

**Дробот О.С.,  
Бабак О.П.,  
Вахнюк А.С.,  
Сиренко Г.А.**

Хмельницкий национальный университет,  
г. Хмельницкий, Украина

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ СОПРЯЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ИЗНАШИВАНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ КАРБОПЛАСТИКОВ

В работах некоторых зарубежных и отечественных исследователей рассмотрено влияние структуры сопряженной поверхности на износ карбопластиков, однако вывод, дающий однозначный ответ, какие же факторы: состав, структура, механические или физические свойства сопряженной поверхности определяют износ карбопластиков, не выявлено. Для карбопластиков содержащих низкомолекулярные углеродистые и графитированные волокна, в общем случае отсутствует какая-либо явная корреляция между интенсивностью изнашивания, коэффициентом трения и твердостью сопряженной поверхности. Структура сопряженной поверхности в значительной степени определяет антифрикционные свойства карбопластиков [1, 2]. Для оценки влияния сопряженной поверхности, ее микроструктуры, механических и теплофизических свойств на антифрикционные свойства однонаправленных карбопластиков испытан композит, армированный лентой ЛУ-2 при скольжении по стали, твердым сплавам, цветным металлам и сплавам. Для чего были выбраны стали: 45, У8 в отожженном и закаленном состояниях. 40Х; 38ХМЮА; 10Х18Н9Т; 10Х17Н13М3Т; серый чугун СЧ20; медь электротехническая; цинк электротехнический, дуралюмин Д1; бронзы Бр.КМц 3-1; Бр.ОС-12-2; Бр.ОФ 6,5-0,15; Бр.БНТ2,5-1; титановые сплавы ВТ-1-00 и ПТ-38; твердые сплавы ВК6; ВК11.

Испытания проведены в режиме саморазогрева при трении без смазки для двух направлений армирования наполнителя – *NLNN* и *LLLТ* при скорости скольжения  $v = 0,54$  0,54 м/с, удельной нагрузке  $P = 2$  2 МПа.

Полученные данные приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

**Износ карбопластика, армированного в направлении *NLNN* при трении по сталям и цветным металлам и сплавам ( $S = 3$  км,  $N = 302 = 382$  Н,  $v = 0,54$  м/с,  $P = 2$  МПа)**

| Марка сплава           | <i>HB</i> , МПа | $10^{-6}$ , мм <sup>3</sup> /Нм | <i>t</i> , °С | <i>f</i> |      |
|------------------------|-----------------|---------------------------------|---------------|----------|------|
|                        |                 |                                 |               | кон.     | min  |
| Сталь 45 (отожженная)  | 1870            | 4,57                            | 100           | 0,22     | 0,46 |
| Сталь 45 (закаленная)  | 4450            | 8,2                             | 170           | 0,25     | 0,75 |
| Сталь У8 (отожженная)  | 1800            | 5,14                            | 100           | 0,27     | 0,40 |
| Сталь У8 (закаленная)  | 5450            | 9,6                             | 130           | 0,2      | 0,52 |
| Сталь 40Х              | 4400            | 8,96                            | 125           | 0,25     | 0,54 |
| Сталь 38ХМЮА           | 1890            | 6,09                            | 110           | 0,22     | 0,53 |
| Сталь 30Х13            | 1750            | 7,8                             | 140           | 0,21     | 0,65 |
| Сталь Х18Н9Т           | 1250            | 10,6                            | 155           | 0,38     | 0,8  |
| Сплав ВК11             | 8200            | 5,07                            | 110           | 0,3      | 0,67 |
| Сплав ВК6              | 8400            | 2,52                            | 70            | 0,2      | 0,34 |
| Электролитическая медь | 660             | 4,5                             | 105           | 0,21     | 0,5  |
| Бронза Бр.КСц 3-1      | 730             | 8,2                             | 115           | 0,21     | 1,1  |
| Бронза Бр.ОФ 6,5-0,15  | 860             | 2,59                            | 90            | 0,21     | 0,48 |
| Бронза Бр.БНТ 2,5-1    | 3920            | 1,91                            | 55            | 0,14     | 0,3  |
| Бронза Бр. ОС 12-2     | 1100            | 5,69                            | 130           | 0,19     | 0,6  |
| Технический цинк       | 233             | 9,5                             | 150           | 0,3      | 1,2  |
| СЧ 20                  | 870             | -                               | -             | -        | -    |
| Д 1                    | 230             | 31,1                            | 75            | 0,16     | 0,36 |

При трении карбопластика по отожженным и низколегированным сталям (45, У8, 40Х, 38ХМЮА) наименьший износ отмечается при трении по стали 45, однако с увеличением количества перлита в структуре контртела износ карбопластика увеличивается.

Изменение структуры сопряженной поверхности на мартенситную увеличивает износ карбопластика по сравнению с износом по отожженным сталям.

Легирующие элементы, присутствующие в стали, интенсифицируют износ карбопластика, причем тем значительнее, чем больше их в стали. Особенно заметно влияние карбидообразующих легирующих элементов.

Износ карбопластика по отожженным сталям 30X13, 10X18H9T, 10X17H13M3T сравним с износом его при трении по закаленным сталям 45 и У8. Причиной тому существенные изменения в структуре этих сталей, происходящие в процессе трения. Науглероживанию стальной поверхности и образованию карбидов способствует переносная пленка, формирующаяся на поверхности контртела из продуктов износа композита.

Более плотная и равномерная пленка образуется на поверхности высоколегированных сталей 10X18H9T, 30X13, 10X17H13M3T, алюминиевого сплава Д1 и цинка. На поверхности углеродистых сталей 45 и У8, низколегированных 40X и 38ХМЮА, пленка менее плотная, неоднородная по ширине пятна контакта. На поверхности контртел из титана, меди, бронз пленка еще более тонкая и менее однородная.

В результате этого в низколегированных сталях образуются карбиды типа  $Cr_7C_6$ , в высоколегированных -  $Cr_{23}C_6$ , обладающие различной твердостью, по-разному влияющие на износ карбопластика.

Микротвердость пятна износа стальной поверхности существенно повышается по сравнению с исходным значением, особенно значительно для сталей 30X13, 10X18H9T, 10X17H13M3T.

Повышение микротвердости пятна износа у бериллиевой бронзы Бр. БНТ 2,5-1 связано с дисперсионным твердением  $\alpha$  – твердого раствора, что повышает твердость поверхности, стабилизирует шероховатость и уменьшает ее влияние на износ карбопластика.

Таблица 2

**Износ карбопластика, армированного в направлении  $NLNN$  при трении по сталям и цветным металлам и сплавам ( $S = 3$  км,  $N = 282$  Н,  $v = 0,54$  м/с,  $P = 2$  МПа)**

| Марка сплава           | HB, МПа | $10^{-6}$ , мм <sup>3</sup> /Нм | t, °C<br>кон. | f    |      |
|------------------------|---------|---------------------------------|---------------|------|------|
|                        |         |                                 |               | min  | max  |
| Сталь 45 (отожженная)  | 1870    | 4,36                            | 120           | 0,3  | 0,38 |
| Сталь 45 (закаленная)  | 4450    | 5,79                            | 105           | 0,28 | 0,46 |
| Сталь У8 (отожженная)  | 1800    | 5,02                            | 130           | 0,25 | 0,64 |
| Сталь У8 (закаленная)  | 5440    | –                               | –             | –    | –    |
| Сталь 40X              | 4400    | 6,0                             | 130           | 0,28 | 0,55 |
| Сталь 38ХМЮА           | 1890    | 5,3                             | 90            | 0,26 | 0,96 |
| Сталь 30X13            | 1750    | 5,51                            | 100           | 0,25 | 0,37 |
| Сталь 10X18H9T         | 1250    | 6,12                            | 130           | 0,24 | 0,46 |
| Сплав ВК11             | 8200    | 2,0                             | 115           | 0,23 | 0,74 |
| Сплав ВК6              | 8400    | 4,21                            | 115           | 0,31 | 0,48 |
| Электролитическая медь | 660     | 2,8                             | 115           | 0,23 | 0,43 |
| Бронза Бр.КМц 3-1      | 730     | 6,22                            | 110           | 0,19 | 0,46 |
| Бронза Бр.ОФ 6,5-0,15  | 860     | 5,21                            | 125           | 0,39 | 0,22 |
| Бронза Бр.БНТ 2, 5-1   | 3920    | 5,0                             | 70            | 0,17 | 0,4  |
| Бронза Бр. ОС 12-2     | 1100    | 5,88                            | 110           | 0,23 | 0,53 |
| Технический цинк       | 233     | 2,9                             | 110           | 0,25 | 0,45 |
| СЧ 20                  | 870     | 5,13                            | 85            | 0,17 | 0,6  |

Распад  $\alpha$  – твердого раствора в оловянистых бронзах в процессе трения не приводит к образованию твердых структурных составляющих, оказывающих влияние на износ композита.

Следует отметить, что износ композита при трении по фосфористой бронзе ниже, чем по кремнистой, т.к. структура первой отличается высокой стабильностью (до 350 °C), а присутствующий в составе бронзы фосфор, уменьшая противозадирные свойства поверхности, сохраняет параметры шероховатости и тем уменьшает износ карбопластика.

Весьма значительный износ карбопластика по дуралюмину обусловлен низкой твердостью сплава и существенными изменениями в процессе трения шероховатости, интенсифицирующей износ композита, а также образованием весьма рыхлых, непрочно связанных с основным металлом окисных пленок, отслоение и абразивное действие которых проявляется даже при комнатных температурах.

Возможно, определенное влияние на износ композита оказывает взаимодействие алюминия или его оксида с эпоксидной смолой, в результате чего расходуются несвязанные эпоксидные группы и образуется нерастворимый полимер. Алюминий, вступая в реакцию с эпоксидными группами, ускоряет тер-

мическую и термоокислительную деструкцию матрицы, что приводит к значительному износу карбопластика.

Анизотропия свойств карбопластика менее существенно проявляется при скольжении по углеродистым и низколегированным сталям.

Ориентационное соотношение для интенсивности изнашивания  $NLNN < LLLT$ .

$NLNN$  – слои волокон располагаются перпендикулярно поверхности трения и параллельно вектору скорости; волокна – перпендикулярны поверхности трения и вектору скорости.

$LLLТ$  – слои волокон ориентированы параллельно поверхности трения и вектору скорости; волокна также располагаются параллельно поверхности трения, но перпендикулярны вектору скорости. наблюдается при трении по твердым сплавам и бронзам.

При трении по сталям оно меняется на  $LLLТ < NLNN$ .

Смена ориентационного соотношения связана с протекающими процессами трибодеструкции композита, т.к. температура сопряженной поверхности в процессе трения повышалась 100 ... 170 °С (рис. 1), что не могло не сказаться на износе композита, особенно на величине сил межслойного взаимодействия.

Со сменой направления армирования с  $NLNN$  на  $LLLТ$  происходит уменьшение коэффициента трения как при скольжении по сталям, так и по меди и ее сплавам.

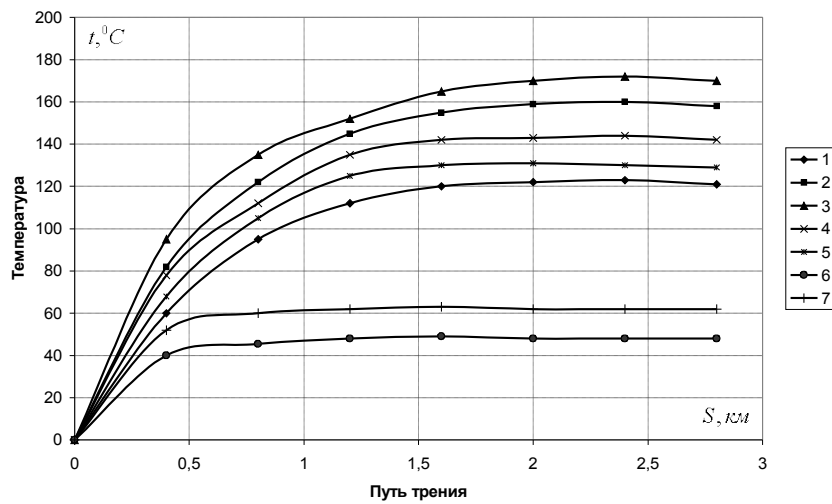


Рис. 1. – Влияние структуры сопряженной поверхности на изменение ее температуры при трении карбопластика.

Направление армирования  $NLNN$ :

1 – сталь 10X17Н13МЗТ; 2 – сталь 10X18Н9Т; 3 – сталь 45 (закаленная); 4 – электролитический цинк;  
5 – сталь У8 (закаленная); 6 – бронза БНТ 2,5-1; 7 – титановый сплав ПТЗВ.

Условия испытаний: скорость скольжения  $v = 0,54$  м/с; удельная нагрузка  $P = 2$  МПа

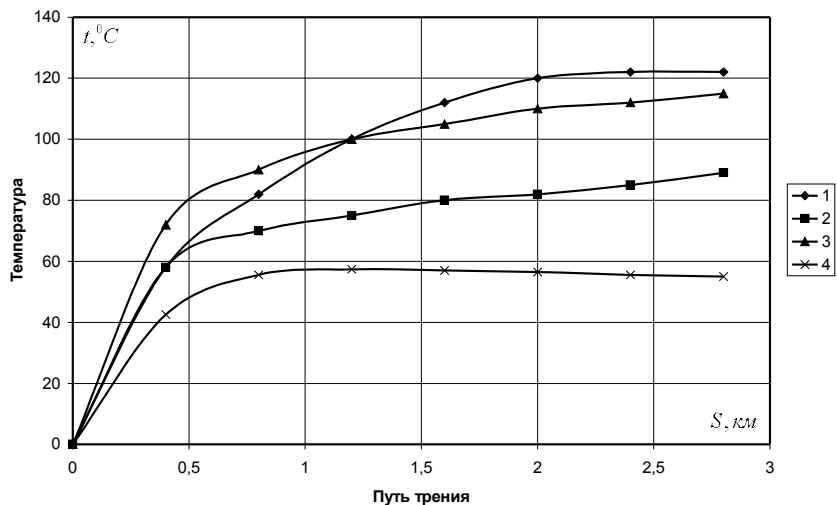


Рис. 2. – Влияние структуры сопряженной поверхности на изменение ее температуры при трении карбопластика.

Направление армирования  $LLLТ$ :

1 – сталь 10X17Н13МЗТ; 2 – 38ХМЮА; 3 – бронза Бр. ОФ 6,5-1,5; 4 – бронза БНТ 2,5-1.

Условия испытаний: скорость скольжения  $v = 0,54$  м/с; удельная нагрузка  $P = 2$  МПа

Более низкий коэффициент трения отмечается при скольжении по меди и ее сплавам.

Для направления армирования *NLNN* коэффициент трения в процессе испытаний по стальным поверхностям изменялся неоднозначно: в начале пути трения отмечается его рост, после чего величина его уменьшается и стабилизируется. При скольжении по бронзам максимум не отмечался, но средние значения коэффициента трения ниже, чем по сталям. Наибольшей стабильностью отличается коэффициент трения при скольжении по оловянисто-фосфористой и бериллиевой бронзам, а также по титановому сплаву ПТ-3В и твердому сплаву.

Численные значения коэффициентов трения находятся в пределах 0,16 ... 0,45. весьма существенное увеличение коэффициента трения до 0,7 ... 0,8 отмечается при скольжении по бронзе Бр.КМц 3-1, закаленной стали 45 и высоколегированным сталям 10X18H9T и 30X13 (рис. 3).

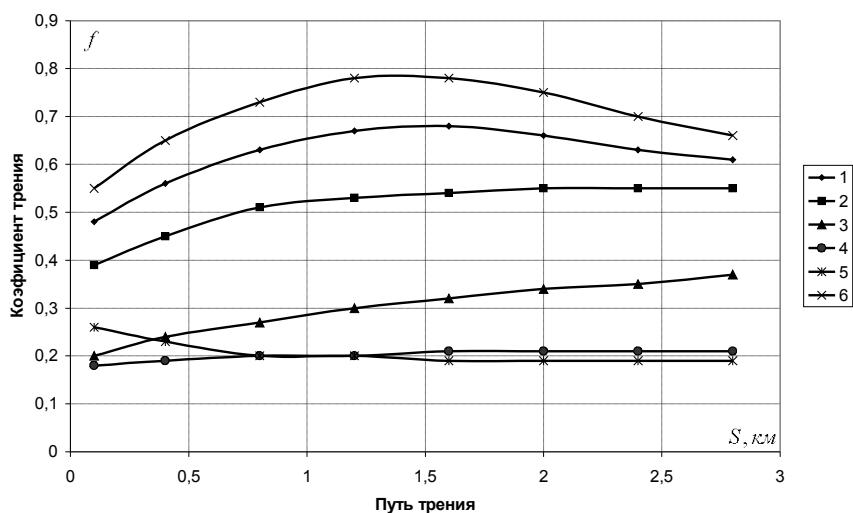


Рис. 3 – Влияние структуры сопряженной поверхности на коэффициент трения карбопластика.

Направление армирования *NLNN*:

1 – сталь 10X13H9T; 2 – сталь У8 закаленная; 3 – медь электротехническая;

4 – бронза Бр. БНТ 2,5-1; 5 – титановый сплав ПТЗА; 6 – цинк электролитический.

Условия испытаний: скорость скольжения  $v = 0,54$  м/с; удельная нагрузка  $P = 2$  МПа.

Для направления *LLLТ* при скольжении по сталям 45, 10X18H9T, бронзе Бр. БНТ 2,5-1 коэффициент трения характеризуется довольно высокой стабильностью во времени (рис.4).

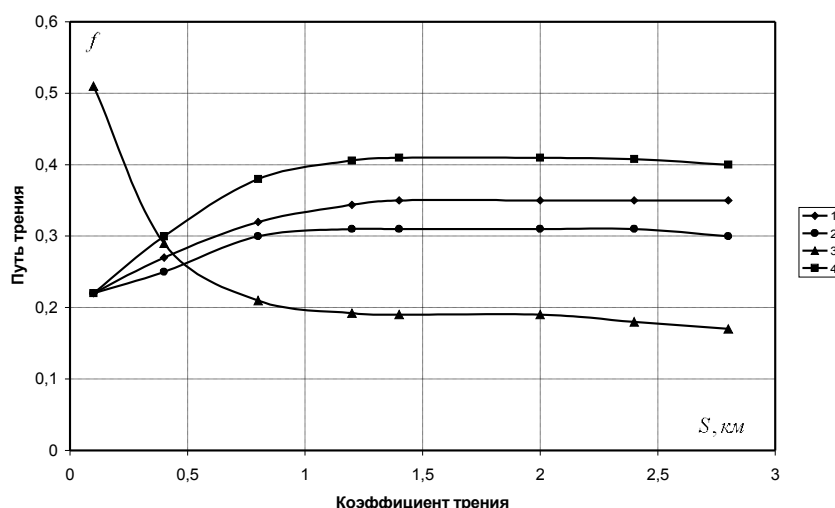


Рис. 4 – Влияние структуры сопряженной поверхности на коэффициент трения карбопластика.

Направление армирования *LLLТ*:

1 – сталь 10X18H9T; 2 – сталь 38ХМЮА; 3 – серый чугун СЧ 20; 4 – электролитический цинк.

Условия испытаний: скорость скольжения  $v = 0,54$  м/с; удельная нагрузка  $P = 2$  МПа

Интенсивное повышение температуры как для направления *NLNN* и *LLLТ* наблюдается в начальный период трения. Практически для всех пар трения, после 1 км пути температура стабилизировалась, достигнув максимального значения (рис. 1, 2).

При трении по углеродистым и легированным сталям (45, У8, 10Х17Н13М3Т), бронзам (Бр. БНТ 2,5-1; Бр. ОФ 6,5-0,15) наблюдаются более высокие приращения температур.

Смена направления с *NLNN* на *LLLТ* практически не повлияла на изменение температуры в процессе саморазогрева пар карбопластик-бронза Бр. КМц 3-1, медь, сталь 40х, а для пар карбопластик – сталь 45 (закаленная), 30Х13, 10Х18Н9Т, бронза Бр. ОС 12-2 при смене направления армирования наблюдается уменьшение температуры на 20 ... 60 °С.

Следует отметить, что скорость повышения температуры в процессе опыта и время достижения ее равновесного значения для разных материалов не одинаково, они зависят от теплофизических свойств сопряженной поверхности и трибологических свойств пары, а также от направления армирования волокон в композите.

Проведенные исследования показали, что износ карбопластиков в значительной мере зависит от направления армирования, температуры в зоне трения, а также природы сопряженной поверхности.

В ходе анализа полученных результатов была предпринята попытка связать износостойкость карбопластика с механическими и теплофизическими характеристиками сопряженной поверхности.

Для металлических пар разработаны критерии оценки износостойкости, позволяющие прогнозировать износ элементов сопряженной пары по значениям твердости, прочности, предела текучести. Но не для всех видов изнашивания можно использовать эти критерии. Сложность и многообразие протекающих в трибосистемах физико-химических процессов требует поиска более надежных критериев.

Как следует из работ [3, 4] при низких уровнях нагружения различия в износостойкости большого набора металлов, сталей и сплавов незначительно, но с ростом нагрузок и скоростей наблюдается существенное расхождение по конечной износостойкости.

Максимальной износостойкостью при этом будут обладать стали, не подвергающиеся в условиях работы разупрочнению под воздействием разогрева в зоне контакта.

В связи с чем автором [4] сделан вывод, что при равных значениях твердости, предела прочности и текучести износостойкость сталей тем выше, чем больше пластичность и ударная вязкость или одинаковая износостойкость сталей одного класса может быть только при равенстве их твердости и энергоемкости.

Не менее сложная задача прогнозирование износа ориентированных карбопластиков при трении их по металлическим поверхностям, т.к. износостойкость их в значительной мере зависит не только от скорости скольжения, приложенной нагрузки, но и от схемы контактирования, коэффициента взаимного перекрытия, типа углеродного волокна, его объемной доли в композите, текстильной формы и расположения его относительно поверхности трения и вектора скорости [5]. Однако нами найдена корреляционная связь износостойкости пар композит-металл с теплофизическими и механическими характеристиками металла (табл. 3).

Таблица 3

**Влияние физико-механических характеристик  
сопряженной поверхности на износ карбопластика**

| № п/п | Материал            | Свойства сопряженной поверхности                |  | Интенсивность изнашивания композита $10^{-6}$ мм <sup>3</sup> /Н·м |
|-------|---------------------|---|--|--|
|       |                     | коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·К | энергоемкость пластического деформирования |  |
| 1     | Сталь 10Х17Н13М-3Т  | 15,2  | 559  | 11,7   |
| 2     | Сталь 10Х18Н9Т      | 26,1  | 549  | 9,9  |
| 3     | Сталь 30Х13         | 31,6  | 510  | 7,8  |
| 4     | Сталь 40Х           | 33,1  | 443  | 7,2  |
| 5     | Сталь 38ХМЮА        | 39,0  | 424  | 5,2  |
| 6     | Сталь 45            | 47,8  | 343  | 4,6  |
| 7     | Бронза КМц. 3-1     | 49,2  | –  | 8,2  |
| 8     | Бронза ОС. 12-2     | 51,0  | –  | 5,7  |
| 9     | Бронза ОФ. 6,5-0,15 | 54,0  | –  | 2,7  |
| 10    | Бронза БНТ. 2,5-1   | 85,0  | –  | 1,9  |

Условия испытаний:  $v: 0,54$  0,54 м/с;  $P: 2$  2 МПа.

Большей теплопроводности сопряженной поверхности соответствует меньший износ карбопластика.

Прослеживается зависимость интенсивности изнашивания карбопластика от энергоемкости пластического деформирования стальной сопряженной поверхности.

По данным [6] энергоемкость пластического деформирования определяется:

$$E_g = \sigma_B \psi \delta_{\max} \quad (1)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности стали, МПа;

$\delta_{\max}$  – ресурс пластичности стали, который связан с относительным сужением  $\psi$  эмпирической зависимостью:

$$\delta_{\max} = 0,84\psi + 1,61\psi^2 - 0,04\psi^3 \quad (2)$$

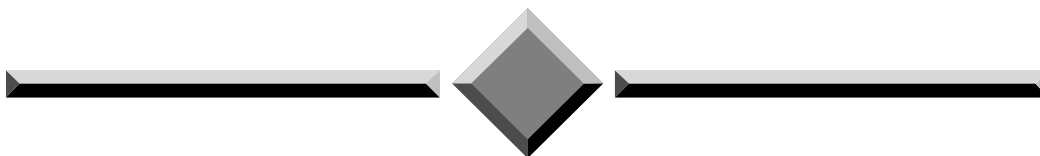
Низкая теплопроводность высоколегированных сталей 10X18H9T, 10X17H13M3T приводит к значительному повышению температуры в зоне трения и протеканию трибодеструктивных процессов, определяющих износ карбопластика.

Корреляционная связь между интенсивностью изнашивания карбопластика и энергоемкостью пластического деформирования позволяет использовать для объяснения влияния природы сопряженной поверхности на износостойкость композита энергетический подход, который как и усталостный, базируется на принципе накопления повреждений в материале до момента отделения частиц износа, а это как показали исследования, весьма существенно влияет на износ скользящего по такой поверхности карбопластика.

### Литература

1. Boufield N. Edwards B.C., Markham A.J., Nite J.K. Wear transfer films formed by carbon fibre reinforced epoxy resin sliding on stainless steel. *Wear* 1976, 37, №1. – P. 113.
2. Сиренко Г.А. Антифрикционные карбопластики. – К.: Техніка, 1985. – С. 195.
3. Айнбиндер С.Б., Тютин Э.Л. Введение в теорию трения полимеров. – Рига, 1978. – 223 с.
4. Сорокин Г.М. О критериях износостойкости сталей в условиях абразивного воздействия // Труды Международной научной конференции «Трение, износ и смазочные материалы». – М.: 1985. – Т. 1. – С. 129-138.
5. Giltrow J.P. Lancaster J.K. The role of the counterface in the friction and wear of carbon fibre reinforced thermosetting resins. *Wear*, 1970. – V.16, №5. – P. 359-374.
6. Сорокин Г.М., Сафонов Б.П. влияние механических характеристик закаленных сталей на их абразивную износостойкость // Вестник машиностроения. – 1983б. – № 2. – С. 38.

Надійшла 08.09.2010



ЧИТАЙТЕ  
журнал  
“Problems of Tribology”  
во всемирной сети  
INTERNET !

**<http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology/>**