

РОЗДІЛ II. МЕХАНОХІМІЯ

УДК 678.01:539.53:539.21

А.И. Буря, канд. техн. наук

Е.А. Ерѐмина, аспирант

Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск, Украина

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ БРОНЗЫ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ АРОМАТИЧЕСКОГО ПОЛИАМИДА ФЕНИЛОН

О.І. Буря, канд. техн. наук

К.А. Єрѐміна, аспірант

Дніпродзержинський державний технічний університет, м. Дніпродзержинськ, Україна

ВПЛИВ ВМІСТУ БРОНЗИ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ АРОМАТИЧНОГО ПОЛІАМІДУ ФЕНІЛОН

Aleksandr Burya, PhD in Technical Sciences

Yekaterina Yeremina, PhD student

Dneprodzerzhinsk State Technical University, Dneprodzerzhinsk, Ukraine

EFFECT OF THE CONTENT OF BRONZE ON THE WEAR RESISTANCE OF THE AROMATIC POLYAMIDE PHENYLONE

В связи с возросшей актуальностью проблемы повышения износостойкости машин и механизмов, связанной с развитием их конструкций и увеличением долговечности, большое внимание уделяется разработке новых антифрикционных материалов. К таким материалам относятся разработанные металлополимеры на основе ароматического полиамида фенилон С-1 и мелкодисперсного порошка бронзы. Показано, что введение в фенилон частичек бронзы увеличивает его износостойкость в 1,8 раз в режиме трения без смазки и в 9,5 раз – при смазке маслом «Индустриальное-50».

Ключевые слова: ароматический полиамид, фенилон, бронза, дисперсный наполнитель, износостойкость, металлополимер.

У зв'язку з підвищенням актуальності проблеми підвищення зносостійкості машин і механізмів, пов'язаної з розвитком їх конструкцій і збільшенням довговічності, велика увага приділяється розробленню нових антифрикційних матеріалів. До таких матеріалів відносяться розроблені металлополімери на основі ароматичного поліаміду фенілон С-1 і дрібнодисперсного порошку бронзи. Показано, що введення у фенілон часточок бронзи збільшує його зносостійкість у 1,8 раза у режимі тертя без змащування і в 9,5 раза – при змащуванні маслом «Індустріальне-50».

Ключові слова: ароматичний поліамід, фенілон, бронза, дисперсний наповнювач, зносостійкість, металлополімер.

Much attention is paid to the development of new anti-friction materials, due to the increased urgency of the problem of increasing wear resistance machines and mechanisms related to the development of their designs and increase durability. Developed metallopolymers based on an aromatic polyamide phenylone C-1 containing a fine powder of bronze, refers to such materials. It is shown that introduction into phenylone bronze particles increases the wear resistance in 1,8 times in the mode of friction without lubrication and in 9,5 times – when lubricating oil „Industrial-50”.

Key words: aromatic polyamide, phenylone, bronze, particulate filler, wear resistance, metallopolymer.

Постановка проблеми. Исследованиями украинских ученых установлено [1], что только 10–15 % деталей машин и механизмов выходят из строя из-за недостаточной прочности, а остальные – из-за износа, поэтому задача повышения износостойкости движущихся деталей и их частей занимает ведущее место при решении проблемы увеличения надежности и долговечности современной техники. Перспективным направлением решения данной проблемы является изготовление деталей из специальных композиционных материалов, сочетающих высокие износостойкость и прочность с необходимыми конструкционными свойствами.

Анализ последних исследований и публикаций. В машиностроении широко применяются композиционные полимерные материалы с более высокими эксплуатационными свойствами, чем у исходных пластмасс. Свойства композиционных материалов можно изменять, подбирая компоненты с целью получить системы с необходимыми свойствами. Примером подобных систем могут служить полимеры, наполненные мелкодисперсными частицами металлов [2–5]. В таких металлополимерах в качестве свя-

зующего используют эпоксидные смолы, фторопласт, каучуки и другие полимеры, обладающие высокой технологичностью переработки в изделия и высоким комплексом физико-механических свойств. Однако при введении в пластические массы наполнителей они в значительной мере теряют свою прочность и ударную вязкость. Авторы отмечают, что наполнители распределяются в структуре материала неравномерно из-за агрегации частиц, что вызывает перенапряжение и приводит к преждевременным поломкам изделий из них.

Интенсивное развитие современной техники содействовало расширению применения тепло- и термостойких полимеров, которые имеют высокие деформационно-прочностные свойства, длительную работоспособность в широком интервале температур, стойкость к влиянию агрессивных сред. Ароматический полиамид фенилон – один из перспективных термостойких полимеров, который работоспособен до температуры 533 К и уступает по прочности только лучшим маркам армированных пластиков, что вызывает к нему особый интерес как к связующему для металлополимеров. Однако переработка фенилона в изделия вызывает сложности из-за повышенной жесткости макромолекул и сильного межмолекулярного взаимодействия, которые сужают температурный интервал его переработки и вызывают необходимость прикладывания больших давлений (до 100 МПа при горячем прессовании), что приводит к ограничению размеров изделий.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В связи с вышеизложенным становится очевидным, что для улучшения прочностных свойств металлополимеров есть два пути. Первый – использование в качестве связующего, сложноперерабатываемого в изделия полимера с максимально высокими прочностными характеристиками. В этом случае необходимо разрабатывать новые методы и технологии переработки полимеров в изделия, которые позволили бы облегчить трудоемкость технологического процесса. Второй – улучшение равномерности распределения наполнителя в полимерной матрице, что так же требует поиска новых способов и технологий.

Цель статьи. Главной целью этой работы является разработка металлополимеров с повышенными антифрикционными свойствами и изучение влияния режимов трения и содержания наполнителя на их износостойкость.

Изложение основного материала. Рассмотрим двухкомпонентные системы на основе термостойкого полимера фенилон С1 (ТУ 6-05-221-101-71) и мелкодисперсного порошка бронзы (Бр О5Ц5С5, ГОСТ 613-79), основные свойства которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные свойства пресспорошков

Символ	Цвет пресспорошка	Плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Температура плавления, К	Размер частиц, мкм
С-1	розовый	1350	200 – 300	543*	35-50
Бр	золотистый	8800	3700 – 4700	1203 – 1373	60-150

Примечание: *температура размягчения по Вика.

В связи с трудоемкостью переработки ароматического полиамида в изделия нами был разработан оригинальный метод его переработки [6]. Пресскпозиции состава фенилон С-1 + 5 – 20 масс. % мелкодисперсного порошка бронзы изготавливали путем смешивания компонентов во вращающемся электромагнитном поле в присутствии неравноосных ферромагнитных частиц, за счет вращения которых металлический наполнитель равномерно распределялся в полимерной матрице. После смешивания частицы извлекались из состава композиции магнитной сепарацией. Приготовленные таким образом смеси таблетировали на гидравлическом прессе при комнатной темпера-

туре и давлении – 4 МПа, после чего оттаблетированные образцы сушили в термошкафу при температуре 473–523 К, т. к. переработка невысушенного фенилона ухудшает его прочностные характеристики и приводит к поверхностным дефектам. Высушенные заготовки перерабатывали в образцы (10x8 мм) методом компрессионного прессования при температуре 593 К и давлении – 4 МПа, выдержка при этой температуре составляла 10 минут.

Исследование трибологических свойств в режиме трения без смазки определяли на дисковой машине трения (диск из стали 45, термообработанной до твердости 45-48 HRC, имеющий шероховатость поверхности $Ra = 0,16-0,32$ мкм) [7]. Путь трения в опытах составлял 1000 м. Удельная нагрузка – 0,6 МПа, скорость скольжения – 1 м/с.

Испытания при смазке маслом «Индустриальное-50» проводили на машине МИ-1М по схеме ролик – колодочка (ролик изготовлен из стали 45, термообработанной до твердости 45–48 HRC; колодочка – из композитов). Износ образцов определяли по потере массы. До взвешивания (аналитические весы, погрешность +0,0002 г) осуществляли одинаковую предварительную приработку образцов.

Тонкую структуру поверхности трения изучали с помощью микроскопа УЭМВ-100, используя метод реплик. Получали желатиновый отпечаток с поверхности, на который наносили углеродную реплику методом термического распыления угольных электродов в вакууме (10-5 мм рт. ст. на установке ТНП-1). Оттенивание реплики осуществляли платиной.

Микроструктуру поверхности трения изучали с помощью оптического микроскопа NEOFOT 32.

Исследования показали, что в процессе трения, в условиях механических и тепловых воздействий, наблюдаются изменения в морфологии полиамидной матрицы в зоне контакта. Свидетельством тому являются электронно-микроскопические снимки (рис. 1).

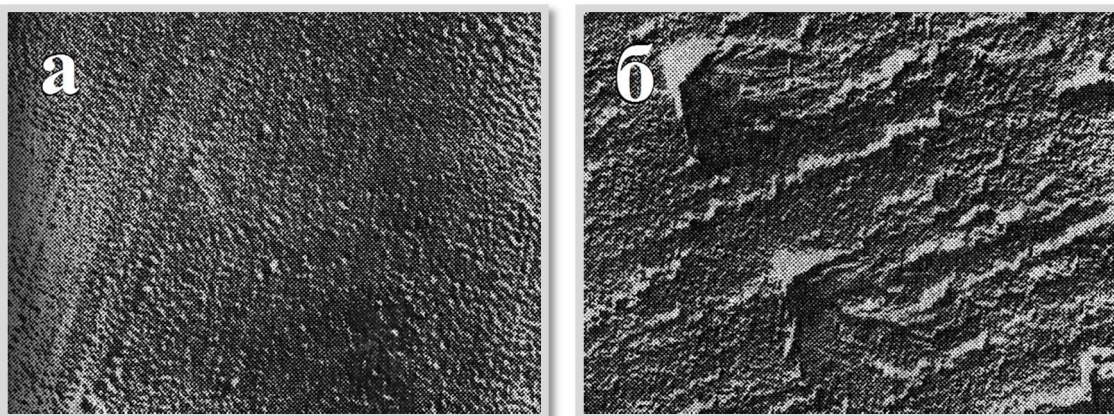


Рис. 1. Электронно-микроскопические снимки с поверхности полиамида до (а) и после (б) истирания без смазки ($P = 0,6$ МПа, $v = 0,3$ м/с). Увеличение $\times 33\ 000$ (а), $\times 12\ 000$ (б)

Если для поверхности образца полиамида, не подвергавшегося испытанию на износ, характерны глобулярные образования, то после испытаний отчетливо проявляются цепочечные структуры и зоны, деформированные по направлению трения, которые можно рассматривать как микроочаги схватывания. Образование их обусловлено дискретностью касания контактирующих микровыступов, приводящего к механическому разрушению полимера под действием тангенциальной силы при истирании. Чтобы избежать деформации фенилона в зоне трения, в него был введен мелкодисперсный порошок бронзы в количестве 5–20 масс. %.

Наполненные полимеры относятся к многофазным материалам. Их прочностные свойства во многом зависят от прочности граничного слоя. Большое значение имеет фактор химической совместимости наполнителя и матрицы, однако не менее значимым фактором является равномерность распределения наполнителя в связующем. Как известно [4], введение в полиамиды наполнителей ведет к ухудшению физико-механических свойств полимеров из-за агрегации частиц, связанной с различиями их природы. Однако наполнители способны влиять на процессы структурирования полиамида при формировании композиции из расплава полимера. В присутствии наполнителя наблюдается тенденция к образованию упорядоченных структур, т. к. они выступают в качестве инициаторов образования зародышей кристаллизации. Формирование более совершенных структур упрочняет композиционный материал и тормозит развитие деструктивных процессов в матрице при истирании, что повышает его износостойкость [8].

Благодаря разработанному оригинальному методу переработки полиамида в изделия нам удалось достичь равномерного распределения наполнителя в полиамидной матрице, о чем свидетельствует рис. 2, а.

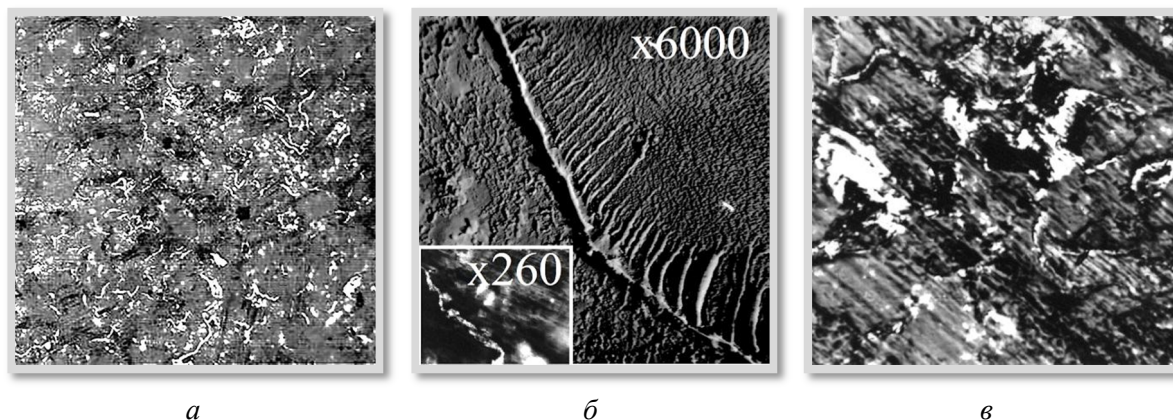


Рис. 2. Микроструктура композитов на основе полиамида: а – распределение мелкодисперсного порошка бронзы Бр О5Ц5С5 в полиамидной матрице (содержание наполнителя – 15 масс.%, увеличение – $\times 100$); б – надмолекулярная структура связующего на границе раздела (увеличение – $\times 6000$) и фрагмент непрерывной пространственной сетки из частиц бронзы (увеличение – $\times 260$); в – сегрегация частиц наполнителя (увеличение – $\times 100$)

Анализ микрофотографий показывает, что частички бронзы уже при содержании 10 масс.% образуют в объеме непрерывную пространственную сетку (рис. 2, б). Этому, возможно, способствует, прежде всего, строение частичек бронзы, имеющих чрезвычайно развитую волокнистую структуру. При этом с увеличением процентного содержания более 15 масс.%, наблюдается сегрегация частиц наполнителя (рис. 1, в), что, как известно [8], отрицательно сказывается на физико-механических свойствах композиций.

Поверхности трения металлополимеров имеют бороздчатую структуру, образующуюся в результате пропахивания (рис. 3). На поверхности трения не наблюдаются микротрещины, что свидетельствует о пластичном разрушении материала. Так же на поверхности трения видны следы схватывания в виде областей материала, смещенных по направлению трения, но их значительно меньше, чем у чистого фенилона, причем, чем выше степень наполнения, тем меньше их становится. В процессе трения металлополимеров происходит образование частиц изнашивания. Частицы износа представляют собой мелкодисперсный порошок и по цвету близки к цвету исходной композиции, морфология их характерна для хрупкого разрушения материала.

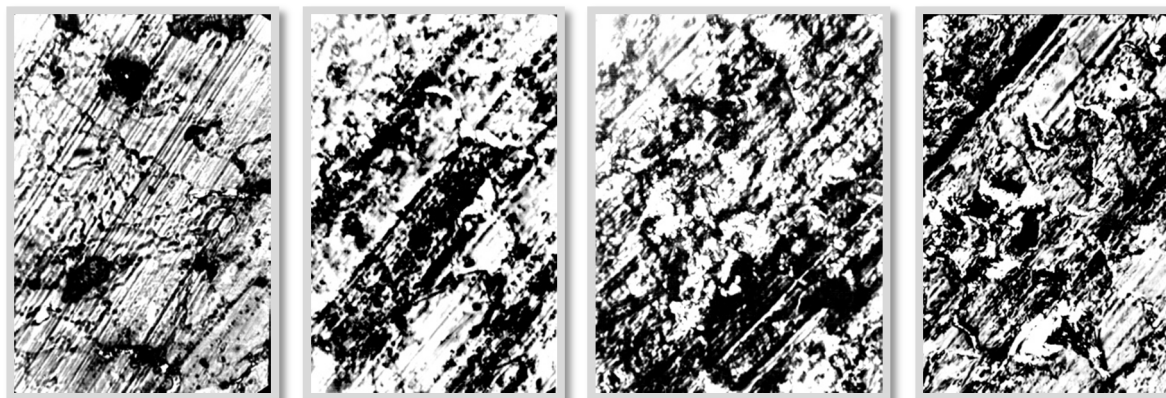


Рис. 3. Поверхности трения металлополимеров, содержащих: а – 5; б – 10; в – 15; г – 20 масс.% наполнителя (увеличение – $\times 100$)

Результаты изучения влияния процентного содержания наполнителя и условий трения на износостойкость композиций приведены в табл. 2.

Таблица 2

Износ полиамида и металлополимеров на его основе

Содержание наполнителя, масс.%	Износ, мкм/км в условиях		
	без смазки $P = 0,6$ МПа, $v = 1$ м/с, $S = 1$ км	смазки маслом при нагрузке, МПа	
		7,5	12,5
–	39,5	106,0	160,5
5	29,8	14,9/7,11	42,8
10	23,8	11,9	34,2
15	22,4	11,2/9,46	32,3
20	28,0	14,0	40,4

Как видно из табл. 2, композиции, содержащие в качестве наполнителя бронзу, характеризуются значительно меньшим износом, чем чистый полиамид. Введение наполнителей способствует структурированию системы и подавляет развитие деструктивных процессов. Бронзовый наполнитель, имея плоские частички, в полимере выстраивается в виде непрерывной пространственной сетки, через которую отводится тепло с поверхности трения. Так, у чистого фенилона температура на поверхности трения при смазке маслом составляет 358 К, а у композиции, содержащей 15 % бронзы – 321 К, это, в свою очередь, приводит к увеличению износостойкости композита за счет лучшей диссипации тепла из зоны трения.

С другой стороны, присутствие химически отличного наполнителя в полиамиде увеличивает пористость композиций на границе раздела фенилон – бронза. Поры, как известно, оказывают весомое влияние на трибологические свойства композиций. Это можно объяснить следующим образом. Наличие в материалах поверхностных пор обуславливает свободные объемы, которые играют двойную роль при испытаниях на износостойкость. Во-первых, эти поры заполняются смазкой, обеспечивая более легкое скольжение в паре трения; во-вторых, в них перемещаются поверхностные частицы износа, удаляемые контртелом в процессе испытаний. Закрытые поры внутри материалов являются своеобразными релаксаторами напряжений, поскольку обладают значительно большей сжимаемостью, чем основной материал. Поэтому поры внутри материала играют роль демпферов, обеспечивающих длительную износостойкость [9].

Таким образом, при смазке маслом картина кардинально меняется и износостойкость металлополимеров увеличивается. Так, при трении без смазки введение бронзы

увеличивает износостойкость фенилона в 1,3–1,8 раз, а при смазывании маслом – в 7–9,5 раз (при нагрузке 7,5 МПа) и в 3,8 – 5 раз (при нагрузке 12,5 МПа)

Выводы и предложения. Результаты исследований процесса износа разработанных металлополимеров на основе ароматического полиамида фенилон и мелкодисперсного порошка бронзы O5Ц5C5 указывают на сложный процесс механохимических превращений, протекающих при внешнем трении композитов. Под действием деформационных и развивающихся тепловых нагрузок происходит изменение морфологической структуры поверхности в контактной зоне, а также деструкция макромолекул рабочего слоя полимера. Введение в качестве наполнителя порошка бронзы возвращает устойчивость поверхностным слоям полимера за счет структурирования полимера и отвода тепла с поверхности трения, что значительно улучшает его антифрикционные свойства. В ходе исследований было установлено оптимальное содержание наполнителя. При введении 15 масс.% бронзы в фенилон износостойкость системы увеличивается в 1,8 раз при трении без смазки и в 9,5 раз при смазывании маслом. Таким образом, полученные металлополимеры могут быть использованы в узлах трения машин и механизмов.

Список использованных источников

1. *Костецкий Б. И.* Трение и износ деталей машин / Б. И. Костецкий // Труды I научно-техн. конференции. – М., 1956. – С. 149–153.
2. *Оптические* характеристики композита, полученного имплантацией ионов серебра в полиэтилентерефталат / [Ю. А. Бумай, В. С. Волобуев, В. Ф. Валеев и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79, № 5. – С. 781–787.
3. *Андреев М. Н.* Газоструйный метод осаждения металлических наночастиц во фторполимерную матрицу / М. Н. Андреев, И. С. Беспалов, А. И. Сафонов // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – № 3. – С. 383–387.
4. *Стукач А. В.* Исследование свойств металлополимерных и фуллеренсодержащих композитов при трении / А. В. Стукач // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2010. – № 13. – С. 10–19.
5. *Жариков В. В.* Безотходная технология производства высоконаполненных металлополимерных композитных материалов / В. В. Жариков, Н. А. Чайников, И. А. Анкудинова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2003. – Т. 9, № 3. – С. 503–514.
6. *Буря А. И.* Разработка способа получения и исследование свойств армированных пластиков / А. И. Буря, О. И. Пилипенко, Т. И. Рыбак // VI Konferencja Naukowo-Techniczna [“Nowe kierunki modyfikacji i zastosowan tworzyw sztucznych”], (Rydzyzna, 15–17 мая 1995 г.). – 1995. – С. 44–53.
7. *Трофимович А. Н.* Машина для изучения свойств полимерных материалов / А. Н. Трофимович, О. Г. Приходько, И. А. Фомичев // Машиностроитель. – 1970. – № 3. – С. 43–45.
8. *Ерёмина Е. А.* Металлополимеры – перспективные конструкционные материалы современности / Е. А. Ерёмина, А. И. Буря // Композитные материалы : Международный научно-технический сборник. – 2015. – Т. 9, № 1. – С. 3–20.
9. *Кульментьев А. И.* Структура и свойства нанокристаллических покрытий из нитрида титана, полученных при непрерывном осаждении или ионно-плазменной имплантации / А. И. Кульментьев, О. П. Кульментьева, А. М. Махмуд // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 2 (24). – С. 36–39.