

Анализ режимов сверхпластической формовки трехслойных конструкций с использованием модели Пэжины

Круглов А.А.^{1,†}, Самойлова А.Ю.², Слесарева А.А.², Тулупова О.П.², Еникеев Ф.У.²

[†] alweld@go.ru

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Ст. Халтурина, 39, 450001, г.Уфа

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов, 1, 450062, г.Уфа

Рассмотрен процесс сверхпластической формовки трехслойной конструкции, состоящей из листа наполнителя, помещенного между двумя листами обшивки, под действием давления инертного газа, подаваемого в технологические зазоры между листами. Основное внимание уделяется учету влияния параметров модели Пэжины на временные характеристики процесса формовки. Предложена математическая модель процесса, основанная на использовании основных гипотез безмоментной теории оболочек. Полученные результаты сопоставлены с результатами решения краевой задачи вязкопластичности, полученными в среде ANSYS. Сделан вывод и применимости предлагаемого упрощенного подхода к анализу основных технологических параметров процесса.

Ключевые слова: моделирование; сверхпластическая формовка; трехслойная конструкция; напряженно-деформированное состояние; ANSYS.

Analysis of the superplastic forming of 3-sheet structure using Perzyna's model

A.A. Kruglov¹, A.Yu. Samoilova², A.A. Slesareva², O.P. Tulupova², F.U. Enikeev²

¹ Institute for Metals Superplasticity Problems, Khalturina, 39, 450001, Ufa

² Ufa State University of Oil & Petroleum, Kosmonavtov, 1, 450062, Ufa

Superplastic forming of 3-sheet structure consisting of the core sheet placed between two face sheets is considered. Deforming of the 3 sheets structure is effected due to the action of an inertia gas which is supplied between the sheets. Main attention is paid to taking into account the influence of parameters of Perzyna's model on the time characteristics of the process involved. Analytical model of the process under study is based on the main assumptions of the thin shell theory. The results obtained are compared with corresponding finite element solutions of the boundary-value problem in the mechanics of viscoplasticity that are found by means of usage of ANSYS program. The conclusion is made that the analytical approach suggested is suitable in analyzing the time characteristics of the technological process under study.

Keywords: analytical modeling; superplastic forming; three sheet structure; stress analysis; ANSYS.

1. Введение

Трехслойная листовая конструкция состоит из внешних несущих слоев и гофрированного заполнителя. По сравнению с традиционными конструкциями трехслойные конструкции обладают рядом преимуществ. Они обеспечивают высокие технико-экономические показатели изделий, обладают высокой удельной прочностью и высокой эффективностью при воздействии внешних нагрузок. Применение методов сварки давлением (СД) и сверхпластической формовки (СПФ) обеспечило получение трехслойных конструкций из титановых сплавов [1]. Трехслойные листовые конструкции из титана доказали свою эффективность при изготовлении полых широкохордных лопаток вентилятора современных авиационных двигателей, створок реактивного сопла и даже лицевых пластин головки клюшки для гольфа [2]. Конструкции, полученные методом СД/СПФ, имеют су-

щественно большую надежность по сравнению с паяными или клепаными.

Математическое моделирование процесса СД/СПФ, основанное на постановке и решении краевых задач механики деформируемого твердого тела, ставит своей целью снижение стоимости проектирования и производства конструкций за счет использования современных методов исследования, средств вычислительной техники и программного обеспечения. Этап компьютерного моделирования особенно уместен на ранних стадиях проектных разработок при изготовлении образцов-прототипов, их испытании и повторном изготовлении образцов с учетом результатов испытаний.

Целью настоящей работы является анализ режимов формовки трехслойной конструкции в зависимости от реологических параметров, входящих в модель Пэжины.

Применяемые в работе методы исследования: математическое моделирование в рамках основных предположений безмоментной теории оболочек и верификация упрощенных моделей на основе сопоставления результатов расчетов по аналитическим формулам с решениями краевых задач механики деформируемого твердого тела.

2. Описание модели

Нарис.1 представлена расчетная схема рассматриваемого процесса. Заполнитель исходной толщины σ_0 помещен между двумя листами обшивки толщины δ . На участке размером a нанесено противосварочное покрытие, благодаря которому процесс соединения заготовок в этой части конструкции не происходит. При СПФ в результате воздействия давления инертного газа p формируется стенка гофра длиной l и толщиной s . На участке размером b формируется твердофазное соединение. С течением времени t высота зазора h и угол наклона стенки гофра φ увеличиваются, достигая к моменту окончания формовки $t=t_k$ своих конечных значений h_k и φ_k , заданных рабочим чертежом готовой детали.

Будем считать, что деформация вдоль оси z отсутствует, в результате главные компоненты тензора деформаций ε_2 и тензора скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_2$ равны нулю. Тогда из несжимаемости $\varepsilon_1 = \ln(l/a) = -\varepsilon_3 = \ln(s/s_0)$ и $\dot{\varepsilon}_1 = (1/l)(dl/dt) = -\dot{\varepsilon}_3 = (1/s)(ds/dt)$. Учитывая, что из геометрических соображений $a = l \cos \varphi$, получим следующее выражение для интенсивности скоростей деформаций [3]:

$$\xi_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \xi_{ij} \xi_{ij} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

Напряженное состояние в стенке гофра характеризуется двумя отличными от нуля компонентами тензора напряжений: σ_1 и σ_2 . Будем считать, что девиаторы напряжений и скоростей деформаций подобны [3], тогда из $\xi_2 = 0$ следует, что вторая компонента девиатора напряжений $S_2 = (2\sigma_2 - \sigma_1)/3 = 0$, откуда $\sigma_1 = 2\sigma_2$. Отсюда следует, что интенсивность напряжений в стенке гофра будет равна, по определению [3]:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2}} S_{ij} S_{ij} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sigma_1 \quad (2)$$

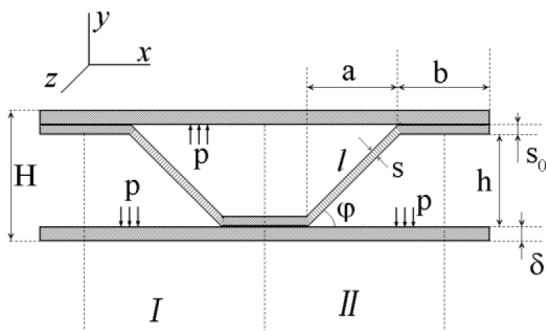


Рис. 1. Расчетная схема процесса СПФ трехслойной конструкции.

Реологическое поведение сверхпластичных материалов характеризуется сильной зависимостью напряжения течения, σ , от скорости деформации, ξ , которую характеризуют величиной параметра скоростной чувствительности m , входящего в простейшую степенную модель сверхпластичности:

$$\sigma = K \xi^m, \quad (3)$$

где K зависит от среднего размера зерен и других структурных характеристик. Если построить зависимость (3) в логарифмических координатах $\lg \sigma - \lg \xi$, получим прямую линию, наклон которой равен m . Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что зависимость $\sigma(\xi)$ в логарифмических координатах $\lg \sigma - \lg \xi$ имеет характерный сигмоидальный вид [3], причем при $\xi \rightarrow 0$ величина напряжения течения σ стремится к некоторому предельному значению σ_0 . Для того, чтобы учесть этот фактор, в модель материала (3) вводят дополнительное слагаемое [4]:

$$\sigma = \sigma_0 + K' \xi^{m'}. \quad (4)$$

В настоящей работе выражение (4) используется в качестве модели материала. Значения постоянных материала σ_0 , K' и m' могут быть определены по экспериментальным данным, например, по методике, изложенной в работе [5].

Для того чтобы составить уравнение равновесия, спроектируем силы, действующие на верхний по рис. 1 стык стенки гофра с обшивкой, на ось y : $p(a+b) = \sigma_1 s \sin \varphi$, или, с учетом $s = s_0 a/l = s_0 \cos \varphi$,

$$p(a+b) = \sigma_1 s_0 \sin \varphi \cos \varphi \quad (5)$$

Подставляя (1)–(4) в (5), получим

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sigma_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{p(a+b)}{s_0 \sin \varphi \cos \varphi} = \\ &= \sigma_0 + K' \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \operatorname{tg} \varphi \right)^{m'} \end{aligned} \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка относительно неизвестной функции $\varphi = \varphi(t)$. Оно имеет разные решения для различных режимов деформирования.

Для оптимального режима деформирования интенсивности скоростей деформаций ξ_e и напряжений σ_e постоянны во времени и равны

$$\xi_e = \xi_{opt}, \quad \sigma_e = \sigma_{opt} \quad (7)$$

где ξ_{opt} , σ_{opt} – параметры точки перегиба сигмоидальной кривой сверхпластичности [3]. Закон подачи давления, обеспечивающий режим деформирования (7), таков:

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{opt} \frac{s_0}{a+b} \sin \varphi \cos \varphi \quad (8)$$

При этом зависимость $\varphi = \varphi(t)$, как следует из (6) при $\sigma_e = \sigma_{opt} = \text{const}$, такова:

$$\ln \frac{1}{\cos \varphi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot t \left(\frac{\sigma_{opt} - \sigma_0}{K'} \right)^{1/m'} \quad (9)$$

Выражение (8) определяет зависимость $p = p(\varphi)$, имеющую максимум при $\varphi = \pi/4$.

Для режима деформирования при постоянном давлении газа $p=p_0=const$ интегрирование (6) дает следующий результат:

$$t \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{p_0 (a+b)}{K' s_0} \right]^{1/m'} = \int_0^\phi \left[\frac{\sin x \cos x}{1 - \chi \sin x \cos x} \right]^{1/m'} \operatorname{tg} x dx \quad (10)$$

где $\chi = 2\sigma_0 s_0 / [\sqrt{3} p_0 (a+b)]$. Из выражений (6) и (10) следует, что минимальное давление, при котором процесс формовки может пройти до конца, определяется максимальным значением $\sin \phi \cos \phi$, которое достигается при $\phi = \pi/4$ и равно 0,5. Таким образом, имеем $p_{min} = \sigma_0 s_0 / [\sqrt{3} (a+b)]$. Далее будем предполагать, что $p_0 > p_{min}$ и знаменатель в правой части (10) не обращается в ноль ни при каких значениях неомной переменной x .

3. Результаты моделирования

Для конкретного расчета рассмотрим деформирование трехслойной конструкции из титанового сплава BT6 (Ti-6Al-4V) со следующими параметрами: $a=9$ мм, $b=12$ мм, $s_0=0,8$ мм, $\delta=1,5$ мм, $\phi_k=\pi/3$. Для того чтобы определить значения реологических параметров σ_0 , K' и m' в определяющем соотношении (4), воспользуемся экспериментальными данными из работы [5]: при скорости деформации ξ , равной $2,4 \cdot 10^{-4}$, $4 \cdot 10^{-4}$, $8 \cdot 10^{-4}$ и $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ напряжение течения равно соответственно 11,4, 14, 19 и 23 МПа. Если обработать этот набор данных по методике [4], то получим следующий результат: $\sigma_0=3,81$ МПа, $K'=925,164 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{m'}$ и $m'=0,5763$. Отклонение значений напряжения, рассчитанного по формуле (4) при указанных значениях реологических параметров от соответствующих значений, приведенных в работе [6], не превышает 0,01%.

На рис.2 приведены кривые зависимости давления газа от высоты зазора $h=atg\phi$, рассчитанные по формуле (8). Все они имеют максимум при $h=a=9$ мм. Продолжительность формовки, рассчитанная по формуле (9) при $\phi=\phi_k=\pi/3$ и σ_{opt} равном 11,4, 14, 19 и 23 МПа, оказалась равной, 3333, 2000, 1000 и 667 с соответственно.

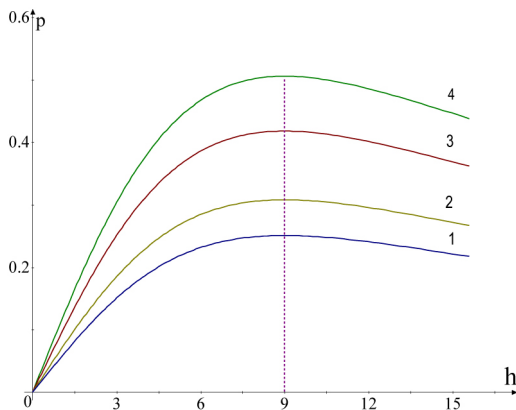


Рис. 2. Зависимости давления инертного газа p , МПа, от высоты зазора h , мм, соответствующие оптимальному режиму деформирования $\sigma_e = \sigma_{opt} = const$, рассчитанные для различных значений σ_{opt} : 1 – 11,4 МПа; 2 – 14 МПа; 3 – 19 МПа; 4 – 23 МПа.

Для расчетов при постоянном давлении выберем $p_0=0,4$ МПа. При этом давлении расчетное время формовки равно $t_k=884$ с.

Для проверки полученных результатов представляется целесообразным провести расчеты в среде программного комплекса ANSYS 10ED. В него встроена модель Пэжины

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{\xi}{\gamma} \right)^p \right] \quad (11)$$

где γ , p – постоянные, а σ_0 зависит от деформации. Включение модели материала (2) в постановку краевой задачи механики СП возможно в рамках варианта теории вязкопластичности [6]. Если положить $K' = \sigma_0 / \gamma^p$, $m' = p$, то легко видеть, что соотношения (11) и (4) представляют собой одну и ту же модель материала. Выше было получено: $\sigma_0=3,81$ МПа, $K'=925,164 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{m'}$ и $m'=0,5763$. По этим данным рассчитываем значения материальных постоянных в модели Пэжины: $p=m'=0,5763$, $\sigma_0=3,81$ МПа, $\gamma=(\sigma_0/K)^p=7,2614 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

Сетка конечных элементов показана на рис.3. Она содержит 378 элементов PLANE82 с опцией Plane strain. На начальном этапе формовки в течение первых 20 с давление задавалось в режиме Ramped, после чего счет был переведен в режим Stepped и продолжался в течение 884 с.

На рис.4 показано распределение интенсивности напряжений σ_e , из которого следует, что в стенке гофра реализуется однородное напряженно-деформированное состояние.

На рис.5 сопоставлены расчетные зависимости высоты зазора h от времени t , из которых видно, что получено удовлетворительное согласие между результатами счета по приближенным аналитическим формулам и решением краевой задачи вязкопластичности в среде ANSYS, расхождение не превышает 11%. На рис. 6 сопоставлены расчетные кривые интенсивности напряжений σ_e от времени, которые

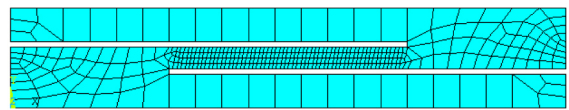


Рис. 3. Сетка конечных элементов.

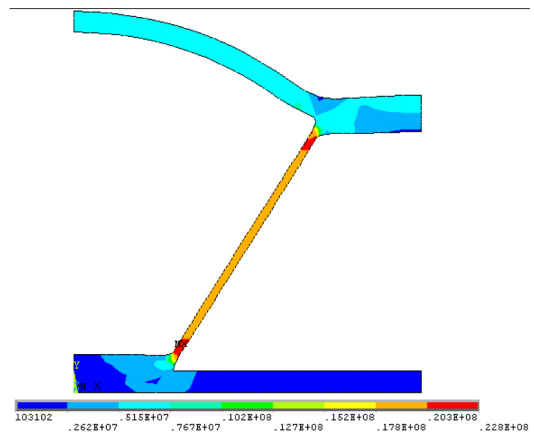


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений σ_e , Па, полученное в ANSYS.

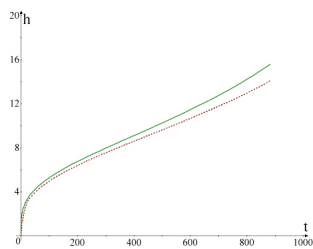


Рис. 5. Зависимости высоты зазора h , мм, от времени t , с, вычисленные по аналитическим формулам (сплошная линия) и в среде ANSYS (пунктир) для режима формовки при постоянном давлении $p=p_0=0,4$ МПа.

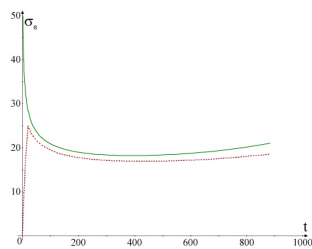


Рис. 6. Зависимости интенсивности напряжений σ_e , МПа, от времени t , с, вычисленные по аналитическим формулам (сплошная линия) и в среде ANSYS (пунктир) для режима формовки $p=p_0=0,4$ МПа.

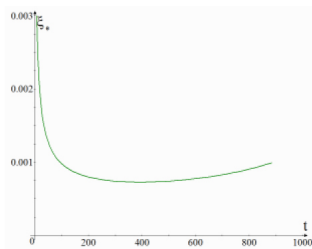


Рис. 7. Зависимость интенсивности скоростей деформаций ξ_e , c^{-1} , от времени t , с для режима формовки $p=p_0=0,4$ МПа.

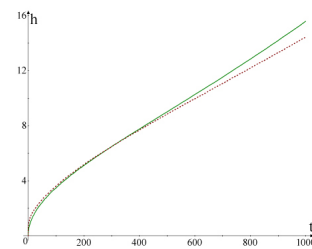


Рис. 8. Зависимости высоты зазора h , мм, от времени t , с, вычисленные по аналитическим формулам (сплошная линия) и в среде ANSYS (пунктир) для режима формовки при постоянной интенсивности напряжений $\sigma_e = 19$ МПа.

также удовлетворительно согласуются друг с другом, расхождение не превышает 12%. На рис.7 представлена расчетная зависимость интенсивности скоростей деформаций от времени, полученная по формуле $\xi_e = [(\sigma_e - \sigma_0)/K']^{1/m'}$. Как следует из рис.7, скорость деформации имеет порядок $10^{-3} c^{-1}$, что соответствует оптимальному интервалу сверхпластичности для сплава ВТ6.

Для проверки оптимального закона подачи давления выберем величину $\sigma_{opt} = 19$ МПа. Продолжительность формовки в этом режиме выберем равной $t_k = 1000$ с. Расчетную кривую $p=p(t)$ вводим в программу ANSYS. Результаты расчетов представлены на рис. 8. Как видно из рис.8, кривые $h(t)$ для режима формовки $\sigma_e = \sigma_{opt} = 19$ МПа близки. Расхождение при $t=t_k=1000$ с не превышает 9%.

4. Заключение

Предлагаемый в настоящей работе подход позволяет с удовлетворительной для практики точностью определить временные параметры процесса СПФ и параметры напряженно-деформированного состояния в очаге деформации (стенке гофра) трехслойных конструкций при различных режимах ее нагружения. Расхождение между результатами расчетов по аналитическим формулам и соответствующими решениями краевой задачи механики сверхпластичности не превышает 12%.

Литература

1. Superplastic Forming of Structural Alloys. Ed. by N.E. Paton, C.H. Hamilton. Warrendale, Pennsylvania. TMS-AIME (1982) 312 p.
2. R.V. Safiullin. Letters on Materials. 2(2), 36 (2012). (in Russian) [P.B. Сафиуллин. Письма о материалах. 2(2), 36 (2012).]
3. O.M. Smirnov. Superplastic metal working techniques, M.: Mashinostroenie. (1979) 184 p. (in Russian) [O.M. Смирнов. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение. 1979. 184 с.]
4. A.P. Zhilyaev, A.I. Pshenichnyuk. Superplasticity and grain boundaries in ultrafine-grained materials. Cambridge. International Science Publishing. (2010) 312 p.
5. F.U. Enikeev. Zavodskaya Laboratoria. 7, 39 (2002). (in Russian) [Ф.У. Еникеев. Заводская лаборатория. 7, 39 (2002).]
6. F.U. Enikeev, A.A. Kruglov. International Journal of Mechanical Sciences. 37(5), 473 (1995).
7. A.H. Akhunova, S.V. Dmitriev, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin. Key Engineering Materials. 433, 319 (2010).