500...8000	3500...4000
Интенсивность изнашивания $I_m$ , мг/км	0,9...1,1	0,8...1,0	1,0...1,2	0,9...1,0

Расположение гранул полиамида торцевой поверхностью к области трения приводит к увеличению площади соприкосновения добавки с контртелом и при этом повышается температура образцов, которая отрицательно влияет на рабочие свойства материала. В свою очередь на гранулы полиамида ПА-6 при расположении по схеме ТП воздействует крутящий момент, что предусматривает увеличение касательных сил нагрузки на поверхность образцов. Это вызывает «вырывание» гранул из КМ и образование концентраций напряжений в самом композите. За счет этого повышается хрупкость КМ. В свою очередь формирование хрупкого состояния и градиент концентраций напряжений в материале при трении, что подтверждено фотографиями поверхности образцов (рис.8), приводит к ухудшению трибологических свойств КМ. На фотографиях (рис.8а,б) ярко выражены глубокие линии, которые образованы вокруг наполнителя ПА-6 и вызваны не только трением поверхности, но и разрушением материала, а также попаданием частиц в область трения. Вместе с тем на рис.8ж заметны дорожки трения со значительными углублениями, что свидетельствует о недостаточно высоких трибологических свойствах данного материала. Использование материала с расположением гранул полиамида по схеме ТП в трибоузлах приводит к дополнительным поломкам за счет частичного разрушения композита. Поэтому на следующем этапе исследовали трибологические свойства материалов, наполненных гранулами ПА-6, при их расположении по схеме БП (рис.1а,б).

Экспериментально установлено, что трибологические свойства КМ с расположением частиц полиамида по схеме БП значительно улучшаются, по сравнению с характеристиками КМ, в которых гранулы расположены по схеме ТП. Показано, что образцы МП-БП по сравнению с композитами МП-ТП характеризуются значительно меньшими показателями рабочего момента и коэффициента трения, меньшей интенсивностью износа материала и пути его приработки (рис.9, табл.4). При этом следует заметить, что наилучшими показателями рабочего момента ( $M=1,7...2,0$  Н×м) и коэффициента трения

( $f=0,34\dots0,39$ ), интенсивности изнашивания ( $I_m=0,5\dots0,8$  мг/км) и рабочей температуры ( $T=316\dots338$  К) отличается материал МП-БП с количеством гранул полиамида  $q=30$  масс. ч.

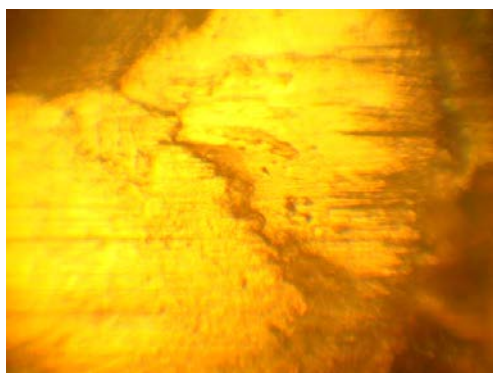
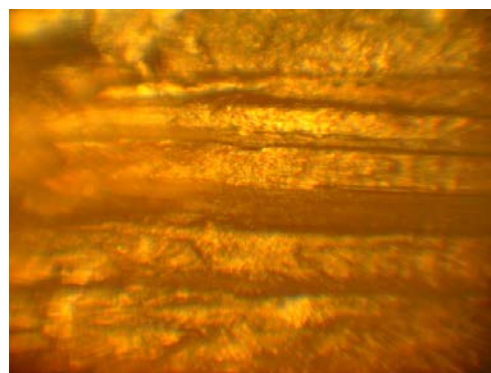
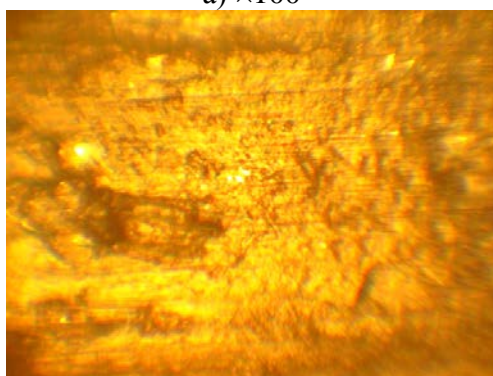
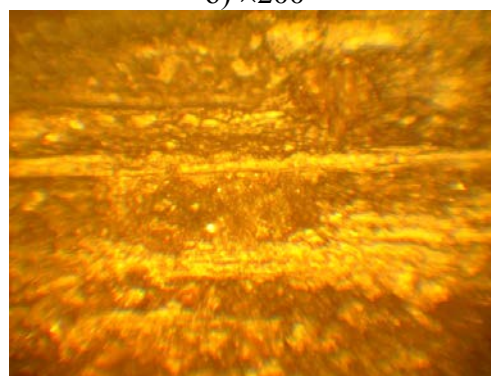
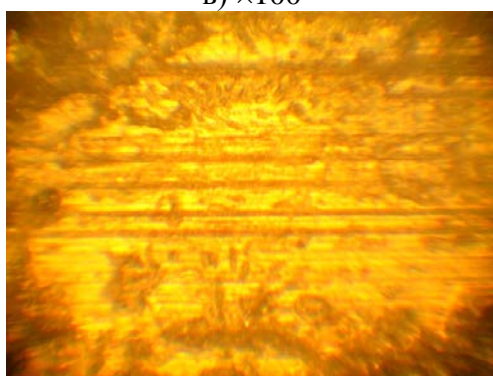
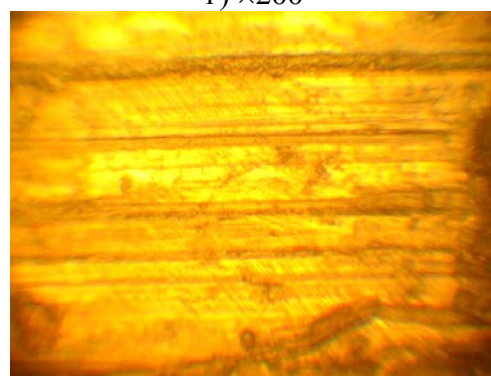
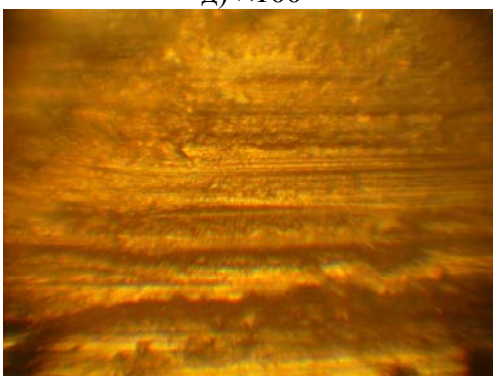
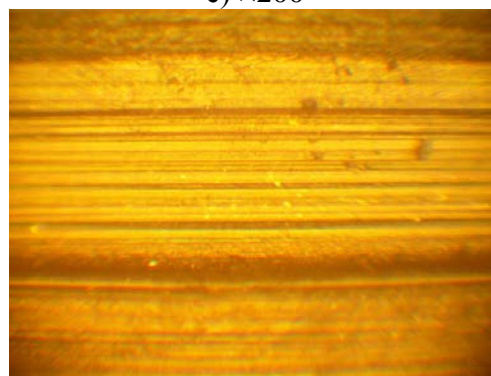
а)  $\times 100$ б)  $\times 200$ в)  $\times 100$ г)  $\times 200$ д)  $\times 100$ е)  $\times 200$ ж)  $\times 100$ з)  $\times 200$

Рис.8. Вид поверхности в области контакта после фрикционного испытания следующих материалов: а), б) МП-ТП (количество гранул полиамида  $q=30$  масс.ч.,  $v=0,5$  м/с); в), г) МП-ТП (количество гранул полиамида  $q=30$  масс.ч.,  $v=1,0$  м/с); д), е) МП-ТП ( $q=60$  масс.ч.,  $v=0,5$  м/с); ж), з) МП-ТП ( $q=60$  масс.ч.,  $v=1,0$  м/с).

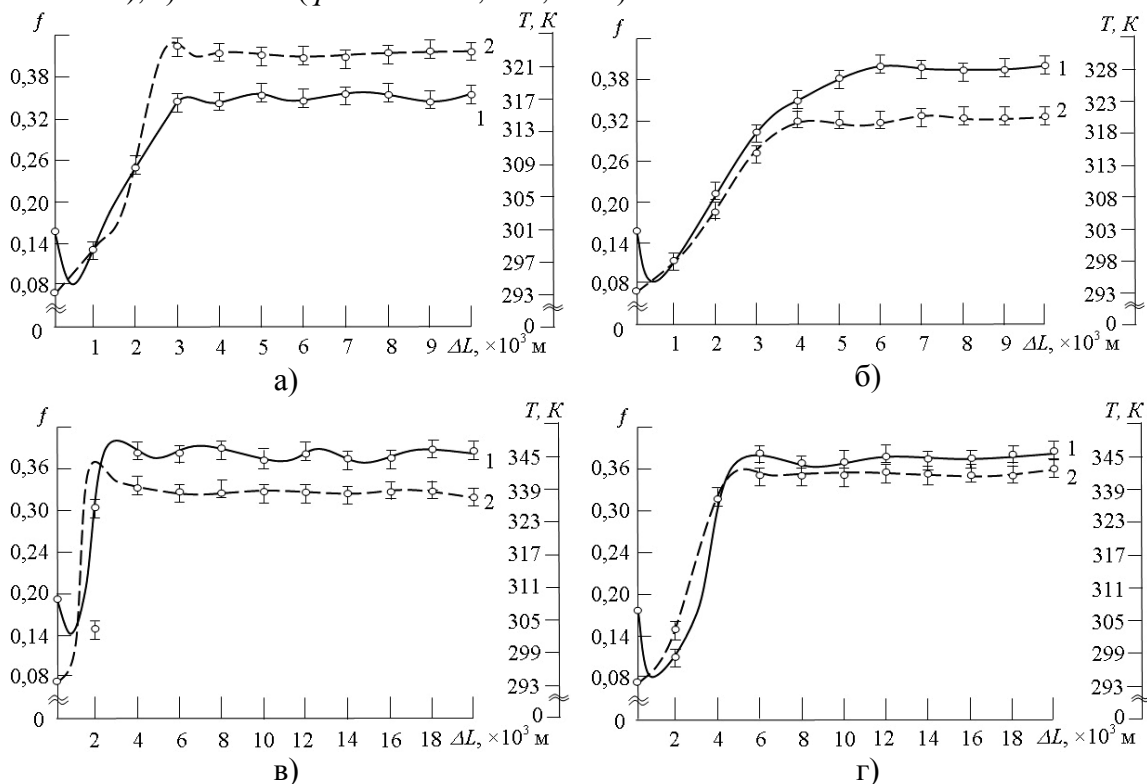


Рис.9. Зависимость коэффициента трения (1) и температуры в области трения (2) от испытательного пути трения материалов: а), в) материал МП-БП (количество гранул полиамида  $q=30$  масс.ч) при скоростях скольжения  $v=0,5$  м/с и  $v=1,0$  м/с, соответственно; б), г) материал МП-БП (количество гранул полиамида  $q=60$  масс.ч) при скоростях скольжения  $v=0,5$  м/с и  $v=1,0$  м/с, соответственно.

Таблица 4.

Трибологические свойства композиционного материала МП-БП.

Параметры	Материал			
	МП-БП $q = 30$ масс. ч.		МП-БП $q = 60$ масс. ч.	
	$v = 0,5$ м/с	$v = 1,0$ м/с	$v = 0,5$ м/с	$v = 1,0$ м/с
Рабочий момент $M$ , Н×м	1,7...1,8	1,9...2,0	1,9...2,0	1,8...1,9
Рабочий коэффициент трения $f$	0,34...0,35	0,37...0,39	0,37...0,39	0,35...0,37
Рабочая температура $T$ , К	316...318	337...338	319...321	340...342
Путь приработки $l$ , м	2700...3000	2000...2200	5700...6100	4700...5100
Интенсивность изнашивания $I_m$ , мг/км	0,6...0,8	0,5...0,7	1,0...1,2	0,9...1,1

Вместе с тем материал, наполненный гранулами полиамида в количестве  $q=60$  масс.ч., характеризуется значениями рабочего момента, коэффициента трения и рабочей температуры, которые несущественно отличаются от аналогичных показателей КМ с количеством полиамида  $q=30$  масс.ч. Однако,

интенсивность износа и путь приработки материала МП-БП с количеством ПА-6  $q=60$  масс.ч. увеличиваются в 1,6 и 2,3 раза соответственно. Данные факторы существенно влияют на выбор материала для использования в трибоузлах.

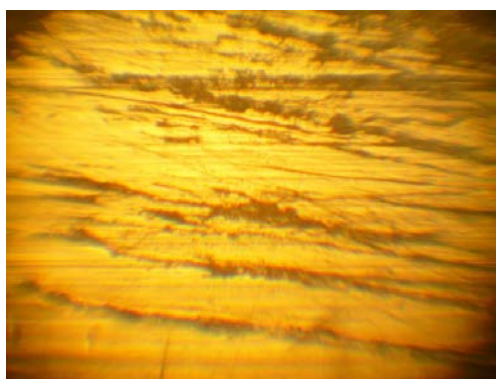
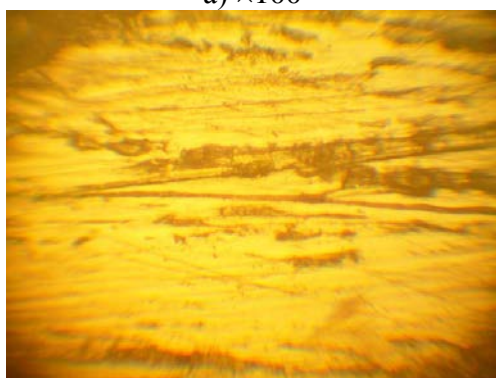
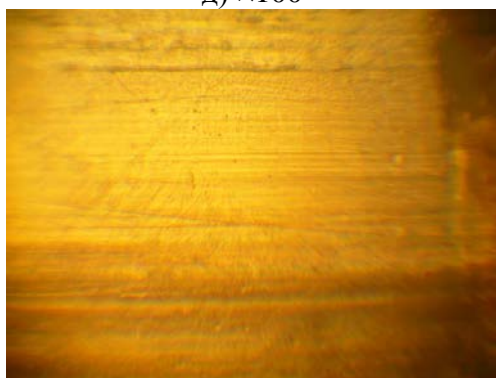
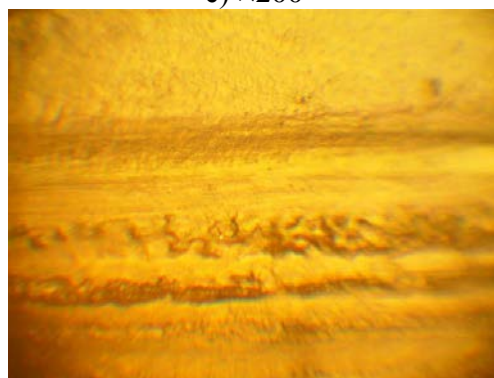
а)  $\times 100$ б)  $\times 200$ в)  $\times 100$ г)  $\times 200$ д)  $\times 100$ е)  $\times 200$ ж)  $\times 100$ з)  $\times 200$



Рис.10. Вид поверхности в области контакта после фрикционного испытания следующих материалов: а), б) МП-БП (количество гранул полиамида  $q=30$  масс.ч.,  $v=0,5$  м/с); в), г) МП-БП (количество гранул полиамида  $q=30$  масс.ч.,  $v=1,0$  м/с); д), е) МП-БП ( $q=60$  масс.ч.,  $v=0,5$  м/с); ж), з) МП-БП ( $q=60$  масс.ч.,  $v=1,0$  м/с).

Приведенные выше результаты испытаний трибологических свойств КМ подтверждены исследованиями поверхности трения материалов методом оптической микроскопии. Установлено, что на поверхности образцов после испытаний образуются дорожки трения, которые не отличаются ярко выраженным характером. Это свидетельствует об улучшенной приработке разработанного материала в трибопаре «Сталь 45 – МП-БП» (рис.10).

#### **2.4. Механизм изнашивания эпоксидных композитов.**

В соответствии с полученными результатами исследования трибологических свойств КМ, наполненных гранулами полиамида ПА-6, и анализом работ [3-12] можно рассматривать следующие этапы механизма изнашивания эпоксидных композитов.

1. Приработка (механический износ):

- микросрез поверхностных микронеровностей и уменьшение шероховатости материалов более твердым телом;
- выравнивание волнообразности материалов и сглаживание поверхности рабочего тела, что увеличивает несущую способность и уменьшает интенсивность изнашивания композитов.

2. Рабочий процесс:

- переход к высокоэластическому состоянию;

На этапе механической приработки выделяется значительное количество теплоты, которая изменяет структуру поверхностного слоя материала. Материал из стекловидного состояния, где доминируют упругие деформации, переходит в высокоэластическое состояние, где преобладают упруго-пластические деформации и увеличивается скорость релаксационных процессов [7,8].

- образование третьего тела;

При повышенной температуре термопласт как добавка в эпоксидной матрице находится в области повышенной пластичности и переходит в стадию плавления. При этом между контртелом и исследуемым материалом образовывается третье тело, которое, в свою очередь, проникает во все микронеровности поверхности (происходит сглаживание поверхности за счет растекания полимера) и вместе с тем служит смазочным материалом.

3. Разрушение:

- повышенный износ;

Пластическая деформация при повышенной температуре приводит к разрушению структуры и частичной деструкции поверхностного слоя, что повышает коэффициент трения и износ композитов.

- выход из строя;

При продолжительном рабочем процессе происходит линейный износ материала, который отрицательно влияет на работоспособность трибопары, приводит к расцентровке и возникновению дополнительных вибраций. Последние вызывают увеличение интенсивности износа и рабочей температуры, которая приводит к разрушению материалов и выходу из строя механизмов.

Дополнительно необходимо обратить внимание на то, что повышение температуры в области контакта до критической (больше  $T=473$  К) способствует переходу к фазе плавления (полиамида) и деструкции (эпоксидной матрицы). При этом увеличивается межмолекулярное взаимодействие в области контакта компонентов трибопары, происходит прилипание и адгезионное взаимодействие молекул полимера и поверхности контртела. Поэтому для улучшения трибологических свойств КМ целесообразно разработанный эпоксидный материал с гранулами полиамида ПА-6 использовать в условиях трения под влиянием охлаждающей среды, в частности, жидкости. Данные условия выполняются при внедрении разработанных композитов в дейдвудных комплексах современных судов, где трение происходит в среде морской воды. Исследование трибологических свойств КМ при приведенных выше условиях будет проведено и описано в следующих работах авторов.

## ВЫВОДЫ

На основе полученных результатов проведенных исследований трибологических свойств эпоксидных композитов можно констатировать следующее.

1. Установлено, что трибологические свойства зависят от режима эксплуатации материалов, природы и количества введенных в эпоксидное связующее ингредиентов. Показано, что эпоксидная матрица на основе эпоксидной смолы CHS-Ероху 525 ( $q=100$  масс.ч.) и отвердителей ПЭПА+Telalit 410 ( $q_1+q_2=5+5$  масс.ч.), сформированная при температуре сшивания  $T=433$  К, отличается улучшенными трибологическими свойствами по сравнению с матрицей на основе эпоксидной смолы CHS-Ероху 525 ( $q=100$  масс.ч.) и отвердителя полиэтиленполиамина (ПЭПА) ( $q=10$  масс.ч.) за счет быстрой ее приработки в трибопаре. Разработанная эпоксидная матрица отличается следующими показателями трибологических свойств: рабочий момент трения  $M=1,8...2,1$  Н×м, коэффициент трения  $f=0,35...0,41$ , рабочая температура  $T=312...319$  К, интенсивность изнашивания  $I_m=1,3...1,8$  мг/км, путь приработки  $l=1800...2100$  м.

2. Экспериментально исследовано влияние двухкомпонентного бидисперсного наполнителя на трибологические свойства эпоксидных композитов. Показано, что улучшенными свойствами отличается эпоксикомпозитный материал с частицами антифрикционного графита марки АГ-1500 (дисперсность 63...80 мкм) и перлита (дисперсность 5...10 мкм) в соотношении 60:20 соответственно. Такой композит при скорости скольжения  $v=1,0$  м/с характеризуется такими свойствами: рабочий момент трения  $M=(1,5...1,6)$  Н×м, коэффициент трения  $f=0,29...0,31$ , рабочая температура  $T=(310...313)$  К, интенсивность изнашивания  $I_m=0,5...0,6$  мг/км, путь приработки  $l=2200...2300$  м. Обосновано, что улучшенные трибологические свойства таких материалов обусловлены самосмазыванием поверхностного слоя композитов благодаря наличию в матрице частиц антифрикционного графита.

3. Впервые предложено для улучшения трибологических свойств добавлять к термореактивному связующему на основе эпоксидного олигомера термопластичный наполнитель – гранулы полиамида ПА-6. Разработано два варианта расположения гранул полиамида в эпоксидных композитах

и установлены закономерности их влияния на трибологические свойства материалов.

Экспериментально установлено, что при расположении гранул полиамида ПА-6 в матрице боковой поверхностью к области трения трибологические свойства композитов значительно улучшаются по сравнению с характеристиками композитов, где гранулы расположены торцевой поверхностью к области трения. Доказано, что наилучшими показателями трибологических свойств характеризуется материал с количеством гранул полиамида  $q=30$  масс.ч. на 100 масс.ч. связующего. При этом рабочий момент трения материала составляет  $M=1,7...2,0$  Н×м, коэффициент трения  $f=0,34...0,39$ , интенсивность изнашивания  $I_m=0,5...0,8$  мг/км, а рабочая температура  $T=316...338$  К. Обоснован механизм изнашивания терморепактивных эпоксидных композитов, наполненных термопластичными гранулами полиамида ПА-6. Методом оптической микроскопии подтверждены полученные результаты трибологических исследований и доказана их достоверность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Maruschak P.O., Panin S.V., Ignatovich S.R., Zakiev I.M., Konovalenko I.V., Lytvynenko I.V., Sergeev V.P.* Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nanocoating // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2012. – № 57. – P. 43-48.
2. *Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др.* Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. Учебное пособие. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
3. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн.2. / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 2002. – 358 с.
4. *Богданович П.Н., Прушак В.Я.* Трение и износ в машинах. Учебник для вузов. – Минск: Высш.шк., 1999. – 374 с.
5. *Стухляк П.Д.* Эпоксидные композиты для защитных покрытий. – Тернополь: Збруч, 1994. – 177 с.
6. *Кіндрачук М.В., Лабунець В.Ф., Пашечко М.І., Корбут Є.В.* Трибологія. – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 392 с.
7. *Савчук П.П.* Особливості застосування епоксидних композиційних матеріалів у триботехніці // *Проблеми трибології*. – 2008. – Т.50. – №4. – С.120-125.
8. *Савчук П.П., Косторнов А.Г.* Особливості впливу процесів модифікації на триботехнічні характеристики епоксидних композиційних матеріалів // *Пробл. тертя та зношування: Наук.-техн. зб.* – Київ: Вид. Київ. нац. авіац. ун-ту., 2008. – Вип.48. – С.135-148.
9. *Марчук В.Є., Ляшенко Б.А., Кіндрачук М.В., Духота О.І.* Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями // *Проблеми тертя та зношування*. – 2013. – №2. – С.80-87.
10. *Костецкий Б.И.* Трение, смазка и износ в машинах. – Киев.: Техника, 1970. – 396 с.
11. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника (износ и безызносность). Учебник. – М.: «Издательство МСХА», 2001. – 616 с.
12. *Белый В.А., Петроковец М.И.* Трение и износ материалов на основе полимеров. – Минск: Наука и техника, 1976. – 432 с.
13. *Бузков В.А.* Підвищення службових властивостей матеріалів для розвитку судових дейдвудних обладнань та захисту моря: автореф. на здобуття наук.

- ступеня д-ра. техн. наук. / Нац. акад. наук України, Ін-т пробл. матеріалознавства ім. І. М. Францевича. – К., 1999. – 36 с.
14. *Букетов А.В., Браїло М.В.* Оптимізація вмісту і природи інгредієнтів епоксидної матриці за її властивостями // Вісник ТНТУ. – 2014. – №2. – С.90-99.
  15. *Букетов А.В., Браїло М.В., Алексенко В.Л., Овдій В.М.* Визначення оптимального вмісту двокомпонентного наповнювача методом математичного планування експерименту // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ, 2014. – Вип.44. – С.18-27.
  16. *Букетов А.В., Браїло Н.В., Алексенко В.Л., Сапронов А.А.* Применение метода математического планирования эксперимента для определения состава эпоксикомпозитов // Вестник Карагандинского государственного университета. Серия «Математика». – 2014. – Т.75. – №3. – С.23-35.
  17. Обеспечение износостойкости изделий. Метод ускоренной оценки материалов трущихся сопряжений: Р 50-54-62-88 – [Действующий от 1987-10-22.]. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 46 с. – (ВНИИНМАШ).
  18. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения: ГОСТ 27674-88. – [Действующий с 1989-01-01]. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1988. – 21 с.

*Поступила в редакцию 23 октября 2014 года.*

---

Сведения об авторах:

Букетов Андрей Викторович – д.т.н., проф., зав. Кафедрой судовых энергетических установок, Херсонская государственная морская академия, г. Херсон, Украина; e-mail: [buketov@tstu.edu.ua](mailto:buketov@tstu.edu.ua)

Браїло Николай Владимирович – к.т.н., ст.преподаватель, Кафедра эксплуатации судовых энергетических установок и общинженерной подготовки, Херсонская государственная морская академия, г. Херсон, Украина; e-mail: [mv-brailo@yandex.ru](mailto:mv-brailo@yandex.ru)