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_{e_0}, например, соответствующей эквивалентной остаточной степени деформации $\varepsilon_{e_0} = 0{,}2\%$ при эквивалентной скорости деформации $\xi_{e_0} = 0{,}02 \quad 1/c$, 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

$$\xi_e^c = \frac{B\left(\sigma_e/\sigma_{e_0}\right)^n}{\left(1-\omega_A^c\right)^m}; \qquad \dot{\omega}_A^c = \frac{\sigma_e \xi_e^c}{A_{np}^c}. \tag{1}$$

В случае, когда характер течения материала описывается энергетической теорией нелинейного вязкопластического течения и разрушения, уравнения состояния при вязкопластическом течении материала ($\sigma_e > \sigma_{e_0}$) записываются в виде

$$\sigma_e = \sigma_{e_0}\left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e_0}^{cp}}\right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e_0}}\right)^k \left(1-\omega_A^{cp}\right)^r; \qquad \dot{\omega}_A^{cp} = \frac{\sigma_e\ \xi_e^{cp}}{A_{np}^{cp}}. \tag{2}$$

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

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

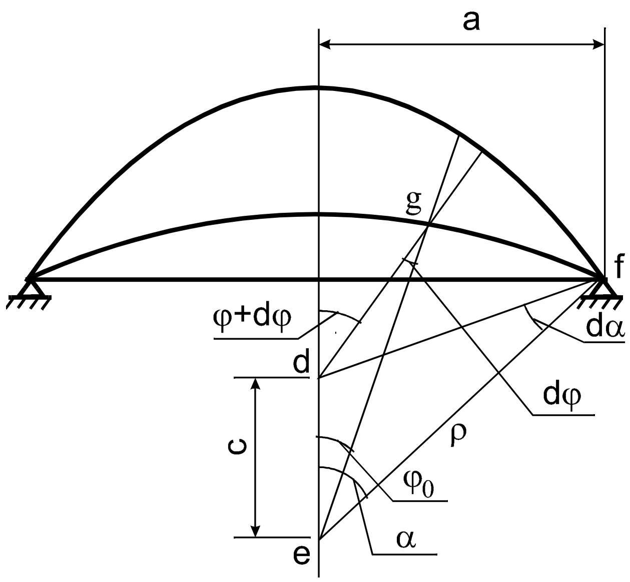

Рис. 1. Схема к расчету деформированного состояния срединной поверхности оболочки

Вычислим повреждаемость

$$\dot{\omega}_A^c=\frac{D_1C_1pa}{\sin\alpha hA_{np}^c}\left(\frac{\sin\varphi}{\varphi\sin\alpha}-ctg\,\alpha\right)\dot{\alpha}. \quad (4)$$

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 $\varphi\to 0$, уравнения (3) и (4) преобразуются как

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

$$d\omega_A^c=\frac{D_1C_1p\,a}{\sin\alpha hA_{np}^c}\left(\frac{1}{\sin\alpha}-ctg\,\alpha\right)d\alpha. \quad (6)$$

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

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

где $A=\dfrac{C_1^{1/n}\sigma_{e0}h_0 2^{\frac{n+1}{n}}\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{n+2}{n}}f^{1/n}}{B^{1/n}D_1a}$; $\Phi(t)=t^{\frac{(n+2)f-1}{n}}\Big/\left(1+\dfrac{b^2}{a^2}t^{2f}\right)^{\frac{2n+1}{n}}$;

$$d\omega_A^c=\frac{D_1C_1pbf\left(1+\frac{b^2}{a^2}t^{2f}\right)t^{f-1}dt}{h_0A_{cp}^c}. \quad (8)$$

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

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

откуда следует

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\xi_{e1} = const = C_1 \left(\frac{1}{\sin\alpha} - ctg\,\alpha\right)\frac{d\alpha}{dt};$$
$$\xi_{e1} t = C_1 \ln \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}; \qquad (17)$$

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

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 $\xi_{e1} = const$.

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 $\overline{\sigma}_e = \sigma_e / \sigma_{e_0}$, напряжений $\overline{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_{e_0}$, $\overline{\sigma}_y = \sigma_y / \sigma_{e_0}$ и эквивалентной скорости деформации ξ_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 $\overline{\sigma}_e$ и напряжений $\overline{\sigma}_x$, $\overline{\sigma}_y$, далее осуществляется плавное увеличение этих величин. Эквивалентная скорость деформации ξ_e плавно увеличивается до определенной величины времени деформирования t, далее происходит резкое изменение ξ_e, это указывает на начало перехода материала из вязкого в вязкопластическое состояние.

Представлено на рис. 3 влияние параметров нагружения на разнотолщинность $\overline{S} = \left(h_{зак} - h_{куп}\right)/ h_0$ 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 $\overline{S}$ 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 $\overline{h}$ в куполе и в точке ее защемления, которая может составлять более 20 %. Критическое время деформирования уменьшается с ростом параметров нагружения a_p и n_p.

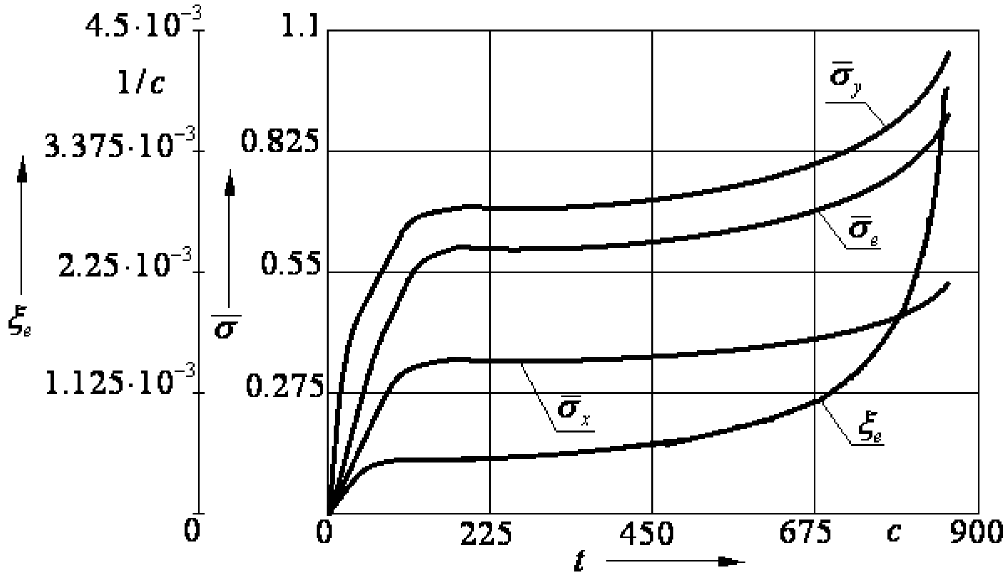

Рис. 2. Зависимости изменения $\overline{\sigma}_e$, $\overline{\sigma}_x$, $\overline{\sigma}_y$ и ξ_e от t для сплава Л63 ($a_p = 0{,}05$ $МПа/с^{n_p}$, $n_p = 0{,}3$)

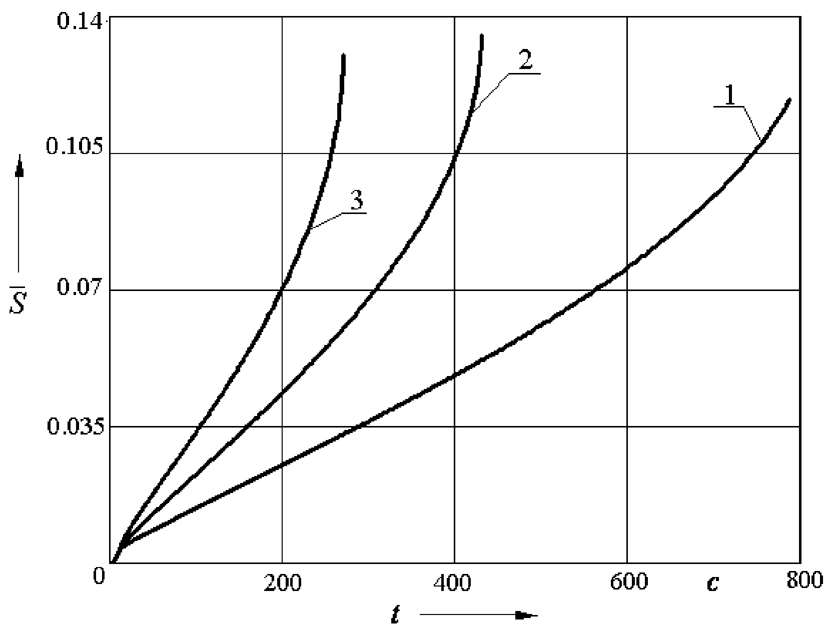

Рис. 3. Зависимости изменения $\overline{S}$ от t для алюминиевого сплава АМг6 при $n_p = 0.4$: кривая 1 – $a_p = 0.1$ $МПа/с^{n_p}$; кривая 2 – $a_p = 0.15$ $МПа/с^{n_p}$; кривая 3 – $a_p = 0.2$ $МПа/с^{n_p}$

Оценим влияния параметров закона нагружения a_p и n_p на предельные возможности формоизменения, связанные с разрушением заготовки при достижении уровня накопленных микроповреждений $\omega_e^c, \omega_e^{cp} = 1$ (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 $\overline{h}_* = h_*/h_0$ алюминиевого сплава АМг6 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 $\overline{h}_*$ возрастает с ростом параметров a_p и n_p.

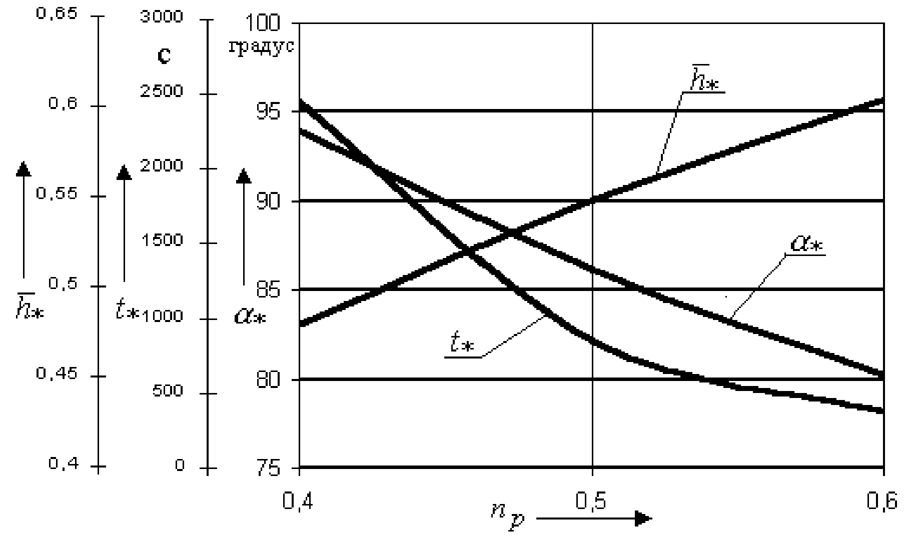

Рис. 4. Зависимости изменения t_*, α_* и $\overline{h}_*$ от n_p для алюминиевого сплава АМг6 ($a_p = 0{,}1 МПа/c^{n_p}$)

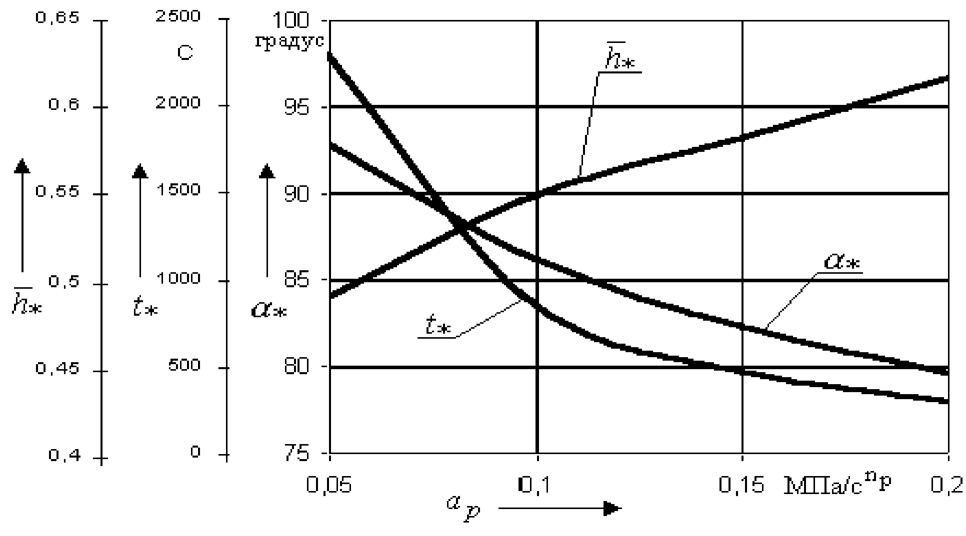

Рис. 5. Зависимости изменения t_*, α_* и $\overline{h}_*$ от a_p для алюминиевого сплава АМг6 ($n_p = 0{,}5$)

Установлено, что увеличение величины параметра нагружения n_p от 0,4 до 0,6 при фиксированном значении $a_p = 0{,}1\, МПа/c^{n_p}$ 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 $МПа/c^{n_p}$ 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 $\bar{p} = p/\sigma_{e_0}$ от времени деформирования t, обеспечивающего различные величины эквивалентной скорости деформации в куполе детали ξ_{e_1}, постоянные в процессе деформирования, для алюминиевого сплава АМг6, поведение которого описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости для вязкого и вязкопластического течения.

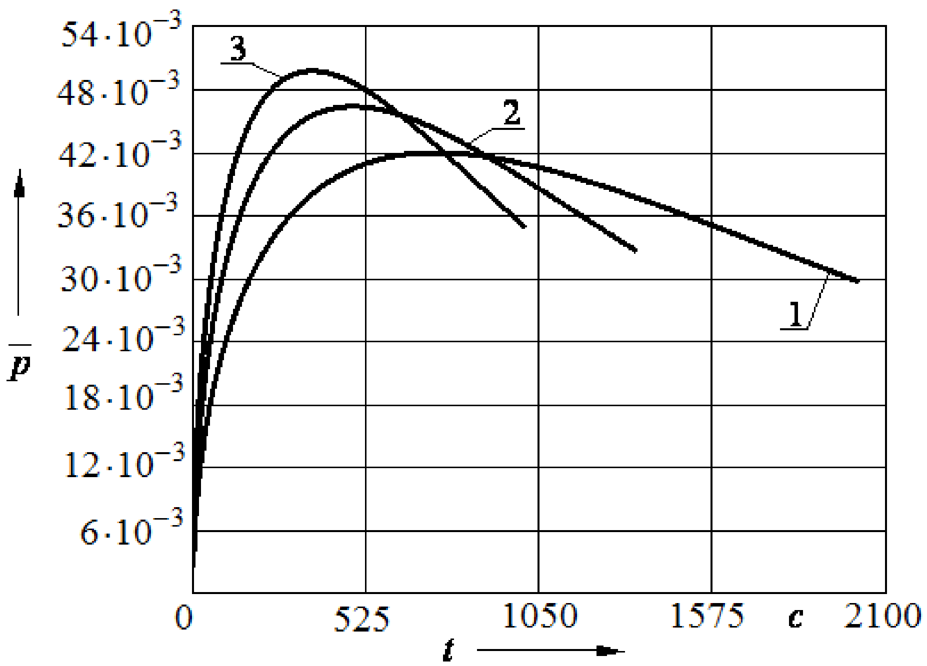

Рис. 6. Зависимости изменения $\bar{p}$ от t для алюминиевого сплава АМг6: кривая 1 - $\xi_e = 0{,}4*10^{-3}\ 1/c$; кривая 2 - $\xi_e = 0{,}6*10^{-3}\ 1/c$; кривая 3 - $\xi_e = 0{,}8*10^{-3} 1/c$

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_{e_1} зависит интенсивность роста или падения исследуемых параметров. Уменьшение эквивалентной скорости деформации ξ_{e_1} 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 $\xi_e = 0{,}8*10^{-3}\ 1/c$ максимальное давление $\bar{p}$ на 16 % больше, чем при $\xi_e = 0{,}4*10^{-3}\ 1/c$. Дальнейшее увеличение времени деформирования t сопровождается плавным уменьшением величины $\bar{p}$ и ростом α.

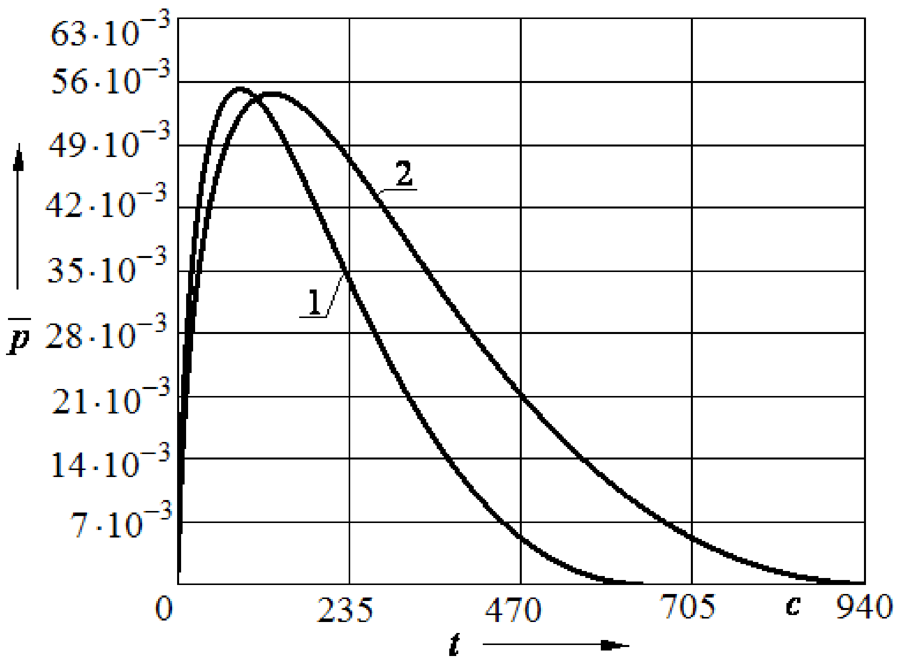

Рис. 7. Зависимости изменения $\bar{p}$ от t для алюминиевого сплава АМг6: кривая 1 - $\xi_e = 0{,}8*10^{-3}\ 1/c$; кривая 2 - $\xi_e = 1{,}2*10^{-3}\ 1/c$ ($\xi_e = 1\cdot 10^{-3} 1/c$)

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.

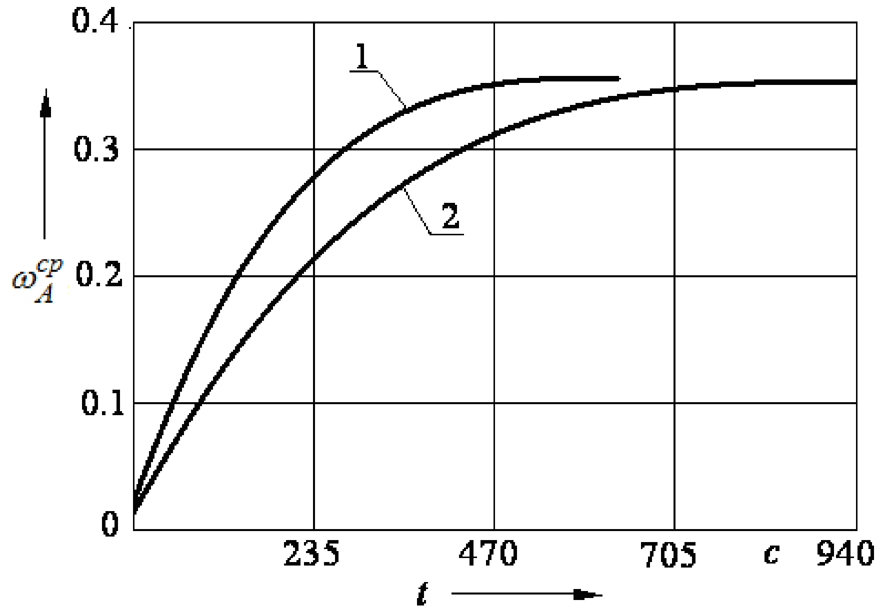

Рис. 8. Зависимости изменения ω_A^{cp} от t для алюминиевого сплава АМг6: кривая 1 - $\xi_e = 1{,}2*10^{-3}\ 1/c$; кривая 2 - $\xi_e = 0{,}8*10^{-3}\ 1/c$

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. Голенкова, 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. ТугГУ

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

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

E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 25.02.2016 г.