УДК 669; 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-81-86

*А. Ю. Муйземнек, д-р техн. наук, Д. В. Козлов, аспирант, М. С. Гуськов, канд. техн. наук,
А. В. Хорин, канд. техн. наук, В. М. Батрашов, канд. техн. наук,
А. Д. Гатаулин, магистрант, А. А. Симаков, магистрант*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Пензенский государственный университет, г. Пенза, suralab@yandex.ru

В работе указаны технологические особенности получения композита системы Ti-Al. Представлены исследования по изучению особенностей структуры и механических свойств композиционного материала, упрочненного интерметаллическими элементами.

Ключевые слова: сварка взрывом, композиционный материал, интерметаллиды, компьютерное моделирование

A. Yu. Muizemnek, D. V. Kozlov, M. S. Gus'kov, A. V. Khorin, V. M. Batrashov, A. D. Gataulin, A. A. Simakov

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A LAYERED COMPOSITE MATERIAL BY EXPLOSION WELDING

Penza State University, Penza, suralab@yandex.ru

The paper indicates the technological features of obtaining a composite of the Ti-Al system. Investigations on the study of structural features and mechanical properties of a composite material reinforced with intermetallic elements are presented.

Keywords: explosion welding, composite material, intermetallic compounds, computer simulation

Слоистые интерметаллические материалы (СИК) – один из перспективных видов композиционных материалов. Качественное изменение физико-механических свойств в таких материалах достигается за счет формирования в них прослоек интерметаллических соединений. При этом изменение свойств зависит от свойств синтезируемых интерметаллидов, их процентного содержания в композите и характера распределения. Одной из основных систем металлов, применяющихся для создания СИК является система титан-алюминий. Интерметаллиды на основе титана и алюминия обладают повышенной хрупкостью и малой пластичностью. Им свойственны низкие значения напряжений при разрушении при изгибе и сжатии. Так, в работе [1] выявлено, что напряжение разрушения интерметаллического соединения $TiAl_3$ при сжатии составило 345 МПа. Формирование прочных и хрупких интерметаллических прослоек в таких материалах

способствует повышению прочности и модуля упругости, однако значительно падает пластичность материала, особенно при воздействии изгибающих нагрузок. Становится актуальным вопрос изменения характера распределения интерметаллидов в композиционном материале и технологической реализации данного вопроса. В данной работе рассматривается способ получения композита системы Ti-Al, армированного не сплошной интерметаллической прослойкой и методы и возможность прогнозирования физико-механических свойств.

Технологические особенности получения композиционного материала и прогнозирование физико-механических характеристик

Исследуемый композиционный материал состоит из трех слоев – внешние слои из технически чистого титана марки ВТ1-0, и внутреннего слоя из алюминия АД1. Особенности промежуточной алюминиевой

пластины заключается в наличии сквозных перфораций, выполненных равномерно по всей плоскости листа. Форма каналов коническая, распределение каналов – каналы с противоположно-направленной конусностью в соседних каналах, причем каналы с однонаправленной конусностью расположены в шахматном порядке. Схематично данный композиционный материал представлен на рис. 1.

алюминиевой пластине сквозных каналов, при проведении процесса сварки взрывом, обеспечивается проникновение металла плакирующего листа сквозь алюминиевый слой и прочное соединения с металлом основы. Коническая форма перфораций и их выполнение с противоположной направленностью значительно снижается напряжения, возникающие при сварке взрывом.

Были установлены рациональные пара-

Рис. 1. Схема исследуемого слоистого композиционного материала:
1 – ВТ1-0; 2 – перфорации; 3 – АД1

При получении композита на завышенных скоростях детонации на границе соединения материалов происходит локальное оплавление с образованием интерметаллида входящего в систему Ti-Al. Если данные оплавления смогут сформировать равномерно распределенный слой на границе раздела двух материалов, то это приведет к повышению модуля упругости композиционного материала и к снижению его пластических свойств и существенному ограничению последующих технологических операций.

Благодаря наличию в промежуточной

метры сварки, при которых обеспечивается качественное соединение материалов: скорость точки контакта от 2063 до 2426 м/с, скорость соударения от 412 до 477 м/с [2].

Синтез интерметаллической прослойки осуществляется термической обработкой, однако образование интерметаллидов возможно и на стадии сварки взрывом. Рентгеноспектральным и металлографическим анализами установлено, что при форсированных режимах наблюдается наличие интерметаллида $TiAl_2$ при этом повышается временное сопротивление. Толщина

Рис. 2. Микроструктура зоны соединения металла-основы и перфорирующего элемента с дефектом (x100)

Рис. 3. Кинетика роста интерметаллической прослойки

прослойки интерметаллидов составляет 3-5 мкм. Однако стоит отметить, что при форсированных режимах образуются дефекты в зоне соединения металла-основы и перфорирующего элемента (рис. 2).

Дальнейшими операциями являются прокатка композиционного материала и термическая обработка с целью синтеза интерметаллических соединений на границе соединений титана и алюминия. Важной задачей является выбор рациональных режимов термической обработки, при которых возможно получить необходимый комплекс физико-механических свойств. На рис. 3 представлена кинетика образования интер-

металлида на межслойной границе в зависимости от режимов термической обработки [3]. Показано, что выдержка в течение 11520 минут при температуре 630 °C позволяет формировать интерметаллическую прослойку толщиной до 100 мкм. Увеличение температурного режима синтеза до 670 °C приводит к расплавлению алюминиевой составляющей и разрушению композиционного материала.

В работе [4] исследование химического состава интерметаллической прослойки выявило, что образующийся интерметаллид соответствует фазе $TiAl_3$.

Синтез интерметаллической прослойки в

Рис. 4. Эпюра распределения коэффициента запаса прочности исследуемой модели композиционного материала

Рис. 5. Зависимость прочности композиционного материала от толщины интерметаллической прослойки

Рис. 6. Схема исследуемого слоистого композиционного материала:
1 – ВТ1-0; 2 – перфорации; 3 – АД1

процессе термической обработки позволяет повысить прочностные показатели композита системы Ti-Al. В работах [2, 5, 6] было проведено прогнозирование физико-механических свойств композиционного материала методом компьютерного моделирования в программе *SolidWorks* с интегрированным в него модулем *CosmosWorks*. В упомянутых работах на трехмерной модели проводился прогноз прочности исследуемого композиционного материала при различных статических нагрузках (рис. 4). При этом учет пластических деформаций не проводился.

Результаты компьютерного моделирования описанных расходились с результатами

реальных экспериментов на 15 %. Оценку прочностных характеристик производили испытанием на статическое растяжение согласно ГОСТ 1497-84, образцы вырезались в перпендикулярных направлениях, что позволяет судить об анизотропии механических свойств исследуемого материала. На основании результатов механических испытаний составлены зависимости временного сопротивления композиционного материала от толщины интерметаллической прослойки (рис. 5).

Таким образом, интенсивность роста интерметаллидов напрямую зависит от температуры и времени выдержки. При этом при достижении толщины прослойки 100 мкм её

Конфигурации схем расчета

Схема эксперимента	1	2	3	4
a , мм	9,8	11,8	13,8	14,8

Рис. 7. Эпюра распределения коэффициента запаса прочности для интерметаллической прослойки в 4-й схеме расчета

Рис. 8. Эпюра распределения коэффициента запаса прочности для титана и алюминия в 4-й схеме расчета

Рис. 9. Зависимость угла прогиба от расстояния между интерметаллическими прослойками

рост прекращается. Максимальная прочность достигается при толщине прослойки порядка 100 мкм, временное сопротивление при этом составляет от 620 до 640 МПа.

В программном комплексе ANSYS проведено компьютерное моделирование пластичности композита системы Ti-Al при воздействии на него изгибающих нагрузок. Из-

меняемым параметром a моделирования являлось расстояние между интерметаллическими прослойками. Схемы нагружения композита соответствуют схемам испытания на изгиб по ГОСТ 14019-2003 [7], но с некоторыми допущениями, диаметр оправки выбран 10,0 мм (рис. 6). В таблице представлены конфигурации схем расчета.

Критерием прочности для материалов титан и алюминий была выбрана гипотеза Губера-Мизеса-Генки, а для интерметаллических прослоек гипотеза Мора-Кулона. В работах [5, 6] показано, что разрушение материала происходит при коэффициенте запаса прочности 0,7, что и было принято критерием разрушения в данной работе. Эпюры распределения коэффициента запаса прочности для 4 эксперимента представлены на рис. 7 и 8.

Максимальный угол прогиба без интерметаллических прослоек, по данным [2] составляет более 120 градусов. На основании серии из 4 расчетов был составлен график (рис. 9), показывающий зависимость максимального угла прогиба от расстояния между интерметаллическими прослойками.

Установлено, что зависимость между углом прогиба и расстоянием между интерметаллическими прослойками нелинейная и имеет ярко выраженный параболический характер.

Заключение

В работе были рассмотрены основные технологические аспекты получения СИК по новой схеме армирования. Показано, что возможно образование интерметаллической прослойки, повышающие физико-механические свойства на стадии соединения слоев сваркой взрывом, одна для этого необходимы форсирующие режимы, которые приводят к образованию различных дефектов. Наиболее рациональным является соединение слоев на оптимальных режимах, исключающих появление интерметаллидов и последующая термическая обработка композита с целью синтеза интерметаллической прослойки. Подтверждено при помощи компьютерного моделирования и экспериментально, что толщина интерметалличе-

ской прослойки напрямую влияет на временное сопротивление композиционного материала, максимальная прочность составляет от 620 до 640 МПа при толщине прослойки, равной 100 мкм. Применяемая новая схема армирования позволяет варьировать различные геометрические параметры с целью изменения физико-механических свойств, в частности, при помощи компьютерного моделирования рассмотрена возможность повышения пластичности за счет изменения расстояния между интерметаллическими прослойками.

Библиографический список

1. Milman, Yu. V. Mechanical behavior of Al₃Ti intermetallics and L12 phases on its basis / Yu. V. Milman, D. B. Miracle, S. I. Chugunova // *Intermetallics*. – 2001. – Vol. 9. – Pp. 839-845.
2. Гуськов М. С. Создание высокопрочного композиционного материала титан-алюминий с перфорированным интерметаллическим слоем и оксидо-керамическим покрытием. – дис. ... канд. тех. наук. – Пенза. – 2015. – 151 с.
3. Крюков, Д. Б. Исследование влияния термической обработки на структурные превращения и физико-механические свойства композиционного материала титан-алюминий / Д. Б. Крюков, М. С. Гуськов, Д. С. Гуськов // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2016. – № 1 (17) – С. 290-298.
4. Жоров, А. Н. Формирование структуры и микромеханических свойств сваренных взрывом титано-алюминиевых слоистых металлических и интерметаллидных композитов. – автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград: ВолгГТУ. – 2006. – 20 с.
5. Крюков, Д. Б. Разработка модели нового композиционного армированного материала системы титан-алюминий в программе *SolidWorks* / Д. Б. Крюков, А. В. Прыщак, М. С. Гуськов. // *Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM, сборник статей VIII межд. науч. - практ. конф.* – 2014. – С. 45-49.
6. Крюков, Д. Б. Исследование влияния конфигурации упрочняющих элементов на прочностные свойства моделей композиционных материалов системы титан-алюминий / Д. Б. Крюков, А. В. Прыщак, М. С. Гуськов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, Пенз. гос. ун-т. – 2014. – С. 112-119.
7. Материалы металлические. Метод испытаний на изгиб: ГОСТ 14019-2003. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.