

О.В. Соснин, Б.В. Горев Б.В., И.В. Любашевская

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

## ПОЛЗУЧЕСТЬ В ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

### Abstract

*The experimental results of the investigation in some features of high-temperature creep of structural materials are given. The connection of these processes with the deformation under superplasticity conditions and near them and the application of these effects to technological problems of processing materials by pressure are shown. Some approximate methods for calculation of the deformation of the constructional elements during a high-temperature creep are considered. It is shown that statistically acceptable stress fields obtained by the model of "ideally plastic material" (or a limiting ideally viscous condition) provide rather good results as supported experimentally, and also as regards the simplicity of computational scheme.*

Работы по использованию реологических свойств металлов при их обработке давлением появились еще в середине двадцатого века. Одними из первых к этому направлению относятся публикации [1-3], но более систематические исследования в этой области, по-видимому, связаны с именем А.А. Поздеева [4-5]. Почти в это же время появляются работы Н.Н. Малинина и его учеников [6], затем более полные изложения [7-8], а в конце семидесятых годов в этом же направлении начались исследования в лаборатории Института гидродинамики СО РАН и появились первые публикации [9,10].

В настоящее время в этой области в лаборатории ведутся работы в трех направлениях:

- особенности кратковременной высокотемпературной ползучести с учетом возможных структурно-фазовых изменений в материале, связь с эффектом сверхпластического деформирования;

- разработка методов расчета технологических процессов формообразования в режимах ползучести тонкостенных элементов конструкций, в основном - применительно к изделиям авиа-судостроения;

- разработка опытных образцов и модулей технологического оборудования лабораторного типа применительно к процессам медленного деформирования заготовки в условиях ползучести.

1. Экспериментально в условиях повышенных температур для широкого класса материалов – легких сплавов на основе алюминия, титановых сплавов, конструкционных сталей, показано, что с уменьшением скорости деформирования «ресурс пластичности», т.е. величина деформации  $\epsilon^*$  к моменту разрушения возрастает, не говоря уже о существенном снижении величины внешней нагрузки. С возрастанием температуры, при  $T > 0,5 T_{\text{плавления}}$  эта разница может достигать нескольких порядков. Можно показать, что если скорость деформаций ползучести выражается

зависимостью типа вязкого течения  $\dot{\varepsilon}^c = \varphi(\sigma, T)$ , где  $\sigma$  - напряжение, то при постоянной температуре  $T$  и постоянной скорости суммарной деформации  $\dot{\varepsilon} = V$ , получим [11]

$$d\sigma / d\varepsilon = E(1 - \varphi(\sigma, T) / V). \quad (1)$$

И чем меньше величина скорости деформирования  $V$ , тем при меньшем уровне  $\sigma$  диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ » выйдет на горизонтальную асимптоту. И если потребовать, чтобы процесс нагружения при деформировании не вышел за пределы упругой области  $\sigma \leq \sigma_e$ , то максимальная скорость суммарной деформации должна быть  $V_{\max} \leq \dot{\varepsilon}^c = \varphi(\sigma_e, T)$ , что для многих материалов соответствует значению  $V < 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . А это одно из условий деформирования материала в режиме сверхпластичности. При медленно меняющихся температуре и нагрузке, в соответствии с (1), общая картина деформирования не изменится. Таким образом, при деформировании материала со скоростями  $\dot{\varepsilon} \leq \dot{\varepsilon}^c = \varphi(\sigma(t), T(t))$ , где  $\sigma(t) < \sigma_e(T)$  напряжения не выйдут за пределы упругости, пластические деформации  $\varepsilon^p \equiv 0$  и при построении определяющих уравнений не надо разделять процессы нагружения на активную и разгрузочную части, что существенно упрощает форму этих уравнений и их использование в прикладных задачах по ОМД в режимах ползучести и сверхпластичности.

Проведена большая серия экспериментов по анализу влияния скорости деформирования, начиная от  $\dot{\varepsilon} \approx 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ , когда деформации ползучести практически отсутствовали и вся необратимая деформация образовалась за счет пластической деформации  $\varepsilon^p$ , до скоростей  $\dot{\varepsilon} \approx 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ , когда наоборот отсутствовала  $\varepsilon^p$  и вся необратимая деформация состояла из  $\varepsilon^c$ . Экспериментальные образцы деформировались до одной и той же величины остаточной деформации с разными скоростями и затем подвергались стандартным испытаниям, типа: временное сопротивление  $\sigma_e$ , предел текучести, ударная вязкость, длительная прочность и т.д. По всем прочностным параметрам образцы, подвергнутые медленному деформированию, давали более хорошие показатели в сравнении с быстрым деформированием. То же подтвердили и металло-физические исследования на шлифах. Вследствие этого был сформулирован тезис: «Проигрыш во времени в процессе ОМД дает выигрыш в качестве материала полученной детали».

Обычно одними из характерных особенностей сверхпластичности считаются высокая температура процесса и узкий температурный интервал. Действительно, экспериментально показано, что диаграммы ползучести  $\dot{\varepsilon}^c = \varepsilon(t)$  при фиксированных значениях  $\sigma$  и  $T$  при  $T > 0,5T_{\text{пл}}$  практически не имеют первой неустановившейся стадии и очень непродолжительную третью стадию. При этом в некотором узком интервале  $\Delta T$  третья стадия исчезает, процесс ползучести протекает по закону  $\dot{\varepsilon} = \varphi(\sigma, T)$  без каких-либо параметров упрочнения - разупрочнения и в этом интервале деформации  $\dot{\varepsilon}^*$  к моменту разрушения максимальны. С отклонением температуры от этого интервала в ту или иную сторону снова наблюдается третья стадия, и существенно уменьшаются значения  $\dot{\varepsilon}^*$  при разрушении. Интересно отметить, что в этих интервалах  $\Delta T$  релаксация напряжений в образцах происходит практически до нуля. По-видимому, эти температурные интервалы соответствуют режимам, близким к сверхпластичности. В этом, с феноменологической точки зрения, проявляется

непосредственная связь явления сверхпластичности с эффектами высокотемпературной ползучести.

Следующей особенностью высокотемпературного деформирования является тот факт, что при таких температурах в материале проходят структурно-фазовые изменения, которые влияют на процесс деформирования. Определять деформационно-прочностные характеристики материала надо в связанной постановке с учетом как внешних температурно-силовых факторов, так и внутренних. Учитывая трудности такой постановки вопроса, как следствие возникает необходимость развития приближенных методов в описании процессов высокотемпературного деформирования, которые интегрально «в среднем» отражали бы общую картину и позволяли проводить оценочные расчеты элементов конструкций.

2. Высокотемпературная ОМД сопровождается накоплением необратимых деформаций  $\epsilon^n$ , содержащих вневременные пластические деформации  $\epsilon^p$  и вязкие составляющие  $\epsilon^c$ ; величина последних зависит и от уровня напряжений, и от продолжительности их воздействий на материал;  $\epsilon^n = \epsilon^p + \epsilon^c$ . В зависимости от соотношения величин  $\epsilon^p$  и  $\epsilon^c$  технологические процессы ОМД условно можно разделить на три вида: ОМД в режиме упруго-пластического деформирования, когда  $\epsilon^c \approx 0$  и вся необратимая деформация  $\epsilon^n \approx \epsilon^p$ ; ОМД в режиме пластичности и ползучести, когда обе составляющие  $\epsilon^p$  и  $\epsilon^c$  одного порядка; ОМД в режиме типа сверхпластичности, когда  $\epsilon^p \approx 0$  и  $\epsilon^n = \epsilon^c$ . Первые два процесса после снятия нагрузки сопровождаются частичным упругим восстановлением - «распружиниванием» отформованной детали, и чем меньше составляющая  $\epsilon^c$  в общей деформации  $\epsilon^n$ , тем больше величина упругого восстановления. Кроме того, численные расчеты формообразования тонкостенных деталей оболочечного типа в этих режимах показывают зависимость геометрической формы готовой детали от точности задания исходных параметров нагружения, и, опять же, чем меньше составляющая  $\epsilon^c$ , т.е. чем меньше продолжительность процесса, тем существеннее эта зависимость. С увеличением длительности процесса составляющая  $\epsilon^c$  в суммарной величине  $\epsilon^n$  увеличивается, что сопровождается релаксацией внутренних напряжений и ослаблением зависимости конечной геометрической формы детали от неточности задания начальных условий. Это особенно проявляется в условиях режима деформирования типа сверхпластичности при  $\epsilon^p = 0$ , когда в материале обрабатываемой детали проходит практически полная релаксация напряжений, а это, в свою очередь, позволяет использовать приближенные методы расчета, задаваясь в исходном состоянии в детали любыми статически допустимыми полями напряжений.

Проиллюстрируем вышесказанное на примере деформирования материала АМГ-6М при температуре  $T=370^\circ\text{C}$ , что соответствует режиму, близкому к сверхпластичности. Эксперименты проводились на образцах стандартного типа на растяжение и сжатие. Из условия несжимаемости  $S_0 \ell_0 = S(t) \ell(t)$ , где  $S$  – сечение образца и  $\ell$  – рабочая длина, проводилась корректировка нагрузки для поддержания постоянной величины напряжения. Деформация определялась по зависимости  $\epsilon = \ln(\ell / \ell_0)$ . Результаты экспериментов представлялись в виде зависимости  $\epsilon_k^c = \epsilon(t)$

при  $\sigma_k = \text{const}$ , либо в виде  $A_k = \int_0^{\epsilon} \sigma_k d\epsilon = \sigma_k \epsilon$  удельной величины рассеянной энергии и

имели четко выраженный линейный характер от времени, при этом результаты на растяжение и сжатие практически совпадали. Аппроксимация зависимости  $\dot{A} = W = \sigma \cdot \dot{\epsilon}$  проводилась в виде

$$W = B\sigma^n, \text{ где } B=1,62 \cdot 10^{-10} \text{ [(МПа)}^{1-n}/\text{с}], n=5. \quad (2)$$

Для пространственного напряженного состояния вместо  $\sigma$  использовали  $\sigma_s = ((3/2)\sigma_{ij}^o\sigma_{ij}^o)^{1/2}$ ,  $\sigma_{ij}^o = \sigma_{ij} - (1/3)\delta_{ij}\sigma_{nn}$ .

Эту зависимость применили и для описания процессов ползучести в элементах конструкций при неоднородном НДС.

На рис.1 точками представлены результаты экспериментов на кручение сплошных круглых стержней радиусом  $R = 10$  мм и рабочей длиной  $l = 47,3$  мм при величинах моментов кручения соответственно  $M_1 = 17,46$  Н·м,  $M_2 = 23,38$  Н·м,  $M_3 = 35,25$  Н·м.

Для описания процесса деформирования использовали метод оценки «средней по объему» мощности рассеяния энергии

$$W_o = \frac{1}{V} \int_V B\sigma^n dv. \quad (3)$$

Характеристики материала определены из экспериментов при одноосном растяжении - сжатии (2). Рассматривались произвольные статически допустимые поля напряжений. В соответствии с теоремой о минимуме мощности дополнительного рассеяния, оценки по статически допустимым полям  $\sigma_{ij}$  должны дать завышенные значения мощности рассеяния в сравнении с истинными.

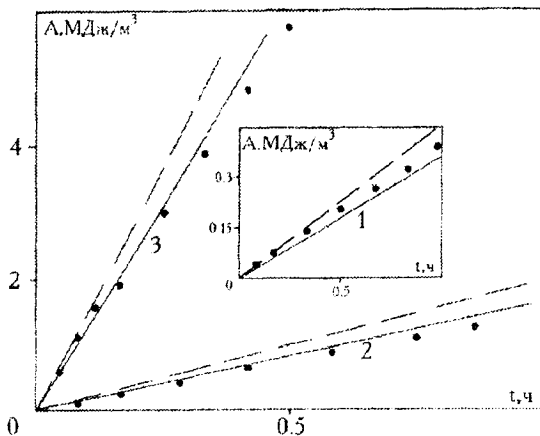


Рис. 1. Результаты экспериментов на кручение сплошных круглых стержней

Возьмем за статически допустимое поле напряжений упругое распределение  $\tau = \tau_o \frac{r}{R}$ ,  $\sigma_s = \sqrt{3}\tau$  и будем считать его неизменным от начала процесса до конца. При заданном моменте кручения  $M_{кр}$ , найдем  $\tau_o$ ,

$$M_{кр.} = \int_s \tau \cdot r ds = \frac{2}{3} \pi \tau_o R^3 \Rightarrow \tau_o = \frac{2M}{\pi R^3}, \sigma_o = \sqrt{3} \frac{2Mr}{\pi R^4}.$$

Подставляя в (3), найдем среднюю по объему величину  $W_o$ , а затем  $A_o(t) = W_o \cdot t$ . Соответствующие графики  $A_k = A(t)$  нанесены на рис.1 пунктирной линией.

Возьмем за статически допустимое поле напряжений «предельное распределение», которое соответствует схеме идеально пластического НДС или более корректно «схеме идеально вязкого распределения», т.е.  $\tau = \tau_o = const$ . Тогда из

$$\text{заданного } M_{кр.} = \int_s \tau_o \cdot r ds = \frac{\tau_o 2\pi R^3}{3}. \text{ Найдем } \tau_o = \frac{3M}{2\pi R^3} \text{ и } \sigma_o = \sqrt{3} \frac{3M}{2\pi R^3}.$$

Подставляя в (3), найдем среднюю по объему величину  $W_o$ , а затем  $A_o(t) = W_o \cdot t$ . Соответствующие графики  $A_k = A(t)$  нанесены на рис.1 сплошными линиями. Совпадение экспериментальных данных с расчетными по предельному распределению НДС очевидно.

Интересно отметить, что если взять отношение  $W_o^{in}$  к  $W_o^{np}$  при фиксированном  $M_{кр.}$  и проанализировать, как это отношение меняется с изменением показателя  $n$ ,

$$\text{получим } \frac{W_o^{in}}{W_o^{np}} = \frac{2^{2n-1}}{3^n (n+2)}, \text{ т.е. оно растет с ростом } n.$$

В нашем случае при  $n = 5$  отношение равно 1,2. Аналогичные результаты получены и на других материалах как при кручении стержней, так и изгибе прямоугольных балок.

Из приведенных экспериментальных результатов по высокотемпературной ползучести элементов конструкций с неоднородным НДС можно заключить:

- для описания процессов деформирования материалов в режимах, близких к сверхпластичности, в качестве удовлетворительного приближения можно принимать усредненное предельное напряжение по схеме идеально пластического или «идеально вязкого» состояния;

- в методическом отношении для определения сдвиговых характеристик материала при высоких температурах можно использовать не тонкостенные трубчатые образцы, которые теряют геометрическую форму уже при небольших деформациях, а толстостенные и даже сплошные – результаты будут близки к истинным.

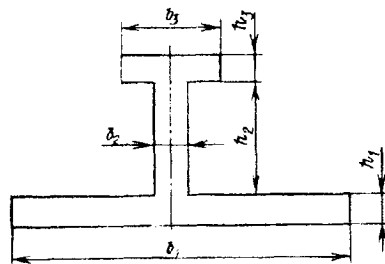


Рис. 2. Разрез двутавровой балки

В качестве примера приближенного расчета рассмотрим чистый изгиб двутавровой балки – один из основных элементов оребренной панели, на которые она разбивается при численных расчетах процесса формообразования. На рис.2

представлен разрез балки и ее размеры. Пусть задан изгибающий момент  $M=30 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ; требуется найти изменение кривизны во времени  $\kappa(t)$ . Характеристики материала – те же (2). В соответствии с вышеизложенным принимаем статически допустимым напряжением  $\sigma_0 = \text{const}$  по высоте балки. Из условия  $\int_S \sigma_0 dS = 0$  находим положение

нейтральной оси, из условия  $M = \int_S \sigma_0 \cdot z dS$  определяем  $\sigma_0$ , подставляя в (3), найдем

среднюю по объему мощность рассеяния  $W_0 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ [МДж/(с}\cdot\text{м}^3\text{)]}$  скорость изменения угла  $\varphi$  на рассматриваемой длине  $l$  балки  $\dot{\varphi} = W_0 (S \cdot \ell) / M$  и затем  $\kappa = \dot{\varphi} / \ell$ , и ее скорость –  $\dot{\kappa} = 1,46 \cdot 10^{-2} \text{ [1/(м}\cdot\text{с)]}$ .

Ранее в подобных задачах использовался метод, основанный на понятии так называемой «характеристической точки». Суть метода заключается в предположении, что в нагруженном элементе конструкции существует характерная точка (или малая ее окрестность), напряжения в которой при стационарных режимах нагружения не изменяются и остаются равными исходным – упругим значениям вплоть до разрушения. При изменении действующей нагрузки напряжения в этой точке изменяются по закону одноосного деформирования, а деформации в ней определяют поведение всей конструкции в целом. Местоположение этой точки определяется как координата пересечения эпюр упругого и установившегося распределения напряжений. Соответствующие зависимости для балки симметричного относительно оси  $z$  сечения приведены в [12]. В нашем случае с типовым сечением балки, изображенным на рис. 2, для тех же характеристик  $B$  и  $n$  получим координату характеристической точки  $\hat{z} = [J_{1x} / J_{(n-1)x}]^{(n-1)/(n-2)}$ , где  $J_{(n-1)x} = \int_F z^{n(n-1)} ds$  – обобщенный момент инерции сечения профиля,  $J_{1x}$  – упругий момент инерции сечения. Начало координат находится на нейтральной оси сечения профиля.

Зная  $M = \int_S \sigma \cdot z dS$ , найдем упругое распределение напряжений  $\sigma(z)$  и величину  $\bar{\sigma} = 26,13 \text{ МПа}$  для точки  $\hat{z}$ . Соответственно, находим  $\hat{\epsilon} = B(\bar{\sigma})^{n-1}$  и, т.к.  $\kappa = \hat{\epsilon} / \hat{z}$ , находим скорость изменения кривизны  $\dot{\kappa} = 1,03 \cdot 10^{-2} \text{ [1/(м}\cdot\text{с)]}$  и  $\dot{W} = \bar{\sigma} \cdot \dot{\epsilon} = B \bar{\sigma}^n = 1,97 \cdot 10^{-3} \text{ [МДж/(с}\cdot\text{м}^3\text{)]}$ .

Разница в скорости изменения кривизны по приведенным методикам – 43%, а в величинах мощности рассеяния – 11%. Но если для определения скорости изменения кривизны использовать не зависимость  $\dot{\kappa} = \hat{\epsilon} / \hat{z}$ , а зависимость  $\dot{\kappa} = \dot{\varphi} / \ell = \frac{n \cdot S \cdot \ell}{M \cdot t}$ , то получим ту же разницу в 11%, как и по мощностям. Из сравнения приведенных данных можно заключить, что оба из приближенных подходов близки по результатам, но методика расчета по предельным значениям напряжений идеально вязкого состояния существенно проще.

3. Наиболее распространенным оборудованием для формообразования тонкостенных элементов конструкций оболочечного типа в условиях высокотемпературной ползучести являются устройства с жесткими матрицами и пуансонами. Наряду с ними появились устройства для формообразования, содержащие систему соосно расположенных подвижных стержней, между которыми зажата формируемая заготовка. С одной стороны, стержни нагружены усилиями, обеспечивающими рост прогибов заготовки в соответствии с заданным для данной

температуры законом ползучести, с другой - каждый стержень перемещается с заранее рассчитанной и управляемой от ЭВМ скоростью. Таким образом, заготовка в процессе формирования с малой скоростью деформирования непрерывно проходит геометрические формы от исходной до конечной, что исключает появления пластических изломов. Возможный вариант такого устройства с изменяемой в процессе деформирования геометрией оснастки описан, например, в [13]. Его опытный образец изготовлен в лаборатории и подтвердил свою работоспособность.

Таким образом, технология обработки материалов в режимах ползучести и сверхпластичности – весьма перспективное направление в механике деформируемых сред и требует дальнейшего комплексного изучения с учетом ее экономической целесообразности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 00-15-96180, 99-01-00526.

### Библиографический список

1. Ильюшин А.А. К вопросу о вязкопластическом течении материала // Тр. конфер. по пластич. деформациям. М.: Изд-во АН СССР, 1938. - С. 5-18.
2. Ишлинский А.Ю. Прокатка и волочение при больших скоростях деформирования // ПМТФ. - 1943. - Т. VII. - Вып. 3. - С. 226-230.
3. Генки Г. О медленных стационарных течениях в пластических телах с приложениями к прокатке, штамповке и волочению // Теория пластичности. М.: Гос. изд.-во иностр. лит.-ры, 1948. - С. 136-156.
4. Поздеев А.А., Тарновский В.И. О перспективах применения теории ползучести и наследственности к расчету процессов обработки материалов давлением // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1965. - №11. - С. 62-68.
5. Поздеев А.А., Тарновский В.И., Еремеев В.И., Баакашвили В.С. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением. - М. Металлургия, 1973. - 222 с.
6. Малинин Н.Н. Технологические задачи теории ползучести // тез. докл. на III съезде по теор. и прикл. механике. - М., 1968. - 203 с.
7. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов - М.: Машиностроение, 1986. - 225 с.
8. Романов К.И. Механика горячего формоизменения металлов. - М.: Машиностроение, 1993. - 241 с.
9. Раевская Г.А., Соснин О.В. Термомеханическая обработка сплава АК4-1 // Наука - производству: Докл. науч. практ. конфер. Новосибирск, 1974. - Ч.4. - С. 106-109.
10. Горев Б.В., Раевская Г.А., Соснин О.В. К вопросу об использовании ползучести в технологии формирования изделий // Динамика сплош. среды. Новосибирск, 1977. - Вып. 30.
11. Соснин О.В., Горев Б.В., Любашевская И.В. Высокотемпературная ползучесть и сверхпластичность материалов // ПМТФ. - 1977. - Т. 38.
12. Горев Б.В., Клопотов И.Д., Шавров И.А., Кузнецовский А.П. Технология формообразования крупногабаритных деталей из сплава 1561 в режиме сверхпластичности // Судостроит. пром-ть. Сер. Технология и организация производства. - Судостроитель, 1989. - Вып. 14. - С. 11-23.

13. Патент РФ №2076010, В 21 D 11/20. Устройство для формообразования / Л.Л. Рублевский, О.В. Соснин, Б.В. Горев, М.И. Бондаренко Бюл. изобр. 1997. №9. С.136.

Получено 14.03.2001