ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 62-419.5:620.172.224:519.876.5
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-48-54

Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ПРОФИЛЯ ГРАНИЦЫ СОЕДИНЕНИЯ СЛОЕВ ТИТАНО-АЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА НА ПОВЕДЕНИЕ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Проведено моделирование методом конечных элементов деформирования при растяжении титано-алюминиевого композита Д20–АД1–ВТ6С с постоянной относительной толщиной мягкой прослойки АД1 и с варьированием параметров волнового профиля сварного соединения. Показано, что рост отношения амплитуды к шагу волны до 0,5 приводит к росту на 4–5 % усилия, необходимого для сопоставимого растяжения, по сравнению с образцом с плоской границей, и преимущественной локализации пластической деформации вблизи свободных поверхностей.

Ключевые слова: титан, алюминий, мягкая прослойка, волновой профиль, амплитуда волны, шаг волны, деформация, моделирование, метод конечных элементов.

L. M. Gurevich, V. F. Danenko, S. P. Pisarev

INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE WAVE PROFILE OF THE JOINT BOUNDARY OF TITANIUM-ALUMINUM COMPOSITE LAYERS ON STRESS BEHAVIOR

Volgograd State Technical University

Simulation by the finite element of tensile deformation of the titanium-aluminum composite D20 – AD1 – VT6S was carried out. The relative thickness of the soft layer AD1 was constant, and the parameters of the wave profile of the welded joint varied. An increase in the ratio of the amplitude to the step of the wave up to 0.5 leads to an increase in effort by 4–5%. It was compared with the force in a specimen with a flat boundary at comparable stretches. Plastic deformation is localized mainly near free surfaces.

Keywords: titanium, aluminium, soft interlayer, wave profile, wave amplitude, wave step, deformation, simulation, finite element method.

Полученные сваркой взрывом биметаллические титаноалюминиевые переходники широко используются для соединения деталей конструкций из трудно свариваемых сваркой плавлением титановых и алюминиевых сплавов [1, 2]. Надежность работающих в сложных условиях конструкций из титано-алюминиевых композитов, во многом, определяется конструкционной прочностью таких переходников.

Из-за узкого диапазона между нижней и верхней границами свариваемости взрывом титана и алюминиевых сплавов [3] в свариваемые взрывом переходники добавляют промежуточные мягкие прослойки, действующие как «буфер пластичности» и расширяющие возможный диапазон технологических параметров, что

обеспечивает получение качественного сварного соединения. Кроме того, мягкие алюминиевые прослойки смещают в область более высоких температур верхнюю границу температурно-временного режима эксплуатации, при котором не образуются хрупкие интерметаллиды.

Профиль поверхности соединения между сваренными взрывом титановым сплавом и алюминием может быть прямолинейным [4–6] или волнообразным [7–9]. При технологических параметрах сварки взрывом вблизи верхней границы свариваемости около впадин и выступов волнообразной границы соединения титановый сплав – Al образуются «вихри» с зонами локального оплавления (оплавами) [10, 11]. Степень плавления в соединениях, сваренных

взрывом, определяется уровнем пластической деформации поверхностных слоев и, следовательно, удельной энергией W_2 , затрачиваемой на ее осуществление: зоны интенсивного перемешивания материалов в виде «вихрей» в направлении фронта ударной волны возникают при $W_2 \geq 0,7$ МДж/м² [12]. Исследования зоны оплава в сваренных взрывом титано-алюминиевого композитов показали, что они состоят из интерметаллидов типа $TiAl_3$, $TiAl$ и метастабильный $TiAl_2$ [12, 13].

Механическая прочность композиций с мягкими прослойками зависит от их относительной толщины $\chi = \delta / d$, где δ – толщина мягкого слоя, d – поперечный размер испытываемого образца [14]. Ю. П. Трыковым с сотрудниками был разработан графоаналитический способ определения прочности слоистых композитов. Все свариваемые взрывом механически неоднородные композиции с учетом распределения твердости по сечению мягких прослоек были разделены на следующие основные модели [14]:

1. С симметричной механической неоднородностью (модель Т – М – Т).
2. С несимметричной механической неоднородностью с близкими прочностными свойствами основных материалов (модель Т – М – СТ).
3. С несимметричной механической неоднородностью с сильно различающимися прочностными свойствами основных материалов (модель Т – М – ТУ).
4. С мягкой прослойкой, жестко закрепленной с двух сторон (модель ТУ – М – ТУ).
5. С последовательно деформируемой композитной мягкой прослойкой (модель Т – М – БП – Т).

Для каждой из этих моделей было предложены алгоритмы расчета прочности слоистых металлических композитов при приложении нагрузки перпендикулярно границе раздела.

С появлением высокопроизводительных компьютерных технологий стали активно развиваться компьютерные методы моделирования поведения разнородных соединений при различных вариантах нагружения, основанные

на методе конечных элементов [15, 16]. Однако во всех случаях моделировалось поведение слоистых композитов с плоскими поверхностями мягких прослоек. В статье [18] проведено 3D моделирование деформирования композита Д20–АД1–ВТ6С с волновым профилем границ в сварном соединении с помощью пакета SIMULIA/Abaqus. Относительная толщина прослойки АД1 варьировалась в интервале $0,042 \leq \chi_{АД1} \leq 0,667$. Моделирование подтвердило влияние толщины мягкой прослойки на максимальную величину осевого напряжения напряжения, после которого начинается формирование шейки. В процессе моделирования было показано, что при волновом профиле границы соединения ВТ6С–АД1 первоначальная локализация пластической деформации происходила в алюминиевой прослойке вблизи границы с титановым сплавом, причем максимальные значения деформации характерны для мест контакта АД1 с выступами титановой пластины. Однако при моделировании не было исследовано влияние параметров волнового профиля (амплитуды и шага волны) на деформирование слоистого композиционного образца.

Целью настоящей работы была проверка 3D моделированием методом конечных элементов влияния параметров волнообразного профиля поверхностей соединения слоев титано-алюминиевого композиционного материала Д20–АД1–ВТ6С на кинетику квазистатической осевой деформации при растяжении.

Моделированию в пакете программ Simulia/Abaqus подвергалось растяжение под действием осевого усилия образцов титано-алюминиевого композита ВТ6-АД1- Д20 толщиной 6 мм и шириной 10 мм. Толщина волнообразной алюминиевой прослойки во всех вариантах моделирования являлась постоянной (0,5 мм, $\chi_{АД1}=0,084$). Используемые значения параметров симметричных синусоидальных волн на границе соединения приведены в табл. 1. Дополнительно моделировалось поведение титано-алюминиевого композита ВТ6-АД1- Д20 с плоской алюминиевой прослойкой толщиной 0,5 мм.

Таблица 1

**Параметры симметричных синусоидальных волн профиля соединения
ВТ6-АД1, использованные при моделировании**

Номер варианта	Параметры симметричных синусоидальных волн		
	длина волны λ , мм	величина размаха $2a$, мм	$2a / \lambda$
1	2,0	0,25	0,125
2	2,0	0,50	0,25
3	2,0	0,75	0,375
4	1,0	0,50	0,5
5	4,0	0,50	0,125
6	плоская поверхность		

Переход от упругой деформации материалов слоев к пластической определялся по критерию Мизеса. Материалы слоев трехслойных образцов принимались изотропными с повышением предела текучести $\sigma_{0,2}$ по мере увеличения локальной пластической деформации. Для описания упрочнения материала в процессе наклепа использовалась модель Джонсона–Кука [18]:

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

где A – предел текучести недеформированного материала, B – коэффициент упрочнения, ε_p – пластическая деформация; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; C – коэффициент зависимости упрочнения от скорости деформирования, n , m , ε_0 – параметры модели; $\dot{\varepsilon}_0$ и $\dot{\varepsilon}_p$ – первые производные по времени величин ε_0 и ε_p . [18]. Численные значения параметров в уравнении Джонсона–Кука были взяты из ряда источников, и для используемых материалов приведены в табл. 2. В связи с низкой скоростью деформирования (менее $0,0025 \text{ с}^{-1}$) ее влияние не учитывалось.

Таблица 2

Коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука [18]

Материал	Толщина, мм	Коэффициенты для модели пластичности						
		A , МПа	B , МПа	m	n	$\dot{\varepsilon}_0$, с^{-1}	T_m , К	T_r , К
Алюминиевый сплав Д20	10	218,3	704,6	0,93	0,62	1	873	293
Алюминий АД1	5	60,0	6,4	0,859	0,62	1	933	293
Титановый сплав ВТ6	10	420,0	52	1,00	0,48	1	1940	293

Прочность связей между слоями соответствовала условию «Тіе», при котором прочность связи соответствует характеристикам наименее прочного элемента пары. При моделировании всех элементов композита из-за криволинейности профиля отдельных участков использовали ячейки конечно-элементной сетки в виде континуальных трехмерных десятиузловых тетраэдров (типа С3D10М) с размером стороны ячейки 0,1 мм. Средние толщины слоев алюминиевого сплава Д20 и титанового сплава ВТ6С составляли 5 мм. Растяжение образца проводилось за счет перемещения по заданному закону прочно прикрепленных к свободным торцам слоев сплавов Д20 и ВТ6С дискретных жестких пластин. Прикрепленная к слою Д20 пластина в хо-

де моделирования была лишена перемещения или осевого вращения относительно осей X, Y и Z, а прикрепленная к сплаву ВТ6С пластина имела только одну степень свободы – перемещение вдоль оси образца Y со скоростью 2 мм/с.

Графический анализ результатов полученных при моделировании растяжения образцов композита Д20–АД1–ВТ6С с различными параметрами (амплитудой и шагом волны) с волнообразной алюминиевой прослойкой толщиной 0,5 мм ($\chi_{\text{АД1}}=0,084$) с помощью кривых «осевое усилие – абсолютное удлинение образца» затруднено, так как различия в осевых усилиях для всех моделируемых образцов варьировались по участкам нагружения, но, в целом, не превышали 4–5 %. Поэтому, для наглядно-

сти, на рис. 1 и 2 показаны на оси ординат не абсолютные значения осевого усилия, а их отношение к усилиям, возникающим при растяжении образца с плоскими границами между слоями

$$k = \frac{P_{wafe,\varepsilon}}{P_{plane,\varepsilon}},$$

где $P_{wafe,\varepsilon}$ и $P_{plane,\varepsilon}$ – соответственно осевые усилия при растяжении трехслойных образцов

с волнообразной и плоской границами соединения при равных величинах абсолютного растяжения.

При величинах абсолютного растяжения Δl до 0,5 мм амплитуда разброса значений k достаточно велика, но при $\Delta l \geq 0,6$ мм величина k стабилизируется и остается практически постоянной для моделируемого образца в широком интервале Δl .

Рис. 1. Изменение отношения усилий, полученных при моделировании растяжения образцов с волнообразными границами (амплитуда $2a = 0,5$ мм), к усилиям, возникающим при растяжении образца с плоскими границами, $\chi_{\Delta l 1} = 0,084$, :
1 – шаг волны $\lambda = 1$ мм; 2 – $\lambda = 2$ мм; 3 – $\lambda = 4$ мм

Рис. 2. Изменение отношения усилий, полученных при моделировании растяжения образцов с волнообразными границами (шаг волны $\lambda = 2,0$ мм), к усилиям, возникающим при растяжении образца с плоскими границами, $\chi_{\Delta l 1} = 0,084$, :
1 – амплитуда $2a = 0,25$ мм; 2 – $2a = 0,5$ мм; 3 – $2a = 0,75$ мм

Сравнение графиков, показанных на рис. 1 и 2, свидетельствует, что во всех случаях для достижения сопоставимой деформации необходимо у образцов с волнообразной границей соединения приложить несколько большие усилия, чем у образцов с плоскими границами соединения. Наибольшие отличия наблюдались при моделировании поведения образцов с максимальными значениями $2a/\lambda$ (кривая 1 на рис. 1 и кривая 3 на рис. 2). Вероятно, это связано с более развитым эффектом контактного упрочнения участков алюминия АД1 во впадинах волнообразного профиля в титановой пластине ВТ6С.

Этот вывод подтверждается сравнением кинетики развития участков повышенных эквивалентных напряжений в алюминиевых прослойках постоянной толщины (0,5 мм) при разных величинах отношения параметров волнообразного профиля $2a/\lambda$ (рис. 3 и 4).

Рис. 3. Изменение характера распределения напряжений по Мизесу в мягкой прослойке образцов Д20–АД1–ВТ6С с $\chi_{\text{АД1}}=0,083$ и $2a/\lambda=0,125$:
1–5 – абсолютное удлинение образца 0,4 мм; 0,8 мм; 1,2 мм; 1,6 мм; 2,0 мм соответственно (показана только прослойка из АД1, четверть образца условно вырезана)

Рис. 4. Изменение характера распределения напряжений по Мизесу в мягкой прослойке образцов Д20–АД1–ВТ6С с $\chi_{\text{АД1}}=0,083$ и $2a/\lambda=0,5$:
1–5 – абсолютное удлинение образца 0,4 мм; 0,8 мм; 1,2 мм; 1,6 мм; 2,0 мм соответственно (показана только прослойка из АД1, четверть образца условно вырезана)

У образца с $2a/\lambda=0,125$ рост осевой деформации образца приводит в алюминиевой прослойке к постепенному увеличению доли площади контакта с ВТ6, где эквивалентные напряжения превышают 140–160 МПа (рис. 3). Увеличение показателя $2a/\lambda$ при постоянной толщине алюминиевой прослойки приводит к резкому уменьшению областей повышенных эквивалентных напряжений, которые, в основном, локализуются вблизи свободной поверхности образца. В образце с $2a=0,5$ мм и $\lambda=0,5$ (рис. 4) даже при абсолютном удлинении образца 2,0 мм в большей части алюминиевой прослойки, примыкающей к слою ВТ6, напряжения составляли 80 МПа. Аналогичные различия наблюдаются и при пластической дефор-

Рис. 5. Развитие пластической деформации в алюминиевой прослойке по мере растяжения образца с $\chi_{\text{АД1}}=0,084$ и $2a/\lambda=0,125$:
1 – абсолютное удлинение образца 0,4 мм; 2 – 0,8 мм; 3 – 1,2 мм (слой из Д20 снизу, четверть образца условно вырезана)

Рис. 6. Развитие пластической деформации в алюминиевой прослойке по мере растяжения образца с $\chi_{\text{АД1}}=0,084$ и $2a/\lambda=0,5$:

1 – абсолютное удлинение образца 0,4 мм; 2 – 0,8 мм; 3 – 1,2 мм (слой из Д20 снизу, четверть образца условно вырезана)

мации алюминиевых прослоек с различной величиной $2a/\lambda$ (рис. 5 и 6). При более плоской волне в процессе растяжения пластическая деформация в алюминиевой прослойке развивается значительно интенсивнее, занимая большую часть ее объема.

Выводы

1. Результаты 3D моделирования осевого растяжения композита Д20–АД1–ВТ6С с волновым профилем сварного соединения при постоянной относительной толщине прослойки АД1 $\chi_{\text{АД1}} = 0,084$ с помощью пакета SIMULIA/Аbaqus показали, что степень развития напряжений и деформаций в алюминиевой прослойке во многом зависит от параметров волны (отношения $2a/\lambda$).

2. Моделирование показало, что рост $2a/\lambda$ до 0,5 для композита с волновым профилем сварного соединения приводит к увеличению на 4–5 % усилия, необходимого для сопоставимого растяжения, по сравнению с образцом с плоской границей, и к преимущественной локализации пластической деформации вблизи свободных поверхностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуревич, Л. М. Структура и микромеханические свойства в биметалле ВТ1-0+ АД1, полученном сваркой взрывом по угловой схеме / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, В. Н. Арисова, О. С. Киселев, А. Ю. Кондратьев, А. В. Полежаев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 38–42.
2. Трыков, Ю. П. Особенности деформирования сваренного взрывом титано-алюминиевого композита / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, Д. Н. Гурулев // Сварочное производство, 1999. – № 1. – С. 11–15.
3. Гуревич, Л. М. Структура и микромеханические свойства полученного сваркой взрывом биметалла ВТ1-0+ АМГ6 / Л. М. Гуревич, А. И. Богданов, В. О. Харламов, А. Г. Серов, С. Ю. Оноколов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – С. 34–38.
4. Malakhov, A. Y., Saikov, I. V., Denisov, I. V., Niyebekov, N. N. AlMg6 to Titanium and AlMg6 to Stainless Steel Weld Interface Properties after Explosive Welding // Metals. 2020. T. 10. №. 11. – С. 1500.
5. Mahmood, Y., Dai, K., Chen, P., Zhou, Q., Bhatti, A. A., Arab, A. Experimental and numerical study on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V/Al-1060 Explosive Welding // Metals. – 2019. T. 9. №. 11. – С. 1189.
6. Najwer M., Nieslony P. Microhardness and strength properties of metallic joint AA2519-AA1050-Ti6Al4V after various heat treatments // Procedia Engineering. 2016. T. 149. – С. 346–351.
7. Трыков, Ю. П. Влияние прокатки при повышенных температурах на свойства титано-алюминиевого композита, полученного сваркой взрывом / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, Д. Н. Гурулев // Сварочное производство, 1999. – № 6. – С. 6–10.
8. Galka A., Najwer M. Explosive Cladding of Titanium and Aluminium Alloys on the Example of Ti6Al4V-AA2519 Joints // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. T. 60.
9. Sniezek, L., Szachogluchowicz, I., Torzewski, J., Grzelak, K. Fatigue Cracking of AA2519-Ti6Al4V Laminate Bonded by Explosion Welding // Solid State Phenomena. – Trans Tech Publications Ltd, 2016. T. 250. – С. 182–190.
10. Гуревич, Л. М. Исследование состава локальных участков оплавленного металла в сваренном взрывом титаноалюминиевом композите / Л. М. Гуревич, О. С. Киселев, М. В. Босов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (15) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 12–15.
11. Fang, Z., Shi, C., Shi, H., Sun, Z. Influence of explosive ratio on morphological and structural properties of Ti/Al clads // Metals. 2019. T. 9. №. 2. – С. 119.
12. Gurevich, L. M., Pronichev, D. V., Bogdanov, A. I., Toan, V. Q., Hung, N. N. Structure and micromechanical properties of bimetal VT1-0+AMg6 obtained by explosion welding // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. T. 537. №. 2. – С. 022053.
13. Fronczek, D. M., Chulist, R., Litynska-Dobrzynska, L., et al. Microstructural and phase composition differences across the interfaces in Al/Ti/Al explosively welded clads // Metallurgical and Materials Transactions A. 2017. T. 48. №. 9. – С. 4154–4165.
14. Трыков, Ю. П. Свойства и работоспособность слоистых композитов / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгул. – Волгоград : РПК Политехник, 1999. – 190 с.
15. Гуревич, Л. М. Моделирование процессов деформирования слоистых титано-алюминиевых композитов

в процессе изгиба / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, В. М. Волчков, О. С. Киселев, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев, // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – С. 11–15.

16. *Гуревич, Л. М.* Моделирование поведения титано-алюминиевого композита с дефектом в мягкой прослойке / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, А. А. Голик // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – С. 43–46.

17. *Гуревич, Л. М.* Моделирование поведения титано-алюминиевого композита с волновым профилем сварного соединения / Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко, В. Або-Шакра // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (249) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 37–42.

18. *Johnson, G.R., Cook, W.H.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th Int. Symp. on Ballistics. — 1983. - P. 541-547.