

УДК 621.7

Бейгельзимер Я. Е.  
Абрамова Е. А.  
Ткаченко Т. К.  
Жбанков Я. Г.  
Гришаев В. В.  
Терменжи А. А.

## ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Материалы с субмикрокристаллической (СМК) структурой (размер зерна от 100 до 1000 нм) обладают высокой прочностью, пластичностью, хорошей текучестью. Получают их методами интенсивной пластической деформации ИПД [1, 2]. В настоящее время эти материалы активно изучают в лабораториях всего мира. Однако по ряду причин до сих пор они не нашли широкого промышленного применения.

Для вывода СМК материалов из лабораторий и привлечения их на рынок, необходимо изучать особенности их формообразования и свойства полученных изделий. Получение СМК материалов и их формообразование могут происходить только при ограниченных температурах, превышение которых разрушает их структуру. Так же и изделия, изготовленные из таких материалов, имеют ограничения по температуре. Высокая циклическая прочность позволяет применять СМК материалы для изготовления деталей ответственного назначения таких, как клапаны, заклёпки. Подобные изделия наиболее целесообразно изготавливать ресурсосберегающими методами, в частности, радиальным выдавливанием (РВ), позволяющим получить высокоточное изделие. Существенным недостатком РВ являются относительно небольшие степени деформации, которые можно получать без разрушения заготовки вследствие исчерпания её ресурса пластичности [3]. Это делает актуальным изучение влияния предварительной ИПД заготовки на процесс ее радиального выдавливания.

Целью данной работы является изучение особенностей радиального выдавливания алюминиевого сплава с субмикрокристаллической структурой.

Для эксперимента нами был выбран алюминиевый сплав Al-4,45Mg-0,3Sc-0,1Zr, который перспективен как конструкционный материал для авиастроения, так как имеет высокий предел выносливости. Сплав относится к термически упрочняемым. Он достаточно прочен, имеет сравнительно высокие пластические характеристики, хорошо поддаётся сварке и имеет высокую коррозионную стойкость. Формирование в нём СМК структуры позволяет повысить долговечность изделий [4].

Эксперименты по радиальному выдавливанию выполняли на сплавах с крупнокристаллической (КК) и СМК структурой. Первые получали горячим прессованием с последующим отжигом. Средний размер зерна составлял 50 мкм. Материал с СМК структурой получали винтовой экструзией (ВЭ) по режиму из статьи [3]. Средний размер фрагментов после обработки составлял 300 нм.

На рис. 1 приведены кривые течения, полученные нами в испытаниях на осадку СМК и КК образцов.

Из заготовок с СМК и КК структурой точением изготовили заготовки цилиндрической формы диаметром 15 мм и высотой 45 мм для последующего РВ. Последнее осуществляли на испытательной машине МС-2000 усилием 2 МН. Схема процесса показана на рис. 2.

РВ производили в полость высотой 5,5 мм. В качестве смазки использовали бараний жир. Скорость деформирования составляла 1 мм/с.

Процесс РВ вели до начала разрушения образцов. Образец с КК структурой начал разрушаться, когда фланец достиг диаметра 20,5 мм. Образец с СМК структурой начал разрушаться, когда диаметр фланца достиг 25,4 мм. Попытка выдавить образец с КК структурой до такого диаметра привела к полному разрушению фланца. На рис. 3, приведены изделия, выполненные из материала с СМК и из материала с КК структурой, при диаметре фланца 25 мм.

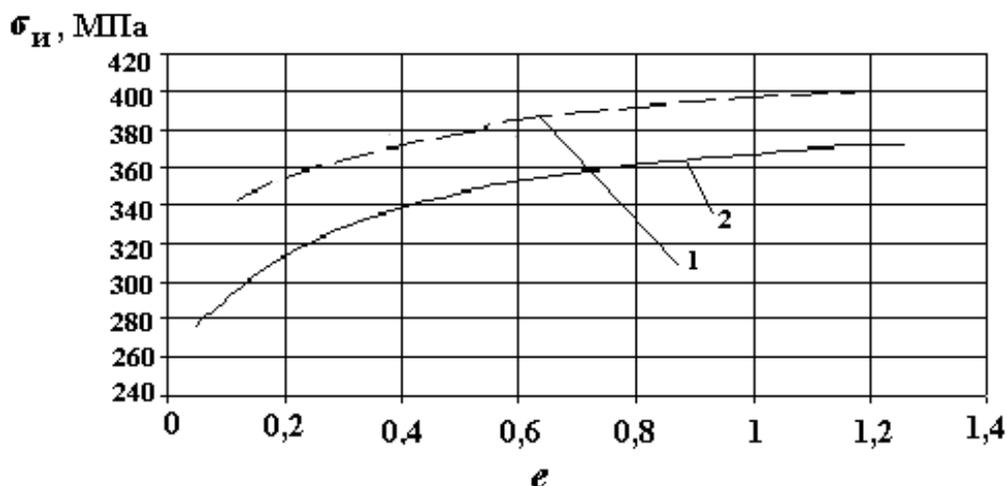


Рис. 1. Кривые течения, полученные по результатам испытаний на осадку цилиндрических образцов с SMK и KK структурой:  
1 – SMK материал; 2 – KK материал

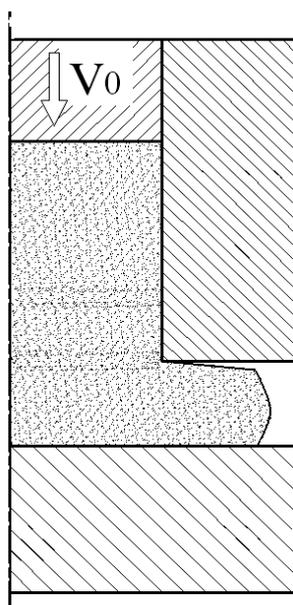


Рис. 2. Схема радиального выдавливания сплошной заготовки

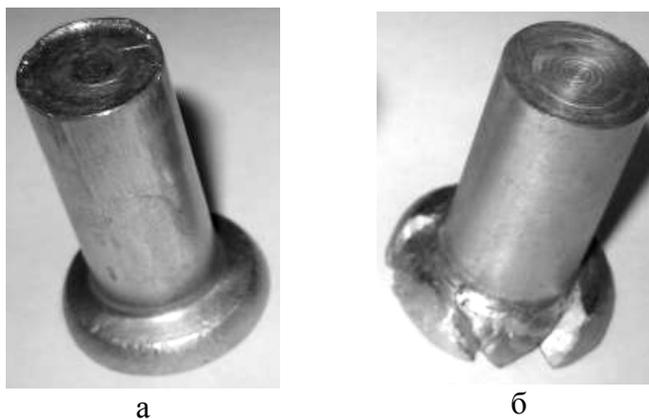


Рис. 3. Образцы, полученные радиальным выдавливанием:  
а – образец с SMK структурой, б – образец с KK структурой

Таким образом, образец с SMK структурой обладает более высокой пластичностью, в сравнении с образцом с KK структурой. Он проявил лучшую заполняемость полости штампа, что означает его более высокую текучесть. Также было отмечено, что для деформирования образца с SMK структурой при прочих равных условиях требуются более высокие усилия выдавливания. Для получения диаметра фланца 20 мм из KK заготовки потребовалось усилие 85 кН, а для SMK заготовки – 127 кН. Это связано с более высоким сопротивлением деформации SMK заготовки.

С целью получения истории деформирования выбранных точек заготовки при РВ провели расчет напряженно-деформированного состояния заготовки методом конечных элементов с помощью пакета «Deform-3D». Далее историю деформирования использовали для расчета ресурса пластичности по модели В. Л. Колмогорова [6].

Условие неразрушения в данном случае выглядит как:

$$\psi = \int_0^t \frac{H(t)}{\Lambda_p[k(t), \mu_\sigma(\tau)]} dt < 1, \quad (1)$$

где  $\psi$  – степень истощения ресурса пластичности в момент времени  $\tau$ ;

$H(\tau), k(\tau), \mu_\sigma(\tau)$  – результаты решения краевой задачи, которые показывают изменение вдоль траектории движения точки интенсивности скоростей деформации сдвига и показателей напряженного состояния;

$\Lambda_p[k, \mu_\sigma]$  – функция, показывающая зависимость пластичности от термомеханических параметров.

В первую очередь ставилась задача качественной оценки процесса, поэтому были приняты следующие допущения:

– модель материала не учитывает СМК – структуру заготовки;

– в качестве материала заготовки был выбран сплав АМг6, как наиболее близкий по свойствам к сплаву, использованному в физическом эксперименте.

Историю деформирования определили для трех точек в плоскости, перпендикулярной оси заготовки, на разном удалении от центра (рис. 4).

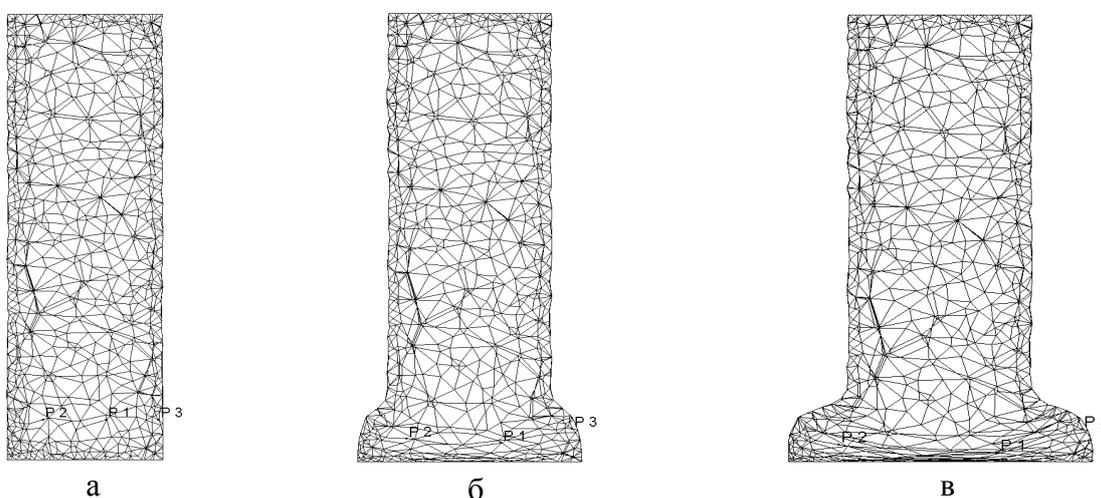


Рис. 4. Расположение точек на осевом разрезе заготовки в разные моменты процесса: а – начальная стадия; б – развитие процесса; в – конечная стадия

Результатом расчета является зависимость истощения ресурса пластичности материала заготовки от хода пуансона (рис. 5). Как видно из графика, ресурс пластичности истощается более интенсивно по мере приближения к поверхности заготовки, которая является наиболее опасным местом с точки зрения трещинообразования.

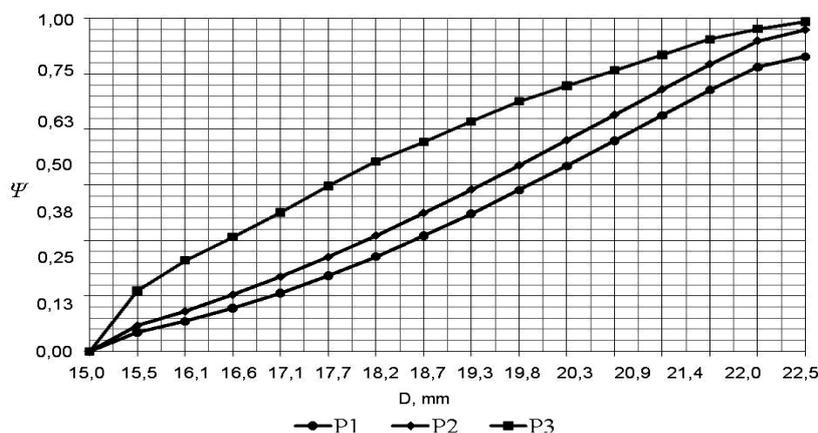


Рис. 5. Зависимость ресурса пластичности  $\psi$  материала заготовки от диаметра фланца  $D$ , мм

В дальнейшем планируется совершенствование методики расчета ресурса пластичности при радиальном выдавливании, в частности, с привлечением модели разрушения Огородникова В. А. [7].

## ВЫВОДЫ

Экспериментально показано, что для радиального выдавливания субмикроструктурированные материалы имеют ряд преимуществ перед крупнокристаллическими материалами. Более высокая пластичность первых позволила получить больший диаметр фланца. Высокая текучесть субмикроструктурированного материала обеспечила хорошую заполняемость штампа. Также отмечено более высокое сопротивление деформации субмикроструктурированной заготовки по сравнению с крупнокристаллической заготовкой.

Это позволяет рекомендовать винтовую экструзию как заготовительную операцию перед обработкой давлением сплава Al-4,45Mg-0,3Sc-0,1Zr, например, перед радиальным выдавливанием для повышения пластических и механических свойств заготовки и готового изделия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев Р. З. *Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией* / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : ЛОГОС, 2000. – 272 с.
2. *Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций* / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков. – Донецк : ТЕАН, 2003. – 87 с.
3. Автократова Е. В. *Усталость мелкозернистого высокопрочного Al-6Mg-Sc сплава, полученного равноканальным угловым прессованием* / Е. В. Автократова, Р. О. Кайбышев, О. Ш. Ситдииков // ФММ. – 2008. – Т. 105. – № 5. – С. 532–540.
4. *Twist extrusion as a tool for grain refinement in Al–Mg–Sc–Zr alloys* / D. Orlov, A. Reshetov, A. Synkov, V. Varyukhin, D. Lotsko, O. Sirko, N. Zakharova, A. Sharovsky, V. Voropaiev, Yu. Milman and S. Synkov // *Nanostructured materials by high – pressure severe plastic deformation. NATO science series II mathematics, physics and chemistry*. – 2005. – Vol. 212. – P. 77–82.
5. Алиева Л. И. *Моделирование разрушения в процессе радиального выдавливания фланца* / Л. И. Алиева, П. Абхари, Я. Г. Жбанков // *Вестник ДГМА*. – 2008. – № 3Е (14). – С. 2–7.
6. Колмогоров В. Л. *Механика обработки металлов давлением : учебник для вузов* / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
7. Огородников В. А. *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением* / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа, 1983. – 176 с.

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, проф. ДонФТИ НАНУ;  
Абрамова Е. А. – аспирант ДонФТИ НАНУ;  
Ткаченко Т. К. – инженер ДонФТИ НАНУ;  
Жбанков Я. Г. – аспирант ДГМА;  
Гришаев В. В. – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник ДонФТИ НАНУ;  
Терменжи А. А. – студент ДонНТУ.

ДонФТИ НАНУ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАНУ, г. Донецк.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: fiztec\_la@mail.ru