

К ВОПРОСУ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ В РЕЖИМЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

Б. В. Горев, И. Д. Клопотов, Г. А. Раевская, О. В. Соснин
(Новосибирск)

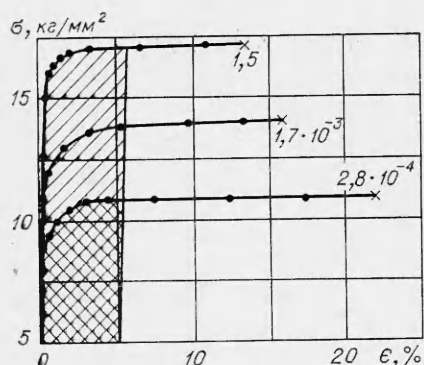
Обработка материалов давлением в горячем состоянии широко применяется в технике. Процесс обработки в таком режиме обычно непродолжителен, формоизменение детали достигается за счет «мгновенных» пластических деформаций, а повышение температуры, с одной стороны, увеличивает пластичность материала, с другой — снижает требуемые для деформирования усилия.

В последние годы ведутся интенсивные исследования в области сверхпластичности материалов и использования этого явления в технологических процессах обработки давлением. Сверхпластическое поведение материала наблюдается при некоторых его структурных состояниях и в определенных температурных диапазонах. Но во всех случаях одним из определяющих факторов, способствующих сверхпластическому деформированию, является медленный режим нагружения. В таких процессах время играет существенную роль и в общей сумме необратимых пластических деформаций основной вклад вносят деформации ползучести. Не останавливаясь на физической природе и вытекающих из нее сходстве и различии в «мгновенных» пластических деформациях и деформациях ползучести, развивающихся во времени, с феноменологической точки зрения можно утверждать, что в процессе сверхпластичности основополагающими являются необратимые деформации, определяемые по законам ползучести. В этом смысле горячую обработку материалов при медленных режимах нагружения более правильно называть термином «обработка материалов давлением в режиме ползучести» [1]. В отличие от технологических процессов обработки материалов в режиме сверхпластичности обработка в режиме ползучести менее ограничена техническими трудностями и применима практически для всех, в том числе и труднодеформируемых материалов.

Работы по использованию процессов ползучести в технологии обработки материалов давлением появились сравнительно недавно. В работах [2—4] в преобладании упругопластическими составляющими деформаций и с учетом только деформации ползучести приведены решения задач по осадке полосы круглого цилиндра, продольной прокатке и ряда других задач, встречающихся в технологии. В работах [1, 5] приведены некоторые общие соображения и экспериментальные данные о перспективности применения явления ползучести в технологических процессах, показано преимущество формообразования деталей в медленном режиме нагружения перед быстрым. В [6] приводится описание устройства, применяемого в соответствующих технологических процессах. Но в целом работ по экспериментально-теоретическому обоснованию применения процессов ползучести в технологии обработки материалов давлением очень мало, что, несомненно, сказывается на темпах развития этого направления.

Ниже экспериментально показаны преимущества медленного режима нагружения перед быстрым. Основываясь на общепринятых соотношениях ползучести даны приближенные методы расчета процесса изгиба элементов тонкостенных конструкций с экспериментальным сопоставлением результатов. Применимость разработанного метода иллюстрируется на примере формообразования оребренной панели.

На фиг. 1 представлены диаграммы деформирования $\sigma - \epsilon$ сплава АК4-1 при температуре 300°C с разными скоростями нагружения $d\sigma/dt$ кг/мм²·с. Видно, что с уменьшением скорости нагружения, когда в суммарной величине необратимых деформаций увеличивается составляющая деформаций ползучести, общая величина деформаций к моменту разрушения ϵ_* монотонно растет. Площадь, ограниченная осью абсцисс и кривой деформирования, представляет собой величину рассеянной удельной работы необратимых деформаций $A_n = \int_0^{\epsilon_*} \sigma d\epsilon$. Из фиг. 1 видно, что ее величина практически остается постоянной и от скорости нагружения не зависит. Экспериментальные исследования как в области механики твер-



Ф и г. 1

фиг. 1. С увеличением температуры этот эффект, как правило, возрастает.

Аналогичные результаты получены на материале АМГ-6 М при температуре 200°C [5], на титановом сплаве ВТ-5 при температурах 400—500°C, где деформации ползучести в 4 раза превосходят величину пластических деформаций к моменту разрушения, а также на ряде других материалов.

Наблюдаемый в экспериментах эффект роста деформаций ϵ_* при уменьшении скорости нагружения качественно можно объяснить следующим образом: в процессе нагружения материала внутри него на стыках зерен возникают напряжения, величины которых могут значительно отличаться от средних макронапряжений. При повышенных температурах и медленных режимах нагружения возникающие «пики» напряжений успевают прорелаксировать, при больших скоростях нагружения на стыках зерен могут возникнуть микротрещины — зародыши локального разрушения материала, резко снижающие его общий прочностной ресурс.

В подтверждение сказанному были проведены следующие эксперименты: образцы из сплава АК4-1 при температуре 195°C, сплава 1201 при температуре 180°C и сплава В95 при температуре 150°C продеформировали до некоторой фиксированной величины деформации ϵ_0 в быстром режиме нагружения (процесс деформирования продолжался не более 10 с) и медленном режиме с продолжительностью порядка 2 ч. После деформирования из образцов вдоль их рабочей длины изготовили шлифы и провели металлографический анализ микроструктур. Исследования показали, что на образцах, подвергнутых быстрому нагружению, отчетливо видны поры по границам зерен, структура менее равномерная, ориентация слабо выражена. При медленном деформировании структура более равномерная, зерна вытянуты и ориентированы в направлении деформирования, пор по границам зерен практически не наблюдается. При больших значениях деформаций ϵ_0 различие между образцами, подвергнутыми быстрому и медленному нагружению, обнаруживалось и при внешнем осмотре: поверхность первых образцов имела матовый оттенок с явно выраженной пористостью, поверхность вторых — оставалась достаточно гладкой.

В пользу медленного режима нагружения говорят и следующие данные. Две партии образцов, вырезанных из монолитных панелей сплава АК4-1 после формообразования при температуре 195°C в быстром и медленном режимах нагружения, были подвергнуты стандартным испытаниям по таким параметрам, как ударная вязкость, усталость, дли-

дого тела, так и в области металлофизики показывают, что степень поврежденности материала при деформировании достаточно хорошо коррелирует с величиной рассеянной работы и в первом приближении можно считать, что поврежденность прямо пропорциональна этой величине [7]. Отсюда следует, что если в процессе обработки материала давлением необходимо продеформировать его до некоторой величины деформации ϵ_0 , то степень поврежденности материала при быстром нагружении больше, чем при медленном. Это отчетливо видно из сравнения заштрихованных площадей под диаграммами

тельная прочность, ползучесть и т. д. По всем параметрам партия образцов, вырезанных из панели, отформованной в медленном режиме нагружения, дала более хорошие показатели в сравнении с партией образцов, вырезанных из панели, отформованной в быстром режиме. Например, предел ползучести увеличился на 15—20%, время до разрушения при испытании на длительную прочность — на порядок.

Приведенные данные наглядно иллюстрируют преимущества обработки материалов в медленном режиме нагружения в условиях ползучести как с точки зрения повышения прочностных ресурсов в готовых изделиях в сравнении с быстрым режимом обработки, так и с точки зрения уменьшения требуемых для обработки материала мощностей технологического оборудования.

Очевидно, чем выше температура обработки материалов давлением, тем интенсивнее идет процесс релаксации напряжений в элементах формируемой детали и тем меньше будет ее упругое восстановление. При достаточно высоких температурах следует ожидать практически полного отсутствия упругого распруживания детали после ее обработки. Однако при высоких температурах происходит процесс термического разупрочнения материала, что связано с потерей ряда важных его прочностных свойств. А их восстановление путем последующей термообработки зачастую недопустимо для деталей, изготавливаемых с высокой точностью. В этом смысле обработка давлением при умеренных температурах за счет деформаций ползучести имеет определенные преимущества. Однако при этом существенным является вопрос об оценке упругого восстановления деталей.

Геометрия формообразующей матрицы с учетом упреждения на величину упругого восстановления должна определяться расчетами упруго-пластического деформирования детали и релаксации напряжений в ней за счет ползучести материала. Время выдержки детали при температуре под нагрузкой в поджатом состоянии является существенным для расчетов, так как распруживание определяется уровнем непрорелаксированных напряжений на момент снятия нагрузки.

Схему расчета упругого распруживания проиллюстрируем на примере расчета балок для случая, когда поджатие к матрице радиуса R_H осуществляется мгновенно при температуре и деталь выдерживается в поджатом состоянии время t_ϕ . После снятия нагрузки балка будет иметь остаточный радиус кривизны R_R , который определяется остаточным моментом, действующим в сечении балки на момент снятия нагрузки. Соответствующие расчеты релаксации момента проводились в общепринятых предположениях для чистого изгиба балок. Из гипотезы плоских сечений

$$(1) \quad \sigma/E + \varepsilon_p + \varepsilon_c = \kappa_H(z + \delta), \quad \kappa_H = 1/R_H = \text{const}$$

и уравнения равновесия

$$(2) \quad \int_F \sigma dF = 0$$

известными методами с учетом геометрии сечения балки определим напряженное состояние в начальный момент времени (момент поджатия к матрице). Здесь δ — смещение нейтральной плоскости, начало координат помещается в центре тяжести сечения; ε_p — мгновенная пластическая деформация, описываемая уравнением

$$(3) \quad \varepsilon_p = K|\sigma|^{m-1} \sigma;$$

ϵ_c — деформация ползучести, описываемая уравнением ползучести

$$(4) \quad \frac{d\epsilon_c}{dt} = f(\sigma, A), \quad A = \int_0^{\epsilon_c} \sigma d\epsilon_c.$$

По найденному напряженному состоянию, согласно аналитической аппроксимации кривой мгновенного деформирования с использованием (3), определим распределение пластических деформаций по высоте балки, которые в дальнейшем считаются «замороженными», так как далее идет процесс уменьшения напряжений.

Подставляя напряжения, выраженные из (1) с учетом известных мгновенных деформаций пластичности $\epsilon_p^0(z)$, в выражение для скоростей деформаций ползучести (4), получим интегродифференциальное уравнение для определения деформаций ползучести по высоте балки во времени

$$(5) \quad \frac{d\epsilon_c}{dt} = \varphi(\epsilon_c, \epsilon_p^0, \kappa_n, \delta, A),$$

где $\delta = \int_F (\epsilon_p^0 + \epsilon_c) dF / (\kappa_n F)$ определяется из уравнения равновесия (2) с учетом гипотезы плоских сечений (1). Разбивая сечение балки на интервалы по высоте и заменяя интегралы в (5) конечными суммами, получим систему дифференциальных уравнений относительно ϵ_c^k . Последняя решается методом Рунге — Кутты, как и для чистого изгиба балок, постоянным моментом [8]. По найденным деформациям ползучести и ранее полученным пластическим деформациям определяются напряжения по высоте балки на любой момент времени. Остаточный момент и остаточная кривизна балки вычисляются по формулам

$$(6) \quad M(t_\Phi) = \int_F \sigma z dF;$$

$$(7) \quad \kappa_n = \kappa_n - M(t_\Phi) / EI,$$

где $I = \int_F z^2 dF$.

На фиг. 2,а значками показаны результаты трех экспериментов по релаксации изгибающего момента на балках прямоугольного сечения (шириной 10 мм и высотой 20 мм) из материала АК4-1Т при температуре 200°C. Образцы предварительно старились в течение 15 ч.

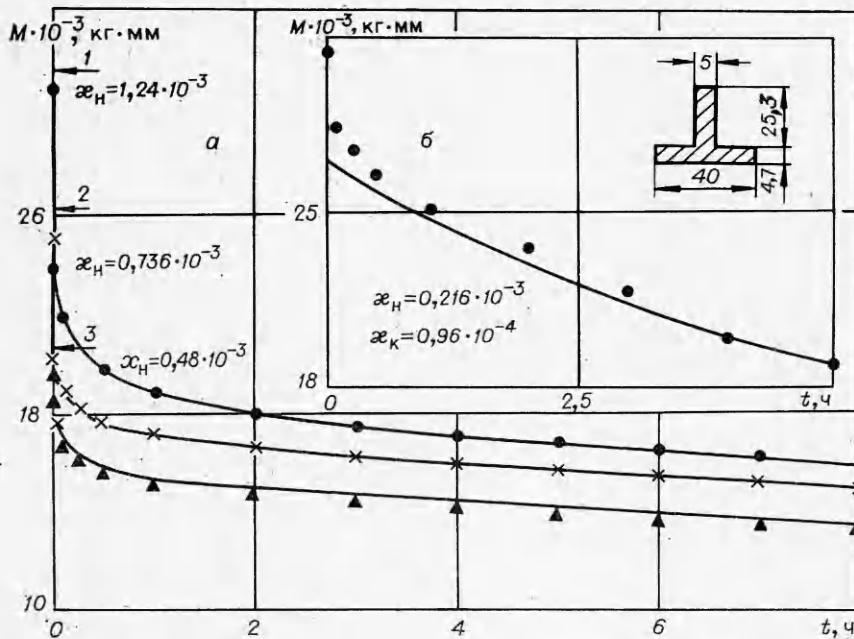
Результаты испытаний на кратковременную ползучесть при постоянном напряжении показали, что материал обладает разными свойствами на растяжение и сжатие и имеет резко выраженный упрочняющийся участок ползучести. Кривые ползучести аппроксимировались по зависимости

$$\frac{d\epsilon_c}{dt} = \frac{B |\sigma|^{n-1} \sigma}{A^\alpha}, \quad \text{где } A = \int_0^{\epsilon_c} \sigma d\epsilon_c,$$

со следующими характеристиками:

$$B_1 = 0,3 \cdot 10^{-54} (\text{мм}^2/\text{кг})^{n_1 - \alpha_1} \text{ч}^{-1}, \quad n_1 = 38, \quad \alpha_1 = 0,54 \text{ для растяжения,}$$

$$B_2 = 0,36 \cdot 10^{-23} (\text{мм}^2/\text{кг})^{n_2 - \alpha_2} \text{ч}^{-1}, \quad n_2 = 15, \quad \alpha_2 = 0,90 \text{ для сжатия.}$$



Ф и г. 2

Диаграммы мгновенных пластических деформаций аппроксимировались по зависимости (3) с соответствующими константами:

$$K_1 = 2,5 \cdot 10^{-45} (\text{мм}^2/\text{кг})^{m_1}, \quad m_1 = 28 \text{ для растяжения,}$$

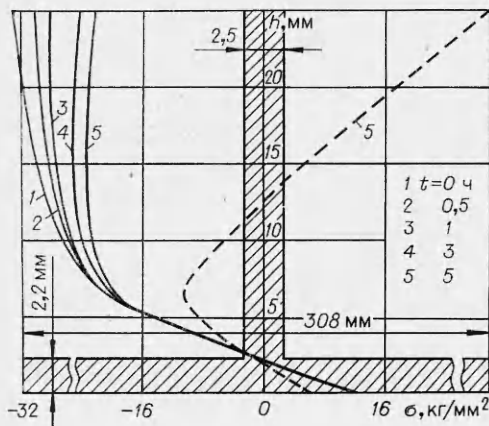
$$K_2 = 6 \cdot 10^{-22} (\text{мм}^2/\text{кг})^{m_2}, \quad m_2 = 12 \text{ для сжатия.}$$

Модуль упругости $E = 6 \cdot 10^3 \text{ кг/мм}^2$. Результаты расчета с приведенными выше характеристиками показаны на фиг. 2, а линиями, где начальные изгибающие моменты, соответствующие трем различным кривизнам α_n 1/мм, отмечены стрелками.

Достаточно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных по релаксации изгибающих моментов позволяет судить о достоверности расчетной схемы.

Следует отметить, что расчеты с учетом первой и второй стадии ползучести связаны с большим объемом вычислений. В практике решения задач на ползучесть используется упрощение, связанное с тем, что деформации первой стадии ползучести включаются в мгновенную пластическую деформацию. Этот прием позволяет упростить определяющие уравнения ползучести и сократить время счета на ЭВМ. Очевидно, расчет по такой методике дает отклонения от истинного процесса в начальный период, с течением времени расчетные значения приближаются к экспериментальным.

На фиг. 2, б точками представлены экспериментальные данные релаксации момента в тавровой балке для $\alpha_n = 0,216 \cdot 10^{-3} \text{ 1/мм}$, линией — результаты расчета по упрощенным уравнениям. Материал 1201-АТ, температура испытаний 180°C , геометрические размеры тавра указаны на фиг. 2, б, ребро работает на сжатие. Для расчета использовались следующие характеристики материала: $E = 5,7 \cdot 10^3 \text{ кг/мм}^2$, в области растяжения: $B_1 = 0,54 \cdot 10^{-38} (\text{мм}^2/\text{кг})^{n_1} \text{ ч}^{-1}$, $n_1 = 27$, $\alpha_1 = 0$, $K_1 = 0,74 \cdot 10^{-6} (\text{мм}^2/\text{кг})^{m_1}$,



Ф и г. 3

Из представленных на фиг. 3 результатов видно, что основание тавра с частью ребра до нейтральной оси работает в упругой области, напряжения релаксируют только в полке. Поэтому для расчетов тавровых элементов профилей, в том числе и ступенчатых тавров, у которых центр тяжести сечения близок к основанию полки, достаточно использовать характеристики пластичности и ползучести материала только на сжатие, если полка подвержена сжатию, или только на растяжение, если полка растянута. Это утверждение подтверждается непосредственными расчетами. Для профилей, у которых нейтральная плоскость является плоскостью симметрии, для точного расчета упругого восстановления необходимо использовать характеристики материала на растяжение и сжатие.

Изменяя начальную кривизну κ_n , в результате расчета будем иметь набор остаточных кривизн балки κ_k для одной и той же продолжительности процесса $t_{\text{ф}}$. Построив номограмму $\kappa_n = \kappa_n(\kappa_k)$ и задав требуемую кривизну детали κ_d , по номограмме определим необходимую кривизну оснастки $\kappa_0 = \kappa_n(\kappa_d)$. Пользуясь номограммой, можно рассчитать геометрию оснастки с учетом упреждения на величину упругого распруживания для деталей постоянного сечения с переменным радиусом кривизны. Для деталей с переменной жесткостью необходимо иметь ряд номограмм для жесткостных базисных элементов.

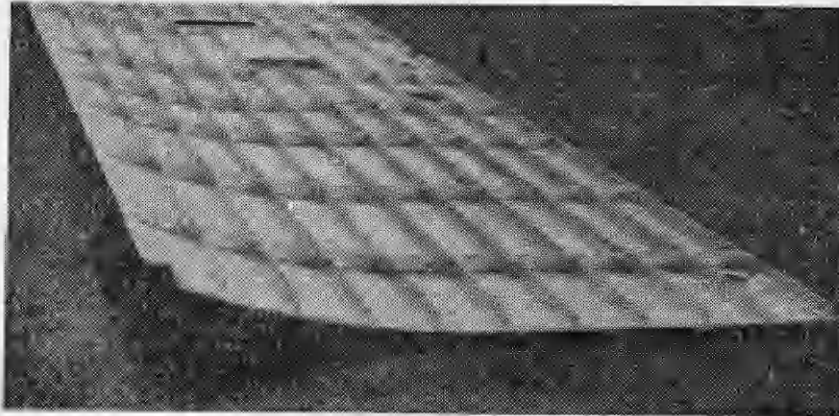
Выше отмечалось, что режим медленного формообразования деталей за счет ползучести материала предпочтительнее быстрого, так как идет устойчивый процесс с минимальным накоплением повреждений в материале, что приводит к увеличению ресурса детали. Приведенные на фиг. 2, 3 результаты относятся к мгновенному упругопластическому нагружению с последующей релаксацией напряжений. Расчет процессов релаксации внутренних напряжений при медленном нагружении балки не представляет принципиальных трудностей. Непосредственные расчеты показали, что при определенных скоростях нагружения возможно формообразование за счет только деформаций ползучести, что дает возможность существенно повысить ресурс детали.

Полученные результаты на балках таврового сечения были положены в основу расчета геометрии оснастки для формообразования оребренных панелей с учетом их упругого восстановления. Панель разбивалась на участки с тавровыми элементами равного сечения. Так как основание панели работает в упругой области без релаксации напряжений, считалось, что процессы релаксации в соседних и перекрещивающихся ребрах про-

$m_1 = 3$; в области сжатия: $B_2 = 0,21 \cdot 10^{-49} (\text{мм}^2/\text{кг})^{n_2} \text{ч}^{-1}$, $n_2 = 33$, $\alpha_2 = 0$, $K_2 = 0,69 \times 10^{-18} (\text{мм}^2/\text{кг})^{m_2}$, $m_2 = 11$.

Величина остаточной кривизны тавра κ_k определялась согласно соотношению (7).

На фиг. 3 показано распределение напряжений по высоте тавра из материала АК4-1Т в различные моменты времени. Для расчета использовались характеристики материала в состоянии поставки. Штриховой линией показана остаточная эпюра напряжений после упругого восстановления при продолжительности процесса $t_{\text{ф}} = 5$ ч.



Ф и г. 4

текают независимо. Это позволило по номограммам базисных элементов панелей рассчитать геометрию оснастки в целом для всей панели.

На фиг. 4 показана отформованная панель. Технологическая оснастка, выполненная по указанной выше расчетной схеме, обеспечила требуемую точность формообразования. Разработанная технология формообразования оребренных панелей в режиме ползучести внедрена на одном из предприятий.

Поступила 26 III 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Копыский Б. Д. Применение явления ползучести при обработке давлением.— Вест. машиностроения, 1977, № 9.
2. Малинин Н. Н. Приближенные решения задач горячего формоизменения (I. Осадка).— Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение, 1976, № 11.
3. Малинин Н. Н. Приближенные решения задач горячего формоизменения (II. Прокатка. Прессование).— Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение, 1976, № 12.
4. Малинин Н. Н. Приближенные решения некоторых технологических задач.— Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение, 1977, № 12.
5. Горев Б. В., Раевская Г. А., Соснин О. В. К вопросу об использовании ползучести в технологии формования изделий. — В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 30. Новосибирск, изд. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1977.
6. Деформирование металла за счет его ползучести в процессе отжига и многостержневое устройство для этой цели. Патент США № 3745805, кл. 72/63, 1973.
7. Соснин О. В. Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности. Ползучесть и разрушение неупрочняющихся материалов. Сообщение I.— Проблемы прочности, 1973, № 5.
8. Горев Б. В. К расчету на неустановившуюся ползучесть изгибаемого бруса из материала с разными характеристиками на растяжение и сжатие.— В кн.: Динамика сплошной среды. Вып. 14. Новосибирск, изд. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1973.