

УДК 66.018.2

**УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ АНТИФРИКЦИОННОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ
ПОЛИИМИДА, АРМИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ**А.А. Богданов^{1,2}Научный руководитель: профессор, д.т.н. С.В. Панин^{1,2}¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634021

E-mail: aab65@tpu.ru**FATIGUE DURABILITY OF ANTIFRICTIONAL POLYIMIDE BASED
CARBON FIBERS REINFORCED COMPOSITE**A.A. Bogdanov^{1,2}Scientific Supervisor: Prof., Dr. S.V. Panin^{1,2}¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050²Institute of Strength Physics and Materials Science of the SB RAS, Russia, Tomsk, Academic str., 2/4, 634021E-mail: aab65@tpu.ru

Abstract. *The paper presents the results of fatigue tests of a solid lubricant antifrictional composite with 10% PTFE and 10% annealed carbon fibers in a PI matrix at various levels of strain. At the same level of stress, the compound "PI + 10 wt. % PTFE + 10 wt. % MCF" demonstrates a greater number of cycles to failure and deforms to a lesser value. It was found that the increase in fatigue life is greater in low cycle fatigue, when plastic deformation occurs in materials. The increase in fatigue life of the composite is therefore caused by the increase in yield stress.*

Введение. Полиимид (PI) является высокотехнологичным инженерным пластиком, обладающим превосходными механическими свойствами и термостойкостью. Это позволяет использовать его в жестких (harsh) условиях, в частности при высоких температурах и давлениях [1-3]. Однако ненаполненный полиимид при работе в парах трения испытывает значительный износ, что не позволяет использовать его в качестве антифрикционного материала. Композиты на основе полиимида, обладающие высокими механическими свойствами, могут быть сформированы путем введения армирующих волокон [4]. Добавление волокнистых наполнителей играет ключевую роль в обеспечении прочности, жесткости, термостойкости и износостойкости полимерных композитов. Волокна могут увеличивать прочность на растяжение, несущую способность, одновременно уменьшая напряжение сдвига и силу трения на поверхностях скольжения при трибонагрузении. Полимерные композиты, армированные углеродными волокнами, имеют более высокий модуль упругости, низкий коэффициент трения и лучшую износостойкость по сравнению с ненаполненным полимером при испытании относительно стальных контртел [5]. Материалы, армированные стекловолокном, обладают высокой механической прочностью и повышенной износостойкостью. Кроме того, стекловолокна в качестве

армирующего наполнителя доступны и относительно недороги. Однако для конструкционных применений также важна способность полимерных композитов выдерживать воздействие циклических знакопеременных нагрузок. Особенностью эксплуатации полимерных материалов, ввиду их вязкоупругой природы, является их склонность к ползучести. Разрушение при ползучести происходит при нагрузках ниже предела упругости. Скорость протекания ползучести зависит от уровня приложенных напряжений и температуры (в том числе определяемой частотой циклирования).

В связи с вышесказанным, целью работы является исследование сопротивления циклическому нагружению (усталости) антифрикционных полимерных композитов на основе полиимида, армированных углеродными волокнами и наполненных твердосмазочными частицами ПТФЭ (в условиях контроля деформации).

Экспериментальная часть. Для изготовления образцов использовали порошок термопластичного полиимида (ПИ) марки «Solver PI-1600» (КНР) со средним размером частиц 16 мкм. В качестве твердосмазочного наполнителя применяли порошок политетрафторэтилена (ПТФЭ) марки Флуралит (Россия) с размером частиц 3 мкм, а также короткие углеродные волокна (КУВ) марки Tenax (Германия) длиной 200 мкм и аспектным соотношением 30. Образцы для механических испытаний имели форму двойной лопатки. Методика изготовления образцов подробно описана в [6]. Статические испытания на разрыв проводились по стандарту ASTM D638. Усталостные испытания проводили в жёстких условиях (контроль деформации) по стандарту ASTM E606 в асимметричном режиме (растяжение) с отнулевым циклом (коэффициент асимметрии $R = 0$); форма нагружающего импульса – треугольная, частотой приложения нагрузки - 1-3 Гц (при различных уровнях амплитуды деформаций). Статические и усталостные испытания проводили на сервогидравлической испытательной машине Biss Nano 15kN (Индия).

Результаты. Изучение на РЭМ надмолекулярной структуры ненаполненного полиимида показало формирование однородной «ячеистой» структуры (размер ячеек порядка 15 мкм). В композите «ПИ+10 вес. % ПТФЭ+10 вес. % КУВ» характер надмолекулярной структуры в целом сохраняется, в то время как фиксируется преимущественная ориентация углеродных волокон в направлении прессования (анизотропия).

Проведены испытания на статическое растяжение ненаполненного ПИ и композита «ПИ+10 вес. % ПТФЭ+10 вес. % КУВ». Результаты измерения предела прочности, модуля упругости, величины удлинения при разрыве и условного предела текучести приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты статических испытаний на растяжение

Материал	σ_b (МПа)	$\epsilon_{\text{разр}}$ (%)	$\sigma_{0.1}$ (МПа)	$\epsilon_{0.1}$ (%)	E (ГПа)
ПИ	100±4	5,0±0,4	43±3	1,52±0,13	3,08±0,15
ПИ+10ПТФЭ+10УВ _{отгожж}	97±3	1,99±0,17	61±4	1,00±0,06	6,9±0,3

Результаты усталостных испытаний для ненаполненного ПИ и композита представлены в виде кривых усталости, рис.1, в логарифмических координатах: «размах деформации, отнесенный к деформации при пределе текучести – циклическая долговечность» и «амплитуда напряжения – циклическая долговечность», где амплитуды напряжений получены пересчётом из соответствующих уровней деформаций.

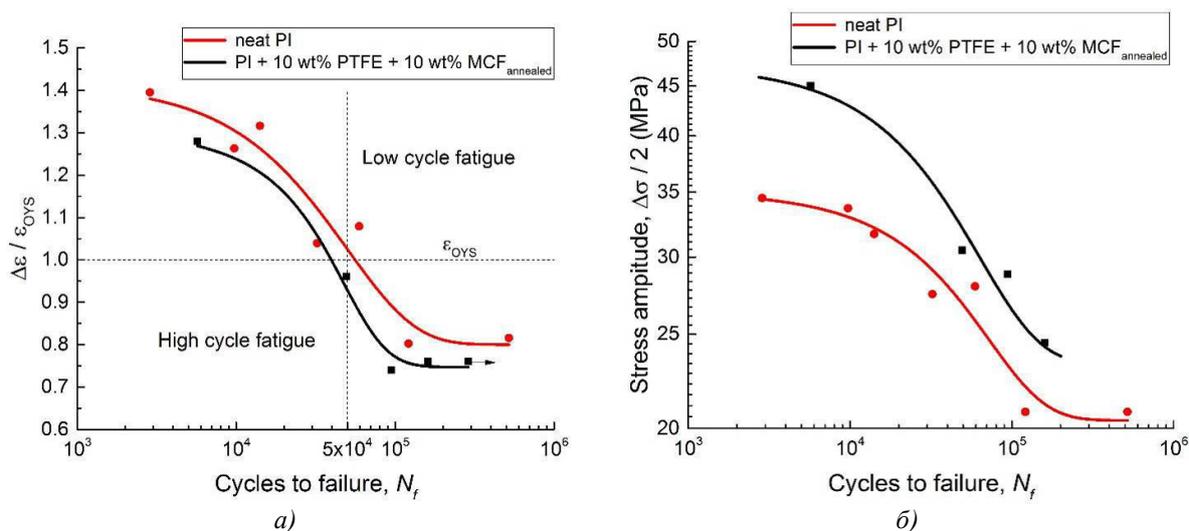


Рис. 1. Кривые усталости ненаполненного ПИ и композита «ПИ+10 вес. % ПТФЭ+10 вес. % КУВ»
а) по деформации в цикле, отнесенной к пределу текучести; б) по амплитуде напряжений

Закключение. Проведены испытания на статическое и циклическое растяжение ненаполненного ПИ, а также твердосмазочного композита «ПИ+10 % ПТФЭ+10 % отожженных УВ». Показано, что при таком же уровне напряжений композит демонстрирует большее число циклов до разрушения и деформируется до меньшего значения. Было обнаружено, что увеличение усталостной долговечности больше при малоцикловой усталости, когда в материалах происходит пластическая деформация. Следовательно, увеличение усталостной долговечности композита вызвано увеличением предела текучести.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Constantin C.P.; Aflori M.; Damian R.F.; Rusu R.D. Biocompatibility of Polyimides: A Mini-Review // Materials. – 2019. – Vol. 12., № 19. – P. 3166.
2. McKen L. W. 6 - Polyimides // The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers (Fourth Edition) Plastics Design Library. / edit. L. W. McKen. – William Andrew Publishing, 2019. – P. 167–184.
3. Wang Q., Zhang X., Pei X. Study on the synergistic effect of carbon fiber and graphite and nanoparticle on the friction and wear behavior of polyimide composites // Mater. Des. – 2010. – Vol. 31., № 8. – P. 3761–3768.
4. Samyn P., Schoukens G. Tribological properties of PTFE-filled thermoplastic polyimide at high load, velocity, and temperature // Polym. Compos. – 2009. – V. 30., № 11. – P. 1631–1646.
5. Jong Hyun Yoo, Eiss N. S. Tribological behavior of blends of polyether ether ketone and polyether imide // Wear. – 1993. – Vol. 162–164., № PART A. – P. 418–425.
6. Panin S.V. et al. The effect of annealing of milled carbon fibers on the mechanical and tribological properties of solid-lubricant thermoplastic polyimide-based composites // Polym. Eng. Sci. – 2020. – Vol. 60., № 11. – P. 2735–2748.