

УДК 62-419.5:620.172.224:519.876.5

Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, И.А. Пономарева, В.Н. Арисова

Волгоградский государственный технический университет

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОСЛОЙКИ МАГНИЕВО-АЛЮМИНИЕВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ*

Герметичное соединение разнородных сосудов и труб часто осуществляется посредством тонкостенных композиционных переходников, в которых под действием рабочего внутреннего давления возникает двухосное растяжение и реализуется эффект контактного упрочнения. Этот эффект заключается в увеличении разрушающих напряжений вследствие сдерживания радиальных деформаций мягкой прослойки на границе с твердым металлом и ужесточением напряженного состояния прослойки [1].

Установлено, что объемное напряженное состояние в поперечной мягкой прослойке в цилиндрическом сосуде (трубе или баллоне) вследствие действия контактного эффекта приводит к упрочнению прослойки, степень упрочнения зависит от относительной толщины прослойки; величины механической неоднородности и напряженно-деформированного состояния основного металла, скорости нагружения и т. п. В случае двухосного растяжения объемное напряженное состояние также зависит от толщины стенки сосуда и положения прослойки относительно его оси. Правильное использование эффекта контактного упрочнения позволяет изменять прочность соединения в диапазоне от прочности металла мягкой прослойки до прочности основных свариваемых металлов.

В работе [2] для проведения расчета прочности соединения с мягкой прослойкой в цилиндрической тонкостенной трубе, работающей под действием внутреннего давления, использован ряд допущений:

- изотропность материалов с одинаковыми упругими константами;
- существенно более высокий предел текучести основных металлов (σ_T^T) по сравнению с пределом текучести металла мягкой прослойки (σ_T^M);
- толщина стенок сосуда значительно меньше внутреннего диаметра этого сосуда;

– радиальные напряжения в прослойке и основных металлах равны нулю, а тангенциальные и осевые равномерно распределены по сечению;

– коэффициент Пуассона (μ) составляет 0,5 при упругой и пластической стадиях деформирования.

Для этих условий было получено, что течение металла прослойки начнется при интенсивности тангенциальных напряжений (σ_φ)

$$\sigma_\varphi = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T^M.$$

Дальнейшее повышение давления приводит к увеличению интенсивности напряжений в основном металле при неизменной интенсивности напряжений в прослойке. Сдерживание радиальных деформаций на контактной поверхности приводит к ужесточению напряженного состояния, т.е. к контактному упрочнению.

Предельные средние осевые напряжения σ_B^z , соответствующие началу вязкого разрушения прослойки, можно определить по формуле [2]

$$\sigma_B^z = \sigma_B^M \left[\frac{\pi}{4} + \frac{1+2\gamma}{3\sqrt{3}\chi(1+\gamma)} \right]$$

где σ_B^M – временное сопротивление металла мягкой прослойки; $\gamma = (r_{\max} + r_{\min})/r_{\min}$; r_{\min} и r_{\max} – внутренний и наружный радиусы цилиндра; $\chi = h/(r_{\max} - r_{\min})$ – относительная толщина прослойки.

Критическая относительная толщина прослойки χ_b , при которой достигается равнопрочность соединения, равна

$$\chi_b = \frac{1+2\gamma}{3\sqrt{3} \left(mK_B - \frac{\pi}{4} \right) (1+\gamma)},$$

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00418).

где $m = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n} + \frac{1}{n^2}}}$; n – отношение осевых

напряжений к тангенциальным в основном металле; $K_b = \sigma_b^t / \sigma_b^m$ – коэффициент механической неоднородности.

Напряженное состояние с $n = 0,5$ реализуется только в длинном сосуде и на достаточном удалении от днищ и различного рода галтелей. В элементах трубы помимо растягивающих усилий действуют изгибающие моменты, осевые напряжения вблизи днищ и галтелей увеличиваются примерно в 1,8 раза [3]. Учитывая это, а также смягчение напряженного состояния твердого металла вблизи контактной поверхности, рекомендуется расчет величины χ_b вести для $n = 1$ и учитывать, в случае необходимости, действие изгибающих моментов [3]

$$\chi_b = \frac{1 + 2\gamma}{3\sqrt{3} \left(K_b - \frac{\pi}{4} \right) (1 + \gamma)}$$

При проектировании сварных соединений необходимо учитывать, что с уменьшением относительной толщины прослойки увеличивается прочность соединения, но возрастает опасность хрупких разрушений.

Значительное количество вынужденных допущений упрощает расчет геометрических параметров сварного узла, но снижает его точность. Развитие компьютерной техники позволяет для повышения достоверности расчетов использовать пакеты программ, основанные на методе конечных элементов.

Целью настоящей работы являлась оценка влияния толщины алюминиевой прослойки на ее поведение в магниево-алюминиевых композиционных баллонах высокого давления при нормальной температуре методом моделирования с использованием пакета компьютерных программ SIMULIA/Abaqus.

Методом конечных элементов с использованием модели Мизеса в модуле Abaqus/Explicit (использующем явную схему интегрирования для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов) программного комплекса SIMULIA/Abaqus компании Dassault Systèmes Simulia Corp (USA) проводили моделирование процессов деформирования и разрушения короткого цилиндрического баллона со сферическими днищами ($r_{\min} = 50$ мм и $r_{\max} = 60$ мм, длина баллона 120 мм) из трехслойного магниево-алюминиевого композита МА2-1-АД1-АМг6. Ранее проведенная верификация показала бли-

зость расчетных и экспериментально получаемых значений пластической деформации, что подтверждает возможность применения программного комплекса SIMULIA/Abaqus для моделирования поведения слоистых металлических композитов при различных схемах деформирования [4 – 7]. Для расчета упрочнения материалов в результате пластического деформирования использовали модель пластичности Джонсона–Кука [8], согласно которой предел текучести G_Y можно определить по формуле

$$\sigma_Y = \left(A + B \varepsilon_p^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p^n}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right],$$

где A – предел текучести неупрочненного материала; B – коэффициент упрочнения при деформировании; ε_p – эффективная пластическая деформация; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; C – коэффициент зависимости упрочнения от скорости деформирования; n, m, ε_0 – параметры модели; $\dot{\varepsilon}_p$ и $\dot{\varepsilon}_0$ – первые производные ε_p и ε_0 по времени.

Модель Джонсона–Кука позволяет получить семейство кривых деформирования материала при различных температурах и скоростях деформирования. Для описания разрушения материала использовали модель разрушения Джонсона–Кука [9], по которой разрушение ячейки происходит при равенстве параметра поврежденности D единице

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f} \sum_i \Delta \varepsilon_p^i,$$

где $\Delta \varepsilon_p^i$ – приращение эффективной пластической деформации в конечном элементе на i -ом шаге интегрирования по времени.

Оценку величины ε_f проводили по формуле

$$\varepsilon_f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{p}{\sigma_{ef}} \right) \right] \left(1 + D_4 \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right) \times \left(1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right),$$

где $D_1 \dots D_5$ – табличные параметры материала; σ_{ef} – эффективное напряжение; p – давление в рассматриваемой ячейке.

Коэффициенты [8, 10, 11] для модели пластичности Джонсона–Кука

Материал	A, МПа	B, МПа	m	n	$\dot{\epsilon}_0$, с ⁻¹	T _m , К	T _r , К
Сплав АМг6	218,3	704,6	0,930	0,62	1	873	293
Алюминий АД1	60,0	6,4	0,859	0,62	1	933	293
Сплав МА2-1	100,0	380,0	1,040	0,28	1	773	293

Значения параметров для выбранных моделей деформирования и разрушения материалов приведены в табл. 1 и 2 [10, 11] (в связи с низкой скоростью деформирования ($\dot{\epsilon}_p \leq 0,0025$ с⁻¹) ее влияние не учитывали).

Цилиндрическая форма баллона позволяет задавать его элементы в виде деформируемых осесимметричных тел [12] и рассчитывать напряжения и деформации в радиальном сечении, что значительно сокращает время моделирования. Относительную толщину прослойки АД1 варьировали от $\chi_{\text{АД1}} = 0,05$ (0,5 мм) до $\chi_{\text{АД1}} = 0,60$ (6,0 мм), толщины стенок АМг6 и МА2-1 равнялись 10 мм. Прочность связей между слоями основных металлов и мягкой прослойки соответствовала прочности мягкой прослойки. Размер сторон квадратных ячеек конечно-элементной сетки в элементах композита из АМг6 и МА2-1 составлял 0,5 мм. Размер прямоугольных ячеек в мягкой прослойке АД1 в радиальном направлении соответствовал размерам ячеек в прилегающих слоях АМг6 и МА2-1, а в осевом направлении составлял 1/12 толщины мягкой прослойки. Максимальное моделируемое внутреннее давление 65 МПа.

Проведенное моделирование показало изменение характера деформирования и разрушения основных слоев композиционного баллона в зоне мягкой прослойки АД1 при варьировании ее относительной толщины (рис. 1). Разрушение при моделировании во всех случаях происходило по прослойке алюминия, уменьшение ее относительной толщины со-

проваждалось все большим вовлечением в пластическую деформацию прилегающих слоев АМг6.

Полученное при моделировании изменение характера деформирования и разрушения основных слоев композита при варьировании относительной толщины мягкой прослойки АД1 показало, что с уменьшением толщины прослойки до 0,30 мм разрушение происходило по слою МА2-1 (рис. 2).

Моделирование процессов деформирования композиционного баллона показало, что размер алюминиевой прослойки композита АМг6–АД1–МА2-1 влияет на прочностные характеристики композиционного баллона: уменьшение относительной толщины $\chi_{\text{АД1}}$ приводит к значительному росту разрушающих давлений (от 42 МПа при $\chi_{\text{АД1}} = 0,6$ до 63 МПа при $\chi_{\text{АД1}} = 0,05$) (рис. 3).

Рост внутреннего давления на шагах моделирования, предшествующих разрушению, при уменьшении толщины алюминиевой прослойки приводит к увеличению максимально допустимой радиальной деформации баллона: при $\chi_{\text{АД1}} = 0,6$ прирост радиуса перед разрушением не превышает 2,2 мм, а при $\chi_{\text{АД1}} = 0,05$ Δr_{max} уже составляет 6,8 мм. Полученные при моделировании кривые деформация – давление ($\Delta r = f(p_i)$) при нагружении внутренним давлением баллона из композита МА2-1–АД1–АМг6 с различными относительными толщинами $\chi_{\text{АД1}}$ прослойки приведены на рис. 4.

Коэффициенты [10, 11] для модели разрушения Джонсона–Кука

Материал	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	$\dot{\epsilon}_0$, с ⁻¹	T _m , К	T _r , К
Сплав АМг6	0,178	0,3890	-2,2460	0	0	1	873	293
Алюминий АД1	0,071	1,4280	-1,1420	0,0097	0	1	933	293
Сплав МА2-1	-0,350	0,6025	-0,4537	0,2060	7,2	1	773	293

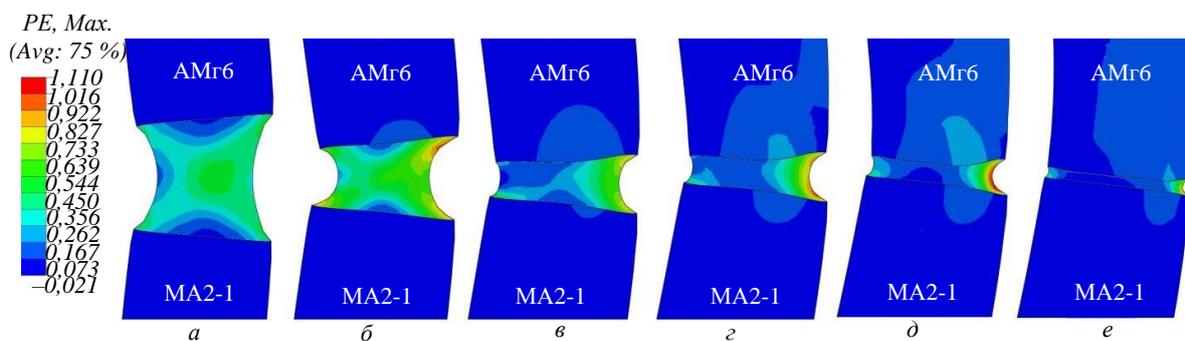


Рис. 1. Изменение характера деформирования слоев и прослоек в композите МА2-1–АД1–АМг6 на шаге, предшествующем разрушению, при варьировании относительной толщины мягкой прослойки:

$a - \chi_{AD1} = 0,60$; $b - \chi_{AD1} = 0,30$; $в - \chi_{AD1} = 0,20$; $г - \chi_{AD1} = 0,15$; $д - \chi_{AD1} = 0,10$; $e - \chi_{AD1} = 0,05$

Проведенные исследования показали возможность определения прочности цилиндрического баллона из композита МА2-1–АД1–АМг6 при варьировании относительной толщины прослойки АД1 с помощью пакета SIMULIA/Abaqus с меньшими допущениями, чем сделанные в работе [2], в частности, с недостаточным учетом влияния тангенциальных напряжений.

Выводы. Методом конечно-элементного компьютерного моделирования определена зависимость внутреннего давления, приводящего к разрушению короткого цилиндрического баллона из композита МА2-1–АД1–АМг6, и максимально допустимой радиальной деформации от толщины алюминиевой прослойки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Проничев Д.В. Композиционные переходники: монография. – Волгоград: РПК «Политехник», 2007. – 329 с.
2. Бакши О.А., Богомолова А.С., Седых В.С. О рациональном проектировании сварных сосудов и труб из разнородных материалов // Сварочное производство. 1973. № 9. С. 3 – 6.

3. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.
4. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Волчков В.М., Киселев О.С., Даненко В.Ф., Писарев С.П. Моделирование процессов деформирования слоистых титано-алюминиевых композитов в процессе изгиба // Изв. ВолгГТУ. Проблемы материаловедения, прочности и сварки в машиностроении. 2012. Вып. 6. № 9 (96). С. 11 – 15.
5. Гуревич Л.М., Волчков В.М., Трыков Ю.П., Киселев О.С. Моделирование процесса глубокой вытяжки трубчатых переходников из слоистых титаноалюминиевых пластин // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2014. № 4. С. 30 – 35.
6. Шморгун В.Г., Гуревич Л.М., Богданов А.И., Слаутин О.В., Таубе А.О., Евстропов Д.А. Моделирование процессов деформирования трехслойных никель-алюминиевых композитов при прокатке и изгибе // Изв. ВолгГТУ. Проблемы материаловедения, прочности и сварки в машиностроении. 2013. Вып. 8. № 15 (118). С. 22 – 26.

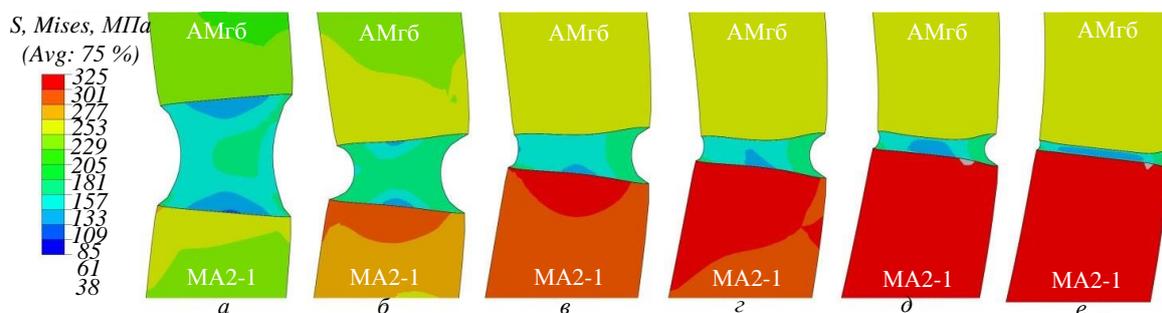


Рис. 2. Изменение напряжений Мизеса в ячейках слоя композита МА2-1–АД1–АМг6 на шаге, предшествующем разрушению, при варьировании относительной толщины мягкой прослойки:

$a - \chi_{AD1} = 0,60$; $b - \chi_{AD1} = 0,30$; $в - \chi_{AD1} = 0,20$; $г - \chi_{AD1} = 0,15$; $д - \chi_{AD1} = 0,10$; $e - \chi_{AD1} = 0,05$

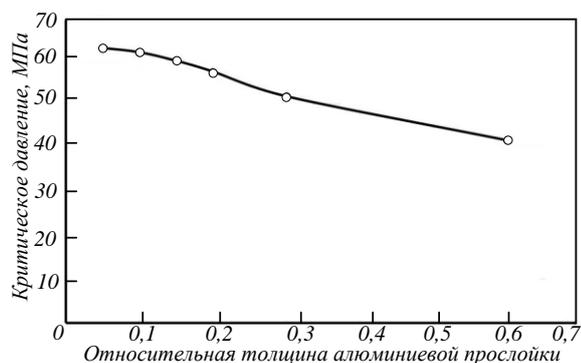


Рис. 3. Зависимость разрушающего внутреннего давления от относительной толщины алюминиевой прослойки

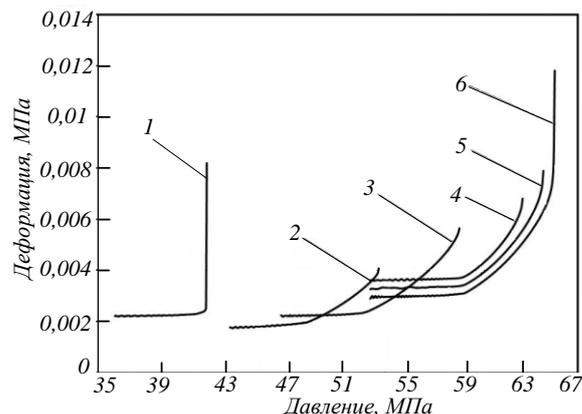


Рис. 4. Зависимость радиальной деформации цилиндрического баллона из композита МА2-1-АД1-АМг6 от давления при варьировании относительной толщины мягкой прослойки:

1 – $\chi_{\text{АД1}} = 0,60$; 2 – $\chi_{\text{АД1}} = 0,30$; 3 – $\chi_{\text{АД1}} = 0,20$;
4 – $\chi_{\text{АД1}} = 0,15$; 5 – $\chi_{\text{АД1}} = 0,10$; 6 – $\chi_{\text{АД1}} = 0,05$

7. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Киселев О.С. Моделирование методом конечных элементов поведения титано-алюминиевого композита с мягкой прослойкой // Изв. ВолгГТУ. Проблемы материаловедения, прочности и сварки в машиностроении. 2013. Вып. 8. № 15 (118). С.6 – 9.
8. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. – In book: Proc. of 7th Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands, 1983. P. 541 – 547.
9. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21. P. 31 – 48.
10. Кузькин В.А., Михалюк Д.С. Применение численного моделирования для идентификации параметров модели Джонсона-Кука при высокоскоростном деформировании алюминия // Вычисли-

тельная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 1. С. 32 – 43.

11. Giraud E., Rossi F., Germain G., Outeiro J.C. Constitutive Modelling of AZ31B-O Magnesium Alloy for Cryogenic Machining. – In book: 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), (CIRP CMMO), Italy (2013). DOI : 10.1016/j.procir.2013.06.144.
12. Abaqus 6.12. Analysis User`s Manual. Vol. 1. Part 1. Introduction, spatial modeling and execution. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2012. – 831 p.

© 2015 г. Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков,
И.А. Пономарева, В.Н. Арисова
Поступила 14 декабря 2015 г.