

ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА С ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ И УМЕРЕННОЙ ЖАРОПРОЧНОСТЬЮ

И.С. Желтякова*, М.И. Карпов, В.П. Коржов

Институт физики твердого тела Российской академии наук,
ул. Академика Осипьяна 2, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия

*e-mail: terekhova@issp.ac.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы получения слоистых композитов систем Ti-Al и Ti-Al-Me (здесь Me представляют Mo, Nb и Zr элементы), формирования структуры и исследования механических свойств данных композитов. Исследование микроструктуры образцов композитов показало, что они состоят из твердого раствора алюминия в титане и интерметаллических слоев Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_2$ и $TiAl_3$. Результаты кратковременных испытаний на 3-х точечный изгиб показали, что средние значения предела прочности нелегированного композита находятся на уровне 820 МПа и 993 МПа, а легированного композита – 952 МПа и 1352 МПа при температурах 20 и 700 °C, соответственно.

1. Введение

Сплавы системы Ti-Al имеют высокую удельную прочность, хорошие антакоррозионные свойства и жаропрочность при температурах до ~ 850 °C. Преимущество титан – алюминиевых сплавов – это незначительный удельный вес и, вследствие этого, небольшие центробежные удельные напряжения. Высокую удельную прочность этих сплавов обуславливает алюминий. А с увеличением его содержания повышается жаропрочность, сопротивление ползучести и модуль упругости сплавов [1-4] без заметного увеличения их стоимости, так как алюминий очень доступен, благодаря широкому распространению в природе. Поэтому сплавы на основе титана с алюминием считаются наиболее перспективным объектом в реактивном двигателестроении. Но низкая температура плавления, равная ~1500 °C, ограничивает их применение камерой низкого давления турбины и статическими деталями двигателя. В проблеме дальнейшего увеличения жаропрочности данных сплавов важной задачей является поиск новых систем легирования, позволяющих повысить эксплуатационные характеристики. К наиболее распространенным легирующим элементам, повышающим сопротивление ползучести при высоких температурах, для титановых сплавов являются молибден, цирконий и ниобий [17]. Кроме того, создание композитов с уникальным сочетанием физико-механических свойств возможно за счет управления их структурой. Перспективными считаются искусственные многослойные композиты.

Особенностью рассматриваемых сплавов является наличие в их структуре интерметаллических фаз титана с алюминием Ti_3Al и $TiAl$ [5] - прочных при умеренных до (900 - 950 °C) температурах и, тем самым, обеспечивающих им

жаропрочность, но хрупких в нормальных условиях. Вторая основная структурная составляющая представлена твердым раствором на основе титана - это пластичная фаза, ответственная в сплаве за трещиностойкость.

Сплавы, полученные по плавильным технологиям с использованием методов направленной кристаллизации, характеризуются слоистыми структурами [6-9, 16], представляющими совокупность колоний с чередующимися прослойками из интерметаллической фазы и твердого раствора. В литых сплавах такая структура формируется естественным образом.

Цель данной работы заключается в искусственном создании слоистой структуры с использованием диффузионной сварки (ДС) многослойных пакетов, собранных из фольг титанового сплава и алюминия. Предлагаемый способ первоначально был опробован на системе Ni-Al. В зависимости от соотношения t_{Ni}/t_{Al} , где t - соответственно толщины Ni- и Al-фольг, были получены многослойные композиты из жаропрочного соединения Ni_3Al и твердого раствора алюминия в Ni [11, 12]. Затем он был подтвержден для композитов Nb/Al и Ti/Al [10, 13-15]. Эта работа является продолжением начатых исследований.

2. Методика эксперимента

В качестве метода изготовления материала была выбрана диффузионная сварка многослойных пакетов под давлением в 2 этапа, собранных из чередующихся фольг сплавов Ti-Me (здесь Me представляют Mo, Nb и Zr элементы), и Al-Si. Сплавление компонентов первого сплава проводили методом бестигельной зонной плавки во взвешенном состоянии в атмосфере аргона высокой чистоты, что обеспечило равномерное распределение элементов по всему объему. Выплавленную таким способом заготовку, цилиндр диаметром 10 и длиной 50 мм, подвергали дальнейшим деформациям. Ti-Me фольги были получены с помощью чередования холодной прокатки и термических отжигов для устранения внутренних напряжений. Методом вакуумной индукционной плавки выплавляли второй сплав (с содержанием 2 вес.% Si), который в начале докатывали в горячую, а после в холодную до требуемой толщины. Собранные многослойные пакеты из фольг Ti-Me сплава толщиной 145 и 170 мкм и фольг Al-Si сплава толщиной 40 и 65 мкм были сварены на 1 этапе при 500 °C и на 2 этапе при 1020 °C методом диффузионной сварки.

Режим ДС пакетов Ti/Al предусматривал два этапа. Температура на первом этапе не превышала температуру плавления алюминия и составляла около 600 °C. Слои алюминия полностью или частично переводились в интерметаллическое соединение с максимальным содержанием алюминия - $TiAl_3$. На втором этапе температура могла варьироваться в интервале 950-1250 °C.

Преимущества предложенного способа получения жаропрочных материалов со слоистой структурой:

- первоначально задаваемая направленность структуры;
- строгое соблюдение чередования прочной интерметаллической фазы и относительно пластичного твердого раствора - регулирование масштабных параметров слоистой структуры;
- отсутствие необходимости в литье или выплавке с использованием тиглей из инертных и огнеупорных керамик;
- возможность получения изделий нужной формы, используя фигурные пресс-формы.

Из полученного композита на установке электроэрозионной резки вырезали образцы для исследования структуры и механических испытаний. Для исследования микроструктуры композитов в отраженных электронах и рентгеноспектрального анализа был использован сканирующий электронный микроскоп Tescan Vega II XMU.

Испытания образцов композитов, размером $2 \times 2 \times 15$ мм на кратковременную прочность были проведены при 20 и 600, 700, 800 °C в атмосфере высокочистого аргона по схеме трехточечного изгиба в вакуумной камере установки INSTRON в атмосфере аргона высокой чистоты.

3. Краткое обсуждение

Морфологическая структура нелегированного композита Ti/Al-Si после пакетной прокатки, последующей ДС и отжига 850 °C в течение 10 часов показана на Рис. 1а. Видно, что на месте Al-прослоек образовались диффузионные слои, каждый из которых состоит из 2-х интерметаллических слоёв Ti_3Al , 2-х слоёв TiAl и одного внутреннего TiAl_2 -слоя. Ti-слои после ДС превращались в твёрдый раствор алюминия в титане $\text{Ti}(\text{Al})$. Средняя толщина твердого раствора и интерметаллических фаз варьируется от 20 до 25 мкм и от 45 до 47 мкм, соответственно.

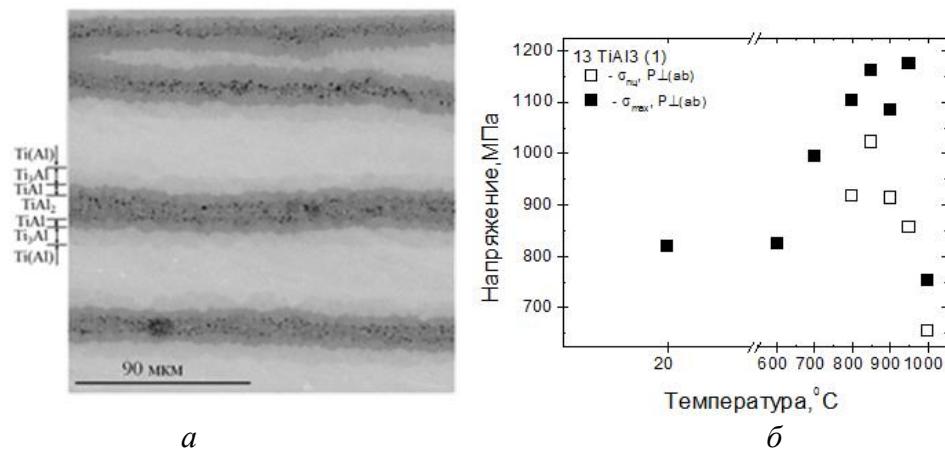


Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения нелегированного слоистого композита после отжига 850 °C в течение 10 часов (а) и результаты кратковременных испытаний на 3x точечный изгиб 2 композитов, полученных ДС под давлением и пакетной прокаткой, с последующей ДС под давлением (б).

Структура полученного образца легированного Ti-Me/Al-Si композита представлена чередующимися прослойками твердого раствора алюминия в Ti-Me и несколькими интерметаллическими фазами Ti_3Al , TiAl , TiAl_2 , и TiAl_3 (Рис. 2а).

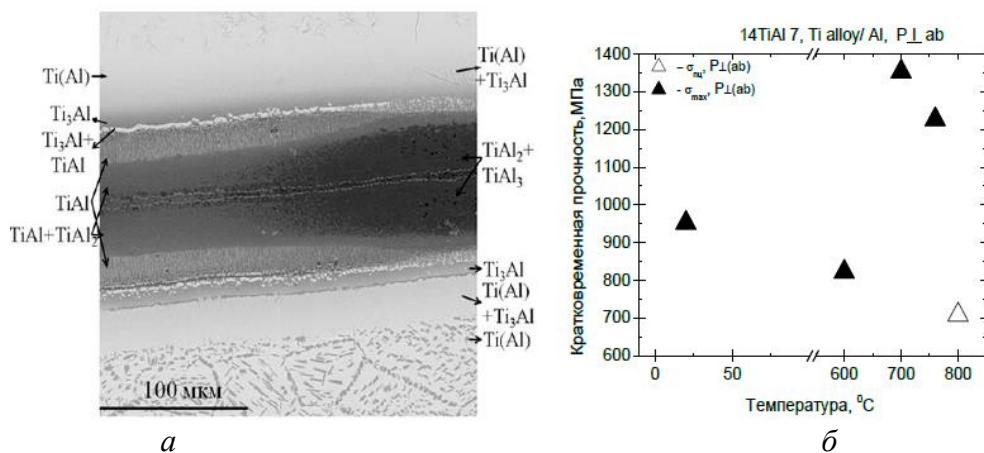


Рис. 2. а – Микроструктура поперечного сечения образца легированного композита, б – зависимость кратковременной прочности от температуры испытаний на 3x точечный изгиб.

Средняя толщина твердого раствора (Ti, Me)(Al) и интерметаллических фаз варьируется от 20 до 35 мкм и от 6 до 23 мкм соответственно. По результатам микрорентгеноспектрального анализа композит состоит из твердого раствора на основе титана (белая область) и интерметаллических фаз (серая область). По результатам анализа распределения легирующих элементов было установлено, что в твердом растворе на основе титана в основном растворяются алюминий, цирконий, и незначительно молибден и ниобий, тогда как в аллюминидах располагается преимущественно титан. Кроме того, в двухфазной области Ti(Al) и Ti₃Al повышаются концентрации циркония в 4 раза, а молибдена и ниobia в 5 раза, по сравнению с другими областями интерметаллических фаз.

На рисунке 3 представлена структура разрушенного образца после кратковременных испытаний при 800 °C. Видно, что трещины останавливаются на границах раздела интерметаллид-матрица, что свидетельствует о способности матричного твердого раствора эффективно снижать напряжения в острие трещин. Ступенчатое распространение микротрещин является характерным в процессе разрушения композиционных материалов при кратковременных испытаниях.

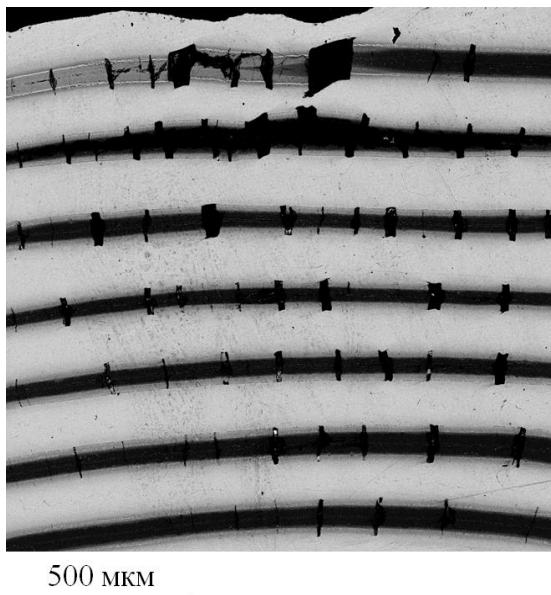


Рис. 3. Микроструктура образца легированного композита после кратковременных испытаний на 3-х точечный изгиб при 800 °C.

По результатам кратковременных испытаний на трехточечный изгиб средние значения предела прочности легированного композита находятся на уровне 650 МПа и 1000 МПа при 20 °C и 700 °C, соответственно.

Легирование молибденом, цирконием и ниобием повысило кратковременную прочность композита в 1,5 раз.

4. Выводы

1. Разработан и проведен на практике надежный способ получения легированных многослойных пакетов.

2. Исследовано изменение структуры Ti-Me/Al-Si композитов, собранных из Ti и Al сплавов. Структура Ti-Me/Al композитов после диффузионной сварки под давлением состояла из слоев твердого раствора Al в титановом сплаве, чередующихся с слоистыми диффузионными зонами из слоев интерметаллических соединений Ti-Me с Al.

3. По результатам кратковременных испытаний на 3-х точечный изгиб легирование молибденом, ниобием и цирконием повышает среднюю прочность многослойных композитов в 1,5 раза при 20 и 700 °C.

Литература

- [1] R. Jing, S.X. Liang, C.Y. Liu, M.Z. Ma, R.P. Liu // *Materials Science and Engineering A* **559** (2013) 474.
- [2] M.H.Loretto, Z.Wu, M.Q. Chu, H. Saage, D.Hu, M.M. Attallah // *Intermetallics* **23**(2012) 1.
- [3] Y. Zhou, J.Q. Wang, B. Zhang, W. Ke, E.H. Han // *Intermetallics* **24** (2012) 7.
- [4] R. Jing, S.X. Liang, C.Y. Liu, M.Z. Ma, X.Y. Zhang, R.P. Liu // *Materials Science and Engineering A* **552** (2012) 295.
- [5] V. Imayev, T. Oleneva, R. Imayev, H.-J. Christ, H.-J. Fecht // *Intermetallics* **26** (2012) 91.
- [6] A. Safdar, L.-Y. Wei, A. Snis, Z. Lai // *Materials Characterization* **65** (2012) 8.
- [7] Chan Hee Park, Jong Woo Won, Jin-Woo Park, S.L. Semiatin, Chong Soo Lee // *Metallurgical and Materials Transactions A* **43** (2012) 977.
- [8] X.F. Ding, J.P. Lin, L.Q. Zhang, Y.Q. Su, G.L. Chen // *Acta Materialia* **60** (2012) 498.
- [9] Guohuai Liu, Xinzhong Li, Yanqing Su, Dongmei Liu, Jingjie Guo, Hengzhi Fu // *Journal of Alloys and Compounds* **541** (2012) 275.
- [10] И.С. Желтякова, М.И. Карпов, В.П. Коржов, В.И. Внуков, Т.Н. Строганова, Д.В. Прохоров, В сборнике: *Тезисы VIII Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов», посвященной памяти академика Г.В. Курдюмова, и Первой Всероссийской молодежной школы «Структура и свойства перспективных материалов»* (Черноголовка, 27-31 октября 2014), с. 23.
- [11] М.И. Карпов, В.П. Коржов, В.М. Кийко, Д.В. Прохоров, А.Н. Толстун // *Перспективные материалы* **13(спец. вып.)** (2011) 704.
- [12] В.П. Коржов, М.И. Карпов, В.М. Кийко // *Физика и техника высоких давлений* **20(4)** (2010) 101.
- [13] V.P. Korzhov, M.I. Karpov, D.V. Prokhorov // *Scientific Proceedings of the Scientific-Technical Union of Mechanical Engineering. Year XXI 10/147* (2013) 120.
- [14] И.С. Желтякова, М.И. Карпов, В.П. Коржов, В.И. Внуков, Т.С. Строганова, Д.В. Прохоров, В сборнике: *Труды международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ 14)»* (Изд-во Политехнического ун-та, Санкт-Петербург, 24-28 июня 2014), с. 237. (In Russian).
- [15] M.I. Karpov, V.P. Korzhov, D.V. Prokhorov, I.S. Zheltyakova, T.S. Stroganov, V.I. Vnukov // *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies* **8** (2014) 177.
- [16] R.T. Zheng, G.A. Cheng, X.J. Li, G.X. CAO, L.F. Fu, Y.G. Zhang, C.Q. Chen // *Journal of Materials Science* **42(4)** (2007) 1251.
- [17] Ю.Н. Подрезов, И.Д. Горная, М. В. Ремез, В.С. Голтвяница, С.К. Голтвяница // *Электронная микроскопия и прочность материалов* **18** (2012) 67.

FEATURES OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF A LAMINATED COMPOSITE WITH HIGH SPECIFIC STRENGTH AND MODERATE HEAT RESISTANCE

I.S. Zheltyakova*, M.I. Karpov, V.P. Korzhov

Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences,
Academician Ossipyan str. 2, Chernogolovka, Moscow District, 142432, Russia

*e-mail: terekhova@issp.ac.ru

Abstract. The work is devoted to the study of the formation of structure and mechanical characteristics of the laminated composites of the system Ti-Al and Ti-Al-Me with high specific strength and moderate heat resistance. The investigation of a microstructure of the composite sample showed that it consists of a solid solution of aluminum in titanium, zirconium, and intermetallic layers Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_2$ and $TiAl_3$. Results of short-term tests on 3 point bending showed that the average values of tensile strength of alloy composites are at the level 820 MPa and 993 MPa, and the doped composite – 952 MPa and 1352 MPa at temperatures of 20 and 700 °C, respectively.

References

- [1] R. Jing, S.X. Liang, C.Y. Liu, M.Z. Ma, R.P. Liu // *Materials Science and Engineering A* **559** (2013) 474.
- [2] M.H.Loretto, Z.Wu, M.Q. Chu, H. Saage, D.Hu, M.M. Attallah // *Intermetallics* **23**(2012) 1.
- [3] Y. Zhou, J.Q. Wang, B. Zhang, W. Ke, E.H. Han // *Intermetallics* **24** (2012) 7.
- [4] R. Jing, S.X. Liang, C.Y. Liu, M.Z. Ma, X.Y. Zhang, R.P. Liu // *Materials Science and Engineering A* **552** (2012) 295.
- [5] V. Imayev, T. Oleneva, R. Imayev, H.-J. Christ, H.-J. Fecht // *Intermetallics* **26** (2012) 91.
- [6] A. Safdar, L.-Y. Wei, A. Snis, Z. Lai // *Materials Characterization* **65** (2012) 8.
- [7] Chan Hee Park, Jong Woo Won, Jin-Woo Park, S.L. Semiatin, Chong Soo Lee // *Metallurgical and Materials Transactions A* **43** (2012) 977.
- [8] X.F. Ding, J.P. Lin, L.Q. Zhang, Y.Q. Su, G.L. Chen // *Acta Materialia* **60** (2012) 498.
- [9] Guohuai Liu, Xinzhong Li, Yanqing Su, Dongmei Liu, Jingjie Guo, Hengzhi Fu // *Journal of Alloys and Compounds* **541** (2012) 275.
- [10] I.S. Zheltyakova, M.I. Karpov, V.P. Korzhov, V.I. Vnukov, T.N. Stroganova, D.V. Prokhorov, In: *Proceeding of the VIII International Conference "Phase changes and the strength of the crystals" dedicated to the memory of academician G.V. Kurdyumov and the First All-Russia Youth School "Structure and properties of advanced materials"* (Chernogolovka, Russia, October 27-31, 2014), p. 23.
- [11] M.I. Karpov, V.P. Korzhov, V.M. Kiiko, D.V. Prokhorov, A.N. Tolstun // *Perspective materials* **13(extra issue)** (2011) 704. (In Russian).
- [12] V.P. Korzhov, M.I. Karpov, V.M. Kiiko // *Physics and Technology of High Pressure* **20(4)** (2010) 101.
- [13] V.P. Korzhov, M.I. Karpov, D.V. Prokhorov // *Scientific Proceedings of the Scientific-Technical Union of Mechanical Engineering. Year XXI 10/147* (2013) 120.
- [14] I.S. Zheltyakova, M.I. Karpov, V.P. Korzhov, V.I. Vnukov, T.N. Stroganova, D.V. Prokhorov, In: *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*

“*Nanotechnologies of functional materials (NFM 14)*” (St. Petersburg, Russia, June 24-28, 2014), p. 237. (In Russian).

- [15] M.I. Karpov, V.P. Korzhov, D.V. Prokhorov, I.S. Zheltyakova, T.S. Stroganov, V.I. Vnukov // *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies* **8** (2014) 177.
- [16] R.T. Zheng, G.A. Cheng, X.J. Li, G.X. CAO, L.F. Fu, Y.G. Zhang, C.Q. Chen // *Journal of Materials Science* **42(4)** (2007) 1251.
- [17] Y. Podrezov, I. Gornaya, M. Remez, V. Goltvjanitsa, S. Goltvjanitsa // *Electron Microscopy and Strength of Materials* **18** (2012) 67.