

УДК 621.983; 539.374

Ларин С. Н.  
Платонов В. И.  
Яковлев Б. С.  
Коротков В. А.

### ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАГОТОВКИ НА ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КУПОЛООБРАЗНЫХ ОБОЛОЧЕК В РЕЖИМЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

Для оценки предельных возможностей изготовления полусферических изделий выполнены теоретические исследования процесса горячего формообразования 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. По внешнему контуру заготовка закреплена. Здесь  $p_0, a_p, n_p$  – константы нагружения. Рассмотрено деформирование анизотропного материала в условиях ползучего течения материала [1, 2]. Упругими составляющими деформации пренебрегаем.

Целью работы является оценка влияния анизотропии механических свойств заготовки на предельные возможности изотермического деформирования куполообразных оболочек в режиме ползучести.

Уравнения состояния с учетом повреждаемости, описывающие поведение материала, подчиняющегося энергетической теории ползучести и повреждаемости, записываются в виде:

$$\xi_e^c = B(\sigma_e / \sigma_*)^n / (1 - \omega_A^c)^m; \quad \dot{\omega}_A^c = \sigma_e \xi_e^c / A_{np}^c, \quad (1)$$

а применительно к группе материалов, подчиняющихся кинетическим уравнениям ползучести и повреждаемости, так

$$\xi_e^c = B(\sigma_e / \sigma_*)^n / (1 - \omega_e^c)^m; \quad \dot{\omega}_e^c = \xi_e^c / \varepsilon_{e np}^c, \quad (2)$$

где  $B, n, m$ , – константы материала, зависящие от температуры испытаний;  $A_{np}^c, \varepsilon_{e np}^c$  – удельная работа разрушения и предельная эквивалентная деформация при вязком течении материала;  $\omega_e^c$ , и  $\omega_A^c$  – повреждаемость материала при вязкой деформации по деформационной и энергетической моделям разрушения соответственно;  $\sigma_*$  – произвольно выбранная величина эквивалентного напряжения;  $\dot{\omega}_A^c = d\omega_A^c / dt$ ;  $\dot{\omega}_e^c = d\omega_e^c / dt$ .

В зависимости от температурно-скоростных условий деформирования, поведение материала может описываться уравнениями состояния (1) или (2) соответственно.

Материал заготовки принимается трансверсально-изотропным с коэффициентом анизотропии  $R$ ; 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].

Влияние параметров закона нагружения  $a_p$ ,  $n_p$ , эквивалентной скорости деформации  $\xi_{e1}$  и геометрических размеров заготовки на предельные возможности формоизменения, рассмотрены в работе [2]. Установлено, что разрушение заготовки при изотермическом деформировании происходит в куполе детали, где имеет место максимальное утонение заготовки. Показано, что увеличение параметров закона нагружения  $a_p$ ,  $n_p$  и величины постоянной эквивалентной скорости деформации в куполе заготовки  $\xi_{e1}$  приводит к уменьшению времени разрушения  $t_*$  и относительной высоты заготовки  $\bar{H}'_* = H_* / R_0$ , а также – к увеличению относительной толщины в куполе заготовки  $\bar{h}_* = h_* / h_0$ . Здесь  $H_*$  и  $h_*$  – высота и толщина в куполе заготовки, соответствующие моменту разрушения.

Ниже оценено влияние анизотропии механических свойств заготовки на предельные возможности формоизменения, связанные с разрушением заготовки при достижении уровня накопленных микрповреждений  $\omega_e = 1$  (или  $\omega_A = 1$ ).

Расчеты выполнены для материалов, поведение которых описывается энергетической и кинетической теориями ползучести и повреждаемости. Механические характеристики этих материалов при формоизменении в условиях вязкого течения материала приведены в табл. 1 [3, 4].

Таблица 1  
Параметры уравнения состояния и разрушения при вязком течении материала

Материал	$\xi_e^c = B(\sigma_e / \sigma_*)^n / (1 - \omega^c)^m$					
	$B, c^{-1}$	$\sigma_*, \text{МПа}$	$n$	$m$	$A_{np}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{enp}^c$
Материал 1	$8,2 \cdot 10^{-7}$	1,0	1,88	1,0	54,8	-
Материал 2	$7,8914 \cdot 10^{-4}$	38	2.03	0.50	-	0,89

Зависимости изменения времени разрушения  $t_*$ , относительной высоты  $\bar{H}'_*$  и толщины в куполе заготовки  $\bar{h}_*$  в момент разрушения, определенных по величине накопленных микрповреждений, от коэффициента анизотропии  $R$  при фиксированных значениях параметров закона нагружения  $n_p$  и  $a_p$  для материалов, поведение которых описывается энергетической и кинетической теориями ползучести и повреждаемости, приведены на рис. 1 (энергетическая теория) и 2 (кинетическая теория) соответственно ( $\bar{R}_0 = 300$ ).

Из анализа графических зависимостей (рис. 1 и 2) и результатов расчета следует, что коэффициент нормальной анизотропии  $R$  существенно оказывает влияние на величину времени разрушения и относительные величины  $\bar{H}'_*$ ,  $\bar{h}_*$ . С ростом коэффициента анизотропии  $R$  относительная величина  $\bar{h}_*$  резко увеличивается, а время разрушения  $t_*$  и относительная высота заготовки  $\bar{H}'_*$  резко уменьшаются. Установлено, что не учет анизотропии механических свойств заготовки при анализе процесса изотермического формоизменения куполообразной оболочки дает погрешность в оценки времени разрушения  $t_*$  порядка 35 %, а относительной высоты  $\bar{H}'_*$  и толщины в куполе заготовки  $\bar{h}_*$  в момент разрушения – 20 %.

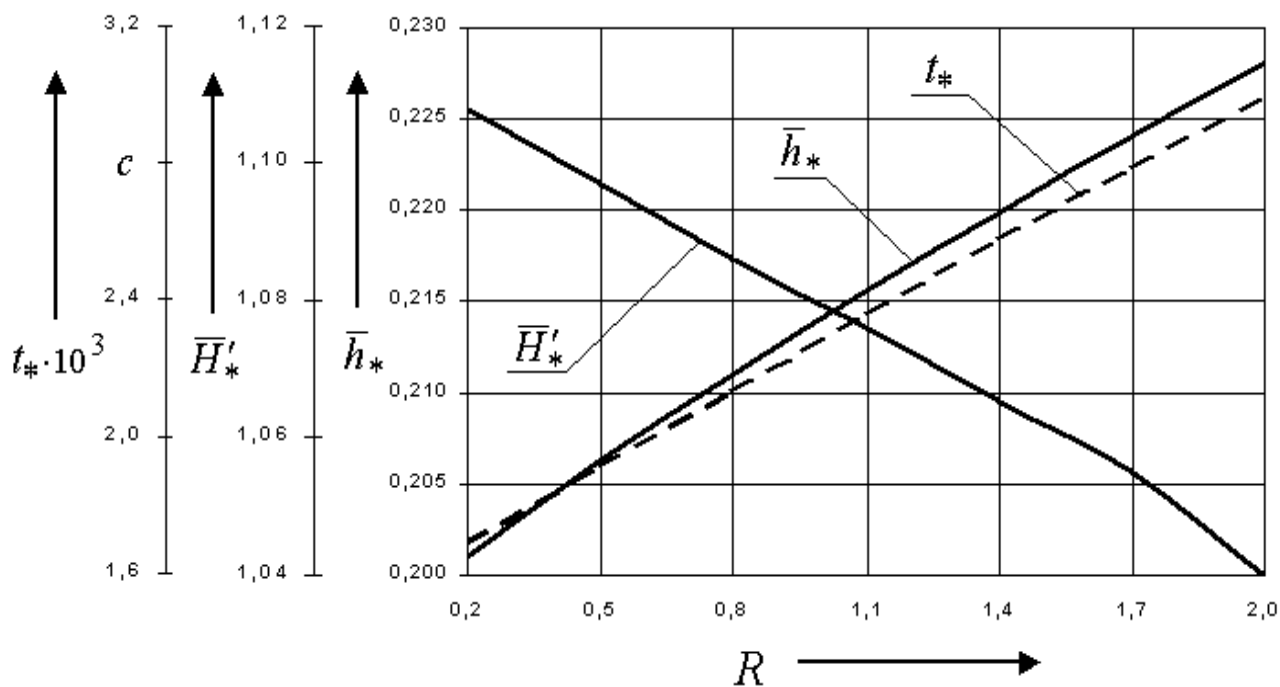


Рис. 1. Зависимости изменения  $t_*$ ,  $\bar{H}'_*$  и  $\bar{h}_*$  от  $R$  ( $p_0 = 0,05$  МПа;  $a_p = 0,4 \cdot 10^{-3}$  МПа/с<sup>np</sup>;  $n_p = 0,6$ )

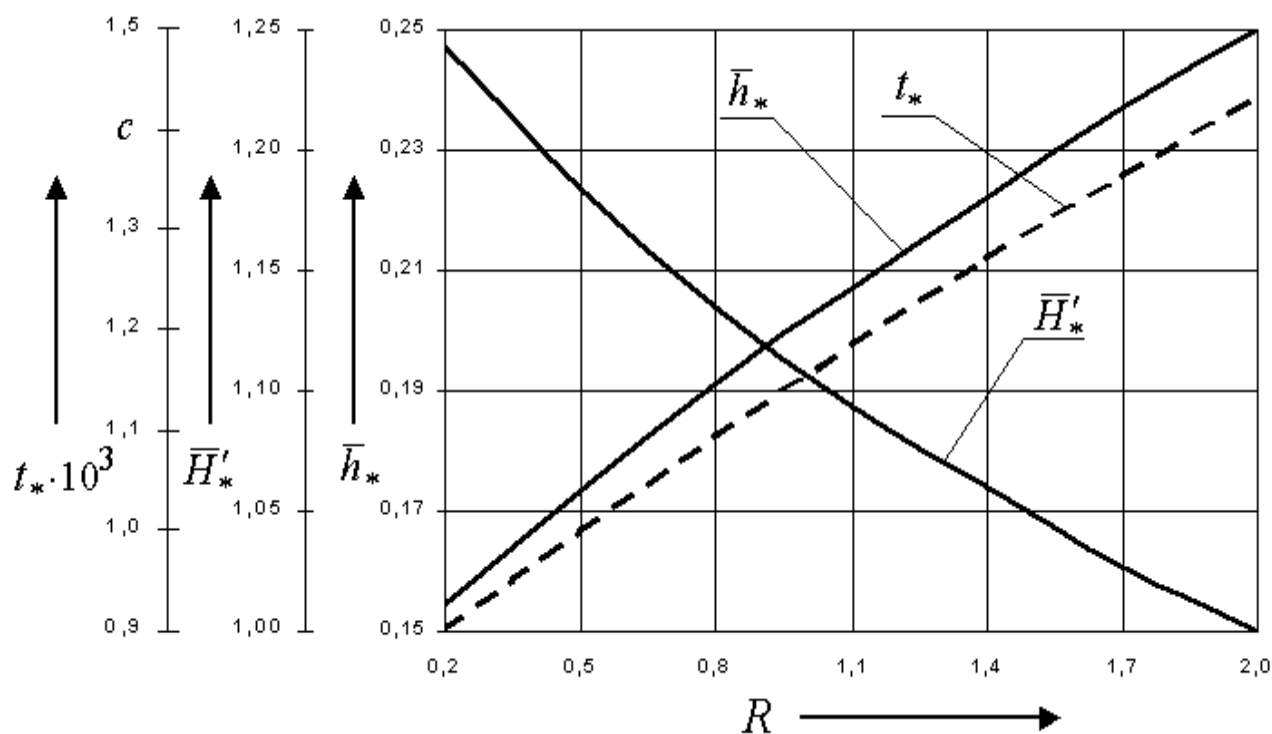


Рис. 2. Зависимости изменения  $t_*$ ,  $\bar{H}'_*$  и  $\bar{h}_*$  от  $R$  ( $p_0 = 0,013$  МПа;  $a_p = 4 \cdot 10^{-3}$  МПа/с<sup>np</sup>;  $n_p = 0,6$ )

Таким образом, анизотропия механических свойств заготовки оказывает существенное влияние на время разрушения  $t_*$ , определенного по накопленной критической величине микроповреждений  $\omega_A^c = 1$ .

### ВЫВОДЫ

1. Произведена оценка анизотропии механических свойств заготовки на предельные возможности формоизменения, связанные с разрушением заготовки при достижении уровня накопленных микроповреждений  $\omega_e = 1$  (или  $\omega_A = 1$ ).

2. Установлено, что коэффициент нормальной анизотропии  $R$  существенно оказывает влияние на величину времени разрушения и относительные величины  $\bar{H}'_*$ ,  $\bar{h}_*$ . С ростом коэффициента анизотропии  $R$  относительная величина  $\bar{h}_*$  резко увеличивается, а время разрушения  $t_*$  и относительная высота заготовки  $\bar{H}'_*$  резко уменьшаются.

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. Грязев М. В. Математическая модель изотермического деформирования полусферических деталей из трансверсально-изотропных материалов в режиме ползучести. / М. В. Грязев, С. С. Яковлев, С. Н. Ларин // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула : Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 1.– С. 27–36.
2. Яковлев С. С., Технологические параметры изотермического деформирования полусферических деталей из анизотропных материалов в режиме ползучести. / С. С. Яковлев, С. Н. Ларин, М. В. Грязев. // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула : Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 2. С. 399–409.
3. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов. / С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, С. С. Яковлев, Я. А. Соболев. М. : Машиностроение, 2004. – 427 с.
4. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов. / С. С. Яковлев [и др.] / под ред. С. С. Яковлева. М. : Машиностроение, 2009. – 352 с.

### REFERENCES

1. Grjazev M. V. Matematicheskaja model' izotermicheskogo deformirovanija polusfericheskikh detalej iz transversal'no-izotropnyh materialov v rezhime polzuchesti. / M. V. Grjazev, S. S. Jakovlev, S. N. Larin // Izvestija TulGU. Ser. Tehnicheskie nauki. Tula : Izd-vo TulGU, 2011. Vyp. 1.– S. 27–36.
2. Jakovlev S. S. Tehnologicheskie parametry izotermicheskogo deformirovanija polusfericheskikh detalej iz anizotropnyh materialov v rezhime polzuchesti. / S. S. Jakovlev, S. N. Larin, M. V. Grjazev. // Izvestija TulGU. Ser. Tehnicheskie nauki. Tula : Izd-vo TulGU, 2011. Vyp. 2. S. 399–409.
3. Izotermicheskoe deformirovanie vysokoprochnykh anizotropnyh materialov. / S. P. Jakovlev, V. N. Chudin, S. S. Jakovlev, Ja. A. Sobolev. M. : Mashinostroenie, 2004. – 427 s.
4. Izotermicheskaja pnevmoformovka anizotropnyh vysokoprochnykh listovyh materialov. / S. S. Jakovlev [i dr.] / pod red. S. S. Jakovleva. M. : Mashinostroenie, 2009. – 352 s.

Ларин С. Н. – д-р техн. наук, проф. ТулГУ  
Платонов В. И. – канд. техн. наук, доц. ТулГУ  
Яковлев Б. С. – канд. техн. наук, доц. ТулГУ  
Коротков В. А. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ТулГУ

ТулГУ – ФГБОУ ВПО «Тулский государственный университет», г. Тула, Россия.

E-mail: [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 06.02.2014 г.