

УДК 621.7

Бейгельзимер Я. Е.  
Гусар Ю. В.  
Бахмацкий В. Д.

## ИССЛЕДОВАНИЕ SWIFT-ЭФФЕКТА НА АЛЮМИНИЕВЫХ И МЕДНЫХ СПЛАВАХ

Swift-эффект состоит в необратимом удлинении цилиндрического образца при кручении со свободными концами. Первые исследования этого эффекта были выполнены W. Swift, на различных металлах и сплавах [1]. В последующем, Swift-эффект тщательно изучался [2, 3]. Причин тому, как минимум, две. Во-первых, возможность удлинения при скручивании необходимо учесть при расчете конструкций на прочность. Во-вторых, Swift-эффект связывают с образованием текстур, в связи с чем, он является хорошим тестом для теоретических моделей.

Исследование Swift-эффекта может иметь и практическое значение. Согласно работе [4], Swift-эффект является мерой того, насколько материал способен деформироваться по схеме простого сдвига. Чем больше удлинение образца при кручении, тем шире и неоднороднее зона сдвига в различных операциях обработки металлов давлением, в частности, при вырубке. В этом процессе нужна узкая зона сдвига для получения заданной точности элементов или всей детали. Это особо важно при изготовлении деталей малых размеров, например, для МЭМС, размеры которых могут быть миллиметры и доли миллиметров. Изготовление таких деталей относят к процессам microforging.

Целью статьи является изучение Swift-эффекта на сплавах с крупнокристаллической и субмикрокристаллической (СМК) структурой. В работе показано, что Swift-эффект ослабляется на СМК материалах. Это соответствует выводам работы [4].

Для исследования Swift-эффекта были подготовлены две серии образцов из медных и алюминиевых сплавов с крупнокристаллической и СМК структурой. Согласно ГОСТу 1497-84 «Образцы для испытаний на кручение», были сделаны образцы цилиндрической формы с диаметром рабочей части 5 мм и длиной рабочей части 36 мм. Эскиз головки образцов приведен на рис. 1. При изготовлении был обеспечен плавный переход от рабочей части образца к его головкам с радиусом закругления 1,5 мм. Разность между наибольшим и наименьшим диаметром на рабочей части образца не превышала 0,2 % диаметра. Диаметр образца измерялся с погрешностью 0,01 мм, а его длина с погрешностью не более 0,1 мм. Технология изготовления образцов не оказывала влияние на механические свойства исходного материала. Шероховатость поверхности рабочей части цилиндрических образцов соответствовала  $Ra < 0,63$  мкм по ГОСТ 2789–73.

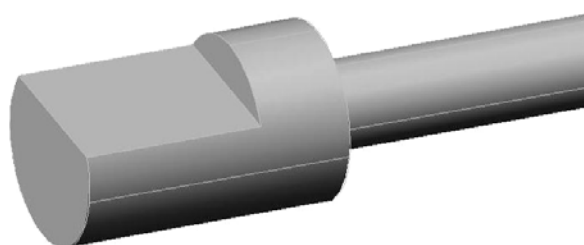


Рис. 1. Эскиз головки образца

СМК структура у меди и алюминия была получена в результате четырёх проходов винтовой экструзией (ВЭ) [5]. Прессование проводили с противодействием 10 т при  $t = 100$  °С. Для снижения уровня трения применяли смазку на основе графита, индустриального масла и дисульфида молибдена.

Исследование свойств образцов и измерение Swift-эффекта проводилось на разработанной нами испытательной машине, внешний вид которой приведен на рис. 2. На рис. 3 показана схема узла машины, обеспечивающего свободное удлинение образца при кручении.

Испытательная машина предназначена для исследования свойств наноструктурных материалов при упругопластических деформациях, а также для моделирования процессов получения таких материалов методами интенсивной пластической деформации (ИПД).



Рис. 2. Испытательная машина

Машина состоит из механической стойки с редукторами, шагового электродвигателя, привода растяжения и привода кручения типа Дшр56-1,8-1200, драйверов двигателей DSM-2,5, датчиков перемещения BS718-1 мкм, тензоизмерительных датчиков осевого усилия и момента кручения, линейной направляющей, электронного блока управления и измерения, специализированного программного обеспечения «RTViewer».

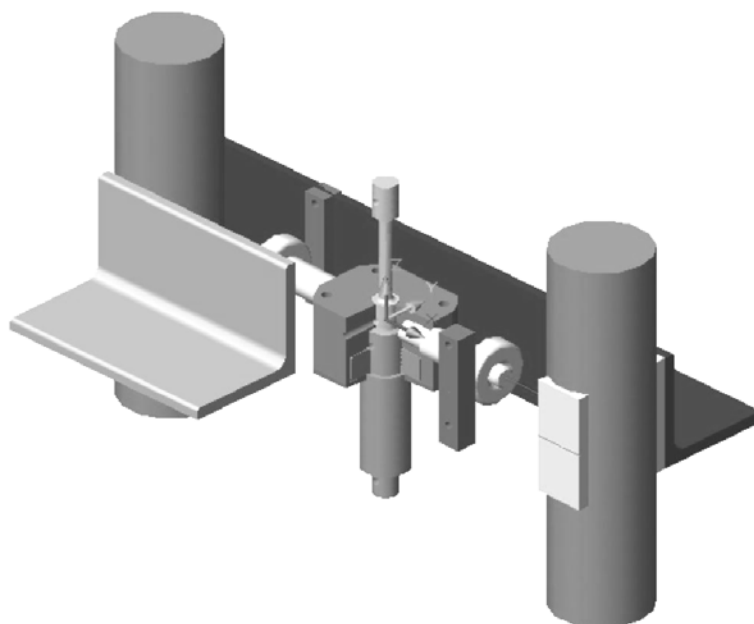


Рис. 3. Узел линейной направляющей

Для измерения Swift-эффекта образец устанавливается в машину в вертикальном положении. Верхний конец образца крепится к приводу кручения, а нижний к линейной направляющей. Линейная направляющая препятствует вращению нижнего конца образца и, в тоже время, дает возможность перемещаться ему в осевом направлении. Образцы центрировались с точностью не ниже 0,1 мм на 100 мм длины. Статическое нагружение было плавным – без толчков и ударов. Измерение угла кручения измерялось с погрешностью, не превышающей 1°. Нагружение выполнялось с угловой скоростью вращения 1°/сек, в диапазоне: 360° для алюминиевых образцов и 720° для медных. Данные по удлинению образцов, в зависимости от угла поворота, записывались на компьютер.

Измерительная аппаратура машины обеспечивает выполнение измерений с погрешностью не превышающей:

- предел допускаемой основной погрешности измерения удлинения при доверительной вероятности 0,95 не более 1 %;
- предел допускаемой дополнительной погрешности измерителя в рабочем интервале температур не превышает 1 %.

На рис. 4–5 приведены графики изменения длины образцов в зависимости от угла поворота при нулевом усилии на свободном конце. По рис. 4 видно, что исходный алюминиевый образец после одного оборота удлинился на 0,35–0,40 мм. Основная часть удлинения пришлось на первые 50° вращения, дальше прирост длины незначителен. Образец, обработанный ВЭ, удлинился на 0,08 мм. Основная часть его удлинения пришлось так же на первые 50° вращения, хотя его величина значительно меньше. Следовательно, у алюминиевых образцов с СМК структурой Swift-эффект в 4–5 раз меньше, чем у крупнокристаллических. На рис. 5 приведен график изменения длины после двух оборотов кручения медных образцов. Поведение кривых на этом графике отличается от предыдущих. До 150° вращения кривые совпадают, далее они расходятся, но продолжают возрастать. Удлинение крупнокристаллического медного образца идет значительно быстрее, чем СМК. Исходный образец удлинился на 0,4 мм, а обработанный ВЭ – на 0,1–0,15 мм. У медных СМК образцов Swift-эффект меньше, чем у крупнокристаллических в 3–4 раза.

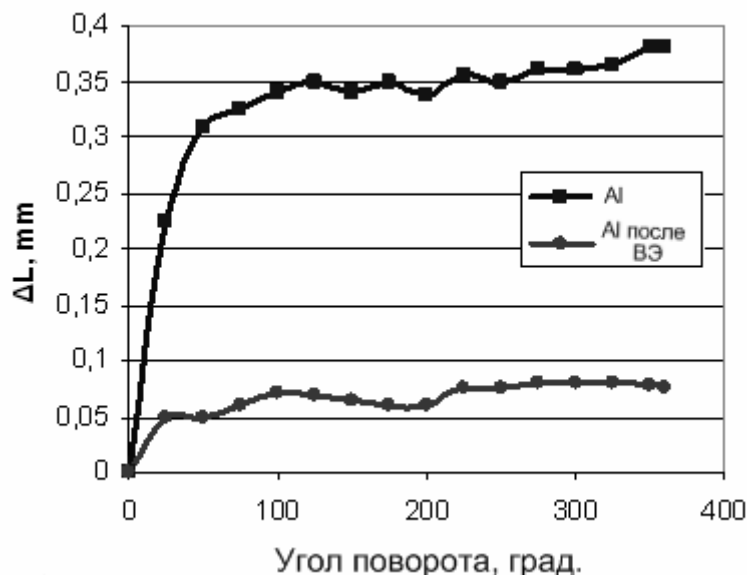


Рис. 4. Результаты измерения удлинения образца из чистого Al и образца из Al после обработки ВЭ в зависимости от угла поворота

Результаты эксперимента могут быть объяснены в рамках модели турбулентного течения металлов на микроуровне, предложенной в работе [4]. Согласно этой модели, Swift-эффект является следствием того, что в отожженных металлах невозможен простой сдвиг из-за отсутствия межзеренного проскальзывания. Поэтому, при кручении возникает

поле скоростей с осевой составляющей, которая и приводит к изменению длины образца. Неравновесные высокоугловые границы, возникающие при ИПД, допускают межзеренное проскальзывание. В результате оказывается, что СМК материал может деформироваться по схеме простого сдвига, т. е. без удлинения образца.

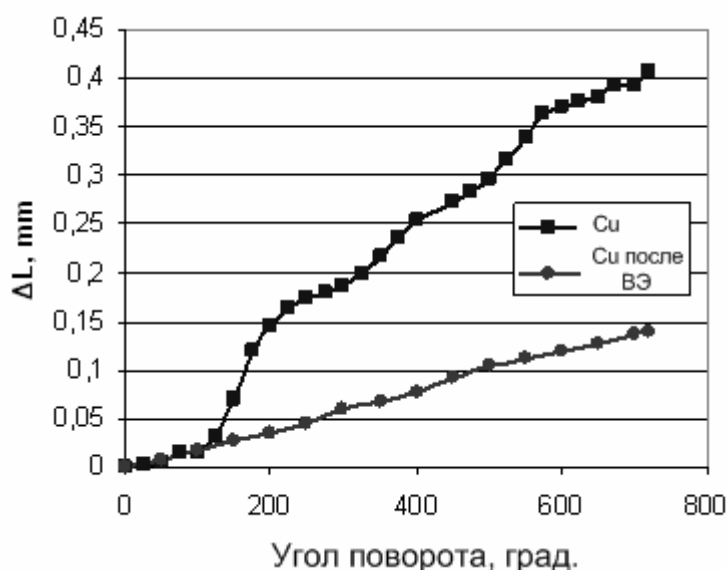


Рис. 5. Результаты измерения удлинения образца из чистого Cu и образца из Cu после обработки ВЭ в зависимости от угла поворота

### ВЫВОДЫ

Экспериментально показано, что на СМК материалах резко ослабляется Swift-эффект. С нашей точки зрения это связано с наличием в этих материалах высокоугловых границ, допускающих межзеренное проскальзывание.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Swift H. W. Length changes in metals under torsional overstrain / H. W. Swift // *Engineering*. – 1947. – № 163. – P. 253–257.
2. Toth L. S. Texture Development and Length Changes in Copper Bars Subjected to Free End Torsion / L. S. Toth, J. J. Jona, D. Daniel, J. A. Bailey // *Textures Microstruct.* – 1992 – № 19. – P. 245–262.
3. W Texture and Mechanical Behavior of Magnesium During Free-End Torsion / B. Beausir, L. Toth, F. Qods, K. Neale // *Journal of Engineering Materials and Technology JAN.* – 2009. – № 131.
4. Бейгельзимер Я. Е. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью / Я. Е. Бейгельзимер // *Физика и техника высоких давлений*. – 2008. – № 18, 4. – С. 77–86.
5. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков. – Донецк : ТЕАН, 2003.

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, проф. ДонФТИ НАН Украины;

Гусар Ю. В. – инженер ДонФТИ НАН Украины;

Бахмацкий В. Д. – науч. сотрудник ДонФТИ НАН Украины.

ДонФТИ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина Национальной академии наук Украины, г. Донецк.

E-mail: yanbeygel@gmail.com