ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 62-419.5:620.172.224:519.876.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-2-249-37-42

Л. М. Гуревич, В. Ф. Даненко, В. Або-Шакра

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТИТАНО-АЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА С ВОЛНОВЫМ ПРОФИЛЕМ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Проведено моделирование методом конечных элементов деформирования при растяжении титано-алюминиевого композита Д20–АД1–ВТ6С с волновым профилем сварного соединения при варьировании относительной толщины прослойки АД1. Определена относительная толщина прослойки, соответствующая началу активного деформирования алюминиевого сплава.

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

L. M. Gurevich, V. F. Danenko, V. Abo-Shakra

SIMULATION OF THE BEHAVIOR OF TITANIUM-ALUMINUM COMPOSITE WITH WAVE PROFILE OF WELDED JOINT

Volgograd State Technical University

The finite element simulation of tensile deformation of titanium-aluminum composite D20 – AD1 – VT6S was carried out. The composite had a wave profile of the welded joint at the boundaries D20 – AD1 and AD1 – VT6S. The thickness of the AD1 interlayer was varied in the simulation from 0.25 to 4 mm. The relative thickness of the interlayer corresponding to the onset of active deformation of the aluminum alloy has been determined.

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

Для соединения трудно свариваемых традиционными способами сварки плавлением разнородных металлов и сплавов (титан-алюминий, титан-сталь, алюминий-сталь и др.) широко используются переходные элементы, которые могут быть получены сваркой взрывом [1]. Надежность конструкций новой техники из разнородных материалов, работающих в сложных условиях нагружения (вибрация, повышенные и криогенные температуры, циклические нагрузки и т. д.) в значительной степени определяется конструктивной прочностью таких переходников. Получение переходников предусматривает введение промежуточных мягких прослоек, играющих роль «буфера пластичности» и значительно расширяющих диапазон технологических параметров между нижней и верхней границами свариваемости. С использованием «буфера пластичности» получены, например,

титано-алюминиевые и стале-алюминиевые композиты Д20–АД1–ВТ6С [2]. Кроме того, мягкие прослойки зачастую позволяют повысить температурно-временные условия эксплуатации, не приводящие к образованию хрупких интерметаллидов на свариваемых взрывом поверхностях разнородных металлов [3].

Закономерности изменения механических свойств композиций с мягкими прослойками во многом определяются относительной толщиной мягкой прослойки $\chi = \delta/d$, где δ – толщина мягкой прослойки, а d – поперечный размер испытываемого образца [4]. На основе предложенных О. А. Бакши, Л. М. Качановым, Т. М. Кульневич и Б. П. Пиксаевым формул для оценки прочности сварных соединений из сталей, полученных контактной сваркой или сваркой плавлением, Ю. П. Трыковым разработана классификация композиционных соединений

с различными вариантами механической неоднородности и предложены полуэмпирические методы расчета их прочности [5].

С появлением высокопроизводительной компьютерной техники начали активно развиваться компьютерные методы моделирования поведения разнородных соединений при различных вариантах нагружения, основанные на методе конечных элементов [6, 7]. В ряде работ, выполненных в Волгоградском государственном техническом университете, была проведена верификация результатов моделирования деформирования слоистых композитов на основе накопленных экспериментальных данных.

Так, для верификации компьютерной модели растяжения образца композита Д20–АД1–ВТ6С использовались [8] ранее полученные результаты испытания образцов этого композита

(модель ТУ–М–Т) [2, 9] с варьированием относительной толщины прослойки АД1 в интервале $0,03 \leq \delta \leq 1,0$. К модели ТУ–М–Т относятся соединения, у которых $\sigma_B^T \leq \sigma_T^{TY}$, где σ_B^T – предел прочности твердого слоя (в нашем случае для алюминиевого сплава Д20 $\sigma_B^T = 180$ МПа), σ_T^{TY} – предел текучести абсолютно упругого твердого тела (для титанового сплава ВТ6С $\sigma_T^{TY} = 1000$ МПа). Проведенные авторами [2] механические испытания отпущенных при 300 °С титано-алюминиевых образцов показали (рис. 1), что при $\chi_{AD1} > 0,9$ эффект контактного упрочнения отсутствует и прочность композиционного соединения определяется прочностью σ_B^M алюминиевой прослойки.

Рис. 1. Влияние относительной толщины мягкой прослойки на прочность композиции Д20–АД1–ВТ6С [2]

Проявление эффекта контактного упрочнения при $\chi_{AD1} < \chi_0$ приводит к повышению прочности соединения σ_B в соответствии с кривой, определяемой уравнением

$$\sigma_B = \sigma_B^M K_\chi \quad (1)$$

где σ_B^M – временное сопротивление металла мягкой прослойки (АД1), K_χ – коэффициент контактного упрочнения, определяемый для элементов компактного сечения по формуле

$$K_\chi = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}\chi} \quad (2)$$

В области $\chi_{AD1} < 0,39$ опытные значения прочности ложились ниже этой кривой вследствие вовлечения сплава Д20 в пластическое деформирование. Уменьшение степени упрочнения характеризуется коэффициентом реали-

зации контактного упрочнения K_p , равным отношению фактической прочности сварного соединения к теоретической [2, 9]

$$\sigma_g = \sigma_g^M \cdot K_\chi \cdot K_p \quad (3)$$

Целью настоящей работы была проверка возможности моделирования методом конечных элементов поведения титано-алюминиевого композиционного материала с мягкой прослойкой в условиях растяжения.

Поскольку во всем диапазоне χ_{AD1} титановый сплав находится в стадии упругой деформации, то титано-алюминиевую композицию авторы [2, 9] рассматривали без учета прочности титановой составляющей как модель сварного соединения с мягкой прослойкой, жестко закрепленной с одной стороны, а коэффициент механической неоднородности K_B определяли из зависимости пределов прочности мягкой

и твердой составляющих биметалла

$$K_B = \sigma_B^T / \sigma_B^M \quad (4)$$

На основе проведенной статистической обработки результатов была получена учитывающая влияние односторонней заделки уточненная формула для определения K_p [2, 5, 9], обеспечивающая удовлетворительную сходимость расчетных и опытных значений прочности

$$K_p = 1,123 - 0,123 K_B. \quad (5)$$

Опытное значение $\chi'_{AD1} = 0,08$, соответствующее условию переноса разрушения на сплав Д20, было несколько ниже расчетного по уравнению

$$\chi'_B = \frac{1}{3\sqrt{3} \left(\frac{\sigma_B^T}{\sigma_B^M} - \frac{\pi}{4} \right)}, \quad \sigma_B = \sigma_B^T \quad (6)$$

Дальнейшее снижение χ_{AD1} не изменяло прочность композиции, сохраняющейся на уровне 180 МПа.

Возможность моделирования процессов растяжения цилиндрического образца Ø6 мм трехслойного титано-алюминиевого композита Д20-АД1-ВТ6С методом конечных элементов и справедливость полученных результатов проверялась в работе [8] с использованием программного комплекса SIMULIA/Abaqus, использующего явную схему интегрирования для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов. Расчет проводился с использованием модели Мизеса. При моделировании был принят ряд допущений, уменьшающих объем вычислений:

- использовалась осевая симметрия цилиндрического тела и рассчитывались деформации в радиальном сечении;
- принималось, что границы между слоями плоские без волнообразного профиля.

Целью настоящей работы была проверка

возможности 3D моделирования методом конечных элементов поведения титано-алюминиевого композиционного материала Д20–АД1–ВТ6С с волнообразным профилем поверхностей соединения слоев в условиях растяжения.

Образцы моделируемого трехслойного титано-алюминиевого композита ВТ6-АД1- Д20 имели толщину и ширину рабочей части соответственно 6 и 10 мм.

Использовались симметричные синусоидальные волны в профилях соединений с длиной волны $\lambda = 2$ мм и величиной размаха $2a = 0,5$ мм. Для определения смены характера деформации материалов с упругой на пластическую использовался критерий Мизеса. Материалы слоев деформируемого твердого тела задавались изотропными с повышающимися пределами текучести $\sigma_{0,2}$ при росте локальной пластической деформации с применением модели Джонсона-Кука [10] для описания пластического поведения материалов. По достижении критического значения напряжения Мизеса, упрочнение материалов задавалось следующей функцией:

$$\sigma_Y = \left(A + B \cdot \varepsilon_p^n \left(1 + \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p^n}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (7)$$

где ε_p – эффективная пластическая деформация; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; A – предел текучести неупрочненного материала, B – коэффициент упрочнения при деформировании, 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 . [10]. Значения параметров уравнения Джонсона-Кука из различных литературных источников для выбранных материалов приведены в таблице. В связи с низкой скоростью деформирования (менее $0,0025 \text{ с}^{-1}$) ее влияние не учитывалось.

Коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука

Материал	Толщина, мм	Коэффициенты для модели пластичности [10]						
		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 ВТ6с	10	420,0	52	1,00	0,48	1	1940	293

Прочность связей между слоями соответствовала прочности менее прочного элемента па-

ры. При моделировании всех элементов композита использовали ячейки типа C3D10M – кон-

тинуальные трехмерные десятиузловые тетраэдры с размером стороны ячейки 0,1 мм. Выбор размера ячеек определялся степенью кривизны элементов волнообразного профиля. Толщина прослойки АД1 варьировалась от 4 ($\chi_{\text{АД1}}=0,667$) до 0,25 мм ($\chi_{\text{АД1}}=0,042$). Средние толщины слоев алюминиевого сплава Д20 и титанового сплава ВТ6С 5 мм. К свободным торцам слоев сплавов Д20 и ВТ6С прочно прикреплялись дискретные жесткие пластины, которые использовались для задания граничных условий

растяжения образца. Пластина, прикрепленная к слою алюминиевого сплава Д20, была неподвижна, а прикрепленная к титановому сплаву, перемещалась вдоль оси образца со скоростью 2 мм/с.

Полученные при моделировании кривые «эквивалентное напряжения – абсолютное удлинение образца» при растяжении образцов композита Д20–АД1–ВТ6С с различными относительными толщинами $\chi_{\text{АД1}}$ алюминиевой прослойки показаны на рис. 2.

Рис. 2. Кривые «эквивалентное напряжения – абсолютное удлинение образца» при растяжении образцов композита Д20–АД1–ВТ6С с различными относительными толщинами прослойки $\chi_{\text{АД1}}$: 1 – $\chi_{\text{АД1}}=0,041$; 2 – $\chi_{\text{АД1}}=0,083$; 3 – $\chi_{\text{АД1}}=0,167$; 4 – $\chi_{\text{АД1}}=0,333$; 5 – $\chi_{\text{АД1}}=0,5$; 6 – $\chi_{\text{АД1}}=0,667$

Форма кривых близки для всех моделируемых толщин мягкой прослойки. Уменьшение толщины прослойки приводило к росту максимальных значений эквивалентного напряжения, после которого начинается формирование шейки. Повышение прочности слоистых металлических композитов при уменьшении толщины мягких прослоек объяснялось [4, 5] эффектом контактного упрочнения, при котором развитие пластических деформаций в прослойке сдерживается работающим упруго более прочным соседним металлом. На контактных поверхностях возникают и с ростом нагрузки увеличиваются касательные напряжения, напряженное состояние в прослойке становится трехосным, неоднородным, что вызывает повышение прочностных характеристик.

Волнообразный профиль границы соединения мягкой прослойки со слоями из титанового и алюминиевого сплавов приводит к сложному характеру развития пластической де-

формации по мере растяжения образца (рис. 3).

Первоначально при удлинении образца с $\chi_{\text{АД1}}=0,167$ на 0,2 мм пластическая деформация в алюминиевой прослойке локализуется вблизи границы с титановым сплавом на свободных поверхностях призматического образца, причем максимальные значения характерны для мест контакта с выступами титановой пластины (рис. 3, а). По мере удлинения образца до 0,6 и 0,8 мм зона с высокой эквивалентной пластической деформацией постепенно захватывает практически всю алюминиевую мягкую прослойку вблизи свободной поверхности, однако в осевой части образца пластическая деформация развивается в более прочном алюминиевом сплаве. При этом максимальные значения пластической деформации по-прежнему локализуются в алюминиевой прослойке вблизи свободных поверхностей на границе выступов волнообразного соединения с титановым сплавом.

Рис. 3. Развитие пластической деформации в алюминиевой прослойке по мере растяжения образца с $\chi_{AD1}=0,167$: 1 – абсолютное удлинение образца 0,2 мм; 2 – 0,6 мм; 3 – 0,8 мм (слой из Д20 снизу, четверть образца условно вырезана)

Объем алюминиевой прослойки с $\chi_{AD1}=0,083$, в котором развиваются высокие эквивалентные напряжения по Мизесу, достаточно активно растет при абсолютном удлинении моделируемого образца до 1,0 мм, а затем интенсивность роста такого объема тормозится (рис. 4).

Рис. 4. Изменение характера распределения напряжений по Мизесу в мягкой прослойке образцов Д20–АД1–ВТ6С с $\chi_{AD1}=0,083$:

а – д – абсолютное удлинение образца 0,5 мм; 0,75 мм; 1,0 мм; 1,5 мм; 2,0 мм соответственно (показана только прослойка из АД1, четверть образца условно вырезана)

На рис. 4, где условно скрыты все элементы моделируемой системы, кроме мягкой прослойки, хорошо видны различия в уровнях напряжений по Мизесу внутренних и поверхностных слоев на всех стадиях растяжения.

Изменение толщины мягкой прослойки практически не влияет на деформацию слоя из титанового сплава, но радикально изменяет деформацию слоя из сплава Д20 (рис. 5). При значениях $\chi_{AD1} \leq 0,167$ алюминиевый сплав активно деформируется при растяжении образца, не смотря на прикрепление к свободному торцу слоя из алюминиевого сплава пластины из дискретного жесткого тела, ограничивающего возможность деформации.

Рис. 5. Изменение характера пластической деформации в образцах Д20–АД1–ВТ6С при абсолютном удлинении 2 мм образца с различными толщинами алюминиевой прослойки: а – $\chi_{AD1}=0,042$; б – $\chi_{AD1}=0,083$; в – $\chi_{AD1}=0,167$; г – $\chi_{AD1}=0,333$; д – $\chi_{AD1}=0,667$ (слой из Д20 снизу, четверть образца условно вырезана)

Выводы

1. Проведено 3D моделирование деформирования композита Д20–АД1–ВТ6С с волновым профилем сварного соединения и варьированием относительной толщины прослойки АД1 в интервале $0,042 \leq \chi_{AD1} \leq 0,667$ с помощью пакета SIMULIA/Abaqus.

2. Моделирование подтвердило, что уменьшение толщины алюминиевой прослойки приводит к росту максимальных значений эквивалентного напряжения, после которого начинается формирование шейки. Показано, что существование волнового профиля границы соединения ВТ6С –АД1 приводит первоначально к локализации пластической деформации в алюминиевой прослойке вблизи границы с титановым сплавом на свободных поверхностях призматического образца, причем максимальные значения деформации характерны для мест контакта с выступами титановой пластины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Трыков, Ю. П.* Композиционные переходники / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, Д. В. Проничев. – Волгоград : Политехник, 2007. – 328 с.
2. *Кусков, Ю. Н.* Прочность сваренных взрывом титано-алюминиевых соединений и ее расчетная оценка / Ю. Н. Кусков, В. С. Седых, Ю. П. Трыков // Сварочное производство. – 1975. – № 9. – С. 11–13.
3. *Трыков, Ю. П.* Исследование кинетики деформации и разрушения сваренных взрывом четырехслойных титаностальных композитов / Ю. П. Трыков, В. П. Белоусов, Л. М. Гуревич [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2007. – № 8. – С. 31–37.
4. *Бакиш, О. А.* Прочность при статическом растяжении сварных соединений с мягкой прослойкой / О. А. Бакиш // Сварочное производство. – 1962. – № 5. – С. 35–46.
5. *Трыков, Ю. П.* Деформация слоистых композитов : монография / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2001. – 242 с.
6. *Bate, K.-Ю.* Методы конечных элементов / К.-Ю. Бате ; пер. с англ. В. П. Шидловского ; под ред. Л. И. Турчака. – Москва : Физматлит, 2010. – 1022 с.
7. *Мишенков, Г. В.* Метод конечных элементов в курсе сопротивления материалов / Г. В. Мишенков, Ю. Н. Самогин, В. П. Чирков ; под ред. проф. В. П. Чиркова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 472 с.
8. *Гуревич, Л. М.* Моделирование методом конечных элементов поведения титаноалюминиевого композита с мягкой прослойкой / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, О. С. Киселев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 15 (118) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – Т. 8.
9. *Трыков, Ю. П.* Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов: монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун // Металлургиздат, 2004. – 230 с.
10. *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.