

УДК 621.983; 539.374

Ларин С. Н.
Яковлев С. С.
Платонов В. И.
Чарин А. В.

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КУПОЛООБРАЗНЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ

В работе [1] предложена математическая модель изотермического деформирования куполообразных оболочек из анизотропных высокопрочных материалов в режиме ползучести, подчиняющихся кинетической теории ползучести и повреждаемости. Получены основные соотношения и уравнения для оценки кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов, геометрических размеров изготавливаемой детали и предельных возможностей деформирования.

Рассмотрено деформирование анизотропного материала в условиях вязкого течения материала [2–4]. Рассмотрены вопросы деформирования заготовки, относящейся к группе материалов, подчиняющихся кинетическим уравнениям ползучести и повреждаемости [2, 3]:

$$\xi_e^c = B \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}} \right)^n \frac{1}{(1 - \omega_e^c)^m}; \quad \dot{\omega}_e^c = k \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}} \right)^n \frac{1}{(1 - \omega_e^c)^m}, \quad (1)$$

где B , n , m – константы материала, зависящие от температуры испытаний; $k = B / \varepsilon_{enp}^c$; ω_e^c – повреждаемость материала при вязкой деформации по кинетической модели разрушения; ε_{enp}^c – предельная эквивалентная деформация при вязком течении материала; $\dot{\omega}_e^c = d\omega_e^c / dt$; ξ_e^c и σ_e – эквивалентные скорость деформации и напряжение; σ_{e0} – эквивалентное напряжение, разделяющее вязкое и вязкопластическое течение материала. Упругими составляющими деформации пренебрегаем.

Целью работы является изучение закономерностей влияния технологических параметров деформирования куполообразных оболочек из высокопрочных анизотропных материалов.

Величина предельной эквивалентной деформации при вязком ε_{enp}^c течении анизотропного материала определяется по выражению:

$$\varepsilon_{enp}^c = D(b_0 + b_1 \cos \alpha + b_2 \cos \beta + b_3 \cos \gamma),$$

где D, b_0, b_1, b_2, b_3 – константы материала; $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ – среднее напряжение; σ_1, σ_2 и σ_3 – главные напряжения; α, β, γ – углы ориентации первой главной оси напряжений σ_1 относительно главных осей анизотропии x, y и z соответственно [5, 6].

Компоненты скоростей деформации ξ_{ij} определяются в соответствии с ассоциированным законом течения:

$$\xi_{ij} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент пропорциональности; $f(\sigma_{ij})$ – потенциал скоростей деформации анизотропного тела при кратковременной ползучести; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений.

Предельные возможности формоизменения в процессах обработки металлов давлением, протекающих при различных температурно-скоростных режимах деформирования, часто оцениваются на базе феноменологических моделей разрушения. В зависимости от условий эксплуатации или последующей обработки изготавливаемого изделия уровень повреждаемости не должен превышать 1, т. е. $\omega \leq 1$.

При справедливости деформационного критерия деформируемости выражения для определения предельной эквивалентной деформации ε_{enp}^c при ползучем течении материала можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon_{enp}^c = D(b_0 + b_1 \cos \alpha + b_2 \cos \beta + b_3 \cos \gamma), \quad (3)$$

где D, b_0, b_1, b_2, b_3 – экспериментальные константы материала; α, β, γ – углы ориентации первой главной оси напряжений σ_1 относительно главных осей анизотропии x, y и z соответственно.

Для оценки предельных возможностей изготовления куполообразных деталей выполнены теоретические исследования процесса изотермического деформирования круглой листовой заготовки радиусом R_0 и толщиной h_0 свободным выпучиванием в режиме вязкого течения материала под действием избыточного давления газа $p = p_0 + a_p t^{n_p}$ в сферическую матрицу (рис. 1). Здесь p_0, a_p, n_p – константы нагружения.

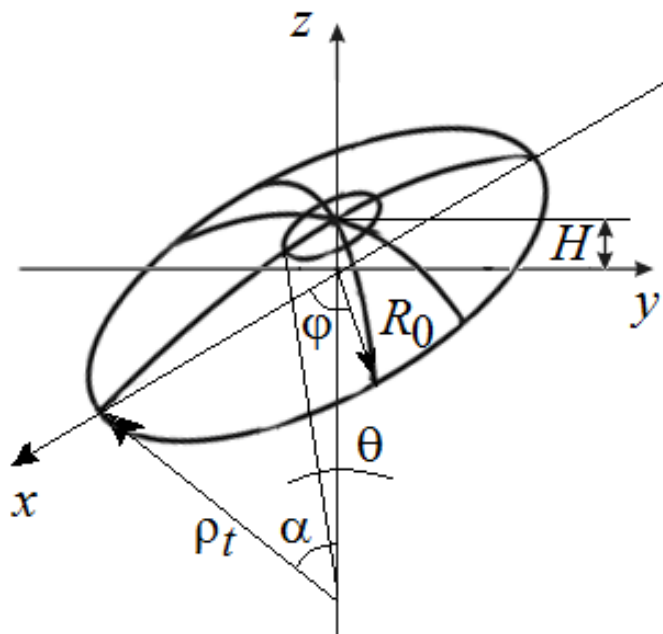


Рис. 1. Схема к расчету деформированного состояния срединной поверхности заготовки в меридиональной плоскости

По внешнему контуру заготовка закреплена. Материал заготовки принимается трансверсально-изотропным с коэффициентом анизотропии R [1]; напряженное состояние оболочки – плоским, т. е. напряжение, перпендикулярное плоскости листа, равно нулю ($\sigma_z = 0$). Рассматривается деформирование в меридиональной плоскости оболочки, как мембраны.

В силу симметрии механических свойств материала относительно оси заготовки и характера действия внешних сил меридиональные, окружные и нормальные к срединной поверхности заготовки напряжения и скорости деформаций являются главными. Срединная поверхность заготовки на каждом этапе деформирования остается частью сферической поверхности. В любом меридиональном сечении оболочки реализуется радиальное течение материала по отношению к новому центру на каждом этапе деформирования. Подробный анализ напряженного и деформированного состояния заготовки при изотермическом формоизменении изложен в работе [1].

Оценено влияние параметров закона нагружения a_p , n_p , эквивалентной скорости деформации ξ_{e1} , анизотропии механических свойств и геометрических размеров заготовки на предельные возможности формоизменения, связанные с разрушением заготовки при достижении уровня накопленных микроповреждений $\omega_e = 1$.

Рассмотрено использование полученных решений для анализа процесса горячего изотермического формоизменения полусферы из специальных алюминиевых и титановых сплавов в режиме вязкого течения материала при известном законе изменения давления от времени, а также при постоянной эквивалентной скорости деформации в вершине полусферы [1].

Расчеты силовых режимов, деформационных параметров, геометрических размеров заготовки и предельных возможностей формоизменения выполнены для титанового сплава BT14 при температуре обработки $T = 950^\circ\text{C}$, поведение которого описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости, механические характеристики которого приведены в работе [3].

В результате расчетов определялись меридиональные σ_m и окружные σ_t напряжения, эквивалентное напряжение σ_e и эквивалентная скорость деформации ξ_e , толщины в вершине куполообразной заготовки h_c и в месте ее закрепления h_k , высота полусферы H , величины накопленных микроповреждений ω_e в вершине куполообразной заготовки и в месте ее закрепления от времени деформирования t , а также предельные возможности формоизменения, определяемые накопленными величинами микроповреждений ω_e равными 1 ($\omega_e = 1$).

На рис. 2 и 3 приведены графические зависимости изменения относительных величин $\bar{H}' = H/R_0$ ($R_0 = 300$) и $\bar{h} = h/h_0$ в куполе полусферы от времени деформирования t при различных значениях параметров закона нагружения (n_p), а также от постоянной величины эквивалентной скорости деформации в куполе заготовки ξ_{e1} . Здесь экспериментальные данные обозначены точками. Методика проведения экспериментальных исследований подробно изложена в работе [3].

Анализ результатов расчетов и графических зависимостей показывает, что предельные возможности формоизменения в режиме вязкого течения материала, поведение которого подчиняется кинетической теории ползучести и повреждаемости, не зависят от условий нагружения заготовки. Показана существенная зависимость времени разрушения t_* от параметров нагружения a_p , n_p и величины постоянной эквивалентной скорости деформации ξ_{e1} . Увеличение параметра нагружения a_p с $0,2 \cdot 10^{-3}$ до $1,4 \cdot 10^{-3}$ МПа/с ^{n_p} и n_p с 0,5 до 0,8 при фиксированных других параметрах приводит к уменьшению времени разрушения t_* в 1,8 раза.

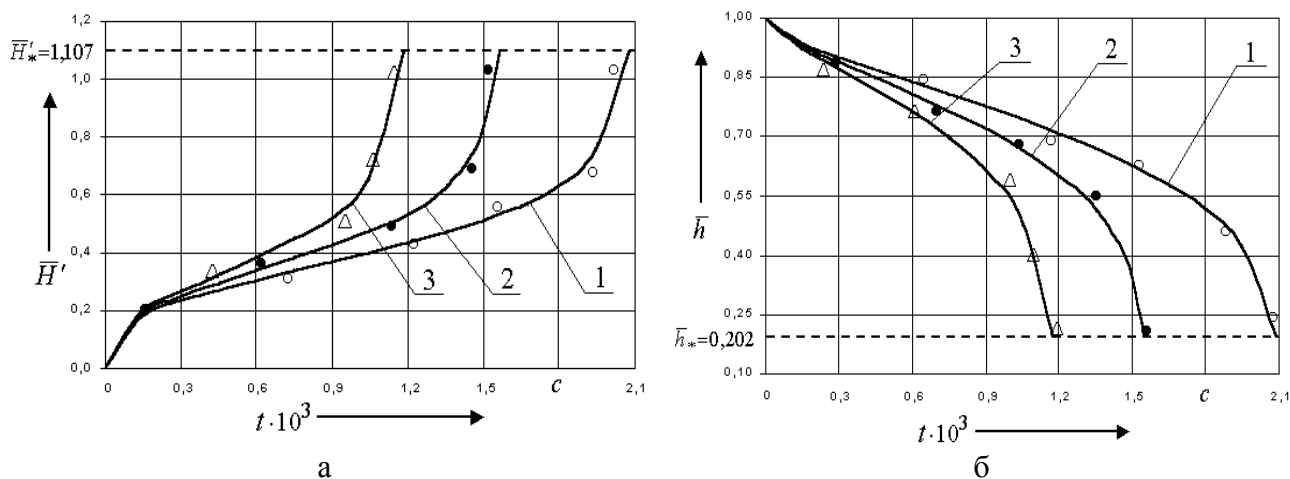


Рис. 2. Зависимости изменения \bar{H}' (а) и \bar{h} (б) от t ($p_0 = 0,013$ МПа; $a_p = 4 \cdot 10^{-3}$ МПа/с n_p):
 1 – $n_p = 0,5$; 2 – $n_p = 0,55$; 3 – $n_p = 0,6$

Рост коэффициента анизотропии R сопровождается увеличением времени разрушения t_* , относительной толщины в куполе заготовки \bar{h}_* и уменьшением относительной предельной высоты изделия \bar{H}'_* в среднем на 20 %.

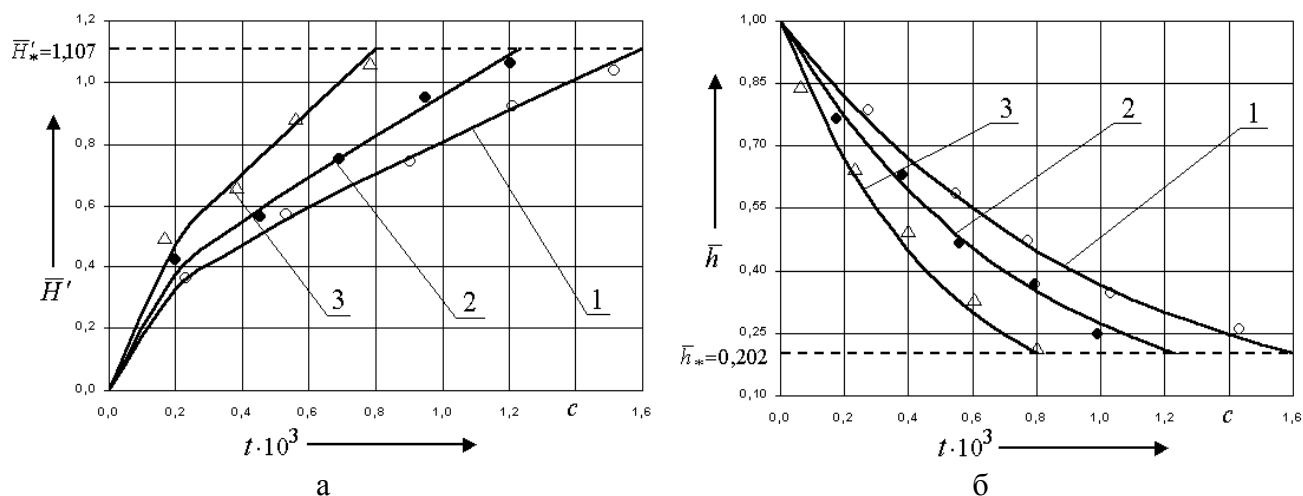


Рис. 3. Зависимости изменения \bar{H}' (а) и \bar{h} (б) от t ($T = 950$ °С; $\bar{R}_0 = 300$):
 1 – $\xi_e = 1 \cdot 10^{-3}$ 1/с; 2 – $\xi_e = 1,3 \cdot 10^{-3}$ 1/с; 3 – $\xi_e = 2 \cdot 10^{-3}$ 1/с

ВЫВОДЫ

Показано существенное влияние геометрических размеров заготовки на величину времени разрушения t_* . Установлено, что увеличение относительной величины радиуса заготовки $\bar{R}_0 = R_0 / h_0$ от 200 до 800 приводит к уменьшению времени разрушения более чем в 4 раза.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания №2014/227 на выполнение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014-2020 годы и гранта РФФИ № 14-08-00066 а.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев С. С. Математическая модель изотермического деформирования куполообразных оболочек из анизотропных материалов, подчиняющихся кинетической теории ползучести и повреждаемости / С. С. Яковлев, С. Н. Ларин, В. И. Платонов // *Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула : Изд-во ТулГУ. 2015. – Вып. 1. – С. 168–174.*
2. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, С. С. Яковлев, Я. А. Соболев. – М. : Машиностроение, 2004. – 427 с.
3. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С. С. Яковлев, В. Н. Чудин, Я. А. Соболев, С. П. Яковлев, В. И. Трегубов, С. Н. Ларин. – М. : Машиностроение, 2009. – 352 с.
4. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов / В. А. Голенков, С. П. Яковлев, С. А. Головин, С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь; под ред. В. А. Голенкова, С. П. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2009. – 442 с.
5. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
6. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов / А. А. Богатов – Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2002. – 329 с.

REFERENCES

1. Jakovlev S. S. *Matematicheskaja model' izotermicheskogo deformirovanija kupoloobraznyh obolochek iz anizotropnyh materialov, podchinjajushhija kineticheskoj teorii polzuchesti i povrezhdaemosti* / S. S. Jakovlev, S. N. Larin, V. I. Platonov // *Izvestija TulGU. Ser. Tehnicheskie nauki. Tula : Izd-vo TulGU. 2015. – Вып. 1. – С. 168–174.*
2. *Izotermicheskoe deformirovanie vysokoprochnyh anizotropnyh materialov* / S. P. Jakovlev, V. N. Chudin, S. S. Jakovlev, Ja. A. Sobolev. – М. : Mashinostroenie, 2004. – 427 s.
3. *Izotermicheskaja pnevmoformovka anizotropnyh vysokoprochnyh listovyh materialov* / S. S. Jakovlev, V. N. Chudin, Ja. A. Sobolev, S. P. Jakovlev, V. I. Tregubov, S. N. Larin. – М. : Mashinostroenie, 2009. – 352 s.
4. *Teorija obrabotki metallov davleniem. Uchebnik dlja vuzov* / V. A. Golenkov, S. P. Jakovlev, S. A. Golovin, S. S. Jakovlev, V. D. Kuhar'; pod red. V. A. Golenkova, S. P. Jakovleva. – М. : Mashinostroenie, 2009. – 442 s.
5. *Kolmogorov V. L. Mehanika obrabotki metallov davleniem* / V. L. Kolmogorov – М. : Metallurgija, 1986. – 688 s.
6. *Bogatov A. A. Mehanicheskie svojstva i modeli razrushenija metallov* / A. A. Bogatov – Ekaterinburg : GOU VPO «UGTU-UPI», 2002. – 329 s.

Ларин С. Н. – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО ТулГУ
Яковлев С. С. – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО ТулГУ
Платонов В. И. – канд. техн. наук, доц. ФГБОУ ВПО ТулГУ
Чарин А. В. – канд. техн. наук, доц. ФГБОУ ВПО ТулГУ

ФГБОУ ВПО ТулГУ – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тулский государственный университет», г. Тула, РФ.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru