

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ФОРМОВКЕ

Н. В. Лопатин^{1,а}, Е. А. Кудрявцев², П.В. Панин³, С.В. Выдумкина³

¹ ОАО «Ступинская металлургическая компания»

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

³ ФГУП ГНЦ РФ Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,

Данная работа посвящена изучению возможности программного комплекса Deform по прогнозированию разнотолщинности при низкотемпературной сверхпластической формовке наноструктурного сплава ВТ6. В работе было установлено, что для повышения адекватности расчетов необходимо применять реологическую модель материала, учитывающую влияния структурного состояния сплава на его механическое поведение.

Введение

Впервые детали авиационного назначения из сплава ВТ6, изготовленные с применением сверхпластической формовки, были применены в двигателях самолетов А12 в 1964 году [Barnes, 2007]. С развитием методов сверхпластической формовки были определены основные требования к режимам деформации и к структуре применяемых для формообразования титановых 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 [Wert, Paton, 1983]. При этой температуре на поверхности титанового сплава образуется альфированный слой, который способствует охрупчиванию поверхности и снижению эксплуатационных свойств сплава. Для снижения температуры деформации и предотвращения образования альфированного слоя был предложен сплав ВТ6 с мелкозернистой (МЗ) и субмикроструктурной (СМК) структурой. Такой материал проявляет характеристики сверхпластической деформации при температурах от 550 до 650°C, при которых альфированный слой не образуется. Однако МЗ и СМК сплавы обладают низкой термостабильностью структуры, что выражается в интенсивном росте зерна α -фазы. Наблюдаемый рост α -фазы приводит к изменению реологической модели сверхпластического течения. Отсутствие учета изменения реологической модели материала при расчете процессов формовки в режимах сверхпластичности приводит к ошибке при выборе режимов деформации и к формированию недопустимой разнотолщинности в изделии. В этой связи, при разработке технологии формовки с применением методов математического моделирования необходимо учитывать влияние эволюции микроструктуры на реологическую модель материала.

Целью работы является разработка реологической модели сверхпластической деформации наноструктурного титанового сплава ВТ6 с учетом эволюции микроструктуры и применением ее в программном комплексе Deform для расчета процессов формовки.

Методы и процедуры

Методика проведения теоретических исследований

С целью оценки возможности прогнозирования разнотолщинности в заготовках после сверхпластической формовки была построена конечно-элементная модель испытаний по методу Эриксона в программном комплексе Deform2D (Рисунок 1). Температурные условия деформации – изотермические, температура формовки 550°C.

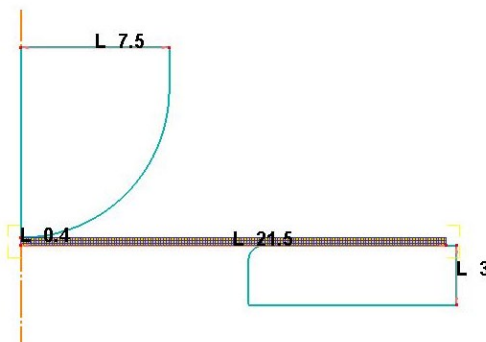


Рис. 1

Задача в определении реологической модели материала решалась с применением двух подходов. Первый подход заключался в применение интегрированной в программный комплекс Deform модели ползучести материала (1.1).

$$\dot{\epsilon} = K \cdot m \cdot \sigma^{n1} \cdot t^{(m1-1)} + Q \cdot \sigma^{r1} \quad (1.1)$$

где $\dot{\epsilon}$ - скорости деформации, $K, m, n1, m1, r1, Q$ – постоянные материала, σ - напряжение течения.

Второй подход заключался в определении реологической модели материала как суммы реологических моделей материала с МК и СМК структурой.

$$\sigma_f = A_f \cdot \varepsilon^{n_f} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_f} + C_f \quad (1.2)$$

где $\dot{\varepsilon}$ - скорости деформации, ε - степень деформации, A_f , C_f – постоянные материала, σ_f - напряжение течения, f - индекс определяющий тип структуры (для МК -1, для СМК-2).

Напряжение течения сплава определялось по правилу смеси (уравнение 1.3)

$$\sigma = \sum_{f=1}^2 V_f \cdot \sigma_f, \quad (1.3)$$

где V_f - объемная доля структуры, f - индекс определяющий тип структуры (для МК -1, для СМК-2).

Изменение объемных долей МК и СМК структуры определялось путем построение диаграмм изотермического превращения. Время перехода структуры из состояния СМК в МК определяли с использованием уравнения (1.4), при условии достижения размера α -фазы величины равной расстоянию между соседними зернами β -фазы.

$$r_\alpha^3 - r_{\alpha 0}^3 = K_G t \quad (1.4)$$

где r_α - радиус зерна α -фазы, $r_{\alpha 0}$ - начальный радиус зерна α -фазы, K_G – постоянный параметр, t – время.

Методика проведения экспериментальных исследований

В качестве материала для исследований были листы наноструктурного титанового сплава ВТ6, изготовленные из прутков по ОСТ1 90173-75. Химический состав сплава (вес. %): Al 6.46, V 3.84, Zr 0.02, Si 0.01, Fe 0.083, C 0.005, O2 0.166, N2 0.003, H2 0.003. Температура полиморфного превращения составила 995°C. Средний размер зерна α -фазы составлял 300 нм, средний размер глобулярной β -фазы составлял 120 нм. В состоянии поставки объемная доля β -фазы составляла 4%, плотность дислокаций в зернах α -фазы $8,67 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Среднее расстояние между зернами β -фазы составляло около 1.6 мкм. (Рисунок 2)

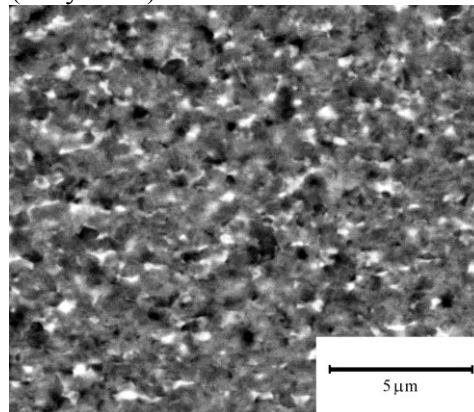


Рис.2

Металлографические исследования исходных и деформированных образцов были выполнены с использованием детектора обратно рассеянных электронов (BSD) на растровом микроскопе Quanta 600 3D. Электролитическое полирование образцов проводили с использованием электролита 80 % $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$, 20 % HClO_4 при напряжении 25 В.

Для определения постоянных значений в уравнениях 1.1-1.3 был проведен эксперимент на растяжение в изотермических условиях заготовок вырезанных из листа ВТ6 с размерами рабочей части 16x1,5x0,3 мм при температуре 550°C и начальной скорости деформации от 10^{-4} до 10^{-2} с^{-1} .

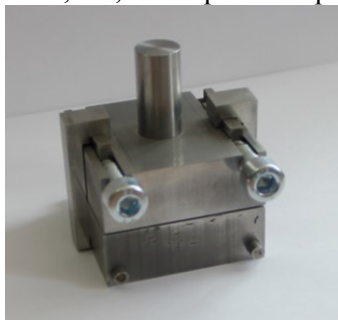


Рис.3

Для оценки адекватности математического моделирования была изготовлена опытная оснастка аналогичная модели Эриксона (Рисунок 3). Деформацию до разрушения заготовки проводили в изотермических условиях со скоростью перемещения траверсы от 0,12 до 12 мм/мин.

Результаты и обсуждение

Кривые напряжение течение – пластическая деформация наноструктурного титанового сплава ВТ6 представлены на рисунке 4 [Salishchev, Kudrjajtsev, Zherebtsov, Semiatin, 2013]. Из рисунка следует, что материал разрушается при степенях деформации более 200%. Высокое значение удлинения образцов показывает, что материал деформируется с преобладанием режимов сверхпластического течения. Детальный анализ результатов испытаний показал, что образцах разрушенных при максимальных удлинениях параметр скоростной чувствительности был близок к значению 0.5. Вместе с тем следует отметить, что напряжение течения материала при пониженной температуре отличается от напряжения течения сплава характерного для высокотемпературной сверхпластичности в 1.8-5 раза.

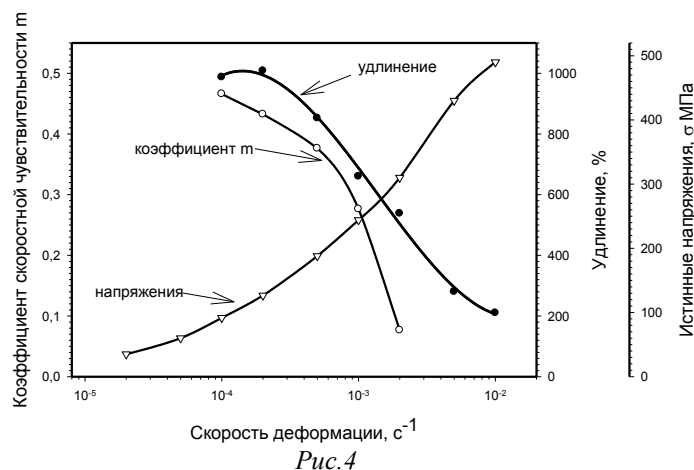


Рис.4

Полученные экспериментальные данные, а также результаты работ [Лопатин, Горбушина, Семенова, Дьяконов, Кудрявцев, Выдумкина 2014] были интегрированы в программный комплекс Deform для расчета процессов формовки. Карты рассчитанной накопленной деформации и места локализации деформации представлены на рисунке 5. В не зависимости от принятой постановки в определении реологической модели материала при моделировании пластической деформации расчет позволил выявить место локализация пластической деформации и локального утонения материала. Экспериментально были определены величины перемещения траверсы испытательной машины, приводящие к разрушению заготовки. В таблицах 1и 2 показаны результаты теоретических и экспериментальных исследований.

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

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, в числителе для постановки 2.

Сопоставление результатов моделирования и экспериментальных данных показывает, что применение постановки №2 при прогнозировании величины локализации деформации к расчету реологической модели позволяет получить сопоставимый с экспериментом результат. Результаты измере-

ния 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 рисунке 5 показаны графики изменения усилий в зависимости от перемещения траверсы при температуре деформации 550°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(Рис.5б) позволяет спрогнозировать момент достижения максимальных усилий и величину падения усилия деформирования.

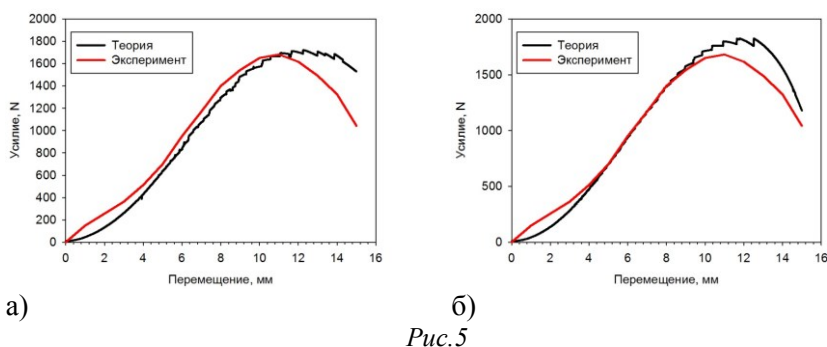


Рис.5

В результате проведения работы было установлено, что:

1. программный пакет Deform позволяет спрогнозировать формообразование при низкотемпературной сверхпластичности.
2. для повышения достоверности прогнозирования мест локализации деформации при сверхпластической деформации СМК материалов необходимо учитывать влияние измерения микроструктурного состояния и его влияние на свойства материалов в процессе деформации.

Список литературы

- Barnes A.J.* Superplastic Forming 40 Years and Still Growing// JMEPEG. –2007–№16–С. 440–454
- Wert J.A., Paton N.E.* Enhanced Superplasticity and Strength in Modified Ti-6Al-4V Alloys //Metallurgical transactions A.– 1983.– Vol. 14A.–P. 2535-2544
- Nieh T.G., Wadsworth J., Sherby O.D.* Superplasticity in metals and ceramics.– 1997.–237 p.
- Salishchev G.A., Kudrjavitsev E.A., Zherebtsov S.V., Semiatin S.L.* Low Temperature Superplasticity of Ti-6Al-4V Processed by Warm Multidirectional Forging //Material Science Forum.– 735 (2013) 253-258
- Лопатин Н. В., Горбушина С. Н., Семенова И. П., Дьяконов Г. С., Кудрявцев Е. А., Выдумкина С. В.* Моделирование структурообразования в титановом сплаве ВТ6 при изотермической ковке в программном комплексе Deform// Компьютерные исследования и моделирование.– 2014.–№ 6.– С. 975–982