



УДК 621.785

Поступила 29.11.2017

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТЕЙНОГО СИЛУМИНА АК15М3

*Е. И. МАРУКОВИЧ, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь,  
ул. Бялыницкого-Бирули, 11. E-mail: maruko46@mail.ru,*

*В. А. КУКАРЕКО, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,  
ул. Академическая, 12, тел.: +375 17-284-63-20,*

*В. Ю. СТЕЦЕНКО, Институт технологии металлов НАН Беларуси, г. Могилев, Беларусь,*

*В. ЧЕКУЛАЕВ, ОАО «Кузлитмаши», г. Пинск, Беларусь, ул. Жолтовского, 109,*

*П. Г. СУХОЦКИЙ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,  
пр. Независимости, 65*

*Проведены сравнительные исследования триботехнических свойств антифрикционного литейного силумина АК15М3 и типичных бронз БрОЦС, БрОФ и БрАЖ при трении в среде смазочного материала И-20А в широком диапазоне скоростей скольжения и давлений испытаний. Сделано заключение, что силумин АК15М3 может быть использован для замены антифрикционных бронз типа БрОЦС, БрОФ и БрАЖ в высоконагруженных узлах трения.*

*Ключевые слова. Алюминиевый сплав АК15М3, антифрикционные бронзы, триботехнические испытания, скорость, удельная нагрузка, линейный износ.*

## RESEARCH OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CAST SILUMIN AK15M3

*E. I. MARUKOVICH, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev,  
Belarus, 11, Byalynitskogo-Biruli str. E-mail: maruko46@mail.ru,*

*V. A. KUKAREKO, The Joint Institute of Mechanical Engineering National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Belarus, 12, Akademicheskaya str., tel.: +375 17-284-63-20,*

*V. Yu. STETSENKO, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev,  
Belarus, 11, Byalynitskogo-Biruli str.*

*V. CHEKULAEV, OJSC Kuzlitmash, Pinsk, Belarus, 109, Zholtovskogo str.*

*P. G. SUKHOTSKY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.*

*A comparative study of the tribological properties of antifriction silumin casting AK15M3 and typical bronzes БрОЦС, БрОФ and БрАЖ at the friction in the lubricant-20A in a wide range of sliding velocities and pressures of the tests. The conclusion is made that the silumin AK15M3 can be used to replace anti-friction bronze type БрОЦС, БрОФ and БрАЖ in highly loaded friction units.*

*Keywords. Aluminum alloy AK15M3, anti-friction bronzes, tribotechnical tests, speed, specific load, linear wear.*

### Введение

Замена дорогостоящих антифрикционных бронз на экономичные алюминиевые сплавы для изготовления узлов трения является весьма актуальной задачей. В частности, значительное количество дорогостоящих антифрикционных бронз используется в узлах трения скольжения мощных листогибочных и чеканочных прессов, а также других машин [1, 2], что существенно удорожает стоимость ремонтных работ оборудования и снижает экономическую эффективность его использования. Значимость указанной проблемы в последние годы возрастает вследствие увеличения удельных нагрузок и скоростей взаимного перемещения в узлах трения современных высоконагруженных машин и механизмов. Одним из путей решения этой проблемы является замена антифрикционных бронз более экономичными материалами, в частности, алюминиевыми антифрикционными сплавами. Вместе с тем, в литературе зачастую

отсутствуют подробные данные о триботехнических характеристиках алюминиевых сплавов, перспективных для использования в качестве антифрикционных материалов. К таким материалам, в частности, относится разработанный в Республике Беларусь силумин АК15М3, который может выступать в качестве заменителя ряда антифрикционных материалов на медной основе [3]. В связи с этим целью работы являлось сравнительное исследование триботехнических свойств образцов из перспективного алюминиевого сплава АК15М3 и типичных антифрикционных бронз с целью замены последних в узлах трения.

### Материал и методики исследований

В качестве материалов для исследований выбраны литейные сплавы силумин АК15М3 (Si – 12–16%, Cu – 2–5%, Al – остальное), а также промышленные антифрикционные бронзы БрОЦС 5-5-5, БрОФ 10-1 и БрАЖ 9-4. Сравнительные триботехнические испытания образцов проводили в режиме граничного трения на машине трения МТВП в среде смазочного материала И-20А (ГОСТ 20799-88). Испытания осуществляли по схеме возвратно-поступательного перемещения вырезанного из исследуемого сплава призматического образца (10×5×5 мм) по пластинчатому контртелу, изготовленному из закаленной среднеуглеродистой стали 45 (520–600 HV 30). Скорость взаимного перемещения образца и контртела составляла 0,1–0,5 м/с. Номинальная удельная нагрузка испытаний варьировалась от 10 до 100 МПа. Перед испытаниями рабочие поверхности контактирующих тел подвергали механической шлифовке и доводке с использованием абразивной бумаги. Направление шлифовки и доводки поверхностей совпадало с направлением перемещения образца при испытаниях. Подготовленные к триботехническим испытаниям поверхности обезжировали спиртом, ацетоном и высушивали. При испытаниях контактирующие поверхности находились в масляной ванне из смазочного материала И-20А. Для определения линейного износа, не превышающего 100 мкм, был использован метод искусственных баз [4]. Углубления на поверхности наносили путем вдавливания индентора в виде пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине между противоположными гранями 136°. Для случаев, когда износ образцов при испытаниях превышал 100 мкм, для определения величины линейного износа использовали цифровой штангенциркуль. Погрешность измерений величины износа образцов при этом не превышала 10 мкм.

Рентгеновскую съемку проводили на дифрактометре «ДРОН-3» в монохроматизированном  $\text{CoK}_\alpha$ -излучении. Запись линий осуществляли в режиме сканирования. Шаг сканирования –  $0,1^\circ$ , время набора импульсов в точке – 10 с. Металлографические исследования проводили на микроскопе Альтами МЕТ1МТ, измерения твердости по Виккерсу – на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор  $P = 10$  кг.

### Результаты исследований и их обсуждение

**Сплав АК15М3.** Силумин АК15М3 содержит Al, Si и интерметаллидную фазу  $\text{CuAl}_2$  (рис. 1). Твердость сплава составляет 155 HV 10. В микроструктуре сплава регистрируются включения частиц кремния в алюминиевой матричной фазе (рис. 2). Частицы кремния имеют морфологию тонких пластинок с размерами 20–50 мкм и толщиной 3–6 мкм.

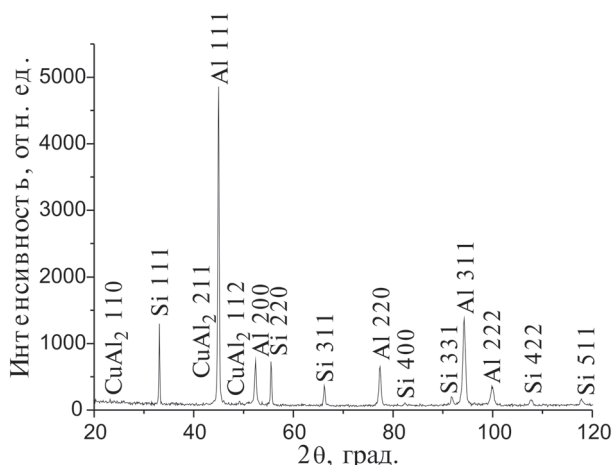


Рис. 1. Фрагмент рентгеновской дифрактограммы ( $\text{CoK}_\alpha$ ) от поверхностных слоев силумина АК15М3

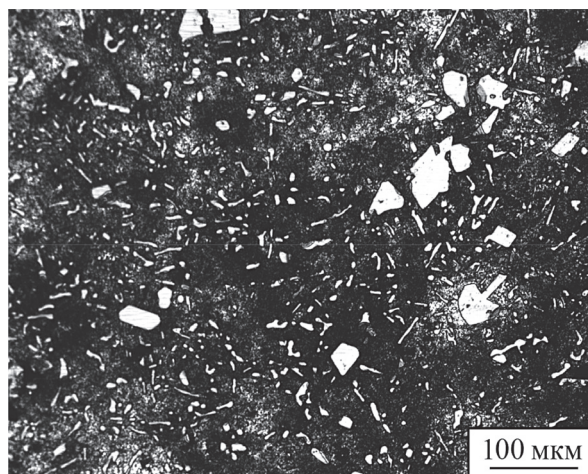


Рис. 2. Микроструктура силумина АК15М3

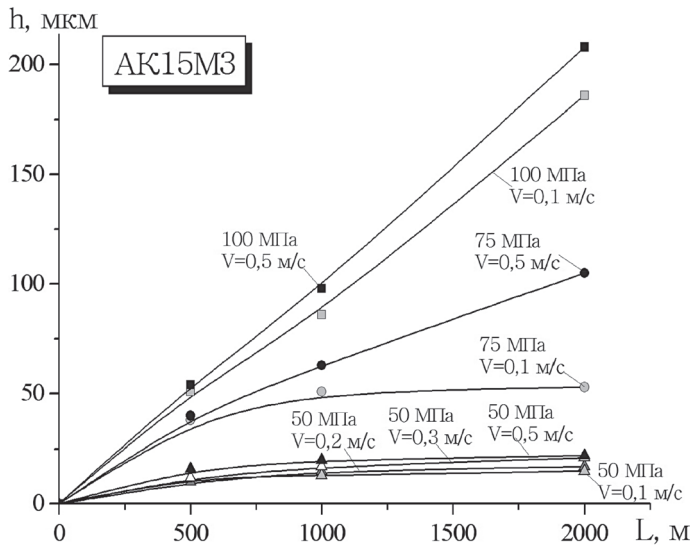


Рис. 3. Зависимость величины линейного износа  $h$  образцов антифрикционного силумина АК15М3 от пути трения  $L$  при различных удельных нагрузках и скоростях взаимного перемещения элементов пары трения

Результаты триботехнических испытаний антифрикционного силумина АК15М3 представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что при относительно низкой удельной нагрузке испытаний, равной 50 МПа, и различных скоростях скольжения образца относительно контртела ( $V = 0,1-0,5$  м/с) сплав характеризуется высокой стойкостью к изнашиванию. Величина интенсивности линейного изнашивания силумина при нагрузке 50 МПа сравнительно низкая и находится на уровне  $I_h \approx 0,9 \cdot 10^{-8}$  (см. таблицу). При нагрузке испытаний силумина  $P = 75$  МПа и скорости перемещения образца  $V = 0,1$  м/с регистрируется возрастание величины линейного износа сплава (рис. 3) и значение интенсивности линейного изнашивания увеличивается до  $I_h = 2,7 \cdot 10^{-8}$  (см. таблицу). Повышение скорости скольжения испытаний до 0,5 м/с ( $P = 75$  МПа) приводит к снижению износостойкости силумина  $\approx 2$  раза по сравнению со случаем испытаний при скорости 0,1 м/с. Увеличение давления

испытаний до 100 МПа приводит к дальнейшему возрастанию интенсивности изнашивания сплава как при скорости взаимного перемещения  $V = 0,1$  м/с, так и при  $V = 0,5$  м/с (см. таблицу). При этом величина  $I_h$  составляет  $9,3 \cdot 10^{-8}$  и  $1,0 \cdot 10^{-7}$  для  $V = 0,1$  и  $0,5$  м/с соответственно. Таким образом, силумин АК15М3 в широком диапазоне скоростей и нагрузок испытаний сохраняет свои сравнительно высокие антифрикционные свойства.

Значения интенсивности линейного изнашивания образцов антифрикционных сплавов на основе меди и алюминия (смазочный материал И-20А, контртело – закаленная сталь 45)

Антифрикционный сплав	Режим трения		Интенсивность линейного изнашивания	Примечание
	удельная нагрузка испытаний, МПа	скорость перемещения образца, м/с		
АК15М3	50	0,1	$0,8 \cdot 10^{-8}$	–
		0,2	$0,9 \cdot 10^{-8}$	–
		0,3	$1,0 \cdot 10^{-8}$	–
		0,5	$1,1 \cdot 10^{-8}$	–
	75	0,1	$2,7 \cdot 10^{-8}$	–
		0,5	$5,3 \cdot 10^{-8}$	–
100	0,1	$9,3 \cdot 10^{-8}$	–	
	0,5	$1,0 \cdot 10^{-7}$	–	
БрОЦС 5-5-5	10	0,1	$7,5 \cdot 10^{-7}$	–
		0,1	$8,0 \cdot 10^{-7}$	–
		0,1	$2,9 \cdot 10^{-6}$	–
		0,1	$3,5 \cdot 10^{-6}$	–
БрОФ 10-1	50	0,1	$1,1 \cdot 10^{-8}$	–
		0,1	$7,8 \cdot 10^{-8}$	–
	100	0,1	$1,0 \cdot 10^{-7}$	Повышение температуры в зоне трения
		0,5	$3,8 \cdot 10^{-7}$	Повышение температуры в зоне трения
БрАЖ 9-4	50	0,1	$1,3 \cdot 10^{-8}$	–
		0,5	$2,3 \cdot 10^{-8}$	–
	75	0,1	$2,5 \cdot 10^{-8}$	–
		0,5	$6,4 \cdot 10^{-8}$	–
	100	0,1	$0,9 \cdot 10^{-7}$	–
		0,5	$2,8 \cdot 10^{-7}$	Повышение температуры в зоне трения

**Антифрикционные бронзы.** Результаты сравнительных триботехнических испытаний образцов антифрикционных бронз БрОЦС 5-5-5, БрОФ 10-1 и БрАЖ 9-4 приведены на рис. 4. Твердость бронз БрОЦС 5-5-5, БрОФ 10-1 и БрАЖ 9-4 составляла 115, 140 и 135 HV 10 соответственно. Из рис. 4 видно, что образцы бронзы БрОЦС 5-5-5 обладают сравнительно низкой износостойкостью и интенсивность линейного изнашивания при нагрузке 10 МПа составляет  $I_h = 7,5 \cdot 10^{-7}$  (см. таблицу). При более высоких давлениях испытаний интенсивность изнашивания бронзы выходит на высокий уровень  $2,9-3,5 \cdot 10^{-6}$ .

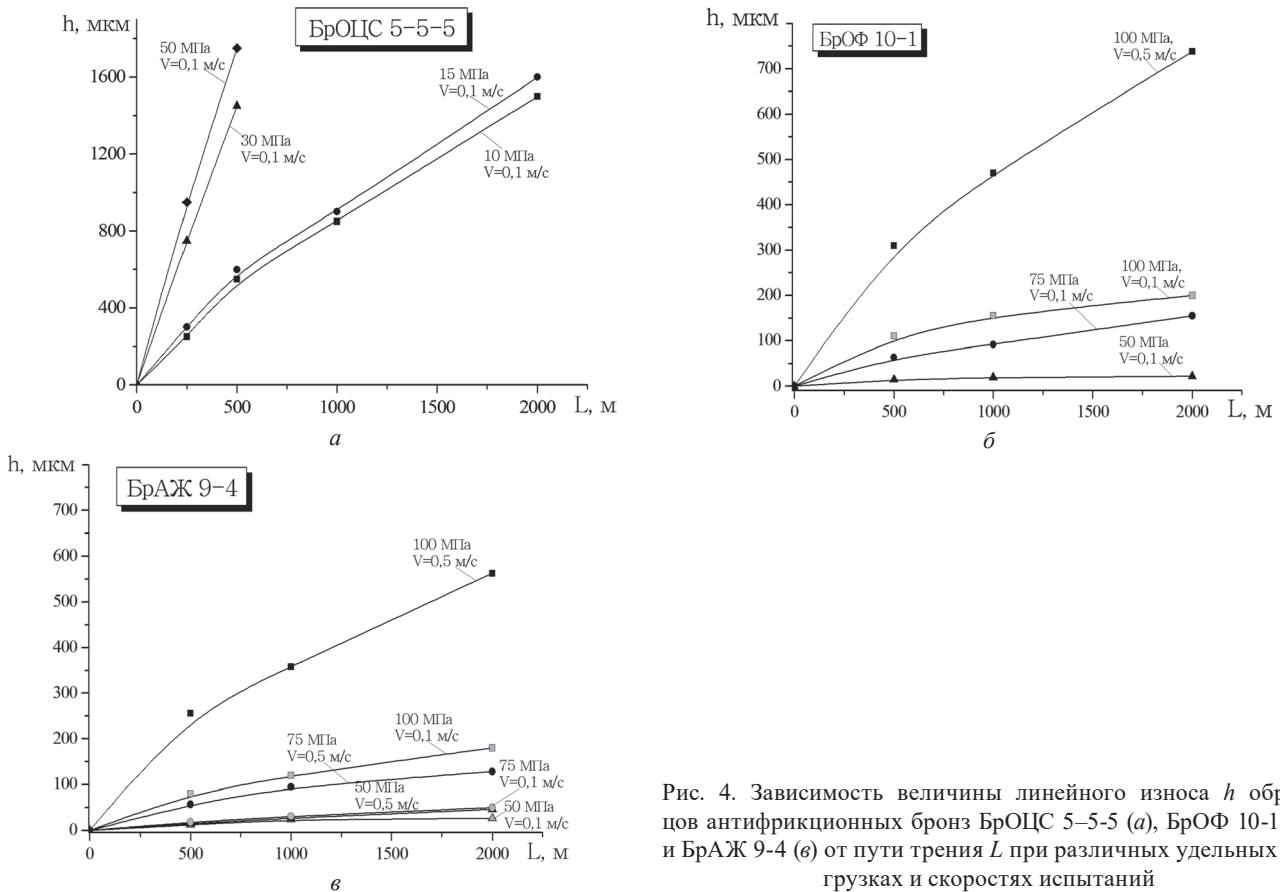


Рис. 4. Зависимость величины линейного износа  $h$  образцов антифрикционных бронз БрОЦС 5-5-5 (а), БрОФ 10-1 (б) и БрАЖ 9-4 (в) от пути трения  $L$  при различных удельных нагрузках и скоростях испытаний

Относительно низкая износостойкость бронзы БрОЦС 5-5-5 связана с ее невысокой твердостью. Пониженные прочностные свойства бронзы приводят к интенсивному пластическому течению ее поверхностных слоев при трении, что вызывает быстрое развитие в них усталостных трещин и изнашивание. На основе проведенных испытаний можно сделать вывод, что максимальное удельное давление, при котором бронза БрОЦС 5-5-5 сохраняет свои антифрикционные свойства в среде смазочного материала И-20А, составляет  $P \leq 10$  МПа.

Бронзы БрАЖ 9-4 и БрОФ 10-1 по сравнению с БрОЦС 5-5-5 имеют более высокий уровень твердости и характеризуются повышенными антифрикционными характеристиками. Из рис. 4 видно, что при удельной нагрузке 50 МПа бронзы БрАЖ 9-4 и БрОФ 10-1 имеют более высокую износостойкость ( $\approx$  в 30 раз), чем бронза БрОЦС 5-5-5 и величина интенсивности линейного изнашивания составляет  $I_h = 1,1-1,3 \cdot 10^{-8}$  (см. таблицу). Увеличение удельной нагрузки испытаний до  $P = 75$  МПа приводит к повышению интенсивности линейного изнашивания бронзы БрАЖ 9-4 до значений  $I_h = 2,5 \cdot 10^{-8}$ , а бронзы БрОФ 10-1 – до  $7,8 \cdot 10^{-8}$  (см. таблицу). Возрастание скорости скольжения образца бронзы БрАЖ 9-4 до 0,5 м/с сопровождается увеличением интенсивности ее изнашивания до  $I_h = 6,4 \cdot 10^{-8}$ . В случае испытаний бронз при давлении 100 МПа значения интенсивности их изнашивания выходят на уровень  $I_h \approx 3-4 \cdot 10^{-7}$ . При этом регистрируется повышение температуры масляной ванны и на поверхности трения регистрируются следы вырывов (рис. 5). Необходимо отметить, что алюминий-железная бронза имеет несколько более высокие характеристики износостойкости при высоких давлениях испытаний по сравнению с бронзой БрОФ 10-1. Таким образом, антифрикционные бронзы БрОФ 10-1 и БрАЖ 9-4 обеспечивают относительно высокую износостойкость при использовании в узлах трения с нагрузками до  $P \leq 100$  МПа ( $V = 0,1$  м/с).



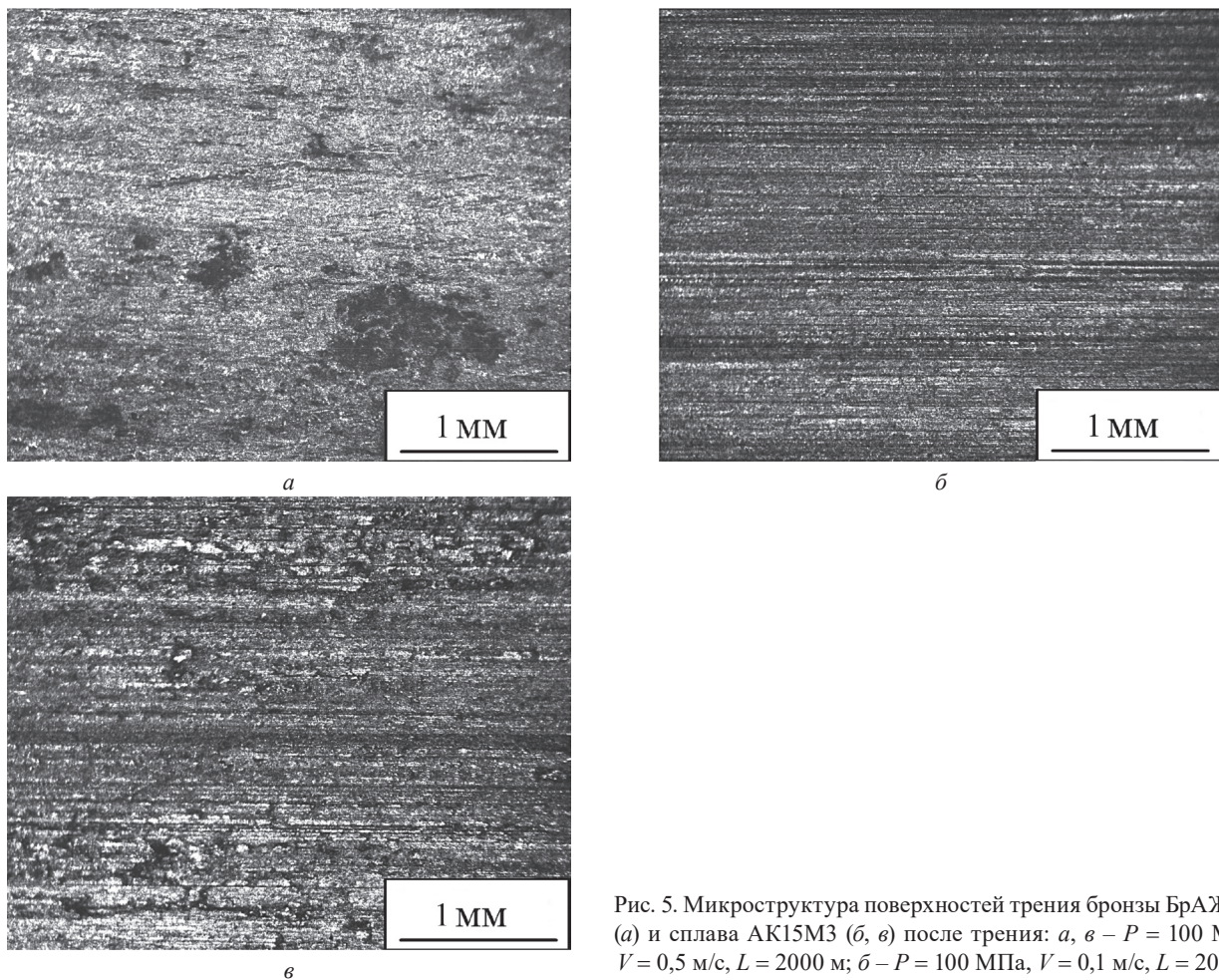


Рис. 5. Микроструктура поверхностей трения бронзы БрАЖ 9-4 (а) и сплава АК15М3 (б, в) после трения: а, в –  $P = 100$  МПа,  $V = 0,5$  м/с,  $L = 2000$  м; б –  $P = 100$  МПа,  $V = 0,1$  м/с,  $L = 2000$  м

Сопоставляя полученные данные по результатам испытания алюминиевого сплава АК15М3 и бронз, следует отметить, что антифрикционные свойства алюминиевого сплава превышают соответствующие свойства бронз. При этом алюминиевый сплав показывает сравнительно низкую чувствительность к возрастанию скорости испытаний при высоких давлениях (см. таблицу). Повышенная износостойкость сплава АК15М3 при его сравнительно невысокой твердости обусловлена, по нашему мнению, низкой температурой рекристаллизации алюминиевой матричной фазы. Указанное свойство сплава способствует релаксации в нем при температурах испытаний дефектов кристаллической структуры и препятствует их накоплению в процессе трения, что повышает сопротивление усталостному разрушению поверхностных слоев сплава при фрикционном взаимодействии. Таким образом, алюминиевый сплав АК15М3 может выступать в качестве эффективного заменителя дорогостоящих бронз типа БрОЦС, БрОФ и БрАЖ в высоконагруженных узлах трения без снижения их рабочих параметров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Трение, износ и смазка (трибология и триботехника)** / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; Под общей ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
2. **Крагельский И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
3. **Марукович Е. И.** Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. Минск: Беларуская навука, 2009. 192 с.
4. **Хрушев М. М., Беркович Е. С.** Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М.: Изд-во Академии наук, 1959. 217 с.

#### REFERENCES

1. **Chichinadze A. V., Berliner Je. M., Braun Je. D.** *Trenie, iznos i smazka (tribologija i tribotehnika)* [Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnics)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 576 p.
2. **Kragel'skij I. V.** *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 480 p.
3. **Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu.** *Modificirovanie spлавov* [Modification of alloys]. Minsk, Belaruskaja navuka Publ., 2009, 192 p.
4. **Hrushhev M. M., Berkovich E. S.** *Opredelenie iznosa detalej mashin metodom iskusstvennyh baz* [Determination of wear of machine parts by the method of artificial bases]. Minsk, Izdatel'stvo Akademii nauk Publ., 1959, 217 p.