

УДК: 621.039.56

## Моделирование формообразования наноструктурного титанового сплава ВТ6 при низкотемпературной формовке

Н. В. Лопатин<sup>1,a</sup>, Е. А. Кудрявцев<sup>2</sup>, П. В. Панин<sup>3</sup>, С. В. Выдумкина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Ступинская металлургическая компания»,  
Россия, 142800, Московская обл., г. Ступино, ул. Пристанционная, вл. 2

<sup>2</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

<sup>3</sup> ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ,  
Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17

E-mail: <sup>a</sup> lopatinv@yandex.ru

*Получено 22.02.2016, после доработки — 21.03.2016.*

*Принято к публикации 13.04.2016*

Сверхпластическая формовка сплавов на основе титана и никеля широко применяется в аэрокосмической промышленности. Основным преимуществом использования эффекта сверхпластичности является возможность формования материала до очень высоких деформаций при значительных растягивающих напряжениях в материале. Представленная работа посвящена изучению возможности программного комплекса, основанного на методе конечных элементов, SFTC DEFORM прогнозировать разнотолщинность наноструктурного сплава ВТ6 при низкотемпературной сверхпластической формовке. Экспериментально разнотолщинность при сверхпластической формовке наблюдается при локализации пластического течения и усугубляется локальным разупрочнением материала, которое обусловлено структурными изменениями. Для анализа экспериментально наблюдаемого течения металла была построена теоретическая модель. При расчете использовались два подхода. Первый подход включал использование интегрированной в программный комплекс модели ползучести. Так как эффект сверхпластичности наблюдается только в материалах с ультрамелкозернистой структурой, второй подход заключался в разработке комбинированной реологической модели материала с учетом структурного состояния. С помощью пользовательского программирования на языке Fortran уравнения реологической модели с учетом структурных превращений были интегрированы в DEFORM на солверном уровне. Использование КЭ-моделирования для подобных задач позволяет оценивать скорость деформации в разных точках заготовки, что является важным для поддержания состояния сверхпластичности в материале. Сопоставление применяемых моделей пластического течения позволило выявить влияние эволюции микроструктуры на течение сплава в режиме сверхпластичности. Результаты моделирования и теоретические выводы подтверждаются результатами стандартного испытания по Эриксону. В результате проведения работы было установлено следующее: а) программный пакет DEFORM позволяет спрогнозировать формообразование при низкотемпературной сверхпластичности; б) для повышения достоверности прогнозирования мест локализации деформации при сверхпластической деформации СМК материалов необходимо учитывать влияние изменения микроструктурного состояния и его влияние на свойства материалов в процессе деформирования.

Ключевые слова: DEFORM, формовка, УМЗ структура сплава Ti-6Al-4V

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-00910.

UDC: 621.039.56

## Simulation of forming of UFG Ti-6-4 alloy at low temperature of superplasticity

N. V. Lopatin<sup>1,a</sup>, E. A. Kydrjajtsev<sup>2</sup>, P. V. Panin<sup>3</sup>, S. V. Vidumkina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CMK JSK,

2 Prstantsionnaya st., Stupino, Moscow Region, 142800, Russia

<sup>2</sup>Belgorod State National Research University,  
85 Pobedy st., Belgorod, 308015, Russia

<sup>3</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials,  
17 Radio st., Moscow, 105005, Russia

E-mail: <sup>a</sup>lopatinnv@yandex.ru

*Received 22.02.2016, after completion — 21.03.2016.*

*Accepted for publication 13.04.2016.*

Superplastic forming of Ni and Ti based alloys is widely used in aerospace industry. The main advantage of using the effect of superplasticity in sheet metal forming processes is a feasibility of forming materials with a high amount of plastic strain in conditions of prevailing tensile stresses. This article is dedicated to study commercial FEM software SFTC DEFORM application for prediction thickness deviation during low temperature superplastic forming of UFG Ti-6-4 alloy. Experimentally, thickness deviation during superplastic forming can be observed in the local area of plastic deformation and this process is aggravated by local softening of the metal and this is stipulated by microstructure coarsening. The theoretical model was prepared to analyze experimentally observed metal flow. Two approaches have been used for that. The first one is the using of integrated creep rheology model in DEFORM. As superplastic effect is observed only in materials with fine and ultrafine grain sizes the second approach is carried out using own user procedures for rheology model which is based on microstructure evolution equations. These equations have been implemented into DEFORM via Fortran user's solver subroutines. Using of FEM simulation for this type of forming allows tracking a strain rate in different parts of a workpiece during a process, which is crucial for maintaining the superplastic conditions. Comparison of these approaches allows us to make conclusions about effect of microstructure evolution on metal flow during superplastic deformation. The results of the FEM analysis and theoretical conclusions have been approved by results of the conducted Erichsen test. The main issues of this study are as follows: a) the DEFORM software allows an engineer to predict formation of metal shape under the condition of low-temperature superplasticity; b) in order to augment the accuracy of the prediction of local deformations, the effect of the microstructure state of an alloy having sub-microcrystalline structure should be taken into account in the course of calculations in the DEFORM software.

Keywords: DEFORM, forming, UFG titanium alloy Ti-6Al-4V

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 127–133 (Russian).

The work was supported by RFFI within the project № 15-08-00910.

## 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 °С 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 °С, при которых альфированный слой не образуется. Однако МЗ и СМК сплавы обладают низкой термостабильностью структуры, что выражается в интенсивном росте зерна  $\alpha$ -фазы. Наблюдаемый рост  $\alpha$ -фазы приводит к изменению реологической модели сверхпластического течения. Отсутствие учета измерения 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 применение 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 DEFORM-2D (рис. 1). Температурные условия деформации — изотермические, температура формовки 550 °С.

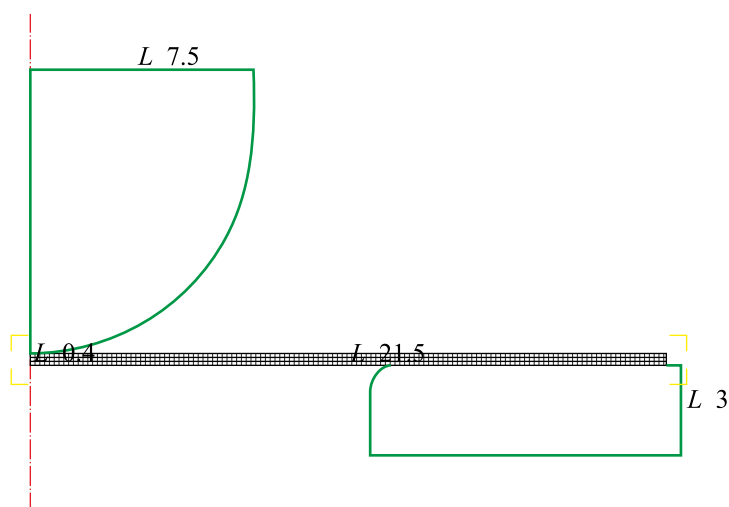


Рис. 1. Модель теста Эриксона в DEFORM-2D

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

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

где  $\dot{\varepsilon}$  — скорости деформации,  $K$ ,  $m$ ,  $n1$ ,  $m1$ ,  $r1$ ,  $Q$  — постоянные материала,  $\sigma$  — напряжение течения.

Второй подход заключался в определении реологической модели материала как суммы реологических моделей материала с МЗ 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,  $\varepsilon$  — степень деформации,  $A_f$ ,  $C_f$  — постоянные материала,  $\sigma_f$  — напряжение течения,  $f$  — индекс, определяющий тип структуры (для МЗ — 1, для СМК — 2).

Напряжение течения сплава определялось по правилу смеси:

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

где  $V_f$  — объемная доля структуры,  $f$  — индекс, определяющий тип структуры (для МЗ — 1, для СМК — 2).

Изменение объемных долей МК и СМК структуры определялось путем построения диаграмм изотермического превращения. Время перехода структуры из состояния СМК в МЗ определяли с использованием уравнения (1.4), при условии достижения размера  $\alpha$ -фазы величины, равной расстоянию между соседними зёрнами  $\beta$ -фазы.

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

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

### **Методика проведения экспериментальных исследований**

В качестве материала для исследований использовались листы наноструктурного титанового сплава ВТ6, изготовленные из прутков по ОСТ1 90173-75. Химический состав сплава (вес. %) следующий:

Al 6.46, V 3.84, Zr 0.02, Si 0.01, Fe 0.083 С 0.005, O2 0.166, N2 0.003, H2 0.003.

Температура полиморфного превращения составила 995 °С. Средний размер зерна  $\alpha$ -фазы составлял 300 нм, средний размер глобулярной  $\beta$ -фазы составлял 120 нм. В состоянии поставки объемная доля  $\beta$ -фазы составляла 4 %, плотность дислокаций в зёрнах  $\alpha$ -фазы  $8.67 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$ . Среднее расстояние между зёрнами  $\beta$ -фазы составляло около 1.6 мкм (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 %  $\text{HClO}_4$  — 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  $16 \times 1.5 \times 0.3$  мм при температуре 550 °С и начальной скорости деформации от  $10^{-4}$  до  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Для оценки адекватности математического моделирования была изготовлена опытная оснастка, аналогичная модели Эриксона (рис. 3). Деформацию до разрушения заготовки проводили в изотермических условиях со скоростью перемещения траверсы от 0.12 до 12 мм/мин.

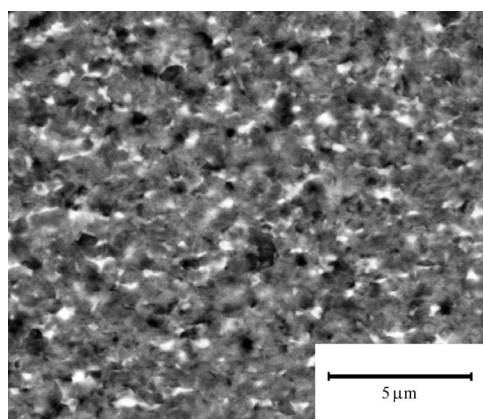


Рис. 2. Микроструктура исследуемого образца



Рис. 3. Экспериментальная установка

## Результаты и обсуждение

Кривые «напряжение течения – пластическая деформация» наноструктурного титанового сплава ВТ6 представлены на рис. 4 [Salishchev et al., 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 в 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.

Полученные экспериментальные данные, а также результаты работ [Лопатин и др., 2014] были интегрированы в программный комплекс DEFORM для расчета процессов формовки. Был проведен анализ распределения рассчитанной накопленной деформации и величин деформации в местах фактической локализации деформации. Вне зависимости от принятой постановки в определении реологической модели материала при моделировании пластической деформации расчет позволил выявить место локализации пластической деформации и локального утонения материала. Экспериментально были определены величины перемещения траверсы испытательной машины, приводящие к разрушению заготовки. В таблицах 1 и 2 показаны результаты теоретических и экспериментальных исследований.

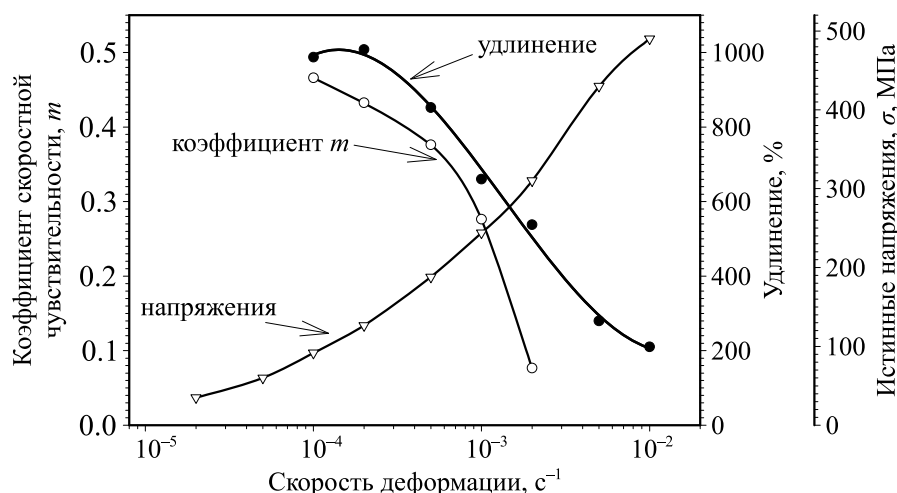


Рис. 4. Кривые напряжения течения сплава ВТ6

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

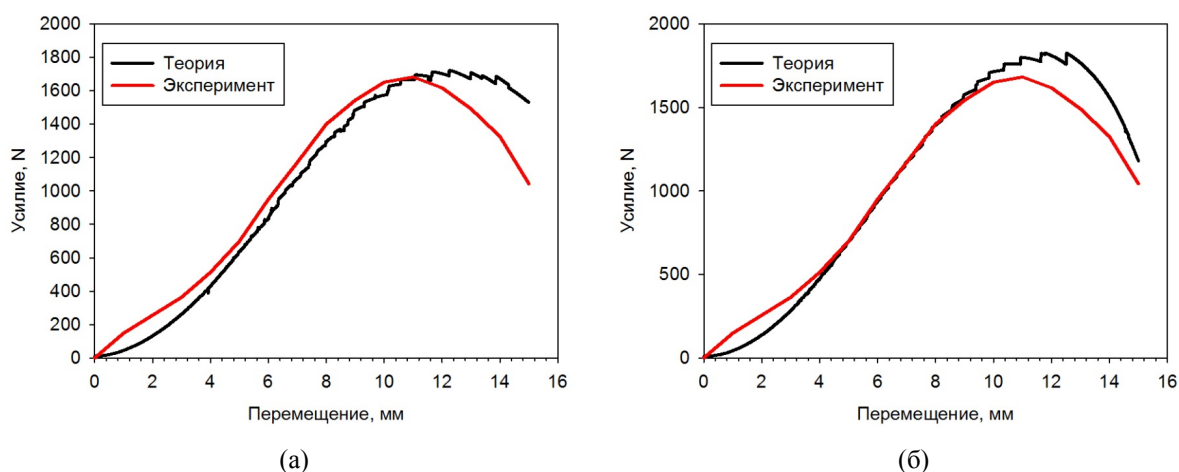


Рис. 5. Графики изменения усилий в зависимости от перемещения траверсы: а) постановка № 1; б) постановка № 2

В результате проведения работы было установлено следующее:

- 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 деформирования.

## Список литературы (References)

- Лопатин Н. В., Горбушина С. Н., Семенова И. П., Дьяконов Г. С., Кудрявцева Е. А., Выдумкина С. В.* Моделирование структурообразования в титановом сплаве VT6 при изотермической ковке в программном комплексе Deform // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6, № 6. — С. 975–982.
- Lopatin N. V., Gorbushina S. N., Semenova I. P., Diakonov G. S., Kudriavtseva E. A., Vidumkina S. V.* Modelirovanie strukturoobrazovania v titanovom splave VT6 pri izotermicheskoy kovke v programnom komplekse Deform [Microstructure evolution simulation of multidirectional forging of VT6 using Deform software] // Kompjuternye Issledovaniya i Modelirovaniye [Computer Research and Modeling]. — 2014. — Vol. 6, no. 6. — P. 975–985 (in Russian).
- Barnes A. J.* Superplastic Forming 40 Years and Still Growing // JMEPEG. — 2007. — Vol. 16. — P. 440–454.
- 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. — 2013. — Vol. 735. — P. 253–258.
- 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.