

УДК 621.983.044

Анищенко А. С.
Кухарь В. В.
Присяжный А. Г.

ВЛИЯНИЕ РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ И УТОНЕНИЯ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБОЛОЧЕК ПРИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКЕ

В инженерных расчетах силовых параметров сверхпластической формовки (СПФ), как правило, используют уравнение Лапласа [1]:

$$\sigma_m/r_1 + \sigma_\theta/r_2 = p/S, \quad (1)$$

где σ_1, σ_2 – главные (меридиональное и тангенциальное) напряжения в оболочке при СПФ;
 r_1, r_2 – меридиональный и тангенциальный радиусы кривизны оболочки;
 p – давление деформирующей среды;
 S – текущее значение толщины вдоль контура оболочки.

Зачастую при анализе процесса СПФ формуемые участки заготовки с равномерной или наперед заданной толщиной стенки, свободные от контакта с поверхностью штампа, представляют как участки сферообразной поверхности с неравномерной, а иногда и равномерной толщиной стенки [1–4]. Такой подход упрощает определение r_1, r_2 и, следовательно, дальнейшие расчеты напряжений и сил. Однако реальные контуры оболочек отличаются от сферообразных [5–6], что вносит погрешности в расчеты и обуславливает необходимость в их совершенствовании.

Радиусы кривизны свободно формуемых поверхностей оболочек зависят от температуры, степени, скорости деформации и сверхпластических свойства материала заготовок. Главные радиусы кривизны r_1, r_2 определяют из различных формул, аппроксимирующих экспериментальные данные. На наш взгляд, наиболее универсальной формулой, аппроксимирующей контур деформируемой заготовки на всех стадиях СПФ, является суперэллипс Ляме [7–8]:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^p + \left(\frac{y}{b}\right)^q = 1, \quad (2)$$

где p и q – показатели степени;

$x = r_i/r, y = h_i/r, a = r/r = 1, b = h/r$ (r_i, h_i, r, h – текущие и максимальные значения соответственно радиуса основания и высоты оболочки).

В зависимости от величин p, q, a и b формула (2) описывает в безразмерных координатах весь набор контуров, которые имеют листовые заготовки на различных стадиях СПФ.

С учетом формулы (1) относительные радиусы кривизны $r_m = r_1/r$ и $r_\theta = r_2/r$ определяют по формулам [9]:

$$r_m = \frac{[1 + (bp/q)^2 a^{-2p/q} x^{2(p-2)} (a^p - x^p)^{(1-q)/q}]^{3/2}}{-(bp/q) a^{-p/q} x^{p-2} (a^p - x^p)^{(1-2q)/q} [(p-1)(a^p - x^p) + ((q-1)/q) p x^p]}. \quad (3)$$

$$r_\theta = -ba^{-p/q} (a^p - x^p)^{1/q} [1 + (bp/q)^2 a^{-2p/q} x^{2(p-1)} (a^p - x^p)^{(2-2q)/q}]^{1/2}. \quad (4)$$

В работах [9–10] показано, что для СПФ куполов из заготовок переменной толщины (ЗПТ) и с различными сверхпластическими свойствами радиусы кривизны r_m, r_θ значительно

отличаются от радиуса сферического сегмента, могут быть бесконечно большими, иметь экстремумы вдоль контура оболочек. Замечена корреляция между изменениями величин r_m , r_θ и утонением заготовки при СПФ [3–4, 10].

Целью работы является изучение взаимосвязи между главными напряжениями, радиусами кривизны и утонением оболочек при СПФ сферообразных куполов для уточнения расчетов силовых параметров технологического процесса.

Для оценки влияния толщины на напряженное состояние оболочки при СПФ использовали ранее полученные нами экспериментальные данные [11–12], а также данные других авторов [5–6]. Утонение, т. е. относительное распределение толщины $z = S/S_0$ (S_0 – исходная толщина заготовки) вдоль относительного радиуса основания x оболочек с относительной высотой $y = 1$ аппроксимировали уравнениями, представленными в табл. 1.

На основе уравнения (1) и критерия Мизеса в работах [12–13] были получены зависимости, удобные для анализа влияния кривизны контуров оболочек на распределение главных напряжений σ_m , σ_θ и их интенсивности σ_e . Для относительных значений радиусов кривизны и толщины (см. табл. 1) оболочек эти уравнения приобретают вид:

$$\sigma_m = pr_\theta / 2z, \quad \sigma_\theta = (2 - r_\theta / r_m) pr_\theta / 2z; \quad (5)$$

$$\sigma_e = (pr_\theta / 2z) \sqrt{[(r_\theta / r_m)^2 - 3(r_\theta / r_m) + 3]}. \quad (6)$$

Если предположить, что: контур оболочки является частью сферы ($r_\theta / r_m = 1$), а утонение оболочки равномерное ($z = 0,5$), формула (6) соответственно упрощается к виду:

$$\sigma_0 = pr_\theta / 2z, \text{ т. е. } \sigma_0 = pr_\theta. \quad (7)$$

На рис. 1, а представлено распределение соотношения главных напряжений σ_θ / σ_m вдоль радиуса основания оболочек. В расчетах не учитывали наличие радиуса сопряжения деформируемой оболочки и фланца, т. е. в интервале $x = (0,95 - 1,0)r$ расчетные данные являлись недостоверными и на графиках не указаны.

Для сверхпластичного баббита $Sn-38\%Pb$ с $m = 0,6$ главные напряжения примерно равны (диапазон погрешности – не более 18 %). С ухудшением сверхпластичных свойств в сплавах расчетные значения σ_θ превалируют над величинами σ_m из-за существенного роста радиуса кривизны r_m [9], в особенности для баббита с $m = 0,25$.

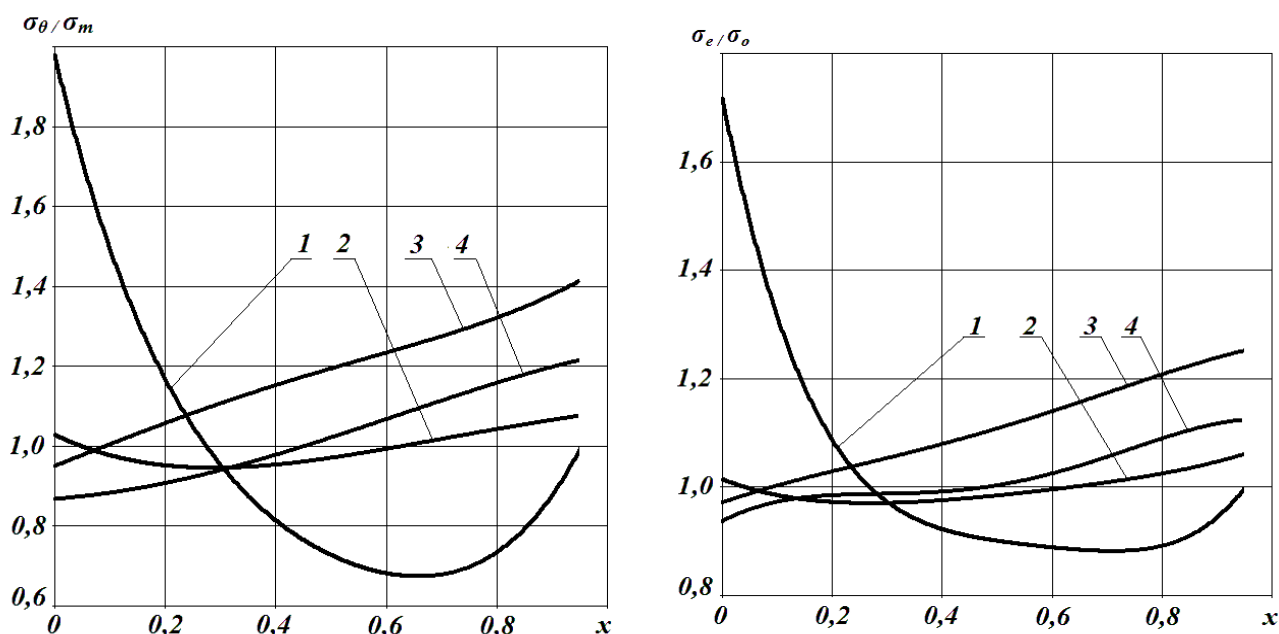
Таблица 1

Формулы аппроксимации толщины оболочек при СПФ

Параметры оболочки	Аппроксимирующая функция	Параметры оболочки	Аппроксимирующая функция
сплав АМг6, ЗПТ, $m = 0,38$	$z_1 = -1,94x^4 + 5,03x^3 - 3,31x^2 + 0,38x + 0,25$	сплав $Sn-38\%Pb$, $m = 0,25$	$z_3 = 0,88x^4 - 0,80x^3 + 0,44x^2 + 0,06x + 0,24$
сплав $Sn-38\%Pb$, $m = 0,60$	$z_2 = 1,09x^4 - 0,93x^3 + 0,17x^2 + 0,05x + 0,43$	сплав $AlMg5$ $m = 0,42$	$z_4 = 1,25x^4 - 1,82x^3 + 1,16x^2 + 0,00x + 0,23$

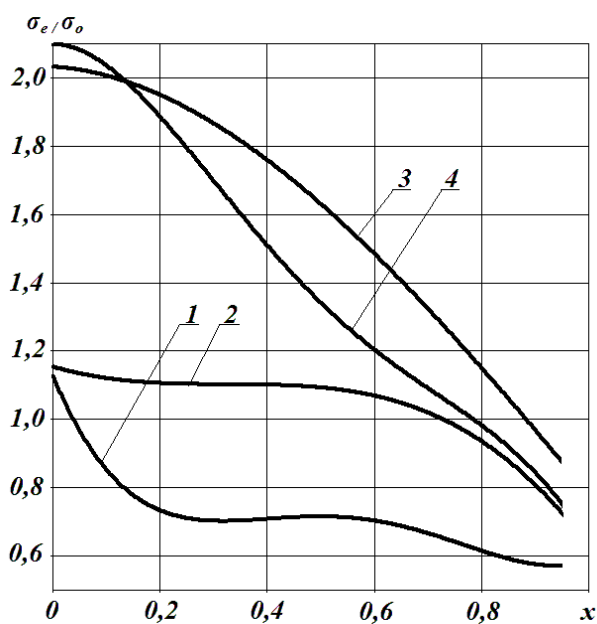
В заготовках переменной толщины распределение $\sigma_\theta / \sigma_m = f(x)$ имеет вид параболы с минимумом в диапазоне $x = 0,6-0,7$, т. е. в местах сопряжения центральной и периферийной зон заготовки с различной толщиной.

В точках пересечения кривых 1–4 с ординатой $\sigma_\theta/\sigma_m = 1$ контуры оболочек совпадают с контуром сферы. Для оболочек из баббита с $m = 0,60$ и заготовок переменной толщины таких точек по две: соответственно $\sigma_\theta/\sigma_m = 0,09$ и $0,62$, $0,27$ и $0,95$. Оболочки из баббита с $m = 0,25$ и сплава *AlMg5* имеют ординату $\sigma_\theta/\sigma_m = 1$ при $x = 0,09$ и $0,44$ соответственно.



а

б



в

Рис. 1. Распределение соотношений главных напряжений и интенсивностей напряжений вдоль относительного радиуса основания оболочек из:

1 – заготовки переменной толщины; 2 – сплава *Sn-38 %Pb* с $m = 0,60$; 3 – сплава *Sn-38 %Pb* с $m = 0,25$; 4 – сплава *AlMg5*

Различия в величинах σ_θ и σ_m вдоль контура оболочек обуславливают значения интенсивности напряжений σ_e , отличающиеся от аналогичных параметров σ_0 для сферообразных оболочек (рис. 1, б). При наблюдаемом геометрическом подобии соответствующих графиков

на рис. 1 а–б разброс значений σ_e/σ_0 для всех оболочек меньше, чем диапазон величин σ_θ/σ_m . С погрешностью не более 10 % можно утверждать, что интенсивность напряжений в оболочках из баббита с $m = 0,60$ допустимо рассчитывать в предположении сферообразности ее контура и равенства $\sigma_\theta = \sigma_m$. Однако для оболочек из баббита с $m = 0,25$ и сплава *AlMg5* отклонения σ_θ/σ_m и σ_e/σ_0 более существенны: $\sigma_\theta/\sigma_m = 0,95\text{--}1,41$ и $0,84\text{--}1,22$, $\sigma_e/\sigma_0 = 0,97\text{--}1,25$ и $0,93\text{--}1,13$ соответственно. В оболочках из ЗПТ минимумы σ_e/σ_0 и σ_θ/σ_m достигаются в одних местах контура и составляют 0,88 и 0,66.

В некоторых работах [1, 2] при определении силовых параметров СПФ одновременно допускали сферообразность контура и равномерность утонения оболочек. По нашим расчетам, такие допущения приводят к тому, что даже в оболочках из баббита с высоким уровнем сверхпластичных свойств ($m = 0,60$) отклонение значений σ_e/σ_0 от единицы достигает $+0,15 \div -0,26$, т. е. погрешность достигает 41 % (рис. 1 в). Для оболочек из заготовок переменной толщины диапазон отклонений еще больше: $+0,14 \div -0,43$ (погрешность – 57 %). В полюсных участках куполов из сплава *AlMg5* и баббита с $m = 0,25$ значения $\sigma_e/\sigma_0 > 2$, а в зонах прижима заготовки $\sigma_e/\sigma_0 = 0,76; 0,87$, т. е. погрешность расчетов достигает 130 %.

Таким образом, графики на рис. 1, в показывают неприемлемость для расчетов допущения о равномерности утонения заготовок при СПФ.

ВЫВОДЫ

Главные напряжения, в особенности тангенциальное напряжение, зависят от главных радиусов кривизны. Интенсивность напряжений, кроме этого, зависит и от утонения оболочек при сверхпластической формовке. Чем выше уровень сверхпластичных свойств материала заготовки, тем в меньшей мере главные напряжения и их интенсивность зависят от разности главных радиусов кривизны. При расчетах силового режима СПФ оболочек неприемлемо допущение о равномерном утонении заготовки при формовке, поскольку погрешность расчетов может достигать 130 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giuliano G. *Superplastic forming of advanced metallic materials* / G. Giuliano. – Oxford : Woodhead Publishing Limited, 2011. – 377 p.
2. Jovane F. *An approximate analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm* / F. Jovane // *International Journal of Mechanical Science*. – 1968. – V. 10. – P. 405–427.
3. Kim Yong H. *Optimal design of superplastic forming processe* / Yong H. Kim, Jung-Min Lee, S. S. Hong. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – No 112. – P. 167–173.
4. Dutta A. *Thickness-profiling of initial blank for superplastic forming of uniformly thick domes* / Abhijit Dutta // *Material Science and Engineering*. – 2004. – A 371. – P. 79–81.
5. Lechten J.-P. *Analyses theorique et experimentale du gonflement dans le domaine de superplasticite* / J.-P. Lechten, J.-C. Patrat, B. Baudalet // *Revue de Physique Appliquee*. – 1977. – № 12 (1). – P. 7–14.
6. Vitu L. *Comparaison de trois modeles pour le post-traitment de mesures issues du test de gonflement libre de tubes* / L. Vitu, [etc.] // *22-ieme Congres Francais de Mecanique*. – Lyon, 2015. – P. 67–78.
7. Анищенко А. С. *Аппроксимация контура оболочек при сверхпластической формовке формулой Ляме* / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь, Е. А. Мктрчян // *Вестник КРСУ*. – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 3–5.
8. Анищенко А. С. *Аппроксимация формулами Ляме-Гелиса контура оболочек при сверхпластической формовке листовых заготовок* / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь, Е. А. Мктрчян // *Вісник ПДТУ : збірник наукових праць*. – 2017. – Вип. 34. – С. 7–17.
9. Анищенко А. С. *Применение формул Ляме для анализа деформированного состояния оболочек при сверхпластической формовке* / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь, А. Г. Присяжнний // *Обработка металлов давлением : сб. науч. трудов ДГМА*. – Краматорск, 2017. – № 2 (45). – С. 11–16.
10. Pushkarraj V. D. *Study of superplastic forming process using finite element analysis* / V. D. Pushkarraj. – University of Kentucky, 2003. – 97 p.
11. Смирнов О. М. *Способы уменьшения разнотолщинности при пневмостатической формовке деталей в режиме сверхпластичности* / О. М. Смирнов, В. О. Гук, М. А. Целин, А. С. Анищенко // *Теория и технология обработки металлов давлением : сб. науч. тр. МИСиС*. – М. : МИСиС, 1979. – № 113. – С. 70–75.

12. Анищенко А. С. К вопросу о напряженном состоянии оболочек при свободной сверхпластической формовке / А. С. Анищенко, Д. И. Чашников // Судостроительная промышленность. Серия : Материаловедение. – Л. : ЦНИИКМ «Прометей», 1989. – Вып. 10. – С. 73–76.

13. Grebenisan G. Parameterized finite element analysis of a superplastic forming process, using Ansys / G. Grebenisan, S. Bogdan // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 126. – P. 1–6.

REFERENCES

1. Giuliano G. Superplastic forming of advanced metallic materials / G. Giuliano. – Oxford : Woodhead Publishing Limited, 2011. – 377 p.

2. Jovane F. An approximate analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm / F. Jovane // International Journal of Mechanical Science. – 1968. – V. 10. – P. 405–427.

3. Kim Yong H. Optimal design of superplastic forming processes / Yong H. Kim, Jung-Min Lee, S. S. Hong. // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – No 112. – P. 167–173.

4. Dutta A. Thickness-profiling of initial blank for superplastic forming of uniformly thick domes / Abhijit Dutta // Material Science and Engineering. – 2004. – A 371. – P. 79–81.

5. Lechten J.-P. Analyses theorique et experimentale du gonflement dans le domaine de superplasticite /

J.-P. Lechten, J.-C. Patrat, B. Baudalet // Revue de Physique Appliquee. – 1977. – № 12 (1). – R. 7–14.

6. Vitu L. Comparaison de trois modeles pour le post-traitment de mesures issues du test de gonflement libre de tubes / L. Vitu, [etc.] // 22-ieme Congres Francais de Mecanique. – Lyon, 2015. – P. 67–78.

7. Anishhenko A. S. Approksimacija kontura obolochek pri sverhplasticheskoj formovke formuloj Ljame / A. S. Anishhenko, V. V. Kuhar', E. A. Mkrchjan // Vestnik KRSU. – 2017. – T. 17. – № 1. – S. 3–5.

8. Anishhenko A. S. Approksimacija formulami Ljame-Gelisa kontura obolochek pri sverhplasticheskoj formovke listovyh zagotovok / A. S. Anishhenko, V. V. Kuhar', E. A. Mkrchjan // Visnik PDTU : zbirnik naukovih prac'. – 2017. – Vip. 34. – S. 7–17.

9. Anishhenko A. S. Primenenie formul Ljame dlja analiza deformirovannogo sostojanija obolochek pri sverhplasticheskoj formovke / A. S. Anishhenko, V. V. Kuhar', A. G. Prisjazhnyj // Obrabotka metallov davleniem : sb. nauch. trudov DGMA. – Kramatorsk, 2017. – № 2 (45). – S. 11–16.

10. Pushkarraj V. D. Study of superplastic forming process using finite element analysis / V. D. Pushkarraj. – University of Kentucky, 2003. – 97 p.

11. Smirnov O. M. Sposoby umen'shenija raznotolshhinnosti pri pnevmostaticheskoi formovke detalej v rezhime sverhplastichnosti / O. M. Smirnov, V. O. Guk, M. A. Cepin, A. S. Anishhenko // Teorija i tehnologija obrabotki metallov davleniem : sb. nauch. tr. MISiS. – M. : MISiS, 1979. – № 113. – S. 70–75.

12. Anishhenko A. S. K voprosu o naprjazhennom sostojanii obolochek pri svobodnoj sverhplasticheskoj formovke / A. S. Anishhenko, D. I. Chashnikov // Sudostroitel'naja promyshlennost'. Serija : Materialovedenie. – L. : CNIKМ «Prometey», 1989. – Вып. 10. – С. 73–76.

13. Grebenisan G. Parameterized finite element analysis of a superplastic forming process, using Ansys / G. Grebenisan, S. Bogdan // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 126. – P. 1–6.

Анищенко А. С. – канд. техн. наук, ст. науч. сотруд., доц. каф. ОМД ГВУЗ «ПГТУ»;
aas540628@gmail.com;

Кухарь В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ГВУЗ «ПГТУ»;
kvv_mariupol@gmail.com;

Присяжный А. Г. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ГВУЗ «ПГТУ».
agp87514@gmail.com

ГВУЗ «ПГТУ» – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь.

Статья поступила в редакцию 12.02.2019 г.