

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ СИСТЕМЫ Ti-Al, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

ЛЮ ЮАНЬСЮНЬ^{1,3}, ХУ ЧЖЭНЬФЭН¹, Ж.Г. КОВАЛЕВСКАЯ^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Шеньянский политехнический университет

E-mail: liuyuanx110@163.com

Интерметаллическое соединение титан-алюминий, полученное с помощью технологии аддитивного производства электронно-лучевой технологией [1,2], стало актуальной темой исследований в области аддитивного производства в настоящее время благодаря своей превосходной низкой плотности, высокой прочности и отличным физико-химическим свойствам. Он широко используется в аэрокосмической и автомобильной промышленности для изготовления лопаток турбин, устойчивых к высоким температурам.

Недавние исследования новых высокотемпературных конструкционных материалов повысили интерес к интерметаллидам, так как они демонстрируют хорошие высокотемпературные свойства из-за своего дальнего порядка. Упорядоченная структура снижает подвижность дислокаций и более эффективно предотвращает процессы диффузии при повышенных температурах [3]. Интерметаллиды обладают прекрасными свойствами: высокая прочность, которая не деградирует с возрастанием температуры; аномальная зависимость предела текучести, наблюдаемая в некоторых интерметаллидах; низкая и очень низкая плотность интерметаллидов на основе Al, Ti, Si, что приводит к высокому отношению прочности к плотности; высокие модули упругости, причем с ростом температуры они уменьшаются медленнее, чем в разупорядоченных сплавах; высокая стойкость к окислению, которую имеют интерметаллиды с высоким содержанием Al; низкие коэффициенты диффузии и в результате более низкая скорость ползучести, рекристаллизации и коррозии [1-4].

Традиционно получения сплава включает индукционную плавку, вакуумную дуговую переплавку и плазменную плавку. Далее применяются традиционные методы производства заготовок, такие как литье, ковка или порошковая металлургия, но все они сопровождаются трудностями, требующими преодоления [5,6].

Реальные технологические маршруты промышленного производства включают литье слитков, штамповку и ковку, производство листов горячей прокаткой, переработку порошковой металлургии, а также центробежное литье или литье по выплавляемым моделям [5,7]

Аддитивное производство – это создание тела объектов за счет наращивания необходимого материала, а не снятия лишнего. Термин «аддитивное производство» описывает технологию по формированию объектов за счет укладки последовательных слоев материала. Детали, изготовленные аддитивным методом, могут применяться на первом этапе производства для изготовления опытных образцов – быстрое прототипирование и на втором этапе производства готовых изделий – быстрое производство [8-10].

Электронно-лучевая плавка или electron beam melting (EBM) широко используется как аддитивный метод получения металлических изделий из титановых сплавов [9]. Поскольку титан химически активный металл, электронно-лучевые технологии представляются очень перспективными для разработки технологии прототипирования деталей из сплавов титана. Детали, полученные EBM, отличаются высокой плотностью и, соответственно, высокими прочностными характеристиками [8].

Для изготовления интерметаллических соединений использовались различные уровни тока при 6.5мА 8.0мА и 9.5мА, а одно- и многотрековые образцы были получены методом ЕВМ в вакуумной среде. Длина проволоки в электронном пучке также изменяется при том же уровне тока, 1,5 мм, 2,0 мм и 3,0 мм соответственно.

Используя программу ImageJ, были рассчитаны размеры площадей интерметаллических соединений на изображениях под электронным микроскопом при различных токах и при различных длинах. Результаты приведены в таблице 1,2.

Таблица 1 – Значение площади интерметаллида при разных силах тока

Сила тока, мА	6.5	8.0	9.5
Площадь интерметаллида мм ²	0.6	1.6	3.0

Таблица 2 – Площадь интерметаллида при разных длинах проволоки в электронном пучке

Длина проволоки в электронном пучке, мм	1.5	2.0	3.0
Площадь интерметаллида, мм ²	0.75	1.5	2.3

Измерения площади интерметаллического соединения показывают, что площадь увеличивается при увеличении силы тока, а также увеличивается при увеличении длины проволоки, но скорость увеличения значительно снижается при увеличении длины от 2 мм до 3 мм.

Для исследования влияния экспериментальных параметров на физико-механические свойства образцов были измерены микротвердость и модуль упругости образцов. Каждая контрольная точка находилась на расстоянии 50 нм друг от друга. Результаты исследования микротвердости и модуля упругости представлены в рисунке 1.

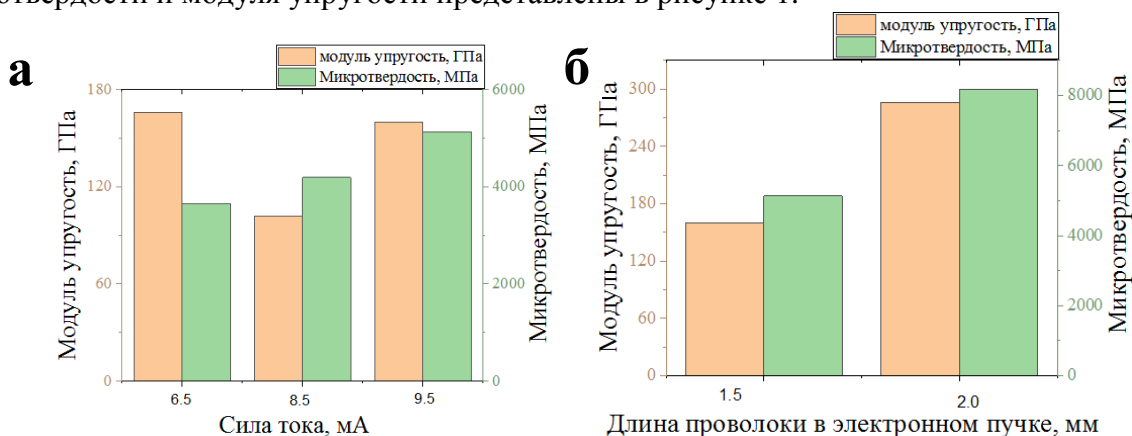


Рисунок 1 – Зависимость микротвердости и модули упругости гистограмма, полученных средних значений (в) в слое интерметаллида зависимости от силы тока (а) и длины проволоки в электронном пучке (б)

В данной статье описывается возможность использования технологии ЕВМ для производства интерметаллических соединений титана с алюминием. Исследовано влияние экспериментальных параметров на физико-механические свойства образцов. Было установлено, что наибольшее содержание интерметаллических соединений в образцах, полученных при уровнях тока 8,0 мА, 9,5 мА и длине проволоки 2 мм, а также увеличение микротвердости по сравнению со всеми другими параметрами.

Список литературы

1. Liu C.T., Stiegler J.O., Froes F.H. Ordered Intermetallics. // ASM International, Metals

- Handbook, Tenth Edition. – 1990. – V.2. – pp. 913-942
2. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni_3Al и $TiAl$: микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург: УрО РАН, – 2002. – 359 с.
 3. Sauthoff G. Intermetallics // G. Sauthoff. – Weinheim: VCH – 1995. – 165 pp.
 4. Лазуренко Д.В. Структура и свойства слоистых композиционных материалов с интерметаллидной составляющей. Специальность 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении) Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск – 2020.
 5. Григоренко Г.С., Григоренко Г.М., Задорожнюк О.М. Интерметаллиды титана. Особенности, свойства, применение (Обзор) // Современная электрометаллургия – 2017 - № 3 (128). – 51-58 с. <https://doi.org/10.15407/sem2017.03.08>
 6. Recina V. Mechanical Properties of Gamma Titanium Aluminides. // Göteborg: Chalmers University of Technology. - 2000.
 7. Wisbey A., Kearns M.W., Partridge P.G. Superplastic deformation in Ti alloy IMI 834 and alpha-2 titanium aluminide // Materials Letters. – 1994. – V. 21. – PP. 31-39. [https://doi.org/10.1016/0167-577X\(94\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0167-577X(94)90120-1)
 8. Imaev R.M., Imaev V.M., Khismatullin T.G. et al. New approaches to designing alloys based on γ -TiAl + α_2 -Ti₃Al phases // Phys. Metals Metallogr. – 2006. – V. 102. – PP. 105-113. <https://doi.org/10.1134/S0031918X06070155>
 9. Вальтер А.В. Технологии аддитивного формообразования: учебное пособие – Томск: Изд-во ТПУ, 2013.– 174 с.
 10. Чжу Л.Ю., Бай П.К., Чжу Ц.М. Быстрое создание прототипов и технология производства присадок. // Пекин: Пресса национальной оборонной промышленности. - 2003. (оригинал <http://www.opticsjournal.net/Articles/abstract?aid=OJ090525000070jQmSpV>)