

## АНАЛИЗ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ И ИХ КОМПОЗИТОВ

*Бирюков В.П., Якубовский А.А.*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
Москва, Россия*

**Ключевые слова:** фторполимеры, радиационная модификация, свободное абразивное зерно, морфология поверхности трения, абразивное изнашивание, износостойкость.

**Аннотация.** Работа посвящена определению влияния радиационной модификации и введения упрочняющей фазы (кокса 20%) во политетрафторэтиленовую (ПТФЭ) матрицу. Испытания на изнашивание свободным абразивным зерном выполняли по схеме «плоский образец (фторполимер, композиционный и радиационно – модифицированный фторполимер) – кольцевая образующая поверхность резинового диска» с введением в зону трения кварцевого песка с фракцией 0,2-0,6 мм при гравитационной его подаче с помощью дозатора. Нагрузка на образец составляла 15 Н, а продолжительность цикла 5 минут. Установлено, что ПТФЭ обладал наибольшей абразивной износостойкостью, за ним по убыванию следовали образцы с добавками кокса, радиационно-модифицированные по режиму (Б) и режиму (А).

## ANALYSIS OF ABRASIVE WEAR OF POLYMERS AND THEIR COMPOSITES

*Biryukov V.P., Yakubovsky A.A.*

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow*

**Keywords:** fluoropolymers, radiation modification, free abrasive grain, morphology of the friction surface, abrasive wear, wear resistance.

**Abstract.** The work is devoted to determining the effect of radiation modification and the introduction of a hardening phase (coke 20%) into a polytetrafluoroethylene (PTFE) matrix. Wear tests with free abrasive grain were performed according to the scheme "a flat sample (fluoropolymer, composite and radiation-modified fluoropolymer) – an annular forming surface of a rubber disc" with the introduction of quartz sand with a fraction of 0.2-0.6 mm into the friction zone with its gravitational supply using a dispenser. The load on the sample was 15 N a cycle duration of 5 minutes. It was found that PTFE had the highest abrasive wear resistance, it was followed in descending order by samples with coke additives, radiation-modified according to mode (B) and mode (A).

Образцы из полиэтилена [1] сверхвысокой молекулярной массы (СВМПЭ), были наполнены волластонитовыми волокнами в соотношениях 10:1, 15:1 и 20:1. Волластонитовые волокна были модифицированы методом комбинированной модификации силаном и титанатом. Испытания на абразивный износ образцов СВМПЭ и композитов были выполнены на машине трения при вращении диска, с использованием кварцевого песка в качестве абразивной среды. Было показано, что износ свободным абразивным зерном композитов зависит от содержания волокон, соотношения сторон волокон, размера частиц абразива и относительной скорости скольжения. Добавление волластонитовых волокон улучшило износостойкость композитов

при содержании волокон 20 мас.%. Увеличение соотношения сторон волокон было наиболее важным фактором в повышении стойкости к истиранию. Износостойкость композитов была повышена за счет комбинированной модификации волокон, но снижалась при увеличении размеров абразивных частиц и скорости скольжения. Абразивный износ композитов в основном обусловлен механизмами пластической деформации, микрорезания и микротрещинообразования.

В работе [2] были изучены характеристики абразивного износа для цилиндрических образцов из чистой эпоксидной смолы и химически обработанных эпоксидно-полимерных композитов с наполнителем из кокосового волокна диаметром 10 мм и длиной 32 мм. Характеристики износа оценивались по следующим двум параметрам: нормальной нагрузке и скорости скольжения при испытаниях на износ по схеме «штифт-диск (сталь с наклеенной абразивной бумагой из карбида кремния)». Было обнаружено, что износ снижается при увеличении скорости скольжения в обоих случаях на образцах из чистой эпоксидной смолы и эпоксидной смоле с наполнителем из кокосового волокна. Скорость истирания композита немного меньше по сравнению с чистыми эпоксидно-полимерными образцами.

В качестве полимера использовалась эпоксидная смола [3], а в качестве армирующего материала – волокно Kenaf в количестве 10-40 масс%. Результаты испытаний показали, что износостойкость увеличивается с увеличением армирования. Были обсуждены как адгезионные, так и абразивные свойства эпоксидно-полимерных композитов, армированных волокнами Kenaf. Эксперимент по адгезионному износу проводился с использованием машины по схеме трения "штифт-диск" при различной нормальной нагрузке и скоростях скольжения, в то время как эксперимент по абразивному износу проводился при различных размерах частиц абразива. Адгезионный износ проводился перпендикулярно направлению волокон, а абразивный износ выполняли по направлению волокон. Из результатов эксперимента следует, что 30%-ная массовая добавка волокон обладает наилучшей износостойкостью как при адгезионном, так и при абразивном износе по сравнению с остальными композитами.

В работе [4] было исследовано, как работает эпоксидный композит, армированный стеклотканью (G-E), при абразивном износе с наполнителями ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , графит и ценосферы летучей золы) и без них. В экспериментах были использованы нагрузки 20 и 40 Н на пути трения – 500, 1000, 1500 и 2000 м. Согласно результатам испытания на износ свободным абразивным зерном, удельные показатели износа композитов на основе G-E чувствительны к адгезии волокон и наполнителя к матрице. При всех параметрах испытаний для всех композитов G-E, содержащих твердые частицы, износ уменьшается в следующем порядке: G-E > Gr/G-E >  $\text{SiO}_2$ /G-E >  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /G-E > ценосфера летучей золы/G-E. Кроме того, было обнаружено, что удельный износ композитов G-E, наполненных ценосферой из летучей золы, ниже, чем композитов G-E, наполненных G-E и другими наполнителями. Удельная скорость износа

образцов с летучей золой, G-E при нагрузке 40 Н, и пути трения 2000 м снизилась на 38,7%. Согласно результатам сканирующей электронной микроскопии, причиной износа композитов были разрыв, вытягивание, истончение волокон и сеть микротрещин.

Для выполнения экспериментов были выбраны образцы фторполимеров политетрафторэтилена (ПТФЭ) (1), радиационно-модифицированные (ПТФЭ-РМ) (2), режим облучения – А, (3), ПТФЭ-РМ режим облучения – Б и ПТФЭ коксонаполненный с содержанием кокса 20% (Ф4К20) (4), диаметром 40 мм, высотой 8 мм. Триботехнические испытания выполняли на машине трения БХ4 по схеме «широкая сторона плоского образца (фторполимер) – образующая поверхность резинового диска» с гравитационной подачей кварцевого песка с размером частиц 0,2-0,6 мм с помощью дозатора. Нагрузка на образцы составляла 15 Н, время испытаний 5 минут.

На рисунке 1 приведена морфология поверхностей трения фторполимерных образцов после испытаний на изнашивание свободным абразивным зерном.

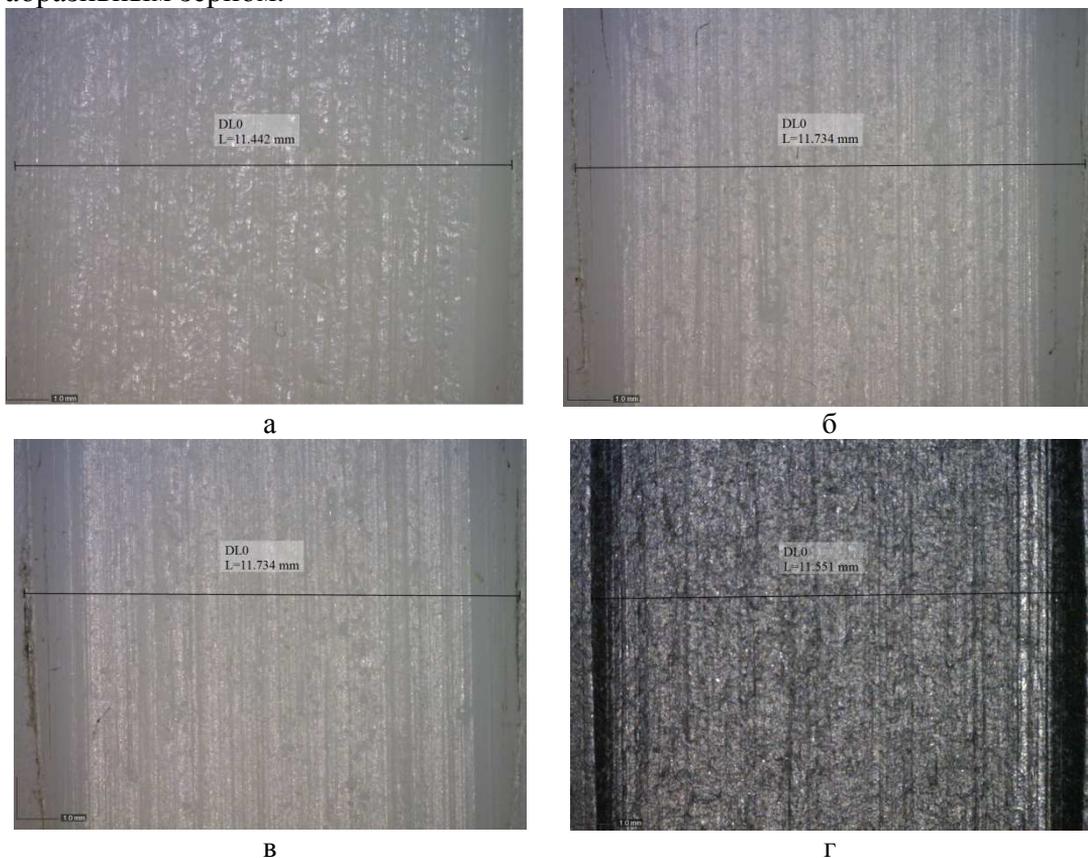


Рис. 1. Морфология поверхностей трения фторполимеров при испытании свободным абразивным зерном

Образцы ПТФЭ (рис. 1, а) имели риски в направлении скольжения абразива, как результат микро резания, и зоны с отделившимися фрагментами

фторполимера по усталостному механизму изнашивания. Поверхности трения радиационно-модифицированных образцов имели риски в направлении скольжения кварцевого песка (рис. 1, б, в). Образцы с содержанием кокса кроме рисков в направлении движения абразива имели углубления образованные отделением крупных частиц износа, образование которых возможно связано с ослаблением матрицы коксовыми частицами.

В таблице 1 приведены результаты испытаний на абразивное изнашивание свободным абразивным зерном.

Табл. 1. Потеря массы образцов при испытании свободным абразивным зерном

Номер образца	Масса до испытания, г	Масса после испытания, г	Потеря массы, г	Средняя потеря массы, г
1.1	24,7483	24,6398	0,1085	0,1044
1.2	25,0325	24,9337	0,0988	
1.3	24,6398	24,5340	0,1058	
2.1	25,9461	25,5730	0,3731	0,3554
2.2	25,3861	25,0359	0,3502	
2.3	25,5730	25,2302	0,3428	
3.1	25,4953	25,1285	0,3668	0,3441
3.2	25,2483	24,9297	0,3186	
3.3	25,1285	24,7817	0,3468	
4.1	23,6419	23,4489	0,193	0,1876
4.2	23,5636	23,3816	0,182	
4.3	23,4489	23,2610	0,1879	

Анализ результатов испытаний показал, что наибольшей абразивной износостойкостью обладали образцы чистого ПТФЭ, за ними по убыванию следовали образцы с добавками 20% кокса, радиационно-модифицированные по режимам (Б) и (А).

**Выводы.** Определено влияние радиационного модифицирования и добавок кокса на абразивную стойкость при испытаниях свободным абразивом. Установлено, что наибольшей стойкостью к абразивному износу обладали образцы чистого ПТФЭ, за ними по убывающей следовали образцы с добавками кокса, радиационно-модифицированные по режимам (Б) и (А).

#### Список литературы / References

1. Tong J., Ma Y., Arnell R.D., Ren L. Free abrasive wear behavior of UHMWPE composites filled with wollastonite fibers // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2006, vol. 37(1), pp. 38-45. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.05.023.
2. Khan A., Ahmad M.A., Joshi S., Said A.F. Al Said. Abrasive Wear Behavior of Chemically Treated Coir Fibre Filled Epoxy Polymer Composites // American Journal of Mechanical Engineering and Automation. 2014, vol. 1, pp. 1-5.

3. Venkategowda T., Manjunatha L.H., Anilkumar P.R. Adhesive and abrasive wear behavior of Kenaf long fiber reinforced epoxy composites // *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 45, pp. 150-155. doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.401.
4. Suresha B., Vidyashree S., Bettegowda H. Effect of Filler Materials on Abrasive Wear Performance of Glass/Epoxy Composites // *Tribology in Industry*. 2023, vol. 45, pp. 111-120. DOI: 10.24874/ti.1386.10.22.01.

<b>Бирюков Владимир Павлович</b> – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	<b>Biryukov Vladimir Pavlovich</b> – candidate of technical sciences, leading researcher
<b>Якубовский Антон Алексеевич</b> – младший научный сотрудник	<b>Yakubovsky Anton Alekseevich</b> – junior researcher
laser-52@yandex.ru	

*Received 17.02.2024*