

УДК 621.983; 539.374

Ларин С. Н.
Леонова Е. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПНЕВМОФОРМОВКИ ДЛЯ ГРУПП МАТЕРИАЛОВ, ПОДЧИНЯЮЩИХСЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

Стрингерные радиаторные панели из алюминиевых и титановых сплавов используют в корпусных конструкциях летательных аппаратов, где необходимо поддерживать заданный температурный режим. Данные панели устанавливают по внутренним и наружным поверхностям корпусов приборных и специальных отсеков. Радиаторная панель представляет собой конструкцию из двух беззазорно соединенных листов с каналами между ними для циркуляции теплоносителя. Профиль сечения канала имеет заданную геометрию – круглую или прямоугольную в сечении канала, а сам канал может быть одно- или двухсторонним. Технологический процесс производства радиаторных панелей сводится к проведению на одной позиции обработки процессов, состоящих из последовательно выполняемых операций диффузионной сварки давлением газа двух листов и горячего формообразования каналов газом, подаваемым между листами [1–3].

Цель работы – повышение эффективности процесса изотермической пневмоформовки в режиме кратковременной ползучести путем анализа влияния механических свойств исходного материала и геометрических размеров заготовки на напряженное и деформированное состояния, силовые режимы и предельные возможности рассматриваемого процесса.

Под кратковременной ползучестью понимается медленное деформирование в условиях вязкого или вязкопластического течения, упругими составляющими деформации пренебрегаем [1–3]. Считаем, что если величина эквивалентного напряжения σ_e меньше некоторой величины σ_{e0} , например, соответствующей эквивалентной остаточной степени деформации $\varepsilon_{e0} = 0,2\%$ при эквивалентной скорости деформации $\xi_{e0} = 0,02 \text{ 1/c}$, то процесс деформирования будет протекать в условиях вязкого течения материала и уравнения состояния с учетом повреждаемости, описывающие поведение материала, подчиняющегося энергетической теории ползучести и повреждаемости, могут быть записаны в виде

$$\xi_e^c = \frac{B(\sigma_e/\sigma_{e0})^n}{(1-\omega_A^c)^m}; \quad \dot{\omega}_A^c = \frac{\sigma_e \xi_e^c}{A_{np}^c}. \quad (1)$$

В случае, когда характер течения материала описывается энергетической теорией нелинейного вязкопластического течения и разрушения, уравнения состояния при вязкопластическом течении материала ($\sigma_e > \sigma_{e0}$) записываются в виде

$$\sigma_e = \sigma_{e0} \left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e0}^{cp}} \right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}^{cp}} \right)^k (1-\omega_A^{cp})^r; \quad \dot{\omega}_A^{cp} = \frac{\sigma_e \xi_e^{cp}}{A_{np}^{cp}}. \quad (2)$$

Далее рассмотрим формоизменение оболочки из материала, подчиняющегося энергетической теории ползучести и повреждаемости, свойства которого в предположении, что $\sigma_e < \sigma_{e0}$, описываются уравнениями (1) (рис. 1).

Подставив в первое из уравнений состояния материала (1) входящие величины σ_e , ξ_e , получим

$$p^n dt = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n (1 - \omega_A^c)^m h^n (\sin \alpha)^n \left(\frac{\sin \varphi}{\varphi \sin \alpha} - \text{ctg} \alpha \right) d\alpha}{BD_1^n a^n} \quad (3)$$

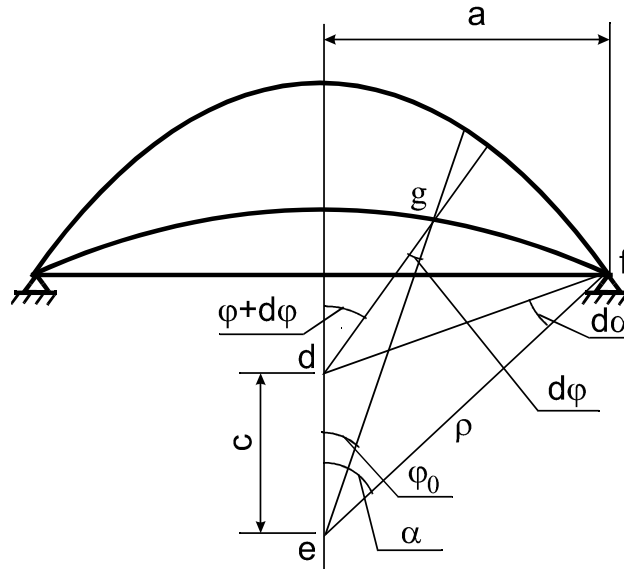


Рис. 1. Схема к расчету деформированного состояния срединной поверхности оболочки

Вычислим повреждаемость

$$\dot{\omega}_A^c = \frac{D_1 C_1 p a}{\sin \alpha h A_{np}^c} \left(\frac{\sin \varphi}{\varphi \sin \alpha} - \text{ctg} \alpha \right) \dot{\alpha} \quad (4)$$

Так как давление p равномерно распределено по поверхности оболочки, поэтому для определения его величины во времени достаточно рассмотреть случай, когда $\varphi = 0$. Кроме того, именно в этом направлении идет более интенсивное утонение толщины оболочки и накопление повреждаемости. При $\varphi \rightarrow 0$, уравнения (3) и (4) преобразуются как

$$p^n dt = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n (1 - \omega_A^c)^m h^n (\sin \alpha)^n \left(\frac{1}{\sin \alpha} - \text{ctg} \alpha \right) d\alpha}{BD_1^n a^n}, \quad (5)$$

$$d\omega_A^c = \frac{D_1 C_1 p a}{\sin \alpha h A_{np}^c} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - \text{ctg} \alpha \right) d\alpha \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) преобразуем в следующем виде

$$p(t) = A \Phi(t) (1 - \omega_A^c)^{m/n}, \quad (7)$$

где $A = \frac{C_1^{1/n} \sigma_{e0} h_0 2^{\frac{n+1}{n}} \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{n+2}{n}} f^{1/n}}{B^{1/n} D_1 a}$; $\Phi(t) = t^{\frac{(n+2)f-1}{n}} / \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f}\right)^{\frac{2n+1}{n}}$;

$$d\omega_A^c = \frac{D_1 C_1 p b f \left(1 + \frac{b^2}{a^2} t^{2f}\right) t^{f-1} dt}{h_0 A_{cp}^c} \quad (8)$$

Система уравнений (7) и (8) решается совместно методом итераций. Решение этой системы при известном перемещении вершины купола от времени позволяет найти давление $p(t)$, обеспечивающее заданное деформирование, и определить предельную высоту купола при деформировании оболочки. В этом случае накопленная повреждаемость принимаем $\omega_A^c = 1$.

Как и в предыдущем случае, если формоизменение оболочки определяется давлением p , необходимо воспользоваться системой уравнений (5) и (6), куда нужно подставить $h = h_0 \cos^2 \frac{\alpha}{2}$. Решение этой системы осуществляется в общем случае также, как было указано раньше. Рассмотрим случай, когда $p = const$. При начальных условиях $t = 0, \omega_A^c = 0, \alpha = 0$ интегрируя уравнение (6), определим

$$\omega_A^c = \frac{D_1 C_1 p a}{h_0 A_{np}^c} \int_0^{\alpha} \frac{\left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) d\alpha}{\sin \alpha \cos^2 \frac{\alpha}{2}}; \quad (9)$$

откуда следует

$$\omega_A^c = \frac{D_1 C_1 p a}{h_0 A_{np}^c} \frac{1}{3} \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos^3 \frac{\alpha}{2}} + 2 tg \frac{\alpha}{2} \right). \quad (10)$$

В момент разрушения угол раствора дуги α_* определяется из уравнения (10), принимающего при $\omega_A^c = 1$ вид

$$tg^3 \frac{\alpha_*}{2} + 3 tg \frac{\alpha_*}{2} = \frac{3 A_{np}^c h_0}{D_1 C_1 p a}. \quad (11)$$

При постоянном давлении выражение (5) можно записать в следующем виде

$$p^n dt = A_1 (1 - \omega_A^c)^m (\sin \alpha)^n \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) \cos^{2n} \frac{\alpha}{2} d\alpha, \quad (12)$$

где $A_1 = \frac{C_1 \sigma_{e0}^n h_0^n}{B D_1^n a^n}$.

Безразмерное время разрушения $\bar{t}_* = p^n \frac{1}{A_1} t_*$ можно определить по формуле

$$\bar{t}_* = \int_0^{\alpha_*} (1 - \omega_A^c)^m (\sin \alpha)^n \left(\frac{1}{\sin \alpha} - ctg \alpha \right) \cos^{2n} \frac{\alpha}{2} d\alpha. \quad (13)$$

Рассмотрим случай, когда $\xi_e = \xi_{e1} = const$. Получим

$$p = \left(\frac{A_1}{C_1} \right)^{1/n} (1 - \omega_A^c)^{\frac{m}{n}} \sin \alpha \cos^2 \frac{\alpha}{2} (\xi_{e1})^{1/n}. \quad (14)$$

Путем подстановки первого уравнение состояния (1) во второе накопление повреждаемости ω_A^c вычисляется

$$\dot{\omega}_A^c = \frac{(1 - \omega_A^c)^{m/n} \sigma_{e0} (\xi_{e1})^{\frac{n+1}{n}}}{B^{1/n} A_{np}^c}. \quad (15)$$

Проинтегрируем это уравнение с начальными условиями $t = 0$; $\omega_A^c = 0$, получим

$$\omega_A^c = 1 - \left[1 + \frac{n-m}{n} \frac{(\xi_{e1})^{\frac{n+1}{n}} \sigma_{e0} t}{A_{cp} B^{1/n}} \right]^{\frac{n}{m-n}}. \quad (16)$$

Это выражение определяет $\omega_A^c = \omega_A^c(t)$. В зависимости от времени изменение угла α при начальных условиях $t = 0$, $\alpha = 0$

$$\xi_{e1} = \text{const} = C_1 \left(\frac{1}{\sin \alpha} - \text{ctg} \alpha \right) \frac{d\alpha}{dt};$$

$$\xi_{e1} t = C_1 \ln \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}; \quad (17)$$

$$\alpha = 2 \arccos e^{-\frac{\xi_{e1} t}{2C_1}}. \quad (18)$$

Определив $\omega_A^c(t)$ из выражения (15) и $\alpha(t)$ из соотношения (16) и подставив их в выражение (14), получим значение давления $p(t)$, обеспечивающее деформирование, при $\xi_{e1} = \text{const}$.

Рассмотренные выше уравнения для анализа процесса изотермического свободного формоизменения узкой прямоугольной листовой заготовки позволили оценить влияние геометрических размеров заготовки, анизотропии механических свойств исходного материала на напряженное и деформированное состояния, закона нагружения, геометрические размеры изделия, кинематику течения материала и предельные возможности исследуемого процесса изотермической пневмоформовки в режиме кратковременной ползучести, связанные с накоплением микроповреждений и локальной потерей устойчивости заготовки.

Рассмотрим графические зависимости изменения эквивалентного напряжения $\bar{\sigma}_e = \sigma_e / \sigma_{e0}$, напряжений $\bar{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_{e0}$, $\bar{\sigma}_y = \sigma_y / \sigma_{e0}$ и эквивалентной скорости деформации $\bar{\xi}_e$ от времени деформирования t для латуни Л63, поведение которого описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости для вязкого течения, при температуре обработки 650, представленный на рис. 2.

Можно сделать вывод, что с ростом времени деформирования t на начальной стадии деформирования происходит резкое увеличение эквивалентного напряжения $\bar{\sigma}_e$ и напряжений $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$, далее осуществляется плавное увеличение этих величин. Эквивалентная скорость деформации $\bar{\xi}_e$ плавно увеличивается до определенной величины времени деформирования t , далее происходит резкое изменение $\bar{\xi}_e$, это указывает на начало перехода материала из вязкого в вязкопластическое состояние.

Представлено на рис. 3 влияние параметров нагружения на разнотолщинность $\bar{S} = (h_{зак} - h_{кун}) / h_0$ для алюминиевого АМг6 сплава, поведение которого описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости для вязкого течения, при температуре обработки 450.

Установлено, что плавное увеличение величины разнотолщинности \bar{S} наблюдается с уменьшением параметра нагружения a_p и n_p . Также графические зависимости показывают, что с ростом времени деформирования существенно увеличивается разница относительной толщины заготовки \bar{h} в куполе и в точке ее заземления, которая может составлять более 20%. Критическое время деформирования уменьшается с ростом параметров нагружения a_p и n_p .

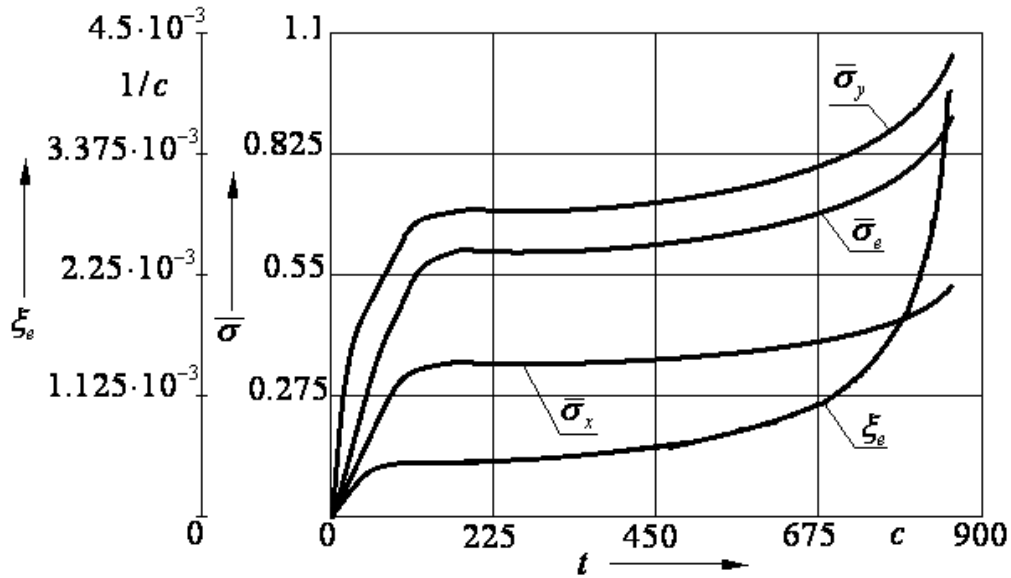


Рис. 2. Зависимости изменения $\bar{\sigma}_e, \bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y$ и ξ_e от t для сплава Л63 ($a_p = 0,05 \text{ МПа}/c^{n_p}, n_p = 0,3$)

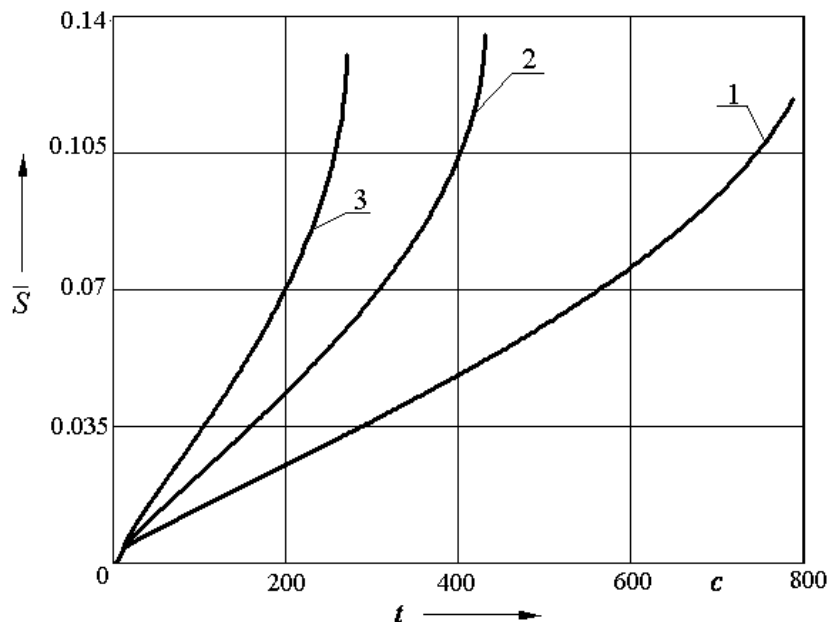


Рис. 3. Зависимости изменения \bar{S} от t для алюминиевого сплава АМг6 при $n_p = 0,4$:
 кривая 1 – $a_p = 0,1 \text{ МПа}/c^{n_p}$; кривая 2 – $a_p = 0,15 \text{ МПа}/c^{n_p}$;
 кривая 3 – $a_p = 0,2 \text{ МПа}/c^{n_p}$

Оценим влияния параметров закона нагружения a_p и n_p на предельные возможности формоизменения, связанные с разрушением заготовки при достижении уровня накопленных микрповреждений $\omega_e^c, \omega_e^{cp} = 1$ (или $\omega_A^c, \omega_A^{cp} = 1$) и с локальной потерей устойчивости заготовки.

На рис. 4 и 5 приведены графические зависимости изменения времени разрушения t_* , половины угла раствора дуги α_* в момент разрушения и относительной толщины заготовки в куполе $\bar{h}_* = h_*/h_0$ алюминиевого сплава АМгб от параметров нагружения a_p и n_p при фиксированных величинах геометрических размеров заготовки ($a = 10$ мм; $h_0 = 1$ мм).

Анализ графических зависимостей и результатов расчетов показывает, что время разрушения t_* (критическое время) и половина угла раствора дуги в момент разрушения α_* уменьшаются, а относительная толщина \bar{h}_* возрастает с ростом параметров a_p и n_p .

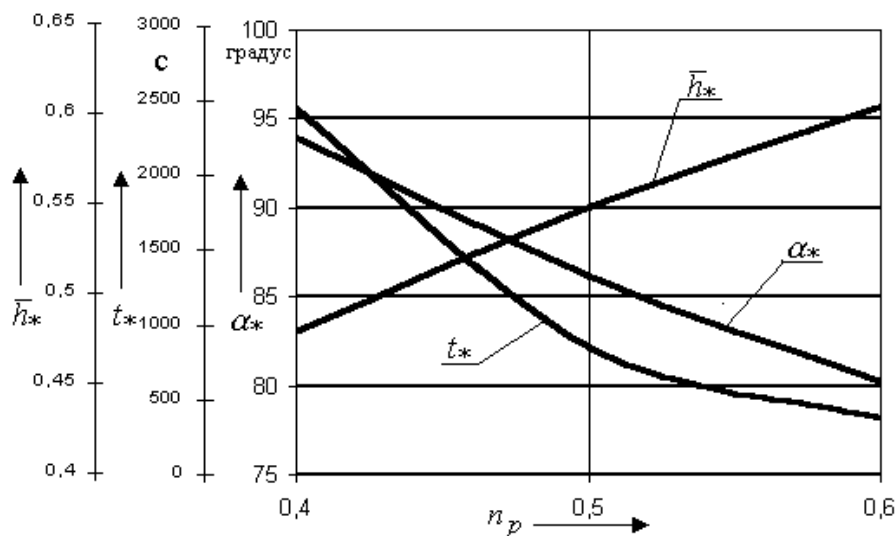


Рис. 4. Зависимости изменения t_* , α_* и \bar{h}_* от n_p для алюминиевого сплава АМгб ($a_p = 0,1 \text{ МПа} / c^{n_p}$)

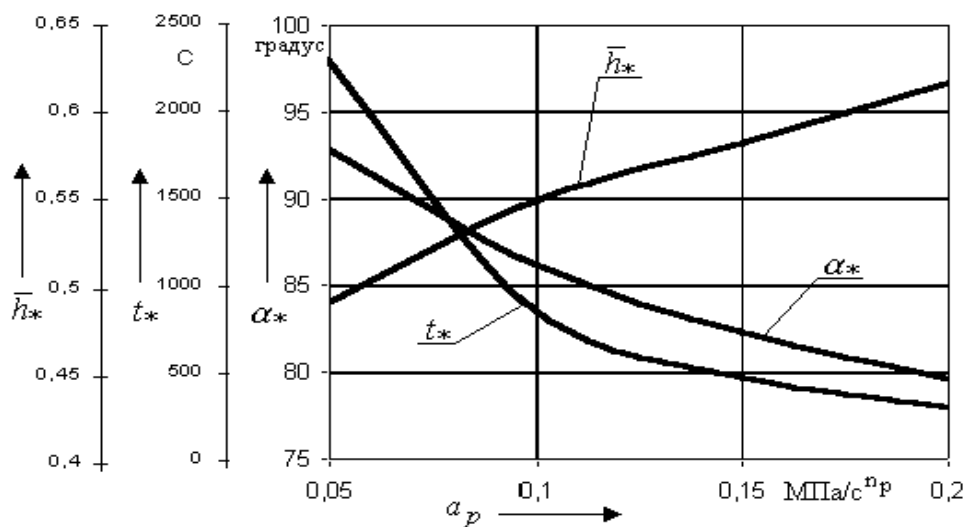


Рис. 5. Зависимости изменения t_* , α_* и \bar{h}_* от a_p для алюминиевого сплава АМгб ($n_p = 0,5$)

Установлено, что увеличение величины параметра нагружения n_p от 0,4 до 0,6 при фиксированном значении $a_p = 0,1 \text{ МПа}/\text{с}^{n_p}$ приводит к уменьшению величины α_* на 20 % и возрастанию относительной предельной толщины заготовки \bar{h}_* на 33 %. Рост параметра нагружения a_p от 0,05 до 0,2 $\text{МПа}/\text{с}^{n_p}$ сопровождается уменьшением половины угла раствора дуги α_* на 15 % и увеличением относительной толщины заготовки \bar{h}_* на 30 %. Установлена повышенная чувствительность относительной величины критического времени разрушения t_* от параметров a_p и n_p . Изменение величин a_p и n_p в указанных выше диапазонах приводит к уменьшению относительного времени разрушения t_* от 2500 с до 500 с.

На рис. 6 и 7 представлены графические зависимости изменения относительной величины давления газа $\bar{p} = p/\sigma_{e0}$ от времени деформирования t , обеспечивающего различные величины эквивалентной скорости деформации в куполе детали ξ_{e1} , постоянные в процессе деформирования, для алюминиевого сплава АМг6, поведение которого описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости для вязкого и вязкопластического течения.

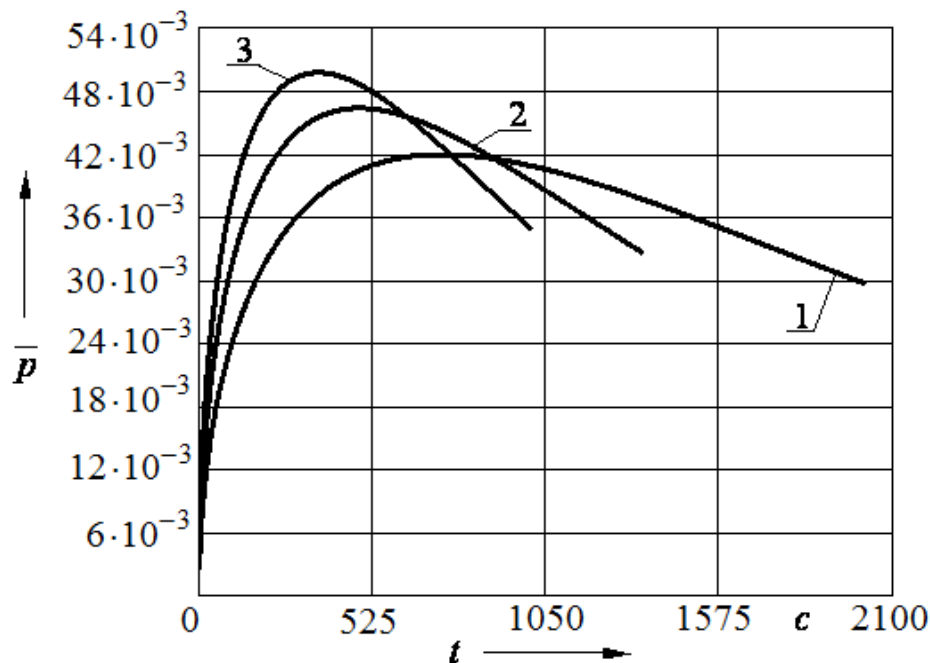


Рис. 6. Зависимости изменения \bar{p} от t для алюминиевого сплава АМг6: кривая 1 - $\xi_e = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$; кривая 2 - $\xi_e = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$; кривая 3 - $\xi_e = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$

Анализ графических зависимостей и результатов расчетов показывает, что в начальный момент деформирования наблюдается резкий рост относительной величины давления \bar{p} и половины угла раствора дуги α . От величины эквивалентной скорости деформации ξ_{e1} зависит интенсивность роста или падения исследуемых параметров. Уменьшение эквивалентной скорости деформации ξ_{e1} приводит к более плавному их увеличению и к смещению величины максимального давления \bar{p} в сторону большего времени t . Так из рисунка видно, что для алюминиевого сплава АМг6, при скорости деформации $\xi_e = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$ максимальное давление \bar{p} на 16 % больше, чем при $\xi_e = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$. Дальнейшее увеличение времени деформирования t сопровождается плавным уменьшением величины \bar{p} и ростом α .

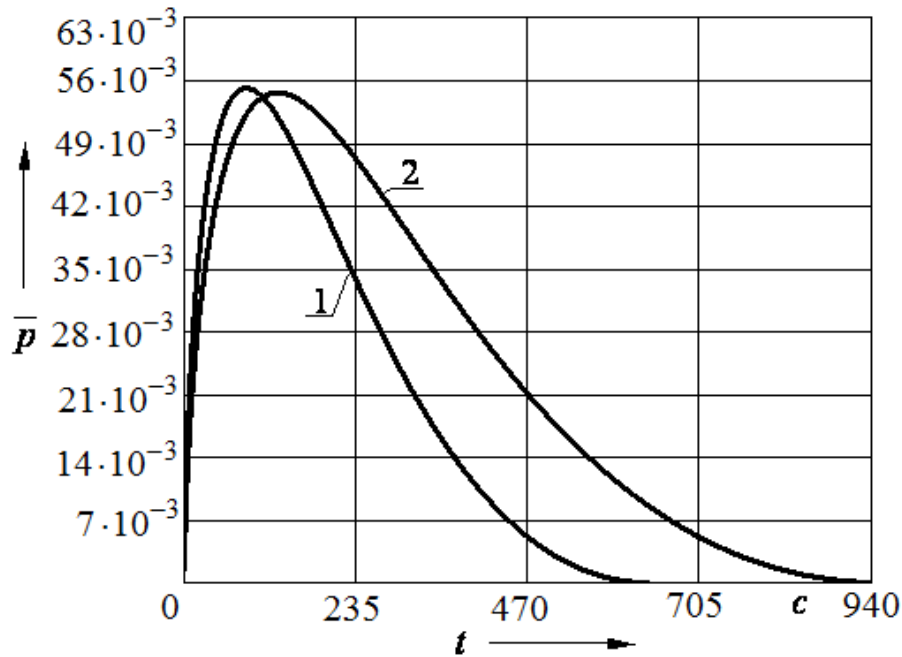


Рис. 7. Зависимости изменения \bar{p} от t для алюминиевого сплава АМг6: кривая 1 - $\xi_e = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$; кривая 2 - $\xi_e = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$ ($\xi_e = 1 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$)

На рис. 8 рассмотрено влияние скорости деформирования на повреждаемость ω_A^{cp} , для алюминиевого АМг6 сплава, поведение которого описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости для вязкопластического течения, при температуре обработки 450.

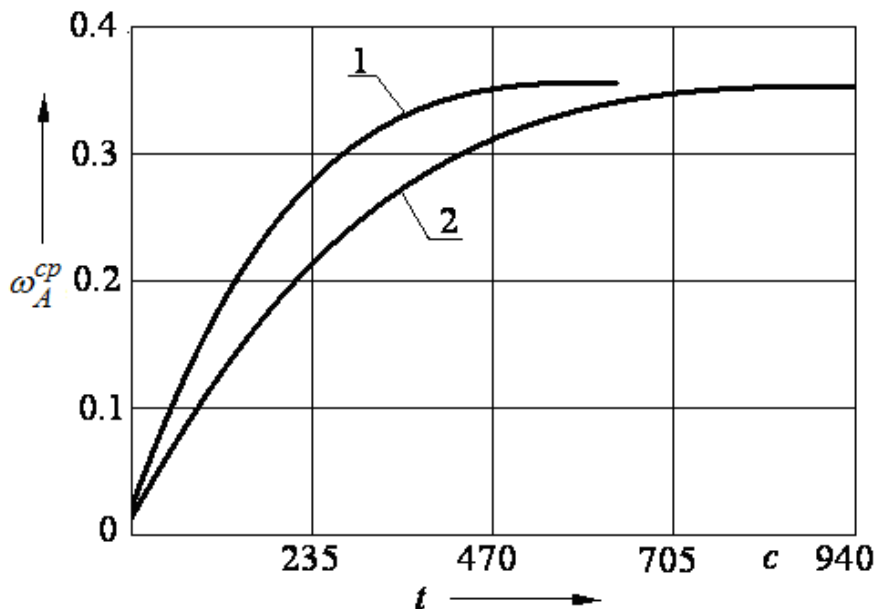


Рис. 8. Зависимости изменения ω_A^{cp} от t для алюминиевого сплава АМг6: кривая 1 - $\xi_e = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$; кривая 2 - $\xi_e = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$

Можно сделать вывод, что в начальный момент деформирования наблюдается резкий рост повреждаемости. Интенсивность роста зависит от величины эквивалентной скорости деформации. Уменьшение эквивалентной скорости деформации ξ_e приводит к более плавному увеличению и к смещению повреждаемости ω_A^{CP} в сторону большего времени t .

ВЫВОДЫ

Полученные результаты можно использовать для разработки технологически процессов свободного деформирования узкой прямоугольной мембраны и формообразования угловых элементов конструкции с неравномерным изменением толщины стенки в условиях кратковременной ползучести. Выявлено влияние анизотропии механических свойств исходного материала, геометрических размеров заготовки и изделия на напряженное и деформированное состояния, геометрические размеры, закон нагружения, кинематику течения материала и предельные возможности процесса изотермической пневмоформовки в режиме кратковременной ползучести, связанные с накоплением микроповреждений и локальной потерей устойчивости заготовки

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 № 16-08-00020.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. Голенькова, С.П. Яковлева. – М.: Машиностроение. – 2009. – 442 с.
2. Изотермическое деформирование металлов / С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин, Ю.И. Каплин. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
3. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.Н. Ларин [и др.] / под ред. С.С. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 352 с.

REFERENCES

1. 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. – M.: Mashinostroenie. – 2009. – 442 s.
2. Izotermicheskoe deformirovanie metallov / S.Z. Figlin, V.V. Bojcov, Ju.G. Kalpin, Ju.I. Kaplin. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 239 s.
3. Izotermicheskaja pnevmoformovka anizotropnyh vysokoprochnyh listovyh materialov / S.N. Larin [i dr.] / pod red. S.S. Jakovleva. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 352 s.

Ларин С. Н. – д-р техн. наук, проф. ТулГУ

Леонова Е. В. – канд. техн. наук, м. н. с. ТулГУ

ТулГУ – Тульский государственный университет, г. Тула, РФ.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru