

Механическое поведение при ударном нагружении структурного композита из титанового сплава ВТ6

Саркеева А.А.

aigul-05@mail.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Ст. Халтурина 39, 450001 Уфа

Mechanical behavior of structural composite made of VT6 titanium alloy under impact loading

A.A. Sarkeeva

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

Проанализировано механическое поведение при ударном нагружении структурного композита, полученного сваркой давлением чередующихся листовых заготовок титанового сплава ВТ6 с пластинчатой и глобулярной структурами. Сравнительные исследования структурного композита и слоистого материала, состоящего из заготовок с глобулярной структурой, показали, что использование заготовок с пластинчатой структурой приводит к снижению ударной вязкости образцов, в которых трещина распространяется одновременно через все слои. Пониженная ударная вязкость данных образцов обусловлена более низкой работой распространения трещины в сплаве ВТ6 с пластинчатой структурой без видимых границ исходных β -зерен.

Ключевые слова: титановый сплав, микроструктура, сварка давлением, ударная вязкость.

Mechanical behavior under impact loading was analyzed for the structural composite made by pressure welding of VT6 alloy sheets with coarse grained laminated and fine grained globular structures. Comparative study of the structural composite and the layered material composed of sheets with globular structure revealed that fracture toughness decreases for the samples where crack propagates simultaneously through the all layers. The reduction of fracture toughness in such samples can be explained by lower crack propagation work in VT6 titanium alloy having laminated structure without visible grain boundaries of initial β -grains.

Keywords: titanium alloy, microstructure, pressure welding, impact toughness.

1. Введение

Титановые сплавы благодаря комплексу полезных свойств, таких как малая плотность, высокая удельная прочность и коррозионная стойкость широко применяются в различных отраслях машиностроения, и особенно в тех, где выигрыш в массе является определяющим. В настоящее время интенсивные исследования проводятся в области изучения механического поведения слоистых композиционных материалов. Значительный интерес к данным материалам обусловлен тем, что в них можно управлять характером распространения трещины [1-4].

С механической точки зрения наиболее интересной характеристикой является ударная вязкость, поскольку возможно ее значительное повышение несколькими

способами. Одним из таких способов является ориентированное расположение поверхностей соединения относительно распространяющейся трещины. В слоистых материалах выделяют три основных вида расположения поверхностей соединения, обеспечивающих торможение, разветвление фронта трещины и прохождение сквозной трещины [1]. При этом трещина распространяется последовательно через каждый слой, одновременно через все слои и вдоль межслойной границы, соответственно. Повышение ударной вязкости наблюдается только в двух случаях, когда возможно торможение трещины на поверхности соединения при переходе из слоя в слой или локальное разветвление общего фронта трещины на отдельные в каждом слое. Повышение сопротивления ударному разрушению слоистого материала возможно также при определенном сочетании заготовок, заметно

отличающихся по исходной структуре и свойствам, т.е. за счет создания структурного композита. В работе [5] отмечено, что сочетание прочных и пластичных слоев оказывает тормозящее действие на развитие трещины. Влияние структуры титанового сплава ВТ6 на характеристики ударного разрушения показано в работе [6].

Существуют разные технологические приемы изготовления слоистых материалов, сварка давлением (СД) является одним из них. СД относится к перспективным ресурсосберегающим технологическим направлениям машиностроения и применяется при изготовлении многослойных конструкций [7-9].

Цель работы – изучить поведение при ударном нагружении структурного композита, полученного сваркой давлением листовых заготовок титанового сплава ВТ6 с пластинчатой и глобулярной структурами.

2. Материал и методика исследования

В качестве исходного материала использовали листы титанового сплава ВТ6 толщиной ~1,5 мм промышленного проката, имеющие глобулярную структуру. Путем вакуумного отжига при температуре 1000°C в течение 30 мин в заготовках была сформирована пластинчатая структура без видимых границ исходных β -зерен, толщина α -пластин составила ~3 мкм.

Для исследований были изготовлены сваркой давлением семислойные материалы двух видов: структурный композит, состоящий из чередующихся заготовок с пластинчатой и глобулярной структурами, и слоистый материал, состоящий из заготовок с глобулярной структурой. Соединение заготовок, собранных в пакет, выполняли в штамповом блоке, помещенном в нагревательную камеру электрической печи ОКБ-8086, в вакууме 0,013 Па. Давление к заготовкам прикладывали с помощью гибкой мембраны, в полость которой подавали газообразный аргон.

Для проведения механических испытаний на ударный изгиб вырезали стандартные образцы с размерами 10 × 10 × 55 мм, отличающиеся расположением U-образного надреза относительно поверхностей соединения.

В образце с «тормозящим» трещину расположением поверхностей соединения (Т-образец) трещина распространяется последовательно, переходя из слоя в слой, в образце с «разветвляющим» трещину расположением поверхностей соединения (Р-образец) трещина распространяется одновременно через все слои (рис. 1). Испытания на ударный изгиб проводили при комнатной температуре на копре с падающим грузом Instron CEAST 9350 и записью диаграммы нагружения в координатах «Усилие – перемещение». Разделение полной работы разрушения ударного образца на ее составляющие – работу зарождения трещины и работу распространения трещины осуществлялось по методике, описанной в монографии [10].

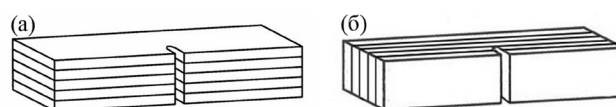


Рис. 1. Образец для испытаний на ударный изгиб с «разветвляющим» (а) и «тормозящим» (б) трещину расположением поверхностей соединения.

Металлографические и фрактографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе «TESCAN MIRA3 LMU».

3. Результаты и обсуждение

При микроструктурном анализе зоны твердофазного соединения (ТФС) структурного композита были обнаружены единичные микропоры размером ~1 мкм (рис. 2). В слоистом материале, состоящем из заготовок с глобулярной структурой, в зоне ТФС присутствуют единичные микропоры размером менее 1 мкм. Как было показано в работе [11], наличие таких пор в зоне соединения не оказывает влияния на свойства слоистого материала.

Результаты механических испытаний сведены в таблицу 1. Видно, что в структурном композите, повышенными значениями ударной вязкости обладают Р-образцы по сравнению с Т-образцами, что согласуется с

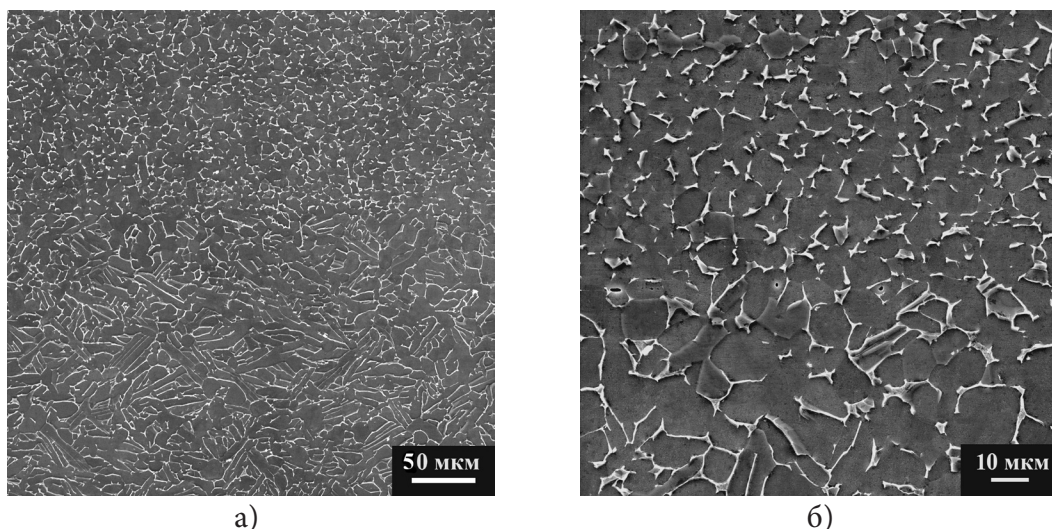


Рис. 2. Микроструктура в зоне ТФС структурного композита: а) × 500; б) × 1500.

Таблица 1

Ударная вязкость (KCU), работа зарождения (A_z) и распространения трещины (A_p) в слоистых образцах на ударный изгиб.

Материал (Структура заготовок)	KCU, МДж/м ²		A_z , Дж		A_p , Дж	
	Р-образец	Т-образец	Р-образец	Т-образец	Р-образец	Т-образец
Структурный композит (Пл/Гл)	0,77±0,002	0,59±0,02	21	22	38	24
Слоистый материал (Гл/Гл)	0,86±0,04	0,59±0,03	20	23	50	27

Таблица 2

Полная работа разрушения (A), работа зарождения трещины (A_z), работа распространения трещины (A_p) в образцах сплава ВТ6 с разной структурой.

Структура	A, Дж	A_z , Дж	A_p , Дж
Пластинчатая	60	44	16
Глобулярная	49	27	24

поведением слоистого материала, состоящего из заготовок с глобулярной структурой. Сравнительный анализ механического поведения данных материалов показал, что характеристики ударного разрушения отличаются только для Р-образцов, в которых трещина распространяется одновременно через все слои. При этом образец структурного композита имеет пониженную ударную вязкость, составляющую 0,77 МДж/м², что связано с более низкой работой распространения трещины в них (табл. 1). Работа зарождения трещины одинакова для данных материалов.

Пониженное значение работы распространения трещины в Р-образцах структурного композита связано с использованием в качестве компонентов композита заготовок с пластинчатой структурой. Титановый сплав ВТ6 с пластинчатой α -фазой без видимых границ исходных β -зерен имеет на ~33% пониженную работу распространения трещины по сравнению со сплавом с глобулярной структурой (табл. 2). Однако чередование слоев с разной структурой не повлияло на механическое поведение Т-образцов. Видимо, при последовательном распространении трещины из слоя в слой имеет значе-

ние не только структура заготовок, но и толщина их, как указывается в [12,13].

Фрактографические исследования показали, что образцы разрушаются с образованием вязкого излома ямочного строения. На изломе видны периодические области, имеющие большую шероховатость, что связано, вероятно, с переходом фронта трещины из слоя с одной структурой в слой с другой структурой (рис. 3). Периодичный характер излома более четко выражен в Т-образцах, чем в Р-образцах. Видимо, это связано с тем, что в Т-образцах трещине необходимо преодолевать слои с разной структурой последовательно, в отличие от Р-образцов, в которых трещина распространяется одновременно через все слои. На поверхности разрушения Т-образцов при переходе из слоя в слой видны неглубокие трещины расслоения.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о влиянии структуры заготовок на механическое поведение титанового композита, полученного сваркой давлением. Следовательно, зная значения работы зарождения и распространения трещины в материалах с разной структурой, можно создать структурный композит, с повышенным сопротивлением ударному разрушению. При этом отдельное внимание необходимо уделить вопросам расположения заготовок относительно друг друга, а также их толщине. Данные композиты можно рассматривать в качестве материалов конструкционного назначения [11]. При этом повышение надежности и работоспособности многослойной конструкции может быть достигнуто, за счет расположения слоев с учетом возможных траекторий распространения трещины.

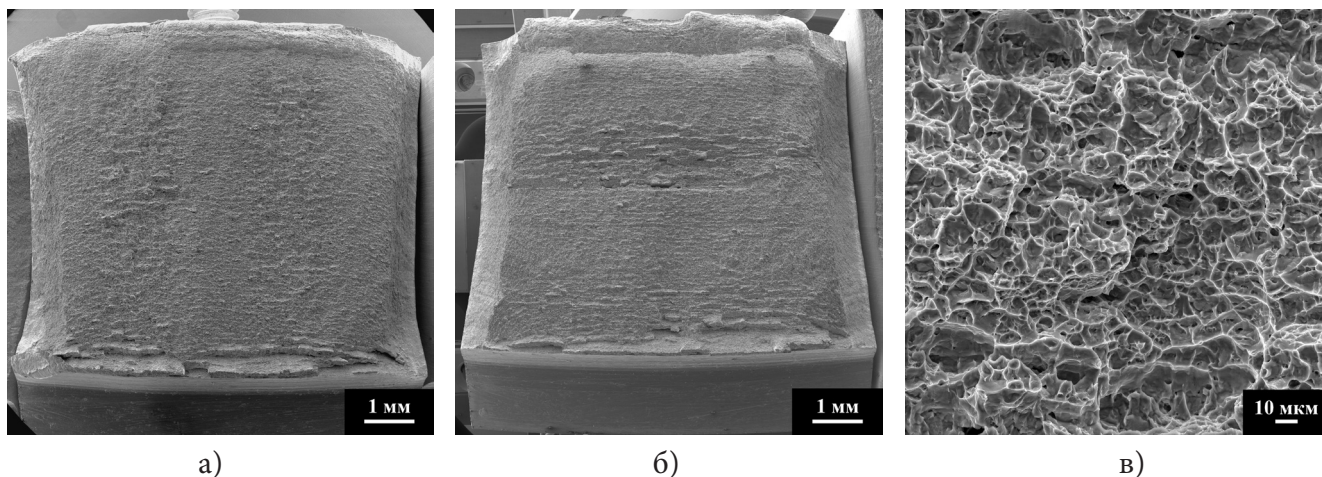


Рис. 3. Изломы образцов структурного композита: а) Р-образец; б) Т-образец; в) фрактограмма излома.

4. Заключение

Исследовано механическое поведение при ударном нагружении структурного композита, состоящего из чередующихся листовых заготовок сплава ВТ6 с пластинчатой и глобулярной структурами в сравнении со слоистым материалом, состоящим из заготовок с глобулярной структурой, полученные сваркой давлением. Показано, что повышенными значениями ударной вязкости обладают образцы, в которых трещина распространяется одновременно через все слои. Использование заготовок с пластинчатой структурой не изменяет механические характеристики образца, в котором трещина распространяется последовательно через каждый слой, однако приводит к снижению ударной вязкости образца, в котором трещина распространяется одновременно через все слои, вследствие более низкой работы распространения трещины в них.

Литература

1. J.D. Embury, N.J. Petch, A.E. Wraith, E.S. Wright. *Trans. Metall. S. AIME* **239**, 114 (1967).
2. E.C. Rait, A.P. Levit. In.: *Metallic Matrix Composites*. Moscow: Mashinostroenie **4**, 49 (1978) (in Russian) [Е.С. Райт, А. П. Левит. В кн.: Композиционные материалы с металлической матрицей. Пер. с англ. М: Машиностроение. **4**, 49 (1978).
3. С.М. Cepeda-Jiménez, J.M. García-Infanta, M. Pozuelo, O.A. Ruano, F. Carreño. *Scripta Mater.* **61**, 407 (2009).
4. A.A. Ganeeva, A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin. *Journal of Advanced Materials* **12**, 92 (2011) (in Russian) [А.А. Ганеева, А.А. Круглов, Р.Я. Лутфуллин. Перспективные материалы **12**, 92 (2011)].
5. A.N. Petukhov. *Engine* **5**, 42 (2005) (in Russian) [А.Н. Петухов. Двигатель **5**, 42 (2005)].
6. A.A. Sarkeeva, R.Ya. Lutfullin, A.A. Kruglov, V.V. Astanin. *Letters on Materials* **2**, 99 (2012) (in Russian) [А.А. Саркеева, Р.Я. Лутфуллин, А.А. Круглов, В.В. Астанин. Письма о материалах **2**, 99 (2012)].
7. R.Ya. Lutfullin. *Letters on Materials* **1(2)**, 88 (2011) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. Письма о материалах **1(2)**, 88 (2011)].
8. R.V. Safullin. *Letters on Materials* **2(1)**, 32 (2012) (in Russian) [Р.В. Сафиуллин. Письма о материалах **2(1)**, 32 (2012)].
9. R.V. Safullin. *Letters on Materials* **2(2)**, 36 (2012) (in Russian) [Р.В. Сафиуллин. Письма о материалах **2(2)**, 36 (2012)].
10. M. Georgiev. *Impact Crack-Resisting of Metals*. Sofia, Bulvest 2000 (2007) 231 p. (in Bulgarian) [М. Георгиев. Пукнатиноустойчивост на металите при ударно натоварване. София, БУЛВЕСТ-2000 (2007) 231 с.].
11. A.A. Ganeeva, A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin. *Deformatsia I Razrushenie Materialov* **7**, 38 (2011) (in Russian) [А.А. Ганеева, А.А. Круглов, Р.Я. Лутфуллин. Деформация и разрушение материалов **7**, 38 (2011)].
12. P.G. Miklyaev, Ya.B. Fridman. *Anisotropy of mechanical properties*. Moscow, Metallurgy (1986) 224 p. (in Russian) [П.Г. Микляев, Я.Б. Фридман. Анизотропия механических свойств металлов. М: Металлургия (1986) 224 с.].
13. P.G. Miklyaev, G.S. Neshpor, V.G. Kudryashov. *Kinetics of failure*. Moscow: Metallurgy (1979) 279 p. (in Russian) [П.Г. Микляев, Г.С. Нешпор, В.Г. Кудряшов. Кинетика разрушения. М: Металлургия (1979) 279 с.].