

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ НАНОСТРУКТУРНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DEFORM 2D

Лопатин Н.В. к.т.н., Кудрявцев Е.А., Салищев Г.А. д.т.н.  
Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

## Введение

Впервые детали авиационного назначения из сплава ВТ6, изготовленные с применением сверхпластической формовки, были применены в двигателях самолетов А12 в 1964 году[1]. С развитием методов сверхпластической формовки были определены основные требования к режимам деформации и к структуре применяемых для формообразования сплавов. Например, изготовление деталей из листов сплава ВТ6, с размером зерна альфа фазы 10 мкм в режиме сверхпластичности, проводят при температурах от 850 до 920°C и давлениях до 10 МПа[2]. При этой температуре, на поверхности титанового сплава, образуется альфирующий слой, который способствует охрупчиванию поверхности и снижению эксплуатационных свойств сплава. Для снижения температуры деформации и предотвращения образования альфирующего слоя был предложен сплав ВТ6 с мелкозернистой (МЗ) и субмикроструктурной (СМК) структурой. Такой материал способен к сверхпластической деформации при температурах от 550 до 650°C, при которых альфирующий слой не образуется. Однако МЗ и СМК сплавы обладают низкой термостабильностью структуры, что выражается в деградации свойств, при сверхпластической деформации, и в формировании разнотолщинности в изделии. В этой связи, при разработке технологии формовки необходимо учитывать деградацию структуры и свойств сплава.

## Методы и процедуры

Материал для исследования был двухфазный титановый сплав ВТ6 с субмикроструктурной структурой. Размер зерна альфа фазы составлял 300 нм. Для построения реологических моделей материала был проведен эксперимент на растяжение заготовок вырезанных из листа ВТ6 с размерами рабочей части 16x1,5x0,3 мм при температурах 550-650°C и начальной скорости деформации от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  с<sup>-1</sup>. На рис. 1 представлены зависимости напряжения течения, удлинения до разрушения и параметра скоростной чувствительности от скорости деформации при температуре деформации 550°C.

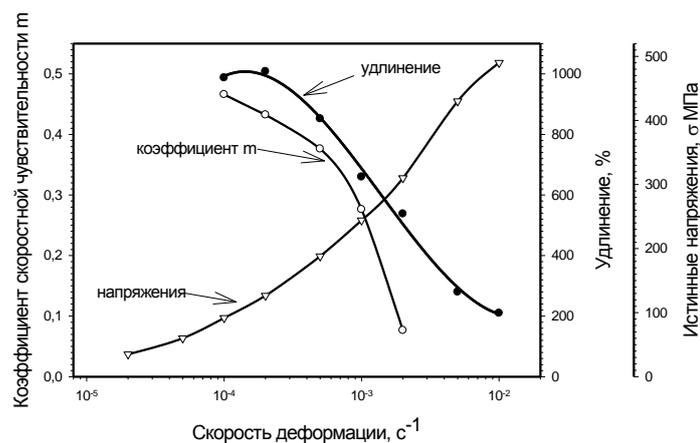


Рис.1 – Механическое поведение сплава ВТ6 при температуре деформации 550°C.

Конечно, элементная модель формовки была построена в программном комплексе Deform-2D с применением моделей материала ползучести  $\dot{\epsilon} = K \cdot m \cdot \sigma^{n1} \cdot t^{(m1-1)} + Q \cdot \sigma^{r1}$  (постановка 1) и модели с учетом вклада фазового состава в напряжение течения сплава (постановка 2). Фактически материал рассматривался как смесь из МЗ и СМК сплава. Переход из СМК в МЗ состояние определялся кинетикой роста зерна. Для постановки 2 кинетика роста зерна, при сверхпластичности, рассчитывалась с применением уравнения  $\bar{r}_\alpha^3 - \bar{r}_{\alpha 0}^3 = K (t - t_0)$ . Принимали, что при достижении размера зерна равном среднему расстоянию между бета фазами, дальнейший рост зерен альфа фазы не происходит и реология течения становится аналогичной МЗ материалу. Реологические модели СМК и МЗ материала задавались уравнением  $\sigma = A_f \cdot \epsilon^{n_f} \cdot \dot{\epsilon}^{m_f} + C_f$ .

## Результаты и обсуждения

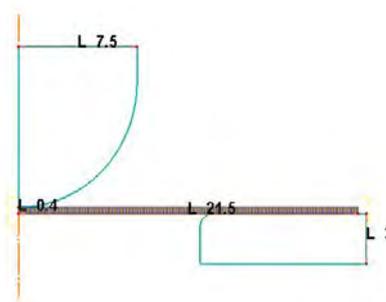
С целью оценки возможности прогнозирования разнотолщинности в принятых приближениях была изготовлена опытная оснастка аналогичная модели Эриксона (Рис.2а) и конечно-элементная модель в программном комплексе Deform2D(Рис.2б). Деформацию до разрушения заготовки проводили в изотермических условиях со скоростью перемещения траверсы от 0,12 до 12 мм/мин. Результаты экспериментальной работы для температуры деформации 650°C представлены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные

Скорость перемещения траверсы, мм/мин	Толщина листа, мкм	Толщина в тонком участке, мкм	Толщина в вершине купола, мкм	Деформация до разрушения
0,12	395	70	300	1.73
1,2	410	80	305	1.63
12	400	180	325	0.8



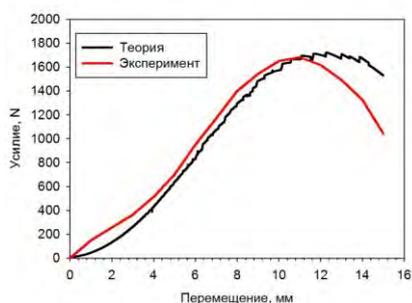
а)



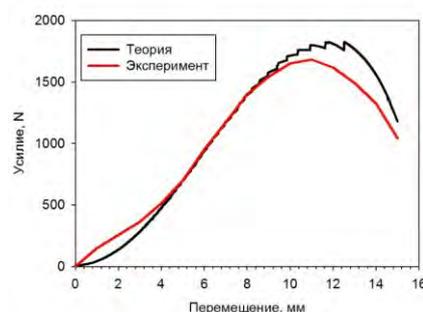
б)

Рис.2 – Экспериментальная модель (а) и теоретическая модель (б) формовки.

Сопоставление результатов измерения, усилий деформирования при эксперименте и теоретически рассчитанных усилий, показали, что наибольшая сходимость результатов наблюдается при задании реологии материала с учетом эволюции структуры при сверхпластичности (постановка 2). На рис. 3 показаны графики изменения усилий в зависимости от перемещения траверсы при температуре деформации 650°C и скорости перемещения траверсы 0,12 мм/мин. Из представленных данных видно, что при локализации деформации, наблюдается снижение усилий деформирования, при этом теоретическая модель в постановке 2 позволяет спрогнозировать момент достижения максимальных усилий.



а)



б)

Рис.3 – Графики изменения усилия деформирования (а) постановка 1, (б) постановка 2.

Детальный анализ НДС при теоретической формовки в постановке 1 и 2 показал, что наилучшая сходимость результатов в постановке 2 обусловлена применением структурно-чувствительной реологической модели. Данная модель позволила учесть упрочнение сплава в режиме сверхпластичности, за счет роста зерна, и изменение параметра скоростной чувствительности материала, величина которого определяет способность деформации металла в режиме сверхпластичности без разрушения[3]. Карты рассчитанной накопленной деформации представлены на рис. 4.

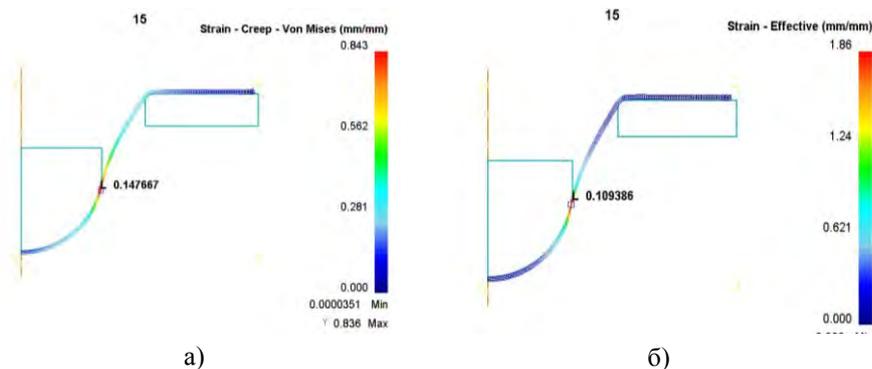


Рис. 4 – Карты накопленной деформации при температуре 650°C и скорости перемещения траверсы 0,12 мм/мин (а) постановка 1, б) постановка 2).

Таблица 2. Теоретические данные

Скорость перемещения траверсы, мм/мин	Толщина листа, мкм	Толщина в тонком участке, мкм	Толщина в вершине купола, мкм	Деформация до разрушения
0,12	400	100/147*	305	1,8
1,2	400	90/170*	330	1,6
12	400	208/260*	340	0,73

\* в знаменателе результаты для решения в постановки 1.

### Выводы

В результате проведения теоретической и экспериментальной работы было установлено, что:

1. программный пакет Deform 2D позволяет спрогнозировать формообразование при низкотемпературной сверхпластичности.
2. для прогнозирования мест локализации деформации при сверхпластической деформации СМК материалов необходимо учитывать деградацию структуры и свойств материалов в процессе деформации.

### Литература

1. A.J. Barnes Superplastic Forming 40 Years and Still Growing JMEPEG (2007) 16:440–454
2. J.A. Wert, N.E. Paton Enhanced Superplasticity and Strength in Modified Ti-6Al-4V Alloys Metallurgical transactions A Vol. 14A, 1983
3. T.G. Nieh, J. Wadsworth, O.D. Sherby, Superplasticity in metals and ceramics 1997