

Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2022. №2 (128). С. 11-16.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №2 (128). P. 11-16.

Научная статья
УДК 620.16+620.18
doi:10.30987/2223-4608-2022-2-11-16

Разработка композиционного материала на основе сплава АК10М2Н и исследование его триботехнических свойств

Юлия Владимировна Шерина¹, аспирант, Альфия Расимовна Луц², к.т.н.,
Ильдар Дугласович Ибатуллин³, д.т.н.
^{1,2,3}Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия
¹yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5451-7107>,
²alya_luts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7889-9931>,
³tribo@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрено получение композиционного материала на основе промышленного поршневого сплава АК10М2Н, с применением метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Представлены результаты микроструктурного, микрорентгеноспектрального и рентгенофазового исследования.

Ключевые слова: композиционный материал, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, триботехнические свойства

Для цитирования: Шерина Ю.В., Луц А.Р., Ибатуллин И.Д. Разработка композиционного материала на основе сплава АК10М2Н и исследование его триботехнических свойств // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №2 (128). – С. 11-16. doi:10.30987/2223-4608-2022-2-11-16.

Original article

Yulia V. Sherina¹, Post graduate student, Alfiya R. Luts², Can. Sn. Tech., Ildar D. Ibatullin³, Dr. Sn. Tech.
^{1,2,3}Samara State Technical University, Samara, Russia
¹yulya.makhonina.97@inbox.ru, ²alya_luts@mail.ru, ³tribo@rambler.ru

Development of composite material based on AK10M2N alloy and study of its tribotechnical properties

Annotation. The preparation of a composite material based on an industrial piston alloy AK10M2N, using the method of self-propagating high-temperature synthesis, has been viewed. The results of microstructural, microrentgenospectral and X-ray phase studies are presented.

Keywords: composite material, self-propagating high-temperature synthesis, tribotechnical properties

For citation: Sherina Yu.V., Luts A.R., Ibatullin I.D. Development of composite material based on AK10M2N alloy and study of its tribotechnical properties / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, No.2 (128), pp. 11-16. doi:10.30987/2223-4608-2022-2-11-16.

По мере развития техники в современном мире растут и удельные нагрузки, и скорости вращения трущихся деталей. В связи с этим трибологическое материаловедение продолжает оставаться одним из самых актуальных направлений для исследований. Традиционно в качестве антифрикционных материалов наибольшее применение имеют бронзы (марки типа БрО10Ф1; БрО4Ц4С17; БрС-30 и др.), баббиты (Б83; Б88; Б16; СОС6-6; БК2 и др.) и чугуны (АЧС-1; АЧС-2; АЧС-3 и др.). Однако всем им свойственны недостатки, ограничивающие их использование в тяжело нагруженных узлах трения.

Так, бронзы не обладают хорошей прирабатываемостью, баббиты не отличаются высокой механической прочностью, а чугуны не имеют достаточного уровня антифрикционных свойств и могут применяться лишь при малых удельных давлениях и скоростях.

В последнее время разработан ряд новых металлокерамических антифрикционных материалов, получаемых прессованием и спеканием порошков, например, железа и графита, бронзы и графита и др. Однако высокая стоимость и трудоемкость исполнения не позволяют пока использовать их достаточно широко.

Вместе с тем, со второй половины XX века

все более активно разрабатываются алюминиевые антифрикционные сплавы. Связано это, в первую очередь, с их свойствами: высокая коррозионная стойкость и теплопроводность, малый удельный вес, хорошая технологичность (благодаря меньшей температуре плавления и более низкой твердости алюминиевые сплавы легче поддаются обработке). Не менее важной причиной является их дешевизна, поскольку алюминиевые сплавы в 2 – 4 раза дешевле, например, бронзы.

К настоящему времени существует целая серия алюминиевых сплавов, которые применяются как для моно-, так и для биметаллических изделий антифрикционного назначения: АО9-2; АО20-1; АСМ; АМСТ; АМК и др. Они обеспечивают равную с баббитами износостойкость при повышенной удельной нагрузке и задиростойкости [1].

Разработка алюминиевых сплавов не прекращается по настоящий момент. Ученые из МИСиС предлагают новый сплав состава Al-Si-Cu-Zn-Pb-Sn, в котором совокупность легирующих элементов позволяет формировать многочисленные вторичные фазы, обеспечивающие хорошую прирабатываемость, задиростойкость и минимальный износ [2]. Также очень интересно предложение ученых ИПМех РАН, в котором антифрикционный сплав получается спеканием порошков алюминия, олова и серпентина $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ и характеризуется уменьшенным коэффициентом трения [3].

Однако для некоторых изделий, например, тяжело нагруженных форсированных двигателей, помимо антифрикционных свойств, требуется также высокий уровень физико-механических характеристик и жаропрочность. В этих случаях применяют алюминиевые сплавы с высоким содержанием кремния, отличающиеся низким коэффициентом термического расширения, которые объединены под названием «поршневые» и включают марки КС740; КС741; АК18; ЖЛС; АК10М2Н [4].

Особо широко распространен сплав АК10М2Н, поскольку наличие в нем кремния позволяет формировать эвтектические колонии, что приводит к дислокационному упрочнению, наличие меди и магния упрочняет твердый раствор алюминия, а добавка никеля значительно повышает жаропрочность [5].

Вместе с этим, в современном материаловедении наблюдается еще одна тенденция: создание новых антифрикционных композиционных материалов путем сплавления матрицы, представляющей собой промышленный алюминиевый сплав (зачастую это именно силумины), и тугоплавких керамических частиц, из всего многообразия которых значительная

часть исследователей отдает предпочтение карбиду титана, поскольку он отличается повышенной температурой плавления, высоким модулем упругости и устойчивостью к воздействию агрессивных сред.

Такие материалы в большинстве случаев создаются по методике ex-situ, когда готовые дисперсные частицы вводятся в расплав. Этот метод чрезвычайно прост и доступен по технологическому исполнению, однако может возникать проблема агломерации частиц вводимой фазы и загрязнения отливок побочными примесями, что в совокупности крайне негативно сказывается на их конечном качестве.

Поэтому более перспективна методика in-situ, подразумевающая формирование карбидной фазы из порошков титана и углерода непосредственно в расплаве, и распространенным примером которой является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Учеными СамГТУ ранее была показана возможность проведения СВС дисперсной фазы карбида титана в составе как чистой алюминиевой матрицы, так и в составе легированной алюмоматричной основы [6].

По результатам проведенного обзора, целью настоящей работы было поставлено проведение СВС фазы карбида титана в количестве 10 % масс. в составе матричного промышленного сплава АК10М2Н, а также сравнение трибологических характеристик полученного композиционного материала и исходного сплава.

В ходе исследований использовались следующие материалы: сплав алюминиевый для производства поршней АК10М2Н (ГОСТ 3062-98); порошок титана ТПП-7 (ТУ1715-449-05785388, исходный размер частиц ≤ 240 мкм); углерод технический П-701 (ГОСТ 7885-86, исходный размер частиц $\leq 0,15$ мкм); галоидная соль Na_2TiF_6 (CAS[®] 17116-13-1).

При первоначальной подготовке порошки титана и углерода подвергались сушке при температуре 100...110 °С в течение 2...3 часов, затем производилось их смешивание и одновременно размол в барабане шаровой мельницы с числом оборотов вала 105 об/мин в течение 1 часа. Далее в состав шихтовых навесок с целью облегчения запуска СВС-реакции добавлялась рафинирующая соль Na_2TiF_6 в количестве 5 % от массы шихты. Затем шихтовая смесь делилась на три порции, каждая из которых заворачивалась в алюминиевую фольгу. Параллельно с этим в графитовом тигле плавильной печи ПП 20/12 сплав АК10М2Н расплавлялся до температуры 900 °С, после чего осуществлялся поочередный ввод навесок. После ввода последней

навески расплав активно перемешивался, выдерживался 5 минут и после повторного перемешивания заливался в стальной кокиль.

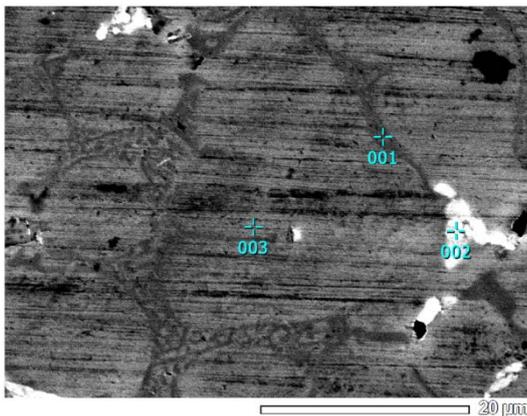
Металлографический анализ проводился на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390A. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводился на этом же микроскопе с использованием приставки Jeol JED-2200. Фазовый состав полученных образцов анализировался на автоматизированном дифрактометре марки ARL X'trA (Thermo Scientific) с использованием Cu-излучения при непрерывном сканировании в интервале углов 2θ от 20 до 80 град со скоростью 2 град/мин.

Оценка трибологических характеристик полученных образцов выполнялась на универсальном триботехническом комплексе «Универсал-1Б» для трения скольжения по схеме: «кольцо (контртело) – плоскость (образец)». Материал контртела сталь 40X (42 HB). Сред-

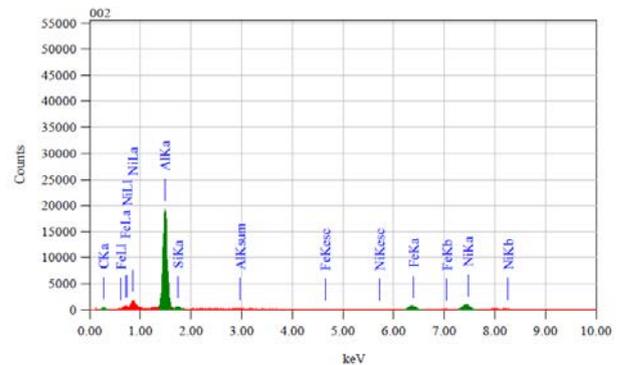
ний диаметр кольцевой поверхности трения 5 мм. Частота вращения шпинделя – 600 мин⁻¹. Площадь поверхности трения 15 мм². В качестве смазочной среды использовалось трансмиссионное масло с группой эксплуатационных свойств GL-5, имеющее в составе высококачественные антизадирные присадки.

В процессе экспериментального ввода шихты в расплав наблюдались все признаки СВС-реакции, а именно, активное искро- и газообразование; излом полученных образцов не содержал посторонних включений или непрореагировавших остатков исходных компонентов шихты. Далее были произведены микроструктурные исследования матричного сплава и композиционного материала на его основе.

Микроструктура сплава АК10М2Н (рис. 1, а) позволяет наблюдать эвтектику ($\alpha + \text{Si}$), равномерно распределенную по границам зерен.



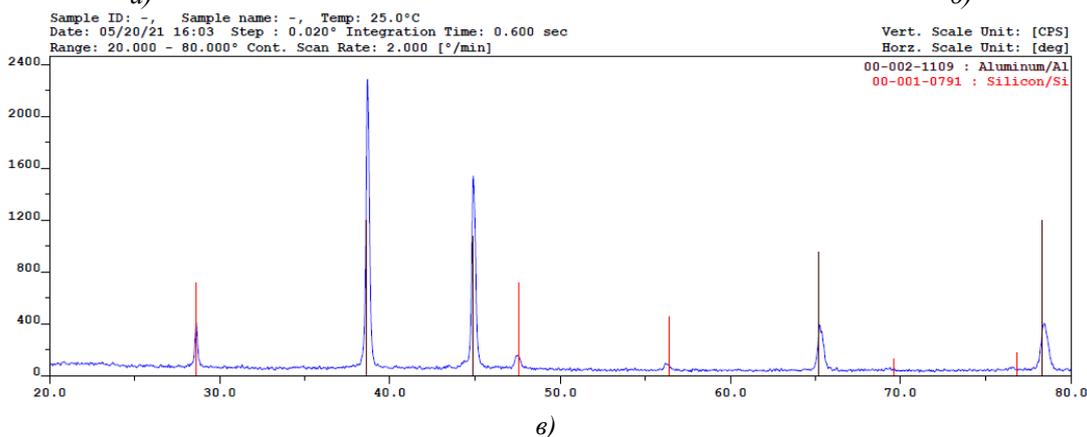
а)



Thin Film Standardless Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.5298

Element	(KeV)	Mass%	Counts	Error%	Atom%	Compound	Mass	Cation
C K	0.277	3.12	1690.93	0.13	7.75			
Al K (Ref.)	1.486	69.66	131372.69	0.01	77.12			
Si K	1.739	1.86	3447.99	0.50	1.97			
Fe K	6.399	9.65	5947.92	0.31	5.16			
Ni K	7.471	15.72	7340.67	0.28	8.00			
Total		100.00			100.00			

б)



в)

Рис. 1. Результаты микроструктурного исследования сплава АК10М2Н:

а – микроструктура; б – результаты МРСА; в – результаты РФА

Посредством МРСА удалось зафиксировать наличие легирующих элементов – Si, Ni, Fe (см. рис. 1, б), а с помощью рентгенофазного анализа (РФА) – только Si, присутствующего

в наибольшем количестве (см. рис. 1, в). Наличие углерода в составе сплава, возможно, обусловлено проведением плавки в графитовом тигле.

По результатам анализа микроструктуры композиционного материала АК10М2Н-10%ТiС (рис. 2, а) можно отметить, что процесс СВС

удалось провести в полной мере, о чем свидетельствует наличие элементов титана и углерода (см. рис. 2, б) и фазы TiC (см. рис. 2, в).

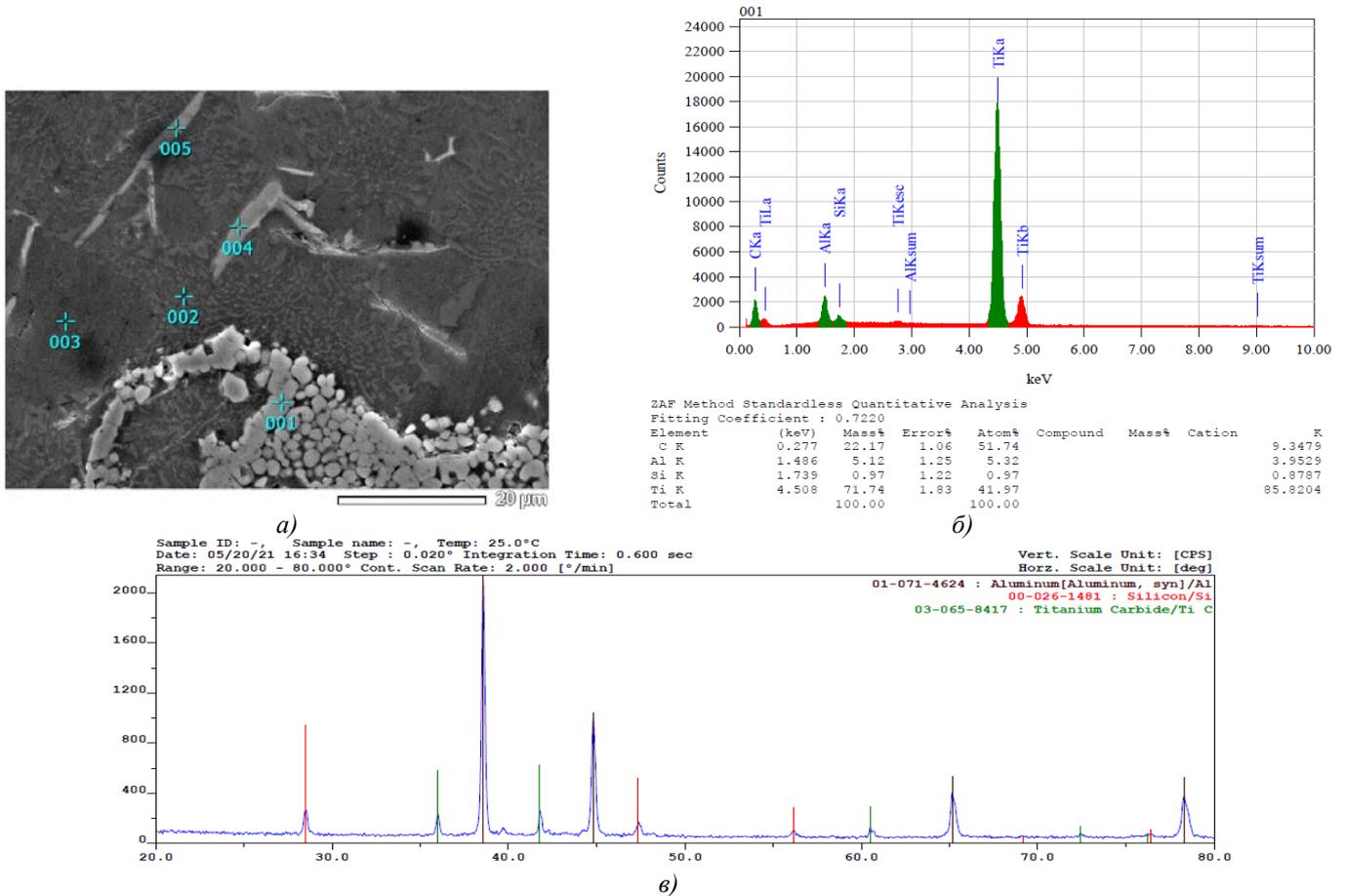


Рис. 2. Результаты микроструктурного исследования композиционного материала АК10М2Н-10%ТiС: а – микроструктура; б – результаты МРСА; в – результаты РФА

Карбидная фаза недостаточно равномерно распределена по объему сплава, однако при большом увеличении видно, что она состоит из отдельных, полностью сформировавшихся частиц субмикронных размеров.

Далее на полученных образцах первоначально были проведены триботехнические испытания со ступенчато возрастающей нагрузкой с целью сравнения антизадирных свойств пар трения по величине критической нагрузки. Длительность каждой ступени составляла 10 минут, шаг нагружения – 100 Н. Испытания проводили до появления режима изнашивания при схватывании, что проявляется в виде резких скачков на эпюре момента трения, или до достижения максимальной нагрузки 500 Н, что, с учетом площади трения, соответствует контактному давлению 33 МПа.

В ходе испытания образец матричного сплава АК10М2Н показал невысокий уровень критической нагрузки (рис. 3, а) и возникновение в зоне трения недопустимых форм изнашивания.

В частности, первые признаки потери стабильности работы пары трения проявились уже при нагрузке 300 Н, далее возникла тенденция к росту момента трения и первый скачок, свидетельствующий о начале появления «мостиков» сварки. Ускорившийся нагрев является следствием интенсивной пластической деформации поверхности трения образца. Повышение нагрузки до 400 Н приводит к переходу пары трения в режим изнашивания при схватывании. На поверхности трения появляются следы пластической деформации поверхности от абразивного изнашивания (длинные параллельные борозды в направлении трения) и схватывания (глубокие единичные борозды с фрагментами вырванного материала).

При испытаниях образца АК10М2Н-10%ТiС во всем диапазоне нагружения признаков схватывания не наблюдалось (см. рис. 3, б). Коэффициент трения сохранял стабильность. Изучение общего вида поверхности трения показало отсутствие признаков

недопустимых форм изнашивания. В процессе приработки на поверхности трения сначала проявляются отдельные пятна в виде равномерно распределенных темных зерен, далее образуются скопления этих зерен.

В продолжение исследований были проведены испытания на изнашивание при форсированной, т.е. максимальной докритической нагрузке в течение 1 часа с оценкой скорости линейного изнашивания и установившегося коэффициента трения.

Полученные данные подтвердили склон-

ность образца сплава АК10М2Н к схватыванию при трении со сталью: первые очаги схватывания стали возникать на 16 минуте наработки, а после 20 минут трения начался процесс изнашивания при схватывании (рис. 4, а).

На поверхности трения образовались смятия, задиры, борозды в направлении трения. Скорость изнашивания составила 15 мкм/ч. Коэффициент трения менялся сначала от 0,1 до 0,19, а затем (при начале схватывания) резко увеличился до 0,57.

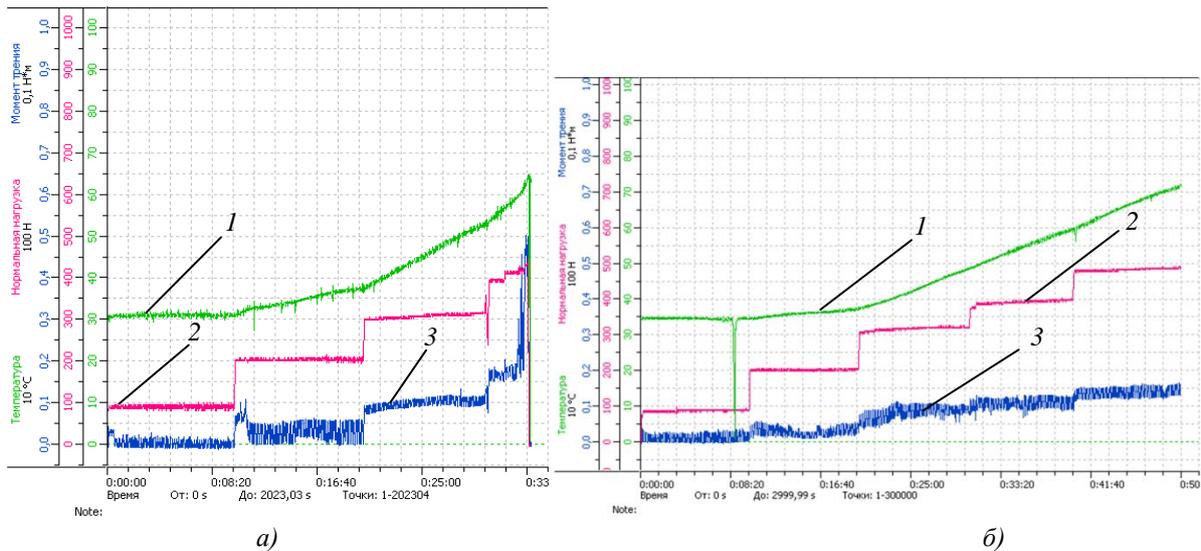


Рис. 3. Эпюры нормальной нагрузки, температуры и момента трения при ступенчато-возрастающей нагрузке: а – сплав АК10М2Н; б – композиционный материал АК10М2Н-10%TiC; 1 – температура; 2 – нормальная нагрузка; 3 – момент трения

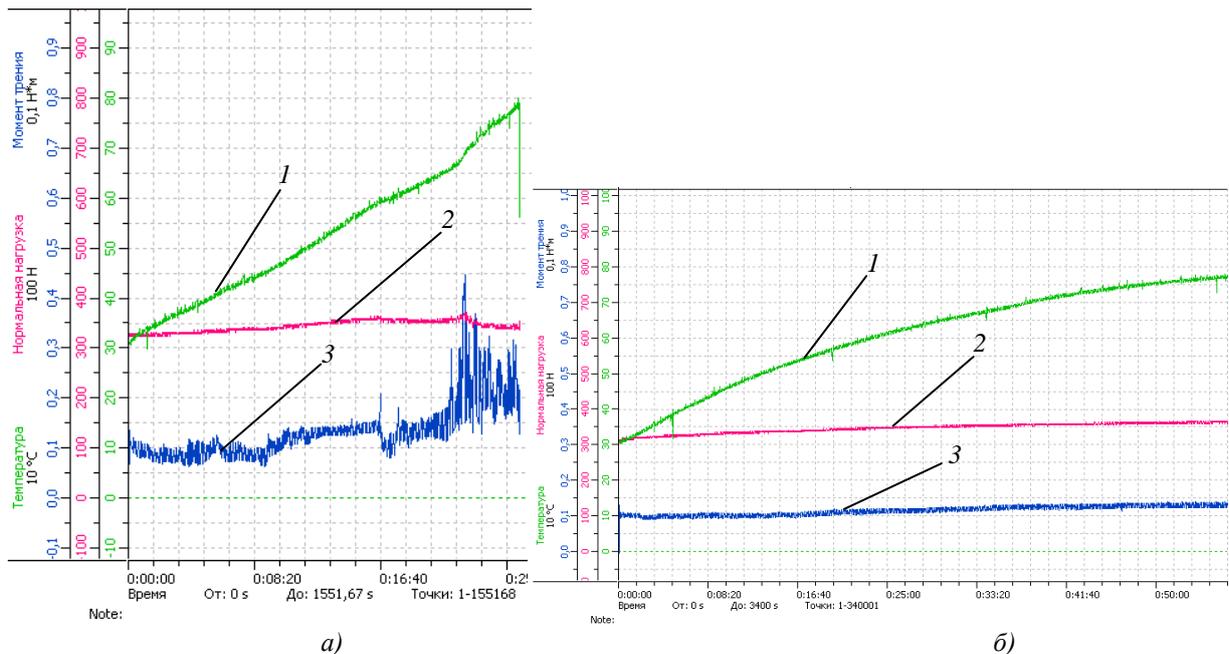


Рис. 4. Эпюры нормальной нагрузки, температуры и момента трения при нагрузке 340 Н (22 МПа): а – сплав АК10М2Н; б – композиционный материал АК10М2Н-10%TiC; 1 – температура; 2 – нормальная нагрузка; 3 – момент трения

Образец АК10М2Н-10%TiC на протяжении всего испытания работал в паре со сталью в режиме нормального усталостного изнашивания со скоростью изнашивания в среднем 0,3 мкм/ч (приработались только вершины неровностей) при стабильном коэффициенте трения в пределах 0,1...0,15 (см. рис. 4, б).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) экспериментально показана возможность проведения СВС ультрадисперсной фазы карбида титана в составе промышленного поршневого сплава АК10М2Н;

2) результаты исследования свойств испытуемых образцов в паре со сталью показали существенные различия как по склонности к образованию задиров, так и по характеру контактного взаимодействия. Триботехнические свойства композиционного материала АК10М2Н-10%TiC по всем показателям превышают показатели исходного образца: уменьшение коэффициента трения может достигать трехкратной величины при повышении нагрузки схватывания не менее чем в полтора раза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Алюминиевые** сплавы антифрикционного назначения: моногр. / Н.А. Белов и др. / под ред. А.Е. Миронова, Н.А. Белова, О.О. Столяровой. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2016. – 222 с.

2. **Пат.** № 2702531 РФ. МПК C22C 21/16, C22C 21/18. Антифрикционный алюминиевый литейный сплав для монометаллических подшипников скольжения / Гершман И.С., Миронов А.Е., Солис П.Н.В., Кузнецова Е.В., Перетягин П.Ю.; приоритет от 28.11.2018. Заявка 2018141927. Опубл. 08.10.2019 г. Бюл. № 28.

3. **Пат.** № 2470082 РФ. МПК C22C 1/04, C22C 21/00, B22F 3/12, B22F 1/00. Антифрикционный материал и способ его получения / Горячева И.Г., Добычин М.Н., Кудряш-

ов А.Е., Курбаткин И.И., Левашов Е.А., Муравьева Т.И.; приоритет от 03.10.2011. Заявка 2011140013/02. Опубл. 20.12.2012 г. Бюл. № 35.

4. **ГОСТ 30620-98** Сплавы алюминиевые для производства поршней. – М.: Стандартинформ, 1998. – 10 с.

5. **Казаков, А.А., Киселев, Д.В., Кур, А.А., Лазутова, Е.Б.** Разработка количественных методов оценки структуры доэвтектических силуминов для прогнозирования их механических свойств // Цветные металлы. – 2014. – № 4. – С. 39-43.

6. **Луц, А.Р., Шипилов, С.И., Рыбаков, А.Д.** Влияние легирующей добавки никеля на структуру композиционного материала Al-10%TiC // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2020. – №10 (112). – С. 10-15.

REFERENCES

1. Aluminum alloys of antifriction purpose: monogr. / N.A. Belov et al., edited by A.E. Mironov, N.A. Belov, O.O. Stolyarova, Moscow, Publ.House MISiS, 2016, 222 p.

2. Patent RF, no. 2702531 IPC S22S 21/16, S22S 21/18. Antifriction aluminum casting alloy for monometallic plain bearings / Gershman I.S., Mironov A.E., Solis P.N.V., Kuznetsova E.V., Peretyagin P.Yu.; priority dated 28.11.2018. Application 2018141927, publ. 08.10.2019, bul. no. 28.

3 Patent RF, no. 2470082 IPC S22S 1/04, S22 S 21/00, B22F 3/12, B22F 1/00. Bearing material and technique for its producing / Goryacheva I.G., Dobychin M.N., Kudryashov A.E., Kurbatkin I.I., Levashov E.A., Muravyeva T.I.; priority dated 03.10.2011. Application 2011140013/02, publ. 20.12.2012, bul. no. 35.

4. GOST 30620 98 Aluminum alloys for the production of pistons, Moscow.: Standartinform, 1998, 10 p.

5. Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kur A.A., Lazutova E.B. Development of quantitative methods for assessing the structure of hypoeutectic silumins to predict their mechanical properties / Non-ferrous metals, 2014, no. 4, pp. 39–43.

6. Luts, A.R., Shipilov, S.I., Rybakov, A.D. The effect of nickel alloying additive on the structure of composite material Al 10%TiC / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2020, No.10 (112), pp. 10-15.

Вклад авторов: Шерина Ю.В. – сбор материала, написание статьи; Луц А.Р. – получение композиционного материала, научное редактирование текста; Ибатуллин И.Д. – проведение триботехнических испытаний, научное редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: Sherina Yu.V. – collecting material, writing an article; Luts A.R. – obtaining composite material, scientific text editing; Ibatullin I.D. – conducting tribotechnical tests, scientific text editing.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.11.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 26.11.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.