

**А.Н. КАРАПЕТЯН, К.В. ОГАНЕСЯН, Н.Г. МЕЛИКСЕТАН,
В.В. САРОЯН**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРА НА СТАРТОВЫЙ ПРОЦЕСС В
ПОЛИМЕР-ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОПОДШИПНИКАХ
СКОЛЬЖЕНИЯ**

Приводятся результаты исследования влияния зазора на процесс трения в стартовой стадии в полимер-полимерных микроподшипниках скольжения. Для исследуемых пар сухого трения найдены оптимальные значения диаметрального зазора, обеспечивающие минимальные значения коэффициента трения и износа сопряженных деталей. Рассмотрено влияние внешних факторов: статической нагрузки, скорости скольжения, а также времени предварительного контакта, на трибологические свойства пары трения полимер-полимер.

Ключевые слова: зазор, статическое трение, микроподшипник, коэффициент трения, износ.

Введение. В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что пары трения полимер-полимер прочно вошли в современную технику и широко применяются в узлах трения точных приборов и миниатюрных микроэлектромеханических устройствах (МЭМУ) [1-4].

Пары трения полимер-полимер в основном используются в качестве материалов для микроподшипников скольжения (втулки, валики). Следует отметить, что применение многих промышленных термопластичных полимерных материалов неоптимизировано, и трибологическое поведение полимер-полимерных микроподшипников скольжения недостаточно изучено [5, 6]. В частности, важное значение имеет приработочный процесс микроподшипников, когда происходит предварительное смещение при переходе от статического трения к кинетическому. В работах [7,8] показано, что период приработки, когда статическая сила трения постоянно увеличивается, может привести к критическим ситуациям: ведущее звено в устройстве не может привести в движение ведомое из-за очень высокого сопротивления трению. Эта проблема очень важна в МЭМУ полимерных подшипников, в которых поверхностные силы и реологические свойства материалов играют значительную роль. Время статического контакта трущихся материалов до скольжения существенно влияет на статическую силу трения при переходе от покоя к скольжению. Работоспособность и долговечность микроподшипников скольжения из пар

трения полимер-полимер во многом зависят от трибологических свойств и размерной точности деталей сопряжения, а также от значения оптимального диаметрального зазора подшипника (в сопряжении с валиком) и точности сохранения допустимого зазора и натяга при эксплуатации и хранении. Поэтому исследование влияния зазора на стартовый процесс, когда происходит переход статического трения на кинетическое, является весьма важным и актуальным для МЭМУ полимерных микроподшипников.

Цель работы - исследование влияния диаметрального зазора на статическое трение и износ в полимер-полимерных микроподшипниках скольжения.

Методика эксперимента. С целью выявления роли различных эксплуатационных условий при проектировании микроподшипников скольжения и влияния диаметрального зазора на характеристики зависимости коэффициента трения от времени скольжения были проведены серии фрикционных испытаний полимер-полимерных подшипников в период приработки.

Экспериментальные исследования перехода от статического трения к кинетическому были проведены в лабораторных условиях на трибометре, детально описанном в работе [6]. Трибологические свойства материалов оценивались при следующих режимах испытания: статическая нагрузка во время покоя, перед началом движения (поворота валика-приложения движущего момента вращения), изменялась в пределах $F=8...30\text{ Н}$, скорость скольжения - $V=4,3...101,6\text{ мкм/с}$, а время предварительного контакта под статической нагрузкой (время стоянки перед пуском) - $t=5...900\text{ с}$. Цикл испытаний при исследуемых режимах составлял 10 час.

Для исследований были использованы различные по физико-механическим свойствам, химическому составу и строению полимерные материалы, широко применяемые в полимер-полимерных трибосопряжениях (табл.1).

Таблица 1

Механические характеристики материалов для микроподшипников скольжения

Материал (торговая марка)	Поверхностная свободная энергия, γ , МДж/м ²	Модуль упругости, E_p , МПа	Микротвердость, НВ, МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Напряжение ссопротивления сдвигу, σ_c , МПа
РА6 (Гарнамид Т-27)	46	1600	75	0,35	40
ПК (Поликарбонат)	40	2400	140	0,43	55
ПОМ (Дельрин 500)	38	2300	160	0,34	65
АБС пластики	45	2500	150	0,38	45

Результаты исследований и их обсуждение. Исследуемый микроподшипник скольжения и полученные в результате экспериментальных исследований характеристики кривой, описывающей переход от статического трения к кинетическому, представлены на рис.1 и 2. Установлено, что процесс предварительного смещения подшипников сопровождается значительным увеличением коэффициента трения. Скачок коэффициента трения Δf и время предварительного смещения t_r (от момента начала вращения валика до начала скольжения валика по втулке - переход к кинетическому трению от трения покоя) можно рассматривать как принципиальные фрикционные характеристики рабочего периода.

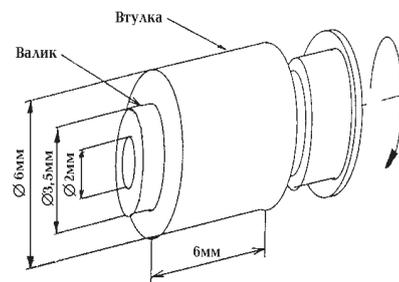


Рис.1. Исследуемый полимер-полимерный микроподшипник

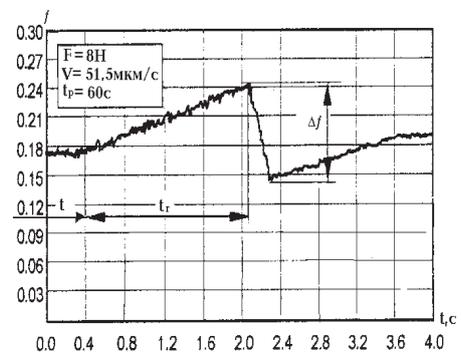


Рис.2. Пример типичного графика зависимости коэффициента трения от времени перехода от стационарного контакта к скольжению: t - время предварительного контакта, t_r - время предварительного смещения, Δf - скачок коэффициента трения во время пуска

С этой целью были изготовлены образцы (всего 1000 шт): валики из поликарбоната (**ПК**) и полиоксиметилена (**ПОМ**), а втулки - из полиамида 6 (**ПА6**) и сополимера акрилонитрила, бутадиена и стирола (**АБС**). Исследовались следующие три пары трения: **ПК-ПА6**, **ПОМ-ПА6**, **ПОМ-АБС**. Для этих пар трения определялись максимальный и минимальный диаметральные зазоры (табл.2), а также распределение количества пар трения от зазора (рис. 3), имеющих одинаковые размеры сопряжения. Диаметры втулок и валиков измеряли в двух взаимно перпендикулярных направлениях на инструментальном микроскопе УИП-21 с точностью до $0,1 \cdot 10^{-6}$ м. Величину весового износа определяли на аналитических весах типа ВЛР-200 с точностью до $0,1 \cdot 10^{-6}$ г.

Таблица 2

Диаметральный зазор для пар трения

Пара трения	Номинальный диаметр, мм	
	втулок: $\Phi=3,600$ мм	валиков (цапфы): $\Phi=3,450$ мм
	Диаметральный зазор, мм	
	максимальный	минимальный
ПК-ПА6	$\Delta=3,609-3,466=0,143$ мм	$\Delta=3,562-3,476=0,086$ мм
ПОМ- ПА6	$\Delta=3,600-3,436=0,164$ мм	$\Delta=3,561-3,454=0,105$ мм
ПОМ- АБС	$\Delta=3,594-3,436=0,158$ мм	$\Delta=3,572-3,456=0,116$ мм

Как видно из рис.3, между количеством сопряжений и зазором существует квадратическая зависимость. Это экспериментально обнаруженная зависимость для исследованных подшипников. Зависимость коэффициента трения от зазора представляет собой сложную функцию адгезионных и механических свойств контактирующих поверхностей. Для пар трения **ПК-ПА6**, **ПОМ-ПА6**, **ПОМ-АБС** максимальное количество пар трения, имеющих одинаковые размеры сопряжения, наблюдается соответственно при зазорах 118, 134 и 142 мкм.

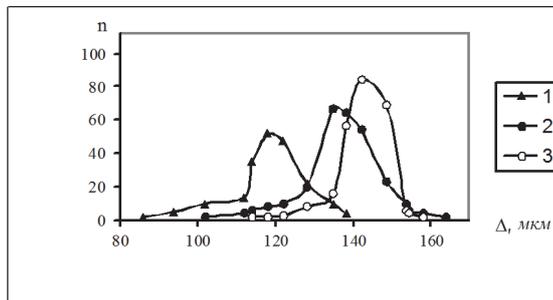
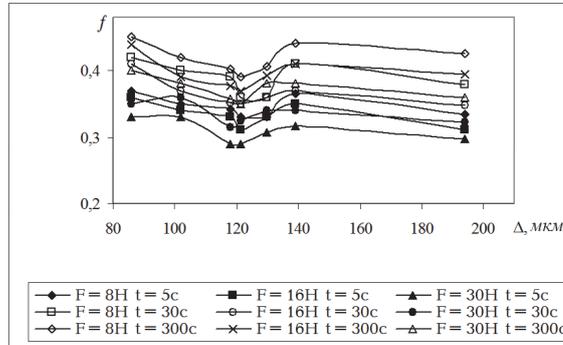


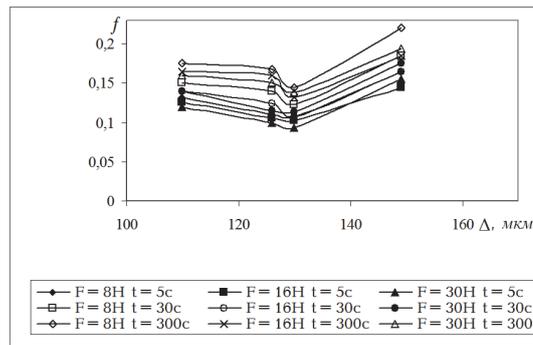
Рис.3. Функция распределения количества сопряжений пар трения от диаметрального зазора микроподшипников: 1- ПК- ПА-6, 2 - ПОМ- ПА6, 3 - ПОМ- АБС

Результаты влияния диаметрального зазора на стартовый процесс, когда происходит переход статического трения на кинетическое для исследуемых пар трения, приведены на рис.4. Характерной особенностью рассматриваемых зависимостей является то, что для исследуемых пар трения существуют оптимальные значения зазоров, при которых обеспечиваются минимальные значения коэффициентов трения. Для исследуемых пар трения **ПК-ПА6**, **ПОМ-ПА6**, **ПОМ-АБС** минимальное значение коэффициента трения наблюдается соответственно при зазорах 118, 134 и 142 мкм, что совпадает с максимальным количеством пар трения, имеющих одинаковые размеры сопряжения, и является важным критерием для функционирования МЭМУ. Полученные зави-

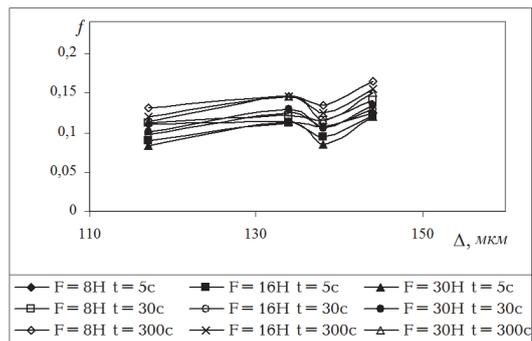
симости коэффициента трения от зазора позволяют определить оптимальные зазоры, обеспечивающие минимальные значения коэффициентов трения.



а)



б)



в)

Рис. 4. Зависимости статического коэффициента трения от диаметрального зазора в микроподшипниках скольжения для следующих пар трения: **ПК - ПА6** (а); **ПОМ - ПА6** (б); **ПОМ - АБС** (в)

Для сравнительной оценки трибологических свойств исследуемых полимер-полимерных микроподшипников скольжения в табл. 3 приведены обобщенные значения коэффициентов трения и весовых износов при оптимальных диаметральных зазорах. Как видно из таблицы, наилучшими трибологическими свойствами обладает пара трения **ПОМ - АБС**.

Таблица 3

Трибологические свойства исследуемых пар трения при оптимальных зазорах и при $F=30H$, $t=60$ с и $V=51,9$ мкм/с

Пара трения	Оптимальный зазор, мкм	Коэффициент трения		Весовой износ, ε	
		статический	кинетический	штулка	валик
ПК - ПА6	118	0,29-0,40	0,26-0,27	0,0074	0,0058
ПОМ - ПА6	134	0,100-0,145	0,09-0,102	0,0072	0,0055
ПОМ - АБС	142	0,098-0,135	0,080-0,095	0,0042	0,0032

Известно [7, 8], что на статический коэффициент трения существенное влияние оказывают статическая нагрузка, скорость скольжения и время предварительного контакта. В связи с этим определенный интерес представляет исследование статического коэффициента трения в широком нагрузочном интервале.

Для пар трения **ПК-ПА6** ($\Delta=0,086$ мкм) на рис. 5-7 приведены двумерные зависимости коэффициента трения: от статической нагрузки и времени предварительного контакта при разных скоростях скольжения (рис. 5), от скорости скольжения и времени предварительного контакта при разных нагрузках (рис. 6), а также от нагрузки и скорости скольжения при разных временах предварительного контакта (рис. 7). Такая зависимость хорошо суммирует влияние нагрузки и скорости скольжения, а также времени стоянки перед пуском на коэффициент трения пары полимер-полимер. Так, повышение скорости скольжения от 4,3 до 101,6 мкм/с (рис.5) при исследуемых нагрузках и временах стоянки перед пуском приводит к существенному повышению коэффициента трения. Повышение нагрузки от 8 до 30 Н (рис. 6) при исследуемых скоростях скольжения и временах стоянки перед пуском приводит, наоборот, к существенному снижению коэффициента трения. Повышение времени предварительного контакта от 5 с до 900 с (рис.7) приводит к значительному повышению времени предварительного смещения и значения коэффициента трения.

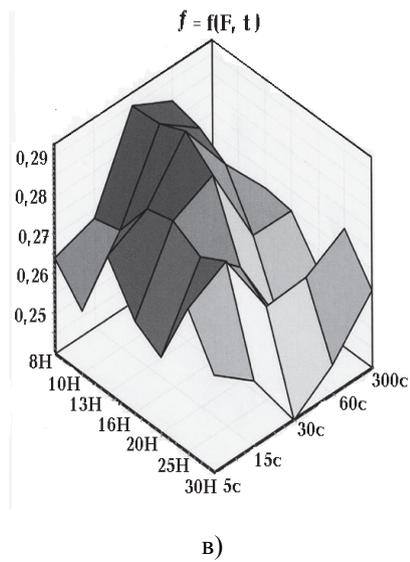
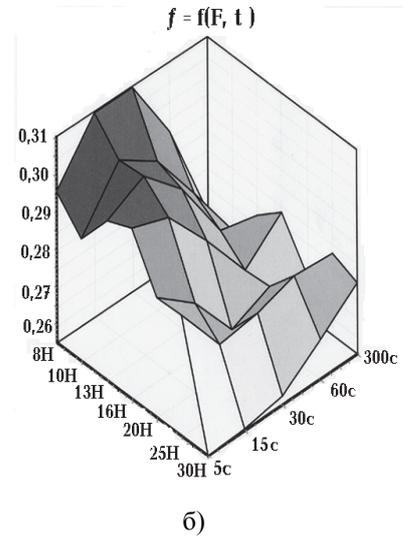
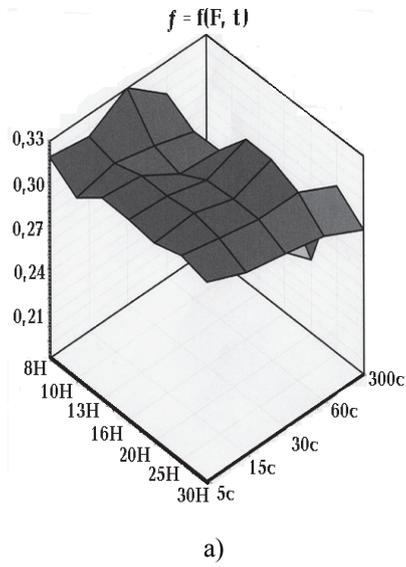
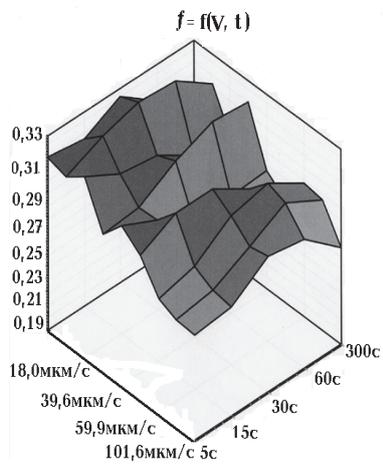
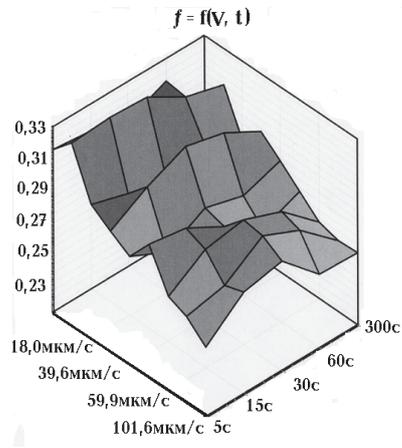


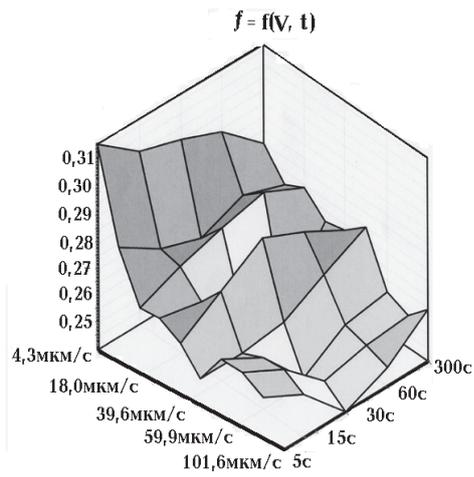
Рис. 5. Зависимость коэффициента трения f от нагрузки и времени предварительного контакта t при разных скоростях скольжения: 4,3 мкм/с (а), 51,5 мкм/с (б), 101,6 мкм/с (в)



a)



б)



в)

Рис. 6. Зависимость коэффициента трения f от скорости скольжения V и времени предварительного контакта t при разных нагрузках: 8 Н (а), 16 Н (б), 30 Н (в)

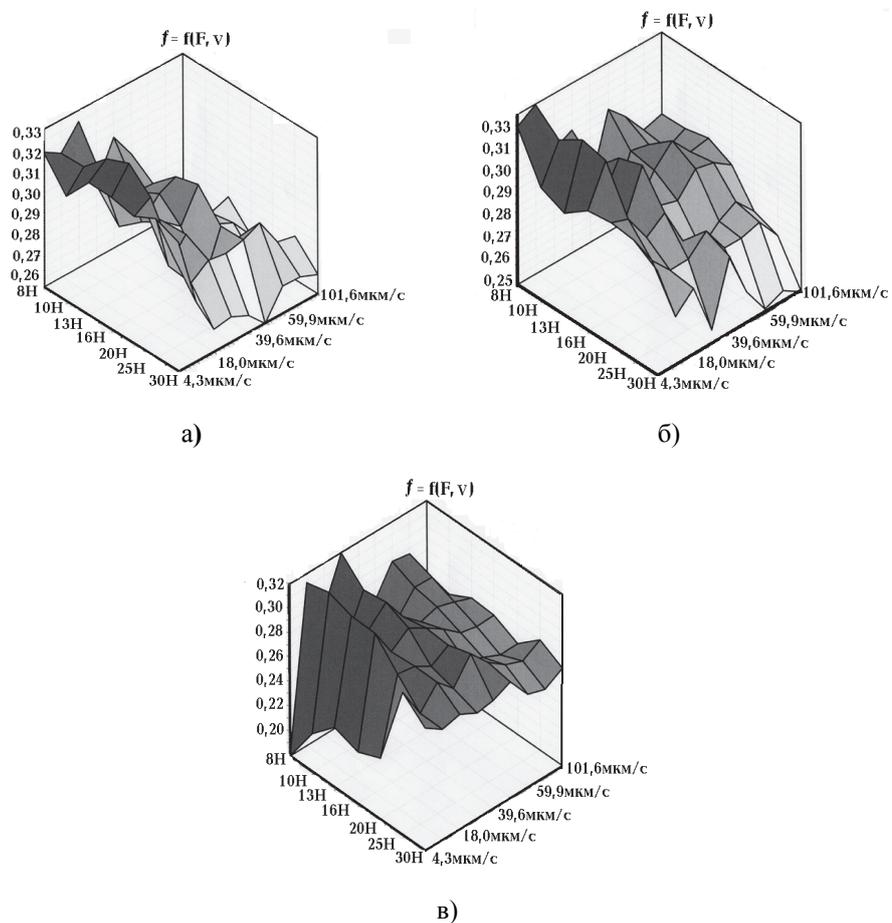


Рис.7. Зависимость коэффициента трения f от нагрузки и скорости скольжения при разных временах предварительного контакта t : 5 с (а), 30 с (б), 300 с (в)

Заключение. Проведенные исследования дополняют наши представления о влиянии зазора на стартовый процесс полимер-полимерных микроподшипников скольжения, когда происходит переход статического трения на кинетическое. Для исследуемых пар сухого трения найдены оптимальные значения диаметрального зазора, обеспечивающие минимальные значения коэффициента трения и износа сопряженных деталей. Установлено существенное влияние нагрузки и скорости скольжения, а также времени предварительного контакта на трибологические свойства пары трения полимер-полимер.

Работа выполнена в рамках научной темы “Создание и исследование деталей машин и композиционных материалов на полимерной основе с использованием местного сырья и минералов” базовой проблемной лаборатории по трибологии НПУА за 2018г. при финансовой поддержке Комитета по науке МОН РА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sundararajan S., Bhushan B.** Micro/nanotribological studies of polysilicon and SIC films for MEMS applications // *Wear.* -1998.-217.- P.251-261.
2. Трение и износ материалов на основе полимеров / **В.А. Белый, А.И. Свириденко и др.** - Минск: Наука и техника, 1976.- 431с.
3. **Rymuza Z.** Tribology of Miniature Systems.- Elsevier, Amsterdam, 1989. – 565p.
4. **Rymuza Z., Kusznierevicz Z., Manturzyk G.** Testing miniature, in particular polymer- polymer // *Wear.* – 1994. – 174. - P. 39-46.
5. **Blau P.J.** Friction Science and Technology.- Marcel Dekker, New York, 1996. - 339p.
6. Static friction and adhesion in polymer-polymer microbearings / **Z. Rymuza, Z. Kusznierevicz, T. Solarski, et al** // *Wear.* – 2000. -238. - P. 56-69.
7. **Pogolian A.K., Karapetyan A.N., Hovhannisyan K.V.** Development of composite antifriction materials based on the thermoplastic polymers // *Tribologia.* –2005. - N 5. – P. 111-119.
8. **Pogolian A., Hovhannisyan K. and Isajanyan A.** Polymer Friction Transfer (FT) // *Encyclopedia of Tribology.* - N. Y.: Springer Scie, 2013. - P. 2585-2592.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 19.04.2019.

**Ա.Ն. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Կ.Վ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ն.Գ. ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ,
Վ.Վ. ՍԱՐՈՅԱՆ**

**ՊՈԼԻՄԵՐ -ՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ ՍԱՀՔԻ ՄԻԿՐՈԱՌԱՆՑՔԱԿԱԼՆԵՐՈՒՄ
ԲԱՑԱԿԻ ԹՈՂԱՐԿՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՎՐԱ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Ներկայացված են պոլիմեր-պոլիմերային սահքի միկրոառանցքակալներում բացակի թողարկման գործընթացի վրա ազդեցության ուսումնասիրության արդյունքները: Հետազոտվող չոր շփման զույգերի համար գտնված են տրամագծային բացակի օպտիմալ արժեքները, որոնք ապահովում են շփման գործակցի և մաշման փոքրագույն արժեքներ: Դիտարկվել են ստատիկ բեռնվածքի, սահքի արագության և նախնական հպման ժամանակամիջոցի ազդեցությունը պոլիմեր-պոլիմերային շփման զույգերի շփագիտական հատկությունների վրա:

Առանցքային բառեր. բացակ, ստատիկ շփում, միկրոառանցքակալ, շփման գործակից, մաշում:

**A.N. KARAPETYAN, K.V. HOVHANNISYAN, N.G. MELIKSETYAN,
W.V. SAROYAN**

**INVESTIGATING THE GAP INFLUENCE ON THE STARTING PROCESS
IN THE POLYMER-POLYMER PLAIN MICROBEARINGS**

The results of investigating the gap influence on the friction process at the starting stage in the polymer-polymer plain microbearings are presented. The effect of external factors: the static load, the sliding velocity, as well as the time of the preliminary contact on the tribological properties of the friction couple polymer-polymer has been considered. For dry friction pairs, optimal values of diametric gap have been found, providing a low friction coefficient and the wear of the joint details.

Keywords: gap, static friction, microbearing, friction coefficient, wear.