

УДК 621.983.044:669.715.001

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ. Часть 1

© Чумаченко Евгений Николаевич<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, e-mail: mmkaf@miem.edu.ru;

Портной Владимир Кимович<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., e-mail: portnoy@misis.ru;

Логашина Ирина Валентиновна<sup>1</sup>, канд. техн. наук, e-mail: ilogashina@hse.ru;

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Россия, Москва

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, Москва

Статья поступила 13.03.2014 г.

Приведены различные методики испытаний для определения механических свойств материалов в состоянии сверхпластичности. Напряжение течения зависит от степени и скорости деформации, структурного параметра и температуры. Обсуждаются реология и механика сверхпластической деформации. Методика была опробована и дала хорошие результаты при испытании сплавов титана и построении математических моделей по заказу компании EADS (Airbus). Методика проведения испытаний и последующей аппроксимации механических свойств представляет большой интерес для построения адекватных прогнозов формоизменения материалов при обработке давлением.

**Ключевые слова:** механические свойства материалов; сверхпластичность; моделирование; механические испытания.

Титановые сплавы имеют высокую удельную прочность (отношение предела прочности к плотности), что обуславливает их эффективное использование в аэрокосмической промышленности. В то же время полуфабрикаты из титановых сплавов достаточно дороги, в частности, из-за большого числа технологических переделов (неоднократный вакуумный переплав, трудоемкая горячая обработка давлением и т.д.) и невозможности холодной штамповки листов. Деформация в состоянии сверхпластичности – это один из эффективных способов получения сложных деталей из листовых заготовок, позволяющий снизить стоимость изготовления [1–6]. Термином «сверхпластичность» обозначают способность поликристаллических материалов при определенных температурно-скоростных условиях нагружения испытывать, без нарушения сплошности, большие деформации при относительно низких напряжениях течения.

Сверхпластичность характеризуется совокупностью следующих основных признаков:

- повышенная (по сравнению с пластическим состоянием) чувствительность напряжения течения материалов к изменению скорости деформации или, иными словами, повышенная склонность сверхпластичных материалов к скоростному упрочнению;

- высокая устойчивость течения сверхпластичных материалов, обеспечивающая большой ресурс деформационной способности, благодаря

чему относительное удлинение при растяжении таких материалов может достигать нескольких сотен и даже тысяч процентов;

- напряжение течения в состоянии сверхпластичности значительно (на порядок и более) меньше предела текучести материалов в обычном пластическом состоянии.

Наиболее существенным из перечисленных является первый признак, а два других можно рассматривать как его следствия. Сильная зависимость напряжения течения от скорости деформации объединяет сверхпластичные материалы (СПМ) по реологическим признакам с вязкими жидкостями. Именно вязким поведением СПМ объясняется их способность к течению под действием напряжений, которые значительно меньше предела текучести, и сопротивляться развитию локализации деформации, в результате чего достигаются рекордные показатели пластичности [7].

Особенностью титановых сплавов является способность к сверхпластической деформации серийных промышленных листов без специальной подготовки структуры. Поэтому их называют «природно» сверхпластичными [1]. Оптимальная температура сверхпластической формовки (СПФ) для широко распространенного титанового сплава ВТ6 (Ti – 6% Al – 4% V) составляет 900–925 °С. В то же время весьма желательно снизить температуру СПФ. Это позволит уменьшить окисление и разгар матриц, снизить стоимость оборудования для формовки и увеличить срок его службы [8].

В связи с вышесказанным понятен интерес ученых к методикам проведения экспериментов и аппроксимации механических свойств сверхпластичных материалов, особенно это относится к титановым сплавам. Требования по качеству и полетной массе специальных изделий авиакосмической промышленности постоянно повышаются. Точность выполняемых расчетов и прогнозов течения материала в условиях сверхпластичности не может быть выше, чем определенные экспериментально механические свойства и построенные модели сплошной среды.

**Общая характеристика методов испытаний.** В общем случае методы испытаний распространяются на черные и цветные сплавы, устанавливают процедуры исследования показателей сверхпластичности листовых образцов при температуре до 1250 °С и предназначены для:

- определения температурного и скоростного интервалов проявления сверхпластичности;
- сопоставления показателей сверхпластичности материалов, различающихся по химическому и фазовому составам и/или структуре;
- для выбора температурного, скоростного и силового режимов обработки металлов давлением (ОМД) в состоянии сверхпластичности.

Под показателями сверхпластичности материала понимают: напряжение течения  $\sigma$ , показатель скоростной чувствительности напряжения течения  $m$ , относительное удлинение (до разрыва)  $\delta$  при фиксированной скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  и температуре  $T$ .

Сущность методов состоит в испытании при различной температуре серии образцов на растяжение со ступенчатым изменением скорости деформирования или на релаксацию напряжений.

По максимальному значению показателя скоростной чувствительности  $m$  определяют оптимальный для проявления эффекта сверхпластичности температурно-скоростной режим деформации. В этом режиме при постоянной скорости деформации испытывают образцы на растяжение для оценки пластичности сплава  $\delta$ , построения кривых растяжения и коэффициента деформационного упрочнения  $\gamma$  как функции степени деформации.

Испытания со ступенчатым изменением скорости деформирования проводят для выбора температурного и скоростного режимов процесса ОМД в состоянии сверхпластичности.

Испытания на релаксацию напряжений проводят для определения и сопоставления показателей сверхпластичности материалов, различающихся химическим и фазовым составом, структурой и способами их получения.

Таким образом, в результате испытаний получают зависимости напряжения течения  $\sigma$  и показателя скоростной чувствительности  $m$  от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  при разной температуре. Кроме того, для оптимальных скоростей деформации  $\dot{\epsilon}$  при каждой температуре получают кривые зависимости растяжения и коэффициента деформационного упрочнения  $\gamma$  от степени деформации  $\epsilon$ .

Испытания проводят на образцах (см. рисунок) с шириной рабочей части 6 мм. Толщина образца определяется толщиной проката. Расстояние между заплечиками  $L_0$  вычисляется по формуле

$$L_0 = 5,65\sqrt{F_0},$$

где  $L_0$  – начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца.

Вычисленную длину  $L_0$  округляют до ближайшего целого числа. Однако эта расчетная длина не должна быть меньше удвоенной ширины образца. Основные значения расчетной длины образцов для листов разной толщины приведены ниже:

Толщина листа, мм	До 0,85	0,90–1,15	1,20–1,40	1,45–1,80	1,9–2,2	2,3–2,6	2,7–3,0
Расчетная длина, мм	12	14	16	18	20	22	24

Допускаемое отклонение ширины рабочей части образцов составляет  $\pm 0,1$  мм, а параметр шероховатости обрабатываемой поверхности – не более 2,5 мкм. Допускаемые отклонения от заданной расчетной длины образца, на которой измеряется удлинение, не должны превышать  $\pm 1\%$ . Допускаемое отклонение площади поперечного сечения не должно превышать 0,5%.

Форма и размеры головок образцов одинаковы для листа любой толщины. Это позволяет унифицировать способ крепления образца в захватах испытательной машины. СПМ удлиняются при растяжении на сотни процентов, при этом разметка начальной длины обычно не сохраняется, поэтому начальную длину удобно отсчитывать как расстояние между заплечиками. В связи с этим сопряжения головок и рабочей части образца могут выполняться без плавного перехода, под прямым углом, так как отсутствует чувствительность сверхпластичных сплавов к концентраторам напряжений.

Для изучения показателей сверхпластичности в широком диапазоне температуры и скоростей деформации наиболее удобны листы толщиной около 1 мм. Это обусловлено значительным

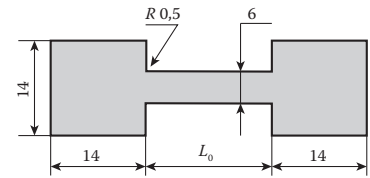


Схема образца для определения показателей сверхпластичности листовых материалов

диапазоном усилий на образце при изучении его поведения в широком интервале скоростей деформации. При этом для обеспечения точности важно, чтобы весь диапазон регистрируемых усилий можно было получить на одном датчике силоизмерителя. При испытании образцов из тонкого листа это можно осуществить, испытывая одновременно несколько образцов одинаковых размеров. Таким образом, изменяя число испытываемых образцов, можно провести испытания с одинаковой точностью при понижающейся температуре.

Образцы для испытаний берутся с сохранением поверхностного слоя без обработки, поскольку предназначены для оценки технологичности этих листов при СПФ.

Образцы, имеющие механические повреждения, дефекты поверхности в виде инородных включений, расслоений, пор, раковин или трещин, испытаниям не подвергаются. Листы, испытываемые после термической обработки, могут иметь коробление. Поскольку такие листы поступают и для СПФ, и в связи с тем, что сверхпластичные сплавы во время нагрева до температуры сверхпластичности быстро релаксируют, рихтовка или другой вид правки заготовок допустимы. Если металл подлежит испытанию в термически обработанном состоянии, термообработке подвергают и заготовки для образцов.

Технические требования к машинам для определения показателей сверхпластичности не отличаются от требований к универсальным испытательным машинам для статических испытаний. Тем не менее, поведение СПМ при растяжении обуславливает ряд особых требований при использовании универсальных испытательных машин.

Способность СПМ при растяжении удлиняться в 3–20 раз предъявляет особые требования к печам, в которых испытываются образцы, и, соответственно, эти требования определяют размеры рамы испытательной машины. Применение образцов из листового проката (см. рисунок) с постоянной шириной рабочей части 6 мм позволяет использовать печь длиной 500 мм с зоной равномерного нагрева около 200 мм. В таком случае испытательная машина имеет раму, позволяющую установить печь такой длины и обеспечивающую свободный ход траверсы не менее 250 мм.

Для обеспечения равномерной деформации рабочей части образца в процессе испытания перепад температуры по длине образца в процессе растяжения не должен превышать 10 °С. Этому требованию удовлетворяет разъемная трехсекционная печь с раздельно-совместным управле-

нием секциями. Но для проведения испытаний в защитной среде аргона более удобна неразъемная трубчатая печь с переменным шагом намотки нагревательной проволоки для обеспечения зоны равномерного нагрева длиной около 200 мм. В этом случае объем нагреваемой части трубы герметизируется пробками из каолиновой ваты и заполняется аргоном. Чтобы предохранить работу силоизмерителя от влияния нагрева на тяге верхнего захвата, над печью закрепляются два алюминиевых отражательных экрана в виде дисков диам. 200 мм и толщиной 1 мм. Диски-экраны непрерывно обдуваются потоком воздуха от вентилятора в течение всего времени работы печи.

Образцы, растягиваемые до заданной степени деформации с постоянной оптимальной скоростью деформации, подлежат структурному анализу для выяснения кинетики изменений структуры в процессе растяжения. В связи с этим конструкция зажимов головок образцов позволяет быстро снять нагрузку с образцов и охладить их рабочую часть в процессе извлечения. Например, для охлаждения образцов могут быть использованы специальные щипцы с охлаждаемыми губками.

Машины для испытания СПМ обеспечивают возможность растяжения в широком диапазоне скоростей движения активного захвата. Испытательная машина оснащена компьютерной системой управления–регистрации. Конструкция испытательной машины и программное обеспечение компьютера позволяют проводить испытания с постоянной скоростью деформации в диапазоне  $10^{-6}$ – $10$  с<sup>-1</sup> с точностью поддержания постоянных скоростей деформации  $\pm(0,3-1\%)$ . При этом, например, для титановых сплавов (образец из листа толщиной 1 мм с расчетной длиной 14 мм), начиная с малых скоростей вплоть до скорости деформации  $5 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup> удлинение может достигать 1000%, а при скорости  $2 \cdot 10^{-1}$  с<sup>-1</sup> – 250%. В диапазоне усилий на образце до 1000 Н нагрузка фиксируется в памяти компьютера с точностью порядка 0,1%.

Программное обеспечение предусматривает прерывание процесса растяжения с постоянной скоростью деформации при заданном уровне удлинения и проведение испытаний на релаксацию нагрузки. Регистрацию усилий при нагружении и на начальном этапе релаксации от 2 до 5 с от момента остановки траверсы проводят с частотой 30–50 Гц, а на последующих этапах релаксации – 0,1–1 Гц. Кроме того, программное обеспечение предусматривает проведение испытаний со ступенчатым повышением или понижением скорости растяжения с заданным шагом по деформации на каждой ступе-

ни, с выбором числа ступеней при фиксации напряжения устойчивого течения на каждой ступени.

*Проведение испытаний и принципы расчета параметров.* Образцы для испытаний листовых материалов устанавливаются в захваты с помощью специальных вкладышей. Вкладыши изготавливают с прорезями под образцы разной толщины с зазором 0,5 мм. Поскольку головки образцов из проката разной толщины отличаются только толщиной, образцы из тонких листов можно устанавливать в захваты пачкой по 2–6 штук. Этот прием позволяет управлять величиной усилия для более точной его регистрации: при малых скоростях или высоких температурах этим способом повышали действующее усилие, при повышенных скоростях или пониженных температурах усилие понижали. Призматический вкладыш с образцами в прорези задвигается в зев захвата до упора и при повороте головки захвата зажимается вместе с образцами. Образцы в таких захватах висят на заплевиках, вкладыши нужны не только для установки образцов – они исключают изгиб головок образцов, возникающий при свободном их подвесе.

Установленный в захватах испытательной машины и помещенный в печь образец нагревается до заданной температуры. Время нагрева, по возможности, должно быть коротким, но обеспечивающим равномерный нагрев образца – для листовых образцов обычно это 15–20 мин.

Температуру измеряют на концах рабочей части образцов двумя термоэлектрическими преобразователями (ТЭП), горячие спаи которых подводят через отверстия в захватах до касания с образцом. Отклонения от заданной температуры в любой момент времени в течение всего испытания не должны превышать  $\pm 2$  °С.

После нагрева образца и выдержки при заданной температуре проводится растяжение со ступенчатым изменением скорости деформирования с регистрацией диаграммы усилие–перемещение

либо нагружение при постоянной скорости деформации с последующей релаксацией нагрузки с записью изменения усилия во времени.

**Заключение.** В работе приведены все основные требования к испытаниям образцов в условиях сверхпластической деформации. Во второй части статьи будут приведены методики испытаний (со ступенчатым изменением скорости деформирования и с постоянной скоростью, на релаксацию), рассмотрены реология и механика сверхпластической деформации, уравнения состояния.

*Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований МИЭМ НИУ ВШЭ.*

#### Библиографический список

1. Novikov I.I., Portnoy V.K. Superplastizitat von Legierungen, Springer-Verlag, Berlin (1984).
2. Barnes A.J. Superplastic forming 40 years and still growing // J. of Vterials Engineering and Performans. 2007. Vol. 16. P. 440–454.
3. Langdon T.G. Seventy-five years of superplastic research: an overall perspective for the superplasticity conferences // Key Engineering Materials. 2010. Vol. 433. P. 3–8.
4. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. М. : ЛИБРОКОМ, 2009. 320 с.
5. Чумаченко Е.Н., Логашина И.В. Математическое моделирование и оптимизация процессов деформирования материалов при обработке давлением. М. : ЭКОМЕТ, 2008. 400 с.
6. Sanders D., Ramulu M., Edwards P. Superplastic forming of friction stir welds in titanium alloy 6Al-4V: preliminary results // Materials science and engineering technology, Mat.-wiss. U.Werkstofftech. 2008. Vol. 39. No. 4/5. P. 353–357.
7. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М. : Машиностроение, 1979. 184 с.
8. Чумаченко Е.Н. Моделирование процесса деформирования оболочек из титановых сплавов в условиях пониженных температур сверхпластичности // Изв. РАН. МТТ. 2004. № 6. С. 151–166.

## MECHANICAL TESTING AND CONSTRUCTION OF ANALYTICAL MODELS OF MATERIALS BEHAVIOR UNDER CONDITIONS OF SUPERPLASTICITY. Part I

© Chumachenko E.N., Dr Sci. (Eng.); Portnoy V.K., Dr Sci. (Eng.); Logashina I.V., Cand. Sci. (Eng.)

The various test methods for determining the mechanical properties of materials in a state of superplasticity were considered. The tension depends from the deformation and strain rate, the structural parameter and temperature. The rheology and mechanics of superplastic deformation were discusses. Methodology has been tested and gave good results when tested Ti alloys and constructing mathematical models commissioned by EADS (Airbus). Information about the method of testing and subsequent approximation of the mechanical properties is of great interest for the development of adequate forecasts materials forming by pressure.

**Keywords:** mechanical properties of materials; superplasticity; simulations; mechanical tests.