



УДК 621.74

Поступила 11.02.2015

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЦИНКОВЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ СПЛАВОВ

## RESEARCH OF THE INFLUENCE NANOMODIFICATION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ZINC ANTIFRICTION ALLOYS

Ф. И. РУДНИЦКИЙ, Ю. А. НИКОЛАЙЧИК, Л. И. КУПРИЯНОВА,

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,

Л. В. СУДНИК, ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН БЕЛАРУСИ, г. Минск, Беларусь

F. RUDNICKI, Y. NIKOLAICHIK, L. KUPRIYANOVA, Belarusian National Technical University, Minsk,

Republic of Belarus, L. SUDNIK, Powder Metallurgy Institute of National Academy of Sciences of Belarus,

Republic of Belarus

*Рассмотрены вопросы технологии получения антифрикционных сплавов системы цинк–алюминий–медь. Изучено влияние модифицирования наноструктурированными материалами формирования структур антифрикционных сплавов при изготовлении из них тяжелонагруженных вкладышей подшипников скольжения.*

*This article describes technology of producing of antifriction alloys of zinc–aluminum–copper composition. The effect of modification by nanostructured materials in forming structures of antifriction alloys in the manufacture of heavy-duty plain bearing liners was examined.*

**Ключевые слова.** Антифрикционные материалы, вкладыш подшипника, сплав, структура, модифицирование.

**Keywords.** Antifriction materials, plain bearing liner, alloy, structure, modification.

Антифрикционные материалы – материалы трения, предназначенные или используемые для работы в несущих или направляющих узлах (согласно ГОСТ 18282-72). Такое определение по функциональному признаку позволяет более точно установить отличие антифрикционного материала от фрикционных материалов, так как диапазоны значений коэффициентов трения для них часто перекрываются. Принято считать, что коэффициенты трения антифрикционного материала составляют 0,001–0,005 при наличии смазки и 0,004–0,5 при ее отсутствии. Диапазон условий применения антифрикционных материалов зависит от состава последних и, в первую очередь, обусловлен физическими свойствами входящих в них базовых материалов (матрицы материала и связующего) и специальных антифрикционных наполнителей.

Антифрикционные материалы подшипников скольжения должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к ним. Они должны быть одновременно и твердыми для уменьшения коэффициента трения, и пластичными и мягкими, чтобы в случае несоответствия форм вкладыша и вала, вкладыш мог приработаться к валу. Такое сочетание противоположных свойств можно осуществить, проще всего, путем применения двух- или даже трехфазных сплавов, где в качестве одной составляющей должны быть твердые кристаллы, а в качестве другой – мягкая пластичная масса. Назначение твердых кристаллов – «выносить» на себе трение, а назначение мягкой массы – обеспечить в случае необходимости возможность вдавливания твердых кристаллов внутрь вкладыша, тем самым, обеспечить прирабатываемость вкладыша к валу. Чтобы твердые и в большинстве случаев хрупкие кристаллы не совершали давление непосредственно друг на друга, необходимо, чтобы объем их был не велик по сравнению с общим объемом, кроме того, они должны располагаться изолированно в мягкой массе [1].

Типичные структуры подшипниковых сплавов можно получить практически в любой системе, на диаграмме состояния которой имеется двухфазная область. Если, например, два металла могут создать

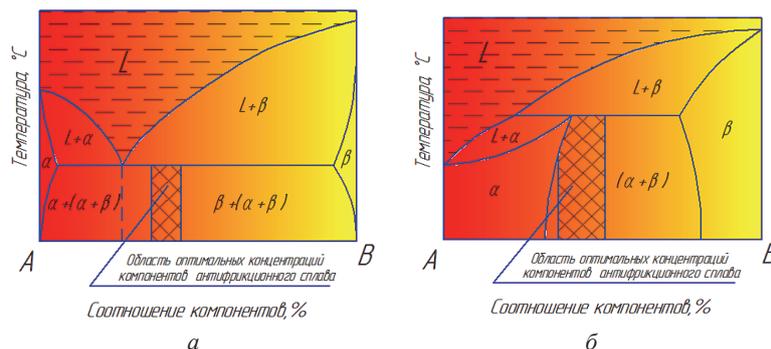


Рис. 1. Расположение составов антифрикционных сплавов на диаграммах состояния: *а* – диаграмма состояния сплава с эвтектическим превращением; *б* – диаграмма состояния сплава с перитектическим превращением; *A, B* – компоненты сплава; *L* – жидкость;  $\alpha$  – твердый раствор *B* в *A*;  $\beta$  – твердый раствор *A* в *B*

ограниченную растворимость в твердом состоянии, то подходящие по структуре сплавы будут находиться на диаграмме состояния вблизи эвтектики с той стороны от нее, где в качестве первичных кристаллов выделяются более твердые кристаллы. При этом состав сплава должен быть таковым, чтобы он находился не очень близко к эвтектике (так как тогда можно получить недостаточное количество твердых кристаллов), но и нельзя, чтобы он находился на значительном удалении от эвтектики (в этом случае можно получить большое количество твердых и хрупких кристаллов, которые в процессе эксплуатации сплава будут соприкасаться друг с другом). Область сплавов, применяемых в качестве подшипниковых материалов, для рассматриваемого типа систем схематически показана на рис. 1, *а*.

Аналогичным образом можно выделить область подшипниковых сплавов и в случае перитектической диаграммы состояния (рис. 1, *б*). В качестве более твердой фазы может быть использован как твердый раствор, так и химическое соединение.

Совершенно ясно, что однородные твердые растворы в отожженном состоянии не подходят по структуре для подшипникового металла. Однако литые сплавы, состоящие из твердого раствора, но имеющие дендритную структуру с осями из более пластичного раствора и междоусными пространствами из более твердого раствора, можно применять как подшипниковые.

В тех случаях, когда и более твердая составляющая подшипникового сплава обладает достаточной пластичностью и значительно мягче, чем материал вала, необязательно ограничение объема твердой составляющей. Так, например, используя сплавы меди со свинцом (с 25–60% Pb), можно допустить содержание твердой меди в количестве до 75%. Такие свинцовые бронзы в силу их большой прочности позволяют работать со значительно большими нагрузками, чем сплавы из легкоплавких металлов. В связи с этим сегодня во многих случаях в области применения подшипниковых сплавов они вытеснили другие сплавы. Чаще всего используется свинцовая бронза с 30% Pb.

Помимо гетерогенной структуры, от подшипниковых сплавов обычно требуется не слишком низкая температура начала плавления, это связано с тем, что при эксплуатации вкладыш подшипника может разогреваться до 100–200 °С, а в некоторых случаях и выше. Поэтому такие сплавы, как Pb-Sn, не нашли широкого применения в качестве подшипникового материала. С другой стороны, для облегчения операции заливки и уменьшения склонности сплава к ликвации желательнее, чтобы интервал плавления был меньше.

За последние два десятилетия резко повысились скорости и давления на подшипниках двигателей и проблема механической прочности подшипникового сплава, почти не стоявшая 20 лет назад, теперь является довольно актуальной и требует конкретных решений. Для подшипников, подвергающихся большим давлениям и работающих при больших скоростях вращения вала, необходима их повышенная механическая прочность и особенно сопротивление усталости и ползучести. Именно поэтому в авиационных подшипниках малопрочные, легкоплавкие сплавы оказались непригодными и были заменены свинцовистой бронзой и отчасти сплавами на основе серебра.

В то же время с экономической точки зрения подшипниковый сплав не должен содержать в своем составе труднодоступных и дорогостоящих элементов.

Сплавы системы цинк-алюминий-медь – антифрикционные материалы, из которых наибольший интерес представляет сплав марки ЦАМ10-5, во многих случаях он способен заменить оловянистую бронзу, а иногда и свинцово-оловянный баббит марки Б-16. При нагрузке на пару трения 50 кгс/см<sup>2</sup> со смазкой коэффициент



Рис. 2. Тяжелонагруженный вкладыш подшипника скольжения

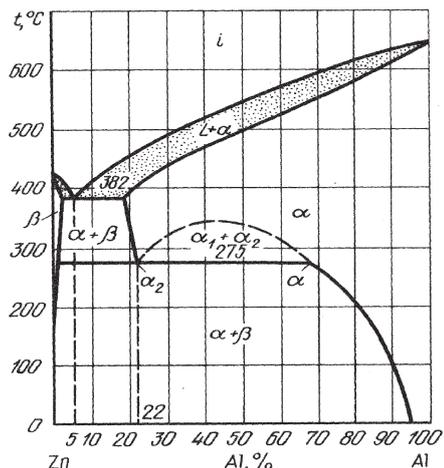


Рис. 3. Диаграмма состояния системы цинк-алюминий

трения данного сплава в паре со сталью 45 (49–51 HRC) составляет 0,009, износ – 0,017 мг/(см<sup>2</sup>·км). Коэффициент трения баббита Б-83 при тех же условиях равен 0,005 [2].

Цинковые сплавы представляют большой интерес для промышленности Республики Беларусь, прежде всего как заменители оловянных бронз. Они отличаются высокими механическими и антифрикционными свойствами, не дефицитны и весьма экономичны. Из антифрикционных сплавов на основе цинка по оптимальному сочетанию алюминия и меди могут быть использованы такие сплавы, как ЦАМ 10-1, ЦАМ 10-5, ЦАМ 30-5 и аналогичные им. Наибольший интерес для замены литейных антифрикционных бронз БрОЦС 6-6-3, БрОЦС 5-5-5, а в некоторых случаях БрОС 8-12, БрОФ 10-1 представляет цинковый сплав ЦАМ 10-5, содержащий 9–11% алюминия, 4–6% меди и остальное цинк. Сплав отличается от ЦАМ 10-1 более высокими антифрикционными и прочностными свойствами, а от сплава ЦАМ 30-5 – меньшей склонностью к усадке. Он и был выбран в качестве базового для дальнейшего исследования возможности использования в подшипниках торфобрикетных прессов. Свойства цинкового сплава и заменяемой бронзы БрОФ 10-1 приведены в таблице 3.1[2].

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что при условии улучшения некоторых свойств, а также для достижения эффекта самосмазывания сплав на основе цинка может быть успешно использован в качестве заменителя бронз.

В настоящей работе выполнены исследования влияния наномодифицирования на структуру и свойства цинковых антифрикционных сплавов при изготовлении тяжелонагруженных вкладышей подшипников скольжения (рис. 2).

При обосновании выбора сплава на основе цинка в настоящей работе проведена оптимизация основных легирующих элементов сплава алюминия и меди с использованием диаграмм состояния [3]. На рис. 3 показана диаграмма цинк-алюминий. Из рисунка следует, что в процессе кристаллизации жидкости при определенной концентрации компонентов происходит эвтектическое и эвтектоидное превращение. Это позволяет обеспечить такую структуру сплава на основе цинка, которая удовлетворяла бы принципу Шарпи – присутствию твердых структурных составляющих в мягкой основе. В этом случае разработанный сплав может быть использован в качестве антифрикционного.

Для изготовления сплава в тигель печи сопротивления загружали 2/3 необходимой по составу шихты цинка, алюминия и медноалюминиевой лигатуры состава 50% меди и 50% алюминия. Поверхность шихты засыпали слоем древесного угля и нагревали до полного расплавления, не перегревая сплав. После расплавления сплав перемешивали и при температуре 440–450 °С добавляли оставшуюся 1/3 цинка, после чего расплав перемешивали. После снятия шлака и угля расплав разливали в формы. Для рафинирования сплава перед разливкой использовали хлористый аммоний, который с помощью колокольчика вводили в расплав и выдерживали определенное время до прекращения выделения пузырьков.

В качестве модифицирующих добавок для исследования их влияния на процесс структурообразования антифрикционного сплава системы цинк-алюминий-медь были выбраны наноструктурированные нитрид бора и одноводный гидроксид алюминия (бемит). Нитрид бора выбран на основании того, что бор, по мнению ряда ученых, является единственным элементом, способным проявлять модифицирующий эффект по отношению к цинку и сплавам на его основе. Бемит – минерал из класса гидроксидов

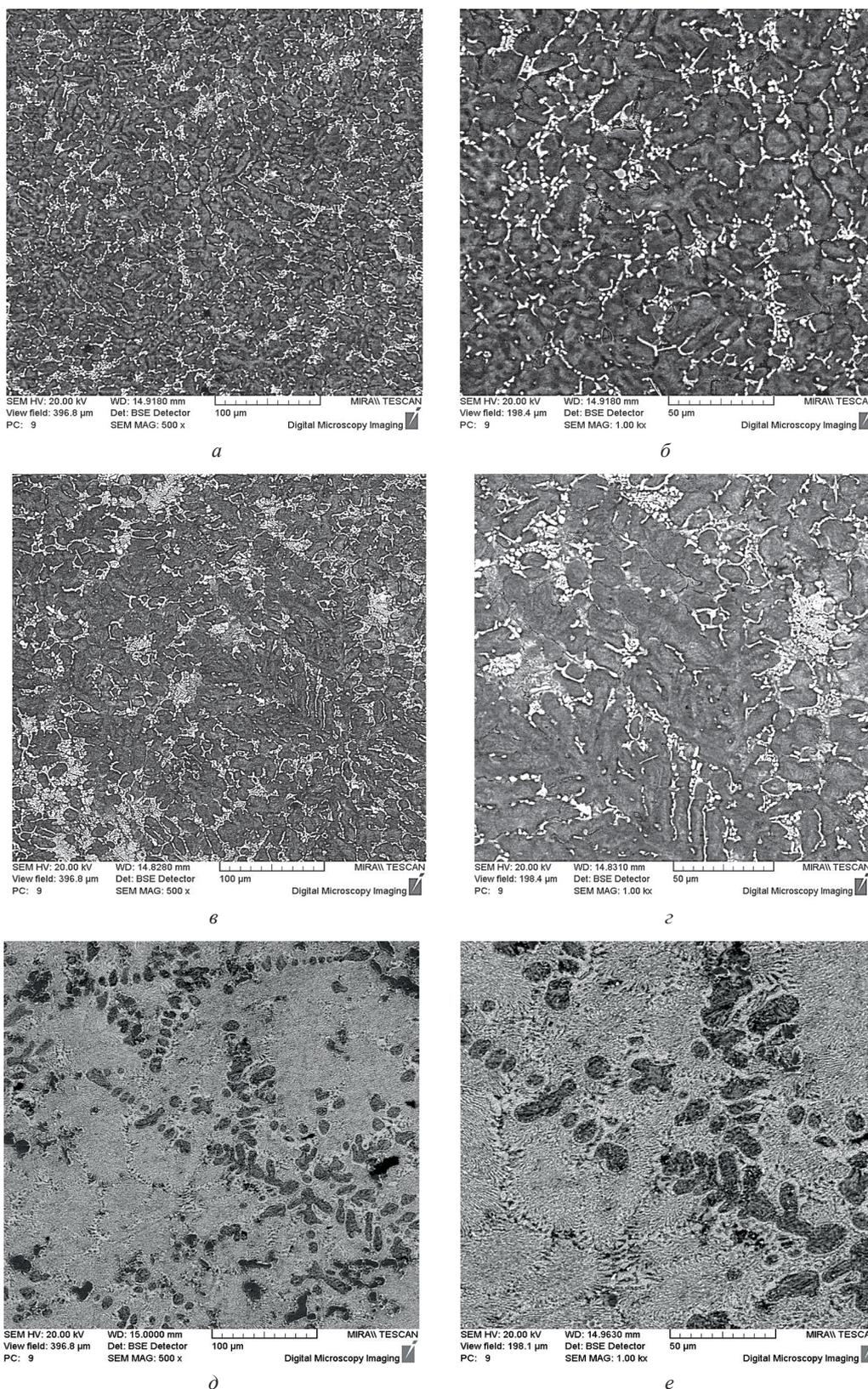


Рис. 4. Микроструктура экспериментального антифрикционного сплава без добавок (*a, б*), с добавкой (0,15 мас.%) наноструктурированного бемита (*в, з*), с добавкой (0,15 мас.%) нитрида бора (*д, е*). *a, в, д* –  $\times 500$ ; *б, з, е* –  $\times 100$

с химической формулой  $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$  может быть модификатором алюминийсодержащих структурных составляющих антифрикционного сплава ( $\alpha$ -твердый раствор, продукты его распада).

Анализ результатов металлографического анализа образцов исследуемого сплава (рис. 4) показал, что вводимые нанодобавки кардинально меняют дисперсность, характер распределения и количественное соотношение структурных составляющих. Так, при введении их в расплав значительно увеличивает

ся доля эвтектики, представляющей собой смесь из двух твердых растворов. Особенно этот эффект проявляется при модифицировании нитридом бора и в несколько меньшей степени бемитом. В частности, в структуре сплава, обработанного нитридом бора, фиксируется лишь небольшая доля (не более 10%) первичных зерен  $\alpha$ -твердого раствора, выстроенных в направлении осей дендритов. Установлено, что модифицирующий эффект нанодобавок проявляется как в инокулирующем, так и лимитирующем действии на кристаллизующийся расплав.

### Выводы

1. Наноструктурированные бемит и нитрид бора могут быть использованы в качестве эффективных модифицирующих добавок для управления формированием структуры антифрикционных сплавов на основе цинка.

2. Эффект наномодифицирования проявляется в измельчении структурных составляющих сплава (первичных зерен твердых растворов), увеличении доли эвтектики на базе твердых растворов вследствие перераспределения элементов между фазами.

3. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии изготовления вкладышей подшипников скольжения из антифрикционных сплавов системы цинк-алюминий-медь.

4. Внедрение результатов исследования позволяет существенно снизить себестоимость изготовления вкладышей подшипников путем замены дорогостоящих бронз, снижения энергозатрат при изготовлении, использования в технологическом процессе изготовления в качестве шихтовых материалов вторичных цинксодержащих металлоотходов.

### Литература

1. Трение, изнашивание и смазка / В. В. Алисин, А. Я. Алебьев, В. А. Белакин и др.; Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. Кн.1. 400 с.
2. Семенников В. К. Переплавы стружки цинкового сплава ЦАМ10-5 // Литейное производство. 1985. № 6. С. 36.
3. Мальцев М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1964. 212 с.

### References

1. *Trenie, iznashivanie i smazka* [Friction, wear and lubrication] V. V. Alisin, A. Ja. Aleb'ev, V. A. Belakin i dr. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. Kn.1. 400p.
2. Семенников В. К. Pereplav struzhki cinkovogo splava CAM10-5 [Remelting chips zinc alloy TSAM10-5] *Litejnoe proizvodstvo*. 1985. no. 6. P. 36.
3. Мальцев М. В. *Modificirovanie struktury metallov i splavov* [Modifying the structure of metals and alloys] Moscow, Metallurgija Publ., 1964, 212 p.

### Сведения об авторах

Рудницкий Федор Иванович, Николайчик Юрий Александрович, Куприянова Л. И., Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости 65. E-mail: yuni@bntu.by.

Судник Лариса Владимировна, Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Платонова 41.

### Information about the authors

Rudnicki F., Nikolaichik Y., Kupriyanova L., Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Pr., Minsk, 220113, Republic of Belarus. E-mail: yuni@bntu.by.

Sudnik L., Powder Metallurgy Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 41 Platonova Str., Minsk, 220005, Republic of Belarus.