ТЕХНИКА, ТЕХНОЛОГИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.01:691-419.8

Д. В. Козлов, И. С. Лось

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ ТИТАН-АЛЮМИНИЙ С ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ

Аннотация. Выполнено компьютерное моделирование композиционного материала системы титан-алюминий с интерметаллическим упрочнением в условиях статического нагружения с применением пакета прикладных программ *ANSYS*. Напряжения в армированном композите в упругой области близки к напряжениям в слоистом материале.

Ключевые слова: многослойные материалы, интерметаллиды, армирование, метод конечных элементов.

Введение

Одной из актуальных задач материаловедения является задача разработки композиционных материалов, сочетающих высокие показатели прочности, пластичности и вязкости, на основе легких сплавов. Наиболее перспективный путь решения указанной проблемы заключается в разработке слоистых композиционных высокопрочных материалов на основе сплавов титана и алюминия. Известно, что механизм разрушения композиционных материалов в значительной мере отличается от механизма разрушения монометаллов, что связано со сложной конфигурацией и различием свойств компонентов композитов [1]. В монометаллических материалах разрушение происходит по вязкому или хрупкому механизмам в зависимости от состава и структуры. В слоистых материалах распространению трещины препятствуют границы раздела слоев. Снижение скорости распространения трещины достигается за счет наличия в структуре слоев с различными показателями вязкости. При статическом и динамическом воздействии на границах раздела наблюдается локальное расслоение, характер которого зависит от условий нагружения, свойств и толщины слоев композита [1–3].

Достижение высокой прочности слоистых композитов на основе легких сплавов – титана, алюминия, магния – обеспечивается подбором материалов слоев из металлов, образующих интерметаллиды, и применением комплексной технологии, которая включает этапы соединения слоев, формообразования и термического воздействия. В результате формируется структура со сплошными упрочняющими интерметаллическими слоями. Однако полученные материалы характеризуются невысокой вязкостью [4].

Разработан композиционный материал, содержащий три слоя «титан + алюминий + + титан», в котором внутренний слой из алюминия имеет перфорацию. Соединение слоев достигается сваркой взрывом. За счет перфорации получается гибрид – слоистый армированный композит, в котором создаются условия для синтеза упрочняющих интерметаллических элементов в виде локальных образований [5]. Таким образом, часть поперечного сечения композита содержит три слоя, а часть – соединение «титан + титан». На свойства разработанного материала влияют многие факторы: толщина слоев титана и алюминия, размеры, форма и геометрия расположения отверстий в перфорированном листе, толщина и состав слоя интерметаллических элементов.

В этих условиях эффективным методом изучения особенностей поведения разработанного композиционного материала при статическом и динамическом нагружении является компьютерное моделирование. Варьирование параметров моделирования – таких, как состав, геометрические размеры слоев и упрочняющих элементов, скорости и диапазон нагружения – позволяет осуществлять поиск рациональных решений с наименьшими затратами.

Целью настоящей работы является изучение напряженно-деформированного состояния в упругой области разработанного композиционного материала системы титан-алюминий с локальными интерметаллическими элементами в сравнении со слоистым материалом со сплошным интерметаллическим слоем.

Материалы и методы

По технологии сварки взрывом сварены листовые полуфабрикаты из титана марки ВТ1-0 толщиной 2 мм и алюминиевого сплава марки АМг5М толщиной 1 мм. Использована схема с параллельным расположением элементов. Перфорация в среднем листе имела шахматное расположение в виде отверстий диаметром 10 мм и межосевым расстоянием 20 мм [6, 7]. Такая конфигурация в наибольшей степени обеспечивала перераспределение внутренних напряжений и создание условий для анизотропии свойств. На рис. 1 показана макроструктура композиционного материала в поперечном направлении после сварки взрывом.



Рис. 1. Макроструктура композиционного материала:
1 – титан ВТ1-0; *2* – алюминий АМг5М

Методом рентгеноспектрального анализа установлено, что при термическом воздействии на межслойной границе ВТ1-0 + АМг5М формируется преимущественно соединение $TiAl_3$ в виде слоя толщиной 90–100 мкм [8].

В табл. 1 представлены физико-механические характеристики компонентов композиционного материала [3].

Таблица 1

Физико-механические характеристики компонентов

Материал	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Модуль упругости *E*, ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Плотность ρ, кг/м³
ВТ1-0	345,0	220,0	105,0	0,34	4510
АМг5М	275,0	205,0	70,0	0,33	2690
$TiAl_3$	1200,0	980,0	235,0	0,17	3300

Расчет напряженно-деформированного состояния композиционных материалов осуществляли в программном комплексе *ANSYS* с применением решателя *Mechanical APDL*. В *ANSYS* используется модульная интерактивная среда *Workbench*. Основной функцией данной подсистемы является упрощение и ускорение постановки и решения задачи за счет унификации модулей, таких, как *Mechanical APDL*, *LS-DYNA*, *Autodyn*. Это

позволяет производить расчеты механики твердого тела с учетом нелинейности свойств материалов, пластичности и контактного взаимодействия, решать задачи нелинейных динамических процессов в одной платформе [9].

Для построения моделей слоистого армированного и слоистого материалов использовали метод конечных элементов. Расчет выполняли со следующими допущениями:

– задача решается в двумерной проекции;
– поведение материалов ограничивается упругой областью;
– геометрия материала с локальным расположением интерметаллидов упрощена;
– гравитация отсутствует;
– критерии разрушения отсутствуют;
– присутствует только интерметаллид $TiAl_3$;
– температурные эффекты не учитываются.

На рис. 2, 3 представлена геометрия образцов с локальным расположением интерметаллидов и со сплошным слоем интерметаллидов соответственно.

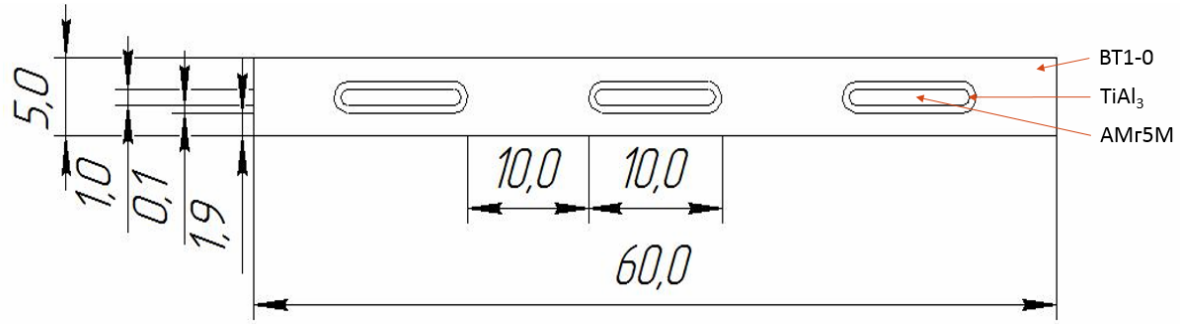


Рис. 2. Геометрия образца с локальным расположением интерметаллидов

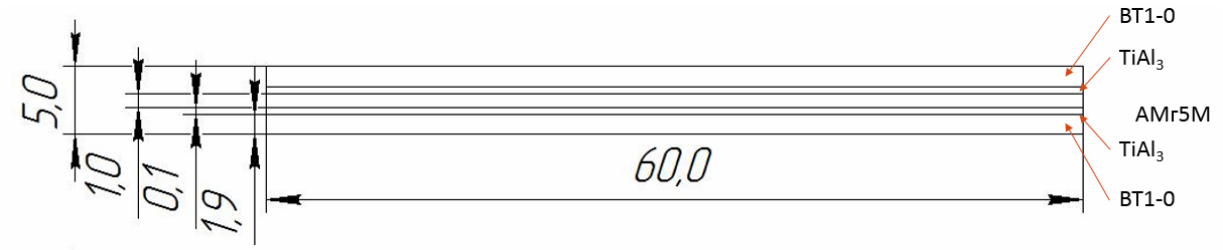


Рис. 3. Геометрия образца со сплошным расположением интерметаллидов

Сетки для образцов обоих видов имели следующие размеры: в зонах сплавов ВТ1-0 и АМг5М размер элемента составлял 0,1 мм, в зоне интерметаллидов – 0,0125 мм. Количество узлов модели образца с локальным расположением интерметаллидов составляло 129800, модели образца со сплошным расположением интерметаллидов – 202300.

Результаты и обсуждение

Нагружение образцов длиной 60 мм проводили путем приложения сосредоточенной нагрузки по центру. Образцы имели шарнирное закрепление. На рис. 4 представлена схема нагружения образцов. Критерием выбора абсолютного значения нагрузки являлось достижение напряжений, сопоставимых с пределом текучести в основном элементе композиционных материалов – сплаве ВТ1-0. Предварительные расчеты проводили при варьировании нагрузки в диапазоне 10–12 МПа.

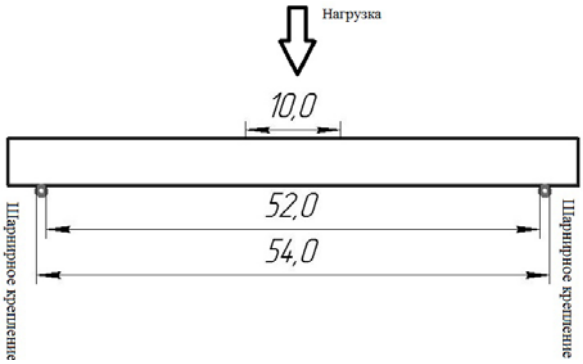


Рис. 4. Схема нагружения образца

В результате расчетов получены эпюры распределения напряжений и общего перемещения при нагрузке 11 МПа, представленные на рис. 5–8. На рис. 5, 6 приведены эпюры общего перемещения образцов с локальным расположением интерметаллидов и со сплошным расположением интерметаллидов соответственно. На рис. 7, 8 представлены эпюры распределения эквивалентных напряжений в указанных образцах.

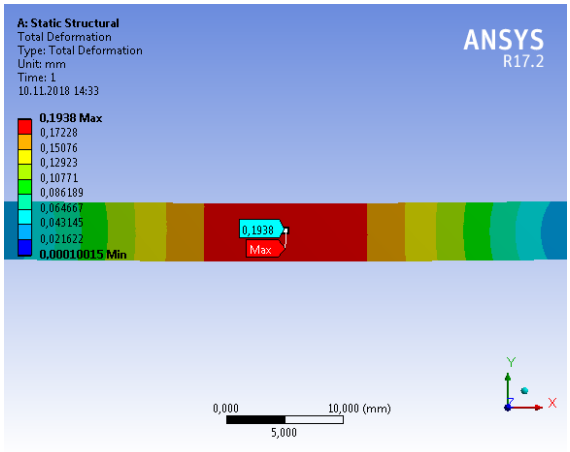


Рис. 5. Эпюра распределения общего перемещения образца
с локальным расположением интерметаллидов

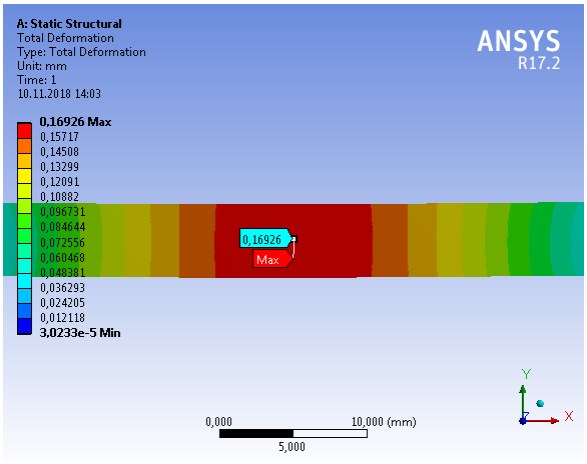


Рис. 6. Эпюра распределения общего перемещения образца
со сплошным расположением интерметаллидов

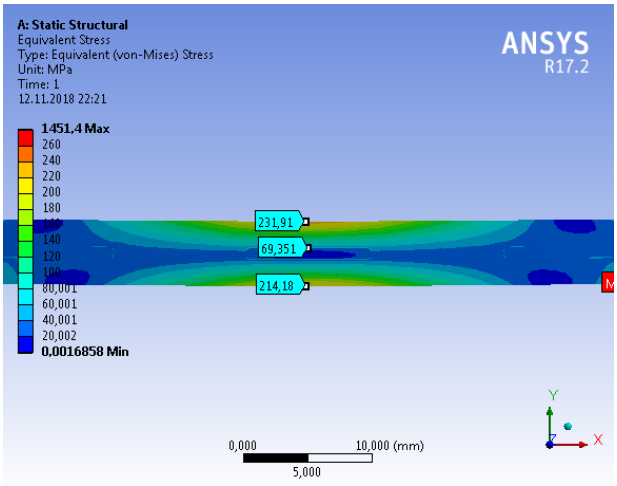


Рис. 7. Эпюра распределения эквивалентных напряжений
в образце с локальным расположением интерметаллидов

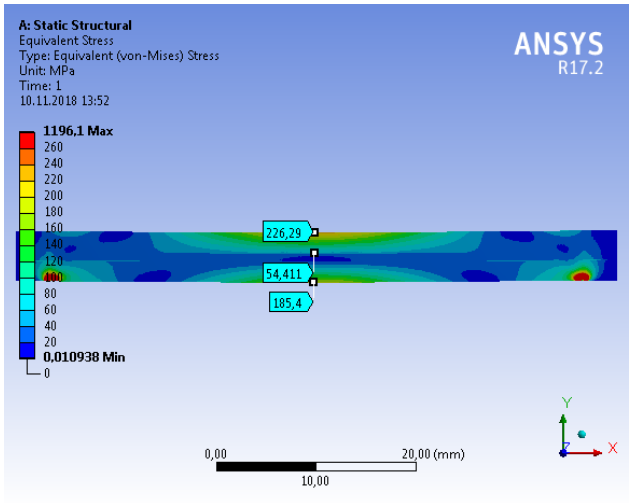


Рис. 8. Эпюра распределения эквивалентных напряжений
в образце со сплошным расположением интерметаллидов

Анализ эпюр образцов с локальным и со сплошным расположением интерметаллидов показал, что максимальные перемещения (общий прогиб) в обоих образцах наблюдались в зоне приложения нагрузки. При этом перемещения в образце с локальным расположением интерметаллидов (общий прогиб) – на 15 % выше. Сравнение эпюр эквивалентных напряжений позволило сделать вывод о том, что при приложении нагрузки в зонах сжатия и растяжения достигались напряжения, сопоставимые с пределом текучести сплава ВТ1-0 (220 МПа). Так, эквивалентные напряжения в зонах сжатия образцов с локальным и со сплошным расположением интерметаллидов составили 231,9 МПа и 226,6 МПа соответственно. Расхождение значений не превышало 16 %.

В целом эпюры эквивалентных напряжений и общих перемещений весьма схожи, что объясняется близким поведением материалов в упругой области. Дальнейшее исследование напряженно-деформированного состояния должно включать расчет напряженно-деформированного состояния в области пластической деформации.

Выводы

Построены модели композиционных слоистых материалов с локальным и сплошным расположением интерметаллидов с применением программного комплекса *ANSYS*. Выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния в упругой области для обоих материалов. Установлено, что сплошность упрочняющей интерметаллической прослойки незначительно влияет на значения эквивалентных напряжений и общих перемещений.

Сформулирована задача дальнейшего этапа исследований – изучение поведения композиционных слоистых материалов с локальным и сплошным расположением интерметаллидов при нелинейном поведении материалов в условиях статического и динамического нагружения.

Авторы статьи выражают благодарность д.т.н., профессору, заведующему кафедрой «Теоретическая и прикладная механика и графика» Муйземнеку А. Ю.

Библиографический список

1. Kenneth, S. V. Synthetic Multifunctional Metallic-Intermetallic Laminate Composites / S. V. Kenneth // JOM. – Vol. 57 (3). – UC San Diego 2005-03-01. – P. 25–31.

2. Nesvadba, P. Explosive welding for preparation of multilayer materials. Shock-assisted synthesis and modification of materials / P. Nesvadba. – Moscow : TORUS PRESS Ltd, 2006. – P. 82–92.

3. Павлюкова, Д. В. Структура и механические свойства слоистых материалов на основе титана и алюминия по технологии сварки взрывом и дополнительной термической обработки : автореф. дис. … канд. техн. наук / Павлюкова Д. В. – Новосибирск, 2011. – 20 с.

4. Трыков, Ю. П. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгунов. – М. : Металлургиздат, 2004. – 230 с.

5. Пат. 2522505 Российская Федерация, МКИ B32B7/04, B32B15/0, B23K20/08. Способ получения композиционного материала / Розен А. Е., Крюков Д. Б., Кирин Е. М., Гуськов М. С., Хорин А. В., Усатый С. Г., Любомирова Н. А. ; заявитель и патентообладатель: общество с ограниченной ответственностью Инженерно-технологический центр «Сварка». – Дата поступл.: 26.04.2013 ; дата регистрации: 20.05.2014.

6. Крюков, Д. Б. Особенности новых схем армирования композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением / Д. Б. Крюков, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов, Д. В. Козлов // Известия Волгоградского ГТУ. – 2016. – № 10 (189). – С. 72–75.

7. Первухин, Л. Б. Металлические композиционные материалы, армированные интерметаллическими упрочняющими элементами / Л. Б. Первухин, А. Е. Розен, Д. Б. Крюков, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов // Металлург. –2015. – № 10. – С. 74–77.

8. Гуськов, М. С. Создание высокопрочного композиционного материала титан-алюминий с перфорированным интерметаллическим слоем и оксидо-керамическим покрытием : дис. … канд. техн. наук : 05.16.09 / Гуськов М. С. – Пенза, 2015. – 151 с.

9. Программные продукты ANSYS. – URL: https://www.cadfem-cis.ru

Козлов Дмитрий Вячеславович, магистрант, Пензенский государственный университет.
E-mail: kozlovdiman_je@yahoo.com

Лось Ирина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение», Пензенский государственный университет.
E-mail: silverelk@yandex.ru

УДК 621.01:691-419.8

Козлов, Д. В.

Расчет напряженно-деформированного состояния композиционного материала системы титан-алюминий с интерметаллическим упрочнением / Д. В. Козлов, И. С. Лось // Вестник Пензенского государственного университета. – 2018. – № 3 (23). – С. 82–87.