кремния // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 4. – С. 13–18.
5. Боборыкин В.М., Гремячкин В.М., Истратов А.Г. и др. О влиянии азота на горение алюминия // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 3. – С. 22–29.
6. Роот Л.О., Сморыгина К.С., Звягинцева Е.С., Ильин А.П. Каталитическое действие добавок оксида хрома (III) на процесс горения нанопорошка алюминия в воздухе // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 3. – С. 5–9.
7. Ильин А.П., Толбанова Л.О., Мостовщиков А.В. Состав промежуточных продуктов горения нанопорошка алюминия в воздухе // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 3. – С. 19–24.
8. Ильин А.П., Толбанова Л.О. Формирование нитевидных кристаллов в промежуточных продуктах горения в воздух нанопорошка алюминия и его смесей с нанопорошками молибдена и вольфрама // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 77–80.
9. Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Толбанова Л.О. Рост монокристаллов нитрида алюминия в условиях теплового взрыва // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – Вып. 20. – С. 49–53.

Поступила 19.12.2012 г.

УДК 621.762.3

ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АНТИФРИКЦИОННОГО СПЛАВА Al–40Sn

А.Л. Скоренцев*, Н.М. Русин*, Е.А. Колубаев*,**

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск
**Томский политехнический университет
E-mail: skoralexan@mail.ru; rusinnm@mail.ru; eak@ispms.tsc.ru

Исследовано влияние равноканального углового прессования на структуру и свойства спеченного сплава Al-40Sn. Было установлено, что в результате деформационной обработки в сплаве формируется слоистая структура, причем толщина прослоек фаз уменьшается с ростом числа прессований. Установлено, что помимо упрочнения Холла–Петча прочность сплава дополнительно повышается вследствие утонения межфазовых прослоек. Обнаружено, что обработка методом равноканального углового прессования уменьшает интенсивность изнашивания исследуемого сплава и практически не влияет на величину его коэффициента трения при сухом трении.

Ключевые слова:
Самосмазывающийся антифрикционный материал, интенсивность изнашивания, интенсивная пластическая деформация.
Key words:
Self-lubrication antifriction material, wear intensity, severe plastic deformation.

Трение твёрдых тел сопровождается износом их поверхностных слоёв, в результате которого меняется форма и геометрические размеры трущихся деталей. В том случае, когда замена или восстановление изношенных деталей обходится слишком дорого, между ними помещают легко заменяемый вкладыш с антифрикционным покрытием, который предохраняет ответственные детали узла трения от прямого механического контакта. Как правило, покрытие гораздо мягче контртела, поэтому в процессе эксплуатации механизма оно изнашивается гораздо быстрее. Продление сроков работоспособности покрытия значительно повышает эффективность используемого агрегата. Следовательно, разработке новых антифрикционных материалов с высокими триботехническими свойствами, а также улучшению свойств известных материалов уделяется большое внимание.

В настоящее время в технике широко используются вкладыши с покрытием из антифрикционных алюминиевых сплавов [1], поскольку составляющий их основу пластичный металл способен выдержать без разрушения многократные переде-формации. Однако Al имеет один существенный недостаток – склонен к схватыванию с находящимися с ним в фрикционном контакте металлами при разрушении в месте контакта поверхностной оксидной плёнки. Для того чтобы изолировать образующиеся в местах разрушения оксидной плёнки участки чистой поверхности алюминия, в сплавы вводят вещества, способные размазываться по поверхности трения и образовывать антизадирную плёнку. Наиболее часто для этих целей используют олово (сплавы марки АО). Объёмная доля Sn, особенности распределения его включений по объёму сплава и их форма могут существенно повлиять на процесс формирования и качество антизадирной плёнки.

Объёмное содержание олова в алюминиевых отливках обычно ограничивают 10 % из-за опасности формирования по границам зёрен непрерывной сетки из мягкого Sn. При наличии такой сетки напряжение течения сплава и его пластичность резко снижаются по причине локализации деформации в прослойках мягкой фазы. Избежать образования оловянной сетки в литых алюминиевых

сплавах сложно из-за большой разности температур плавления Al и Sn и снижения практически до нуля растворимости последнего в твёрдом алюминии. Однако если прибегнуть к получению сплавов Al-Sn методами спекания смесей заданного состава, то можно увеличить содержание в них олова и сохранить при этом цельность алюминиевого каркаса, так как в смеси порошков он существует изначально, и задачей спекания является укрепление стыков частиц алюминия. При наличии непрерывного алюминиевого каркаса сплавы можно подвергать деформации, не опасаясь её локализации. Более того, подвергнув спечённый материал интенсивной пластической деформации (ИПД), можно не только существенно упрочнить алюминиевую матрицу [2], но и модифицировать макроскопическую структуру сплава, приведя её к состоянию, наиболее благоприятному для реализации самосмазывания поверхности трения оловом.

Целью настоящей работы было исследование возможностей по управлению структурой и механическими свойствами сплавов системы Al-Sn и изучение их влияния на триботехнические характеристики этих сплавов при использовании такого метода ИПД, как равноканальное угловое прессование (РКУП) [3]. В отличие от обычных методов обработки металлов давлением (ОМД), РКУП позволяет не только подвергать материалы большим деформациям, но и сохранять при этом исходный поперечный размер обрабатываемых образцов, что позволяет существенно расширить ассортимент изделий из обработанного материала.

Материалы и методика эксперимента

В работе использовался сплав состава Al-40Sn, полученный жидкофазным спеканием смеси порошков АСД-4 и ПО2. Спеченные образцы подвергали интенсивной пластической деформации методом РКУП в пресс-форме с перпендикулярными каналами сечением 10×10 мм. Среднее расстояние между фазовыми прослойками определяли по методу секущей. Образцы для механических испытаний на сжатие вырезали из середины полученных прессовок. Направление сжатия образцов совпадало с направлением течения материала при РКУП. Испытания проводили на машине Instron 3369 при скорости осадки образцов 0,5 мм/мин.

Трибологические испытания проводили без применения смазки по схеме «палец–диск» при скорости скольжения 0,6 м/с и давлении на образец 1...5 МПа. Величина коэффициента трения регистрировалась каждую секунду автоматически с помощью встроенного микропроцессора. Интенсивность изнашивания образцов определяли после прохождения ими пути трения длиной 500 м как относительное укорочение (мкм) образца за метр скольжения.

Результаты и их обсуждение

Спечённый сплав Al-40Sn состоит из непрерывных, вложенных друг в друга оловянной и алюминиевой сеток (рис. 1, *а*). Твёрдость отожжённого Al низкая, поэтому такой сплав имеет низкую несущую способность. Структура сплава также не вполне благоприятна для самосмазывания, так как на отдельных участках поверхности трения расстояния между прослойками олова могут быть довольно большими.

С целью устранения указанных недостатков спечённые образцы были подвергнуты интенсивной пластической обработке методом РКУП по так называемому маршруту прессования А, далее – РКУП (А). Из-за того что плоскость течения материала на данном маршруте не меняется, уже через несколько прессований структура сплава в данной плоскости состоит из чередующихся тонких прослоек алюминиевой и оловянной фаз (рис. 1, *б*). Если указанную плоскость использовать как поверхность трения, организовав скольжение контртела перпендикулярно вытянутым прослойкам фаз, то дистанция размазывания олова резко сократится, по сравнению со спечённым образцом.

Степень утонения межфазовых прослоек зависит от числа испытанных образцом прессований (N) по закону

$$h=h_0[(\gamma N)^2+1]^{-0,5}. \quad (1)$$

Здесь γ – интенсивность простого сдвига при РКУП, а h_0 – средняя исходная толщина прослоек

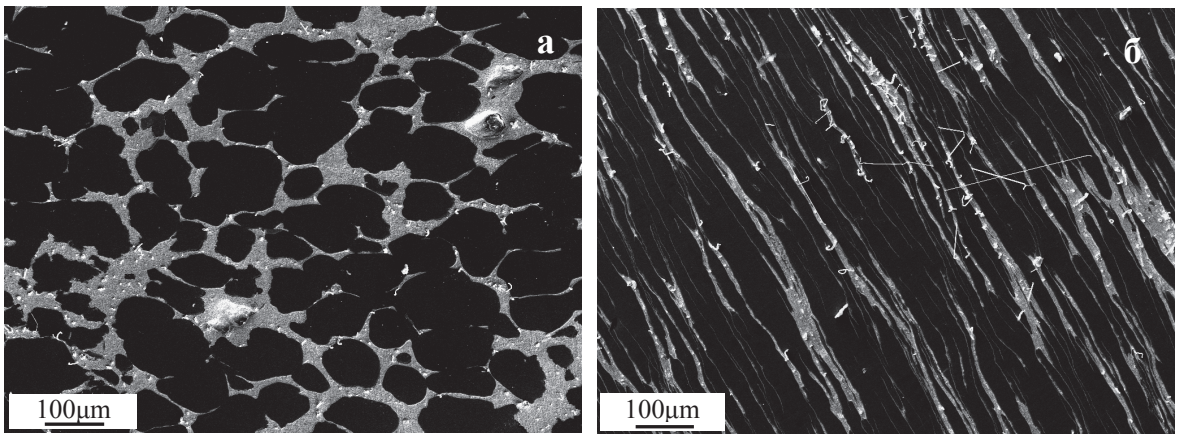

Рис. 1. *Структура сплава Al-40Sn: а) после спекания; б) после 4-х прессований методом РКУП (А)*

Al или Sn фаз [4]. Между рассчитанными (прерывистая линия на рис. 2) по формуле (1) и экспериментальными значениями h/h_0 имеется хорошее совпадение, поэтому здравый смысл подсказывает, что, увеличивая число проходов, дистанцию размазывания олова можно значительно сократить. Алюминиевая матрица в это время будет испытывать наклёп, прочность и твёрдость её возрастут, а несущая способность и износостойкость сплава повысятся.

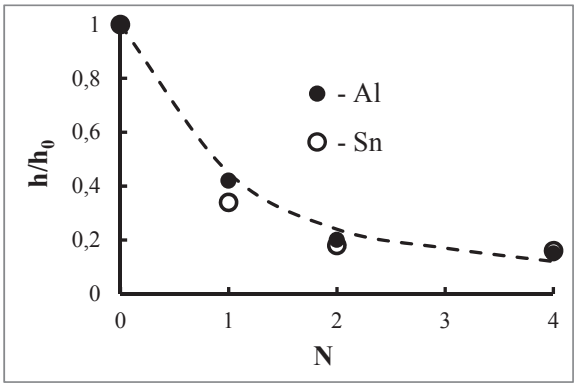

Рис. 2. *Отклонение измеренной интенсивности утонения слоев фаз от рассчитанной в сплаве Al-40Sn при РКУП (А)*

В случае перпендикулярного расположения каналов в пресс-форме интенсивность сдвига при РКУП γ=2, что эквивалентно деформации образца растяжением на величину ε=1,155. В случае чистого поликристаллического алюминия данной величины деформации обычно достаточно, чтобы достичь его предельного деформационного упрочнения. В нашем случае прочность двухфазного сплава Al-40Sn продолжает расти и при большем числе прессований (рис. 3). Причём, начиная со второго прохода и выше, величина приращения прочности примерно одинакова. То есть в целом при N>1 прочность сплава можно описать функцией типа $\sigma=\sigma(1)+\kappa/h$. Здесь κ – константа, характеризующая эффективность дислокационных барьеров в алюминиевой матрице, а $\sigma(1)$ – её упрочнение после первого РКУП.

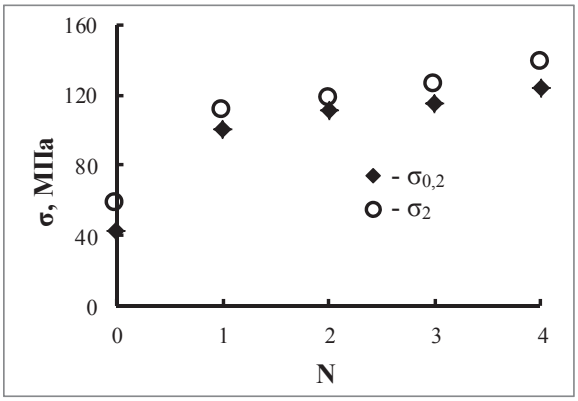

Рис. 3. *Зависимость прочности сплава Al-40Sn от числа РКУП (А)*

Микроскопические исследования показали, что в ходе первого РКУП происходит значительная фрагментация зёрен алюминиевой фазы за счёт образования субзёрен со средним диаметром 0,45±0,03 мкм. После повторных прессований размер субзёрен алюминиевой фазы оставался неизменным. Средний размер субзёрен после 5-го РКУП (А) был 0,50±0,05 мкм. Таким образом, скачёк прочности сплава в результате первого РКУП обусловлен измельчением зёренной структуры алюминиевой матрицы (эффект Холла–Петча). При этом последующий её рост не вполне понятен.

Единственным заметным изменением в структуре сплава при многократном РКУП (А) является утонение межфазовых прослоек, оловянные включения при этом вытягиваются, то есть площадь межфазной поверхности растёт. Границы фаз некогерентны и являются непроницаемыми барьерами для решёточных дислокаций. Поэтому наиболее вероятной причиной упрочнения сплава при многократном РКУП (А) является увеличение их удельной площади, вернее – сопутствующее ему сокращение свободного расстояния между границами фаз, действующими как дислокационные барьеры.

Естественно, что описанные изменения структуры и механических свойств подвергнутого РКУП (А) сплава Al-40Sn должны сказаться на его трибологических свойствах. В таблице приведены значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания сплава при давлении 1, 3 и 5 МПа и скорости скольжения 0,6 м/сек по сухому стальному диску.

Как следует из таблицы, влияние обработки неоднозначно. Так, при заданном давлении и скорости скольжения число РКУП и, значит, упрочнение и утонение алюминиевых прослоек, практически не сказывается на величине коэффициента трения сплава. Он остаётся высоким при малом давлении и резко снижается при большом. Интенсивность изнашивания сплава также почти не меняется при малом давлении, но резко возрастает при увеличении нагрузки на образец. Причём при всех трёх давлениях усматривается некоторая связь с толщиной алюминиевых прослоек. Пока прослойки толстые (N=0 и 1), интенсивность изнашивания образцов высока.

Таблица. *Влияние числа РКУП (А) на трибологические свойства сплава Al-40Sn при различном давлении*

№ РКУП	Коэффициент трения, μ			Интенсивность изнашивания, мкм/м		
	Давление, МПа					
	1	2	3	1	3	5
0	0,63	0,20	0,11	0,1	0,18	0,24
1	0,63	0,20	0,11	0,1	0,18	0,22
2	0,64	0,19	0,11	0,08	0,14	0,16
3	0,65	0,20	0,11	0,1	0,14	0,18
4	0,59	0,21	0,11	0,12	0,14	0,18

При более сильном их утонении скорость износа сплава понижается примерно на 25 % и далее остаётся постоянной. Видимо, при утонении прослоек алюминиевой фазы до определённой величины выдавленное олово размазывается по всей их поверхности и дальнейшее их утонение ситуацию не меняет. Излишки выдавленного олова на поверхности трения не задерживаются, поскольку образуемая им плёнка имеет строго заданную толщину, определяемую силами адгезионного сцепления олова с алюминием.

Полученные значения величины коэффициента трения сплава хорошо согласуются с теорией преимущественно адгезионной природы силы трения твёрдых тел, где коэффициент адгезионного трения определяется как

$$\mu_a = \tau_0/\rho_r + \beta. \quad (2)$$

Здесь ρ_r – фактическое давление в зонах контакта (полная нагрузка на суммарную площадь пятен фактического контакта!), а τ_0 и β – характеристики поверхностных слоев. При малых нагрузках удельное давление на фактических контактных площадках низкое, и, следовательно, значение μ_a большое. При возрастании давления на образец площадь контактных площадок остаётся практически неизменной, но величина ρ_r растёт пропорционально нагрузке, что приводит к снижению μ_a.

При этом величина силы трения, определённая как произведение коэффициента трения на нормальную нагрузку (закон Амонтона–Кулона) в нашем случае остаётся примерно постоянной. Это заставляет предположить, что на поверхности трения сплава формируется специфический слой материала, имеющий постоянную прочность на сдвиг τ_0. Отметим, что величина коэффициента трения сплава в начале испытаний на трение имеет низкое значение. Далее в процессе притирки она растёт и достигает значения, которое далее не меняется при неизменной действующей нагрузке. То есть поверхностный слой, свойства которого обсуждались выше, формируется в процессе сухого трения. Поэтому связь между триботехническими параметрами сплава и его механическими свойствами обнаружена не была.

Таким образом, объяснение полученных результатов триботехнических испытаний не простое и требует тщательного изучения механизмов износа сплавов системы Al-Sn при сухом трении. На основании изложенных результатов в настоящий момент можно сделать лишь промежуточные выводы, в основном касающиеся структуры и механических свойств сплава Al-40Sn.

1. Деформационная обработка спечённого сплава Al-40Sn методом РКУП (А) позволяет трансформировать его исходную матричную структуру в структуру слоистого типа.
2. Толщина фазовых прослоек уменьшается практически в два раза после каждого прессования.
3. Прочность сплава Al-40Sn растёт с увеличением числа прессований. Максимальный её прирост происходит в ходе первого РКУП и далее она увеличивается на постоянную величину после каждого прохода образца через матрицу.
4. Обработка сплава Al-40Sn методом РКУП (А) улучшает его сопротивление изнашиванию при сухом трении, особенно эффективно после первых двух прессований.
5. При отсутствии жидкой смазки величина коэффициента трения сплава Al-40Sn по стали практически не зависит от структуры и прочности сплава.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ по проекту № 11-08-00460а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буше Н.А. и др. Подшипники из алюминиевых сплавов. – М.: Транспорт, 1974. – 256 с.
2. Xu K., Wongpreedee K., Russell A.M. Microstructure and strength of a deformation processed Al-20 % Sn in situ composite // Journal of materials science. – 2002. – V. 37. – P. 5209–5214.
3. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Мн.: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
4. Русин Н.М., Скоренцев А.Л., Коростелёва Е.Н. Микроструктура и механические свойства двухфазного сплава Al-Sn, подвергнутого интенсивной пластической обработке методом РКУП (А) // Известия вузов. Физика (спец. выпуск). – 2011. – № 11/3. – С. 208–214.

Поступила 23.05.2013 г.