

УДК 620.621.669.762

ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

А.П. Савицкий, М.И. Вагнер, S.-K. Shin*, Y.-G. Jo*

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

*LuBo Industries Inc., Incheon, Republic of Korea

E-mail: arnold_savitskii@mail.ru

Методом порошковой металлургии изготовлены антифрикционные сплавы на основе алюминия, которые обладают достаточной пластичностью для калибровки спеченных подшипников скольжения и пригодны для термообработки. Исследованы твердость, коэффициент трения, сопротивление износу и шероховатость контртела до и после трибологических испытаний подшипников в условиях ограниченной смазки. Технология производства подшипников апробирована в условиях опытно-промышленного производства на южнокорейском предприятии LuBo Industries Inc.

Ключевые слова:

Алюминий, смеси, спекание, твердость, коэффициент трения, износ.

Введение

Классический метод порошковой металлургии – холодное прессование с последующим спеканием – широко применяется для получения изделий из железа и ряда других металлов. Техническая и экономическая целесообразность широкого применения спеченных материалов на основе алюминия обусловлена рядом причин:

- процесс прессования изделий из смесей порошков на основе алюминия осуществляется при сравнительно низких давлениях;
- на спекание алюминиевых деталей требуется на 10 % меньше затрат времени и энергии, чем из железа;
- малый удельный вес деталей на основе алюминия и технологичность в условиях массового их производства;
- прочность спеченных сплавов алюминия не ниже прочности спеченного железа;
- изделия из спеченного алюминия обладают высокой коррозионной стойкостью и другими важными свойствами.

Основными служебными характеристиками антифрикционных материалов являются легкая прирабатываемость, низкий коэффициент трения в условиях несовершенной смазки, сопротивление к схватыванию и заеданию при трении, свойство не царапать и не изнашивать вал, способность «поглощать» твердые частицы, высокие износостойкость, теплопроводность, сопротивление сжатию и ползучести, усталостная прочность, стойкость против коррозии.

Алюминий обладает многими из указанных свойств и используется в качестве основы для создания антифрикционных материалов. Использование порошковой технологии, при которой обеспечивается заданная пористость, а в порошок алюминия вводятся различные легирующие добавки, в том числе твердые смазки, дает возможность придать чистому алюминию все недостающие ему антифрикционные свойства [1, 2].

Подшипники из сплавов алюминия с оловом, получаемые литьем, используются в двигателях, га-

зовых и посадочных устройствах самолетов. Изготовление подшипников такого состава методом порошковой металлургии позволит улучшить их антифрикционные свойства. Однако применение алюминия как основы антифрикционного материала ограничено из-за его чрезвычайно высокой реакционной способности. Если в процессе скольжения оксидная пленка разрушается, чистая поверхность алюминия моментально охватывается с поверхностью контртела, особенно когда это – сталь. При продолжении скольжения происходит интенсивный адгезионный износ материала или полное заклинивание трущихся поверхностей. Поэтому подшипники скольжения из алюминиевых сплавов используют, как правило, при надежной смазке.

Цель данной работы – получить спеченный антифрикционный сплав на основе алюминия, который можно было бы легко воспроизвести в условиях массового промышленного производства. Кроме того, сплав должен быть достаточно пластичным для калибровки и пригодным для термообработки, повышающей механические и трибологические свойства материала.

Методика эксперимента

Для получения спеченных антифрикционных сплавов на основе порошка алюминия марки ПА-4 использовались две системы: Al-Cu-Mg и Al-Cu-Mg-Si. Частицы порошка ПА-4 имеют неправильную форму и покрыты невосстановимой оксидом алюминия Al_2O_3 . Cu и Mg являются наиболее эффективными упрочнителями алюминия, которые не ухудшают его пластичность [3]. Кроме того, медь в смеси этих металлов обеспечивает интенсивное уплотнение прессовок при жидкофазном спекании [4, 5]. Поскольку магний вызывает рост прессовок при спекании [4], его количество, вводимое в порошковую смесь, должно быть ограничено. Кремний относится к традиционному легирующему элементу алюминия. Он практически не растворим в алюминии в твердом состоянии и находится в нем в виде дисперсных включений, которые придают материалу антифрикционные свойства. Как и медь,

кремний интенсифицирует процесс спекания алюминия с участием жидкой фазы [4].

Содержание легирующих элементов, вводимых нами в алюминий, примерно отвечают их содержанию в известных промышленных термообрабатываемых сплавах (табл. 1). Согласно [6] введение 5 % графита в алюминиевый сплав в качестве антизадирной добавки мало влияет на его прочностные характеристики, но обеспечивает работоспособность материала. Однако имеются сведения [7], что для заметного улучшения антифрикционных свойств алюминиевого сплава достаточно и меньшее количество графита, порядка 1,5 %. Поэтому, кроме упрочняющих элементов, в 5 из 6 порошковых смесей, использованных в данной работе, вводился порошок графита в количестве от 1 до 3 мас. %.

Таблица 1. Химический состав подшипников скольжения, режимы их термообработки в среде осушенного азота

№ штулки	Состав, мас. %					$T_{сп}$, °C	Термообработка		
	Al	Cu	Mg	Si	C		$T_{заж}$, °C	$T_{отж}$, °C	$t_{отж}$, ч
1	94,0	4,5	0,5	–	1,0	630	500	100	2
2	93,0	4,5	0,5	–	2,0				
3	92,0	4,5	0,5	–	3,0				
4	93,1	3,9	0,5	1,0	1,5	620	500	100	8
5	91,7	3,8	0,5	1,0	3,0				
6	94,5	4,0	0,5	1,0	–				

Порошки смешивались в течение 2 ч в цилиндрическом смесителе, который вращался вокруг оси, проходящей через центр цилиндра под углом к его оси. Вместо обычных шаров в смеситель помещались тела специальной конфигурации. Для предотвращения расслоения, вызываемого значительным отличием плотностей компонентов, в смесь вводилось некоторое количество глицерина.

Сырые заготовки подшипников скольжения представляли собой втулки с внешним диаметром 28, внутренним 20 и высотой порядка 21 мм. Они изготавливались двусторонним прессованием одинаковых навесок смеси данного состава с помощью 40-тонного гидравлического пресса. Для предотвращения налипания алюминия на стенки стальной пресс-формы на них наносился тонкий слой машинного масла.

Оптимальная пористость сырых прессовок составляла 20...23 %. Прессовки с пористостью менее, чем 13...15 %, увеличиваются в размерах при спекании из-за расширения газов в замкнутых порах. Исходная пористость 20 % и выше позволяет влаге, воздуху и другим газообразным продуктам свободно покидать прессовку в ходе предварительного отжига при 500 °C и последующего спекания. Предварительный отжиг и спекание сырых втулок проводилось в атмосфере азота с точкой росы –63 °C и содержанием кислорода 0,0003 об. % в течение часа. При этом, втулки, не содержащие кремний, спекались при 630 °C, втулки с кремнием – при 620 °C (табл. 1).

Спеченные втулки подвергались калибровке до высоты 20 мм в пресс-форме для прессования исходных порошковых смесей. Калибрование позволяет получать заданную пористость, требуемую высоту и размеры внешнего и внутреннего диаметров с необходимыми допусками, а также высокую чистоту рабочей поверхности. Пористость всех втулок в результате калибровки оказалась в пределах 5...10 %, что соответствовало техническому заданию заказчика.

Поскольку спеченные сплавы содержат легирующие элементы, растворимость которых в алюминии в твердом состоянии меняется с температурой, все калиброванные втулки подвергались термической обработке путем закалки и старения. Вначале они гомогенизировались под закалку при 500 °C в течение 2 ч, затем закачивались от этой температуры в воду. Процесс искусственного старения проводился при 100 °C в течение 2 ч для втулок, не содержащих кремний, и 8 ч – для втулок с кремнием (табл. 1).

Трибологические испытания проводились по схеме «вал-втулка» с вращающимся валом и неподвижной втулкой (рис. 1). Для каждой втулки вытачивался и подвергался термообработке отдельный вал из стали. Перед испытаниями втулки пропитывались машинным маслом. Скорость скольжения составляла 5 м/мин при давлении на подшипник 10 МПа. Продолжительность испытаний каждой втулки, за исключением подшипника № 1, равнялась 100 ч. По результатам испытаний определяли коэффициент трения и износ втулки.

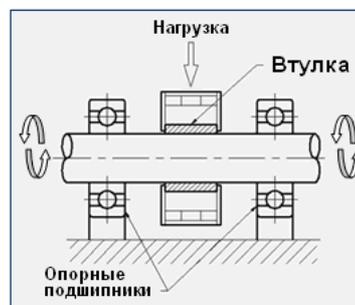


Рис. 1. Схема трибологических испытаний

Для определения шероховатости вала до и после испытаний использовался прибор Surftest SV-3100N4. На основании результатов инструментальных измерений профиля поверхности вала расчет шероховатости проводился по следующим формулам для трех параметров:

- $Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$, где y_i – высота i -го пика;
- $R_{max} = R_p - R_v$, где R_p – максимальная высота пика, R_v – максимальная глубина впадины на всей рабочей длине образца;
- $Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{pi} - R_{vi}$, где R_{pi} – i -ый наивысший пик, R_{vi} – i -ая самая глубокая впадина.

Экспериментальные результаты

Микроструктура. Микроструктуры спеченных подшипников скольжения № 3 и № 5, содержащих по 3 мас. %, графита, представлены на рис. 2. Стрелками показаны включения твердой смазки. Можно видеть, что графит не смачивается жидкой фазой, которая образуется при спекании. В результате к частицам твердой смазки часто примыкают поры, понижающие прочность сплавов. С другой стороны, поры, выходящие на рабочую поверхность подшипников, важны как резервуары для жидкой смазки. В процессе работы при нагревании подшипника смазка выступает на поверхность скольжения, предотвращая схватывание поверхностей трибологической пары. При охлаждении подшипника жидкая смазка снова втягивается в поры.

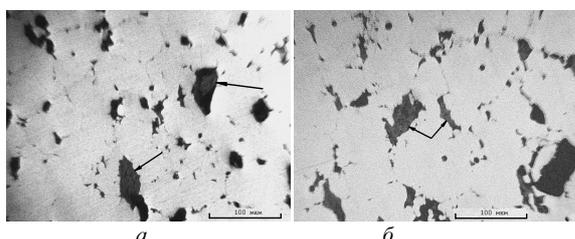


Рис. 2. Микроструктуры подшипников скольжения № 3 (а) и № 5 (б), содержащих 3 мас. % графита

Твердость. Как и ожидалось, термообработанные втулки, в том числе с графитом, показали достаточно высокую твердость (табл. 2). Средняя твердость подшипников скольжения составляет около 600 МПа, что оказалось выше твердости, предусмотренной техническим заданием (400 МПа).

Таблица 2. Повышение твердости по Бринеллю в результате термической обработки калиброванных втулок, МПа

№ втулки	До обработки	После обработки
1	550	620
2	480	580
3	450	510
4	390	620
5	310	530
6	360	670

Коэффициент трения. Зависимости коэффициента трения от времени испытания подшипников скольжения представлены на рис. 3 и в табл. 3.

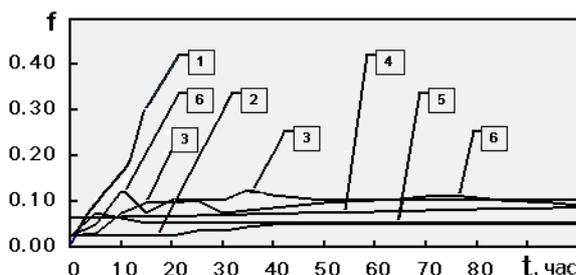


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от времени испытания

Известно, что сила трения складывается из адгезионной и деформационной составляющих. Адгезионная составляющая силы трения значительна при низких нагрузках (<2 МПа). По мере роста нагрузки взаимодействие сопряженных поверхностей меняет упругий характер на упруго-пластичный. В результате происходит переход к режиму нормального механо-термического изнашивания, который во многом определяется стадией приработки и характеризуется незначительной повреждаемостью поверхности трения и малым объемом изнашиваемого материала. В свою очередь, стадия механо-термического изнашивания сменяется стадией химико-термического износа, которая характеризуется резким повышением температуры образца и заметным возрастанием коэффициента трения.

Таким образом, процесс трения в зависимости от нагрузки носит трехстадийный характер. Практическое применение материалов трения чаще всего протекает в режиме нормального механо-термического изнашивания, при котором и проводились наши испытания в условиях давления, составляющего 10 МПа. Эта максимальная нагрузка, при которой данный режим еще выполняется, можно принять за несущую способность сплавов при выбранной скорости скольжения.

Таблица 3. Коэффициент трения подшипников скольжения различного состава в начале испытаний и в конце

№ образца	Коэффициент трения f	
	Исходный	Конечный
1	0,10	–
2	0,03	0,04
3	0,03	0,10
4	0,06	0,08
5	0,03	0,05
6	0,03	0,09
Среднее	0,05	0,08

Стадия приработки исследуемых материалов специально не изучалась, но, судя по характеру изменения коэффициента трения, на некоторых кривых она проявляется (рис. 2, кривые 3 и 6). Можно полагать, что на стадии приработки наиболее высокие выступы на рабочей поверхности втулок, взаимодействуя с поверхностью вала, пластически деформируются и, возможно, разрушаются. В результате коэффициент трения вначале растет, а затем, по мере разрушения выступающих микронеровностей и создания более гладкой поверхности, убывает. Такое поведение коэффициента трения на стадии приработки, например, наблюдалось для спеченных материалов на основе железа [10].

Разделительная пленка из жидкой смазки препятствует непосредственному контакту чистых поверхностей пары трения, существенно понижая коэффициент трения в начале испытаний. При этом на коэффициенте трения в значительной мере сказываются гидродинамические и химические свойства самого смазочного материала. С другой стороны, поскольку в процессе скольжения участвуют

тонкие поверхностные слои и пленки, содержащие в том числе графит, то непосредственная связь между трибологическими свойствами данных сплавов и их механическими характеристиками, такими как твердость, в явной форме не прослеживается. Отсюда следует и сложный характер зависимости коэффициента трения исследуемых сплавов от их состава.

Если условно считать, что на начальном этапе трибологических испытаний процесс трения осуществляется со смазкой, то полученные исходные коэффициенты трения оказываются близкими к требованиям (0,01...0,03), предъявляемым к нему заказчиком в случае трения со смазкой (табл. 3). Подшипники скольжения (№№ 1 и 4), содержащие небольшое количество графита (1 и 1,5 %), показали достаточно высокий коэффициент трения со смазкой (0,10 и 0,06 соответственно), хотя в конце испытаний коэффициент трения втулки № 4 не имел существенных отличий от этого параметра для остальных подшипников. На основе полученных данных трудно сказать, с чем связано отличие исходного коэффициента трения для указанных втулок от остальных результатов. Однако, как следует из таблицы 3, коэффициенты трения с ограниченной смазкой (в конце испытаний) вполне укладываются в интервал, отвечающий требованиям заказчика (0,08...0,10). Для сравнения отметим, что коэффициент трения у сплава САС1 в присутствии смазки равен 0,01...0,025 [8], а у сплава ПВ90 – 0,05 [9], у сплава Д16 он равен 0,1 [9]. Таким образом, коэффициенты трения у исследованных нами спеченных сплавов вполне сопоставимы с таковыми для других алюминиевых сплавов.

Износ. В таблице 4 приведены результаты трех измерений толщины стенки подшипников скольжения до испытаний и после, среднее значение толщины, а также линейная величина износа, которая определялась как разность между средней толщиной стенки до испытаний и средним ее значением после испытаний. Из таблицы следует, что максимальная величина износа, которая составляет 0,086 мм, наблюдается у втулки № 3, содержащей 3 % графита. У остальных втулок величина износа оказалась примерно одного порядка, в пределах от 0,010 до 0,017 мм, что в несколько раз меньше, чем у подшипника № 3. Такой аномально высокий износ указанной втулки, вероятно, вызван

максимально высоким коэффициентом трения у этого подшипника, равным 0,10 (табл. 3).

При фиксированной нагрузке и скорости скольжения со временем устанавливается равновесный микрорельеф с равновесной толщиной промежуточной прослойки, содержащей графит, жидкую смазку и продукты износа. При продолжительном скольжении жидкая смазка истощается, в результате чего поверхности трения сближаются. При этом разделительная пленка может нарушаться, и возникает смешанное трение, когда часть нагрузки передается через площадки контактов поверхностей неровностей чистых материалов. На этих площадках вследствие значительных давлений происходит интенсивное выделение теплоты, которая расходуется на нагрев поверхностных слоев сопряженных тел и разделительной пленки. Повышение температуры вызывает интенсивный износ материалов в результате адгезионного схватывания и образования наростов. Можно предполагать, что втулка № 4 была недостаточно пропитана машинным маслом. Вероятно, это обстоятельство и послужило причиной максимально высокого коэффициента трения и, следовательно, наибольшей величины износа данного подшипника.

Таблица 4. Средняя величина толщины стенок втулок, полученная в результате измерений в трех различных местах, и величина износа, мм

№ втулки	Толщина до испытаний				Толщина после испытаний				Износ
	1	2	3	Сред.	1	2	3	Сред.	
1	3,990	3,988	3,975	3,984	–	–	–	–	–
2	4,000	3,995	3,989	3,995	3,984	3,979	3,973	3,979	0,016
3	4,014	4,001	3,988	4,001	3,919	3,919	3,906	3,915	0,086
4	4,031	4,009	3,990	4,010	4,021	3,999	3,980	4,000	0,010
5	4,014	4,018	4,007	4,013	3,997	4,001	3,990	3,996	0,017
6	3,942	3,966	4,011	3,973	3,928	3,952	3,997	3,959	0,014

Шероховатость. На рис. 4 представлен вид рабочих поверхностей всех втулок и соответствующих им валов. Обращают на себя внимание поврежденные в значительной степени поверхности втулки № 1 и ее вала, хотя продолжительность его испытания составляла примерно 12 мин. Ввиду резкого возрастания коэффициента трения испытание данного подшипника было остановлено. Причиной такого его поведения не могло быть малое содержание графита (1 %, табл. 1), поскольку втулка № 6, не

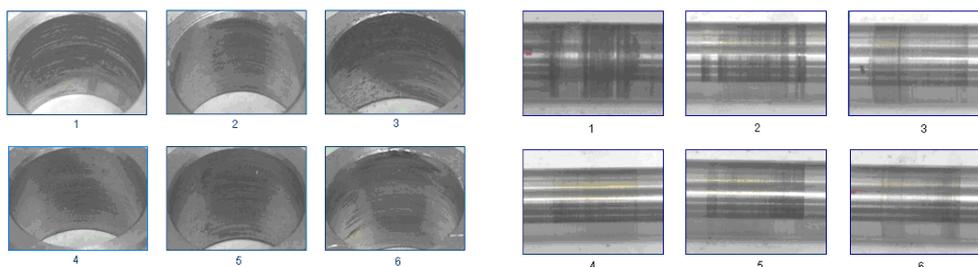


Рис. 4. Вид рабочих поверхностей втулок (слева) и вала (справа) после испытаний

содержащая графита вообще, оказалась вполне работоспособной. По-видимому, высокий коэффициент трения и значительный износ втулки № 1 обусловлен ее слишком тесной посадкой на вал, что воспрепятствовало образованию разделительной масляной пленки в зоне скольжения.

Таблица 5. Шероховатость вала до и после испытаний по трем характеризующим ее параметрам, мкм

№ втулки	До испытаний			После испытаний			Разность, Δ		
	<i>Ra</i>	<i>Rmax</i>	<i>Rz</i>	<i>Ra</i>	<i>Rmax</i>	<i>Rz</i>	<i>Ra</i>	<i>Rmax</i>	<i>Rz</i>
1	0,162	1,149	0,827	0,850	5,431	–	0,688	4,282	–
2	0,157	1,237	0,805	0,159	1,439	1,103	0,002	0,202	0,298
3	0,162	1,312	0,918	0,296	2,822	1,656	0,134	1,510	0,738
4	0,098	0,762	0,564	0,209	2,415	1,716	0,111	1,653	1,152
5	0,156	1,104	0,776	0,216	1,909	1,480	0,060	0,805	0,704
6	0,133	1,036	0,788	0,183	1,653	1,281	0,050	0,617	0,493

В табл. 5 представлены результаты определения шероховатости рабочей поверхности вала для каждого подшипника. Можно видеть, что все три параметра шероховатости вала № 1 до испытаний ничем не выделяются из общего ряда соответствующих

ших параметров шероховатости для остальной группы валов. Однако уже после кратковременного испытания рельеф поверхности этого вала сильно огрубляется, что согласуется с высоким коэффициентом трения уже в начале испытаний. Следует отметить, что параметры шероховатости рабочей поверхности валов и коэффициенты трения по закаленной стали не коррелируют между собой, а также с химическим составом спеченных подшипников скольжения на основе алюминия.

Заключение

Предложены антифрикционные сплавы на основе алюминия, включающие добавки меди, магния, кремния и графита. Показано, что предложенные составы спеченных сплавов пригодны для изготовления антифрикционных материалов при их эксплуатации в условиях ограниченной смазки и малых нагрузок. Заметных зависимостей твердости сплавов, коэффициента трения, величины износа и шероховатости рабочей поверхности вала от состава подшипников ввиду малого различия химического состава сплавов не обнаружено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – Киев: Наукова думка, 1980. – 404 с.
2. Савицкий А.П., Гопаенко В.Г., Марцунова Л.С. и др. Технологические процессы получения порошковых алюминиевых материалов. – М.: ЦНИИцветмет, 1983. – 60 с.
3. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы / Под ред. Ф.И. Квасова и И.Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1972. – 552 с.
4. Савицкий А.П., Марцунова Л.С. Влияние растворимости в твердой фазе на объемные изменения алюминия при жидкофазном спекании // Порошковая металлургия. – 1977. – № 5. – С. 14–19.
5. Савицкий А.П. Жидкофазное спекание систем с взаимодействующими компонентами. – Новосибирск: Наука, 1991. – 183 с.
6. Способы получения и обработки антифрикционных сплавов. Серия «Обработка цветных металлов и сплавов». – М., 1981. – Вып. 4. – 51 с.
7. Царев Г.Л., Чельшев А.П., Волочко А.Г. и др. Свойства горячедеформированного антифрикционного алюминиево-графитового сплава // Порошковая металлургия. – 1986. – № 1. – С. 40–43.
8. Алиева С.Г., Альтман М.Б. и др. Промышленные алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
9. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
10. Абугов А.Л., Баршай И.Л., Белоцерковский М.А. Повышение износостойкости деталей из антифрикционных порошковых материалов поверхностным пластическим деформированием // Трение и износ. – 1994. – Т. 15. – № 2. – С. 264–269.

Поступила 29.09.2008 г.