

07,01

Высокоскоростная эрозия ультрамелкозернистого титанового сплава Ti–6Al–4V, полученного интенсивной пластической деформацией кручением

© А.Д. Евстифеев¹, Н.А. Казаринов^{1,2}, Ю.В. Петров^{1,3}, С.А. Атрошенко³, Р.Р. Валиев^{1,4}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, Россия

³ Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт физики перспективных материалов
Уфимского государственного авиационного технического университета,
Уфа, Россия

E-mail: ad.evstifeev@gmail.com

(Поступила в Редакцию 22 февраля 2017 г.
В окончательной редакции 13 марта 2017 г.)

Представлены результаты тестирования ультрамелкозернистого титанового сплава Ti–6Al–4V, полученного интенсивной пластической деформацией кручением (ИПДК). Для того чтобы оценить влияние ИПДК-обработки на поведение материала в эрозионных условиях, разработаны специальные экспериментальные методики. Ультрамелкозернистый сплав испытан наряду с традиционным крупнозернистым сплавом титана в эрозионной аэродинамической трубе в воздушном потоке с частицами корунда в качестве абразивного материала. Эрозионная стойкость материала оценивалась по потере массы образцов. Несмотря на существенное увеличение статических прочностных характеристик, наноструктурированный материал не продемонстрировал увеличения эрозионной стойкости по сравнению с характеристикой для исходного сплава.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-31-60003 мол_а_дк, 16-31-60047 мол_а_дк, 16-01-00638 А, 16-51-53006), СПбГУ (проект № 6.39.319.20), Минобрнауки РФ (грант Правительства РФ 14.B25.31.0017), РНФ (грант № 15-11-10000).

DOI: 10.21883/FTT.2017.09.44849.050

1. Введение

Типовые испытания материалов в промышленности включают в себя испытания на сжатие, растяжение, изгиб, определение микроструктуры и микротвердости, а также усталостные испытания. Это позволяет обеспечить действующие требования по надежности и ресурсу эксплуатируемого оборудования. За рамками исследований остаются нетиповые условия эксплуатации, связанные, как правило, с высокоскоростными динамическими нагрузками. Примером может служить работа реактивных двигателей, ядерных реакторов, паровых турбин и котлов. Поверхность некоторых деталей в этих установках постоянно подвергается эрозионному воздействию газоабразивного потока.

Наиболее перспективными для повышения ресурса и надежности оборудования могут, в частности, стать подбор оптимального материала под заданные условия эксплуатации, а также повышение прочностных характеристик выбранного материала, например путем измельчения микроструктуры с помощью интенсивной пластической деформации (ИПД) [1,2]. При этом довольно широко исследовано влияние уменьшения характерного размера структуры материала на такие его свойства, как

статическая и динамическая прочность [3], пластичность, усталостная прочность [4]. Важным аспектом исследования эрозионного воздействия на материал является определение различных пороговых характеристик процесса [5], а также выявление закономерностей, связанных со структурой материала и параметрами внешнего воздействия.

Повышение устойчивости поверхности материала к эрозионному потоку невозможно без экспериментального изучения динамических прочностных характеристик материала. Это определяет необходимость получения прочностных свойств материалов при высокоскоростных воздействиях с длительностями микросекундного диапазона, что является сравнительно новой областью исследований. В настоящей работе выполнена серия эрозионных экспериментов на установке аэродинамического типа и приводятся результаты исследования свойств поверхности ультрамелкозернистого титанового сплава Ti–6Al–4V в сравнении с тем же материалом в исходном состоянии. Исследованный сплав широко распространен в авиационной отрасли, в частности, в качестве материала для изготовления лопаток турбинных двигателей.

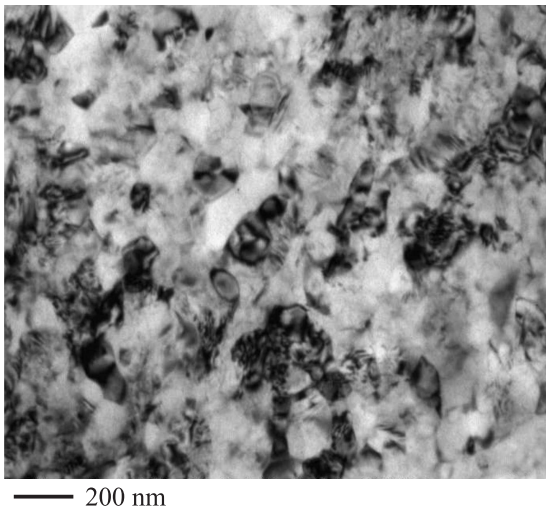


Рис. 1. Светлопольное ПЭМ-изображение сплава Ti–6Al–4V после ИПДК (10 оборотов при 20°C).

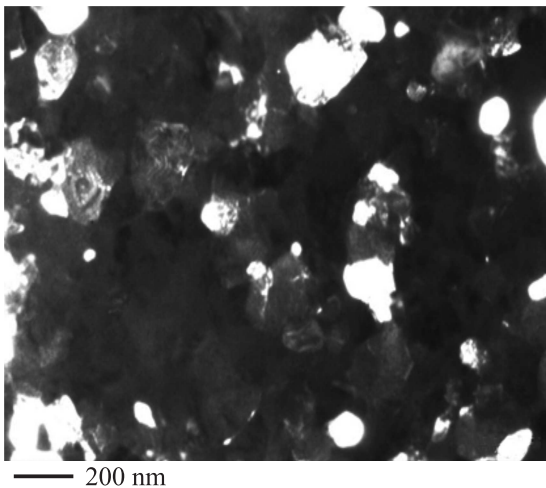


Рис. 2. Темнопольное ПЭМ-изображение сплава Ti–6Al–4V после ИПДК (10 оборотов при 20°C).

2. Материал

Процесс обработки исходного титанового сплава Ti–6Al–4V проводился с использованием технологии интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) при следующих параметрах: давление 6 GPa, количество оборотов 10, скорость обработки 0.2 rpm, температура 20°C. Измерения микротвердости образцов по Виккерсу продемонстрировали однородность образцов, подвергнутых обработке ИПДК. В среднем микротвердость образцов увеличилась на 20% (до 4.6 GPa). Также были измерены статическая прочность, которая составила 1041 и 1650 МПа, и деформация до разрушения 19 и 11% для исходных образцов и образцов после ИПДК-обработки соответственно.

Изучение структуры образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии до и после ИПДК указывает на уменьшение размера зерна сплава. Мик-

роструктура сплава ВТ6 после ИПДК изображена на рис. 1 и 2, полученных с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) в светлопольном и темнопольном режимах. Наблюдается формирование наноструктуры со средним размером зерен 105 nm, высокой плотностью дислокаций и повышенными внутренними напряжениями.

Последние исследования, выполненные на ряде металлов и сплавов [6–9], показали, что интенсивная пластическая деформация металлических материалов, как правило, существенно повышает твердость и прочностные характеристики материалов при снижении пластичности, что в свою очередь негативно влияет на прочностные характеристики материала в динамическом диапазоне нагружения.

С целью испытания материалов на возможность использования в агрессивных эрозионных средах была разработана и применена методика эрозионных испытаний на аэродинамической установке, по своей сути являющаяся экспресс-методом определения динамической прочности материала, в том числе и эрозионной стойкости поверхности.

3. Методика эрозионных испытаний

Испытания проводились на эрозионной установке аэродинамического типа [10,11], схема которой представлена на рис. 3. Образцы изготавливались из дисков диаметром 20 mm и толщиной 1 mm и представляли собой полукруги диаметром 15 mm. Конструкция крепления образцов в газобразивном потоке позволяла испытывать ультрамелкозернистый и исходный материалы парами (рис. 4) в абсолютно одинаковых эрозионных условиях.

В рамках испытаний на эрозионную стойкость материала было проведено три серии экспериментов: с кварцевым порошком со средними размерами частиц 25, 109 и 230 μm. Все эксперименты проводились при времени экспозиции образцов, равном 5 min. Для всех

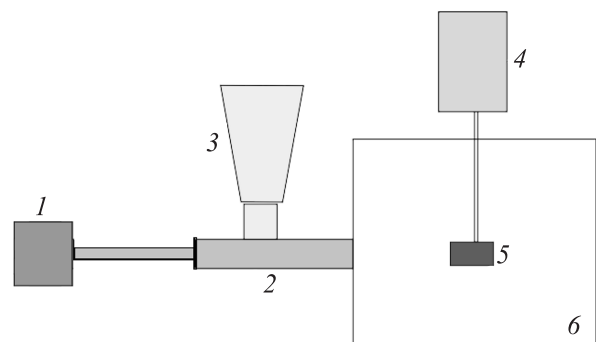


Рис. 3. Схема эрозионной установки. 1 — компрессорная камера, 2 — разгонный участок, 3 — дозатор твердой фазы, 4 — пневматический привод для ввода образца, 5 — образец, 6 — рабочая камера.

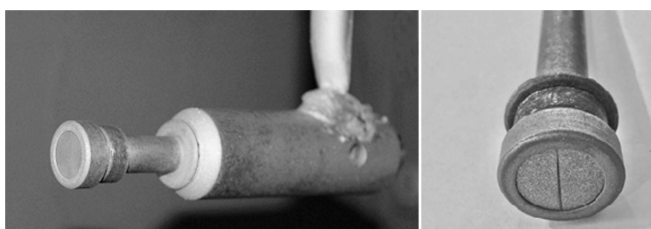


Рис. 4. Конструкция крепления образцов в газоабразивном потоке.

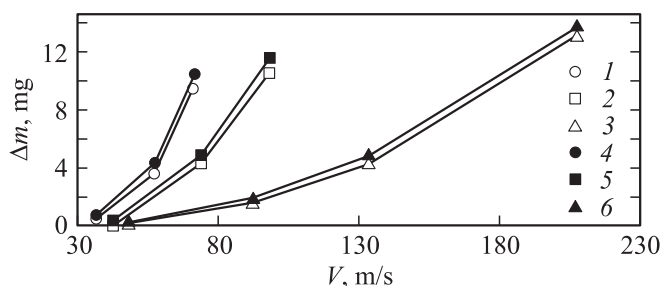


Рис. 5. Изменение массы (погрешность измерений ± 0.2 mg) образцов исходного сплава Ti–6Al–4V (1–3) и ультрамелкозернистого Ti–6Al–4V (4–6) после эрозионного испытания с размерами твердой фракции в воздушном потоке 230 (1, 4), 109 (2, 5) и 25 μm (3, 6).

испытаний было выбрано фиксированное значение расхода порошка 1.7 g/s. Поток частиц был направлен по нормали к поверхности образцов. Испытания проводились при комнатной температуре.

4. Результаты и обсуждение

В представленном исследовании в качестве параметра, описывающего эрозионную стойкость материала, была выбрана величина изменения массы образцов. На рис. 5 представлено изменение массы образцов в зависимости от скорости абразивных частиц в потоке. Данные приведены для порошков со средним размером частиц 25, 109 и 230 μm . В ходе эксперимента для каждого режима проводилась одна серия эрозионных испытаний с длительностью 5 min. Изменение массы фиксировалось с использованием цифровых весов с погрешностью измерений 0.2 mg. Ультрамелкозернистый материал продемонстрировал большее уменьшение массы образцов по сравнению с исходным материалом, однако различия незначительны. Полученные результаты не соответствуют закономерностям, отмеченным ранее для алюминиевых сплавов [10,12], где ультрамелкозернистый материал показал существенное повышение прочностных и эрозионных характеристик по сравнению с исходным материалом, однако подтверждаются некоторыми исследованиями прочностных характеристик титановых сплавов в динамической области [13].

Возможно, это связано со снижением пластичности материала, подвергнутого ИПД. Дополнительно была исследована поверхность разрушения образцов на оптическом микроскопе Axio-Observer Z1-M в темном поле. Поверхность вязкого излома характеризуется тусклым серым видом с характерными „волоками“. Поверхность хрупкого излома кристаллическая, без видимых следов пластической деформации на поверхности разрушения. Количество вязкой составляющей в изломе B (в %) определялось по формуле (ГОСТ 30456-97)

$$B = 100 - X,$$

где X — доля хрупкой составляющей в рассматриваемой площади излома. Площадь хрупкой составляющей определялась путем измерения площади хрупкого излома по фотографиям локальных областей с последующим осреднением характеристик по поверхности. В таблице приведены результаты замера процентного содержания волокна B на поверхности разрушенного в результате эрозии слоя для материала Ti–6Al–4V в исходном и ультрамелкозернистом состояниях. Как видно из представленных данных, после эрозионной обработки разрушение ультрамелкозернистого материала становится более хрупким, чем для исходного сплава. Эта особенность в настоящее время не имеет строгого объяснения, но может быть связана со структурными характеристиками материалов, подвергнутых ИПД, поскольку при таком способе обработки кроме зерен нано- и субмикроразмерного размера образуются неравновесные границы зерен, нанодвойники и наноразмерные частицы вторых фаз.

Полученные результаты указывают на необходимость проведения специфических прочностных испытаний для оценки применимости того или иного материала в экстремальных условиях. Увеличившаяся в результате ИПД статическая прочность сплава титана Ti–6Al–4V не привела к улучшению сопротивляемости высокоскоростной эрозии данного материала, что может быть объяснено значительным охрупчиванием материала в

Деграляция поверхности образцов после эрозии

| Скорость частиц, m/s | Диаметр частиц, μm | B , % | |
|----------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| | | Исходный Ti–6Al–4V | Ультрамелкозернистый Ti–6Al–4V |
| 36 | 230 | 96.7 \pm 0.2 | 95.5 \pm 0.2 |
| 57 | 230 | 95.2 \pm 0.2 | 93.9 \pm 0.2 |
| 71 | 230 | 93.5 \pm 0.2 | 91.7 \pm 0.2 |
| 43 | 109 | 96.9 \pm 0.2 | 96.5 \pm 0.2 |
| 74 | 109 | 96.2 \pm 0.2 | 96.1 \pm 0.2 |
| 98 | 109 | 95.6 \pm 0.2 | 95.0 \pm 0.2 |
| 48 | 25 | 96.0 \pm 0.2 | 94.0 \pm 0.2 |
| 93 | 25 | 96.5 \pm 0.2 | 96.0 \pm 0.2 |
| 134 | 25 | 95.1 \pm 0.2 | 94.5 \pm 0.2 |
| 208 | 25 | 93.8 \pm 0.2 | 87.7 \pm 0.2 |

результате обработки ИПД. Данное обстоятельство свидетельствует о необходимости комплексного подхода к изготовлению ультрамелкозернистых материалов, целью которого может стать не только увеличение статической прочности материала, но и улучшение показателей пластичности [14].

5. Заключение

Проведенные эксперименты показали, что исследуемый материал в исходном и ультрамелкозернистом состояниях имеет различную сопротивляемость эрозионному разрушению, вызванному высокоскоростным потоком твердых абразивных частиц. Повышение прочностных характеристик материала методом интенсивной пластической деформации кручением незначительно (в среднем на 15%) ухудшило эрозионную стойкость при эрозионном воздействии на поверхность. Данная особенность может быть связана как с уменьшением пластичности материала, так и с изменением динамических свойств наноструктурированного материала и требует дальнейшего изучения. В качестве возможных способов улучшения эрозионной стойкости новых материалов можно обозначить различные способы термической обработки образцов, подвергнутых ИПДК, применение иных методик интенсивного пластического деформирования, например равноканального углового прессования, а также защитных покрытий.

Примененный метод тестирования материала на сопротивляемость эрозии показал свою работоспособность и может быть рекомендован для комплексного испытания материалов, которые планируется использовать в агрессивных эрозионных условиях.

Список литературы

- [1] R.Z. Valiev. *Ann. de Chim. Sci. Mater.* **21**, 369 (1996).
- [2] R.Z. Valiev, A.V. Korznikov, R.R. Mulyukov. *Mater. Sci. Eng. A* **186**, 141 (1998).
- [3] Q. Wei, H.T. Zhang, B.E. Schuster, K.T. Ramesh, R.Z. Valiev, L.J. Kecskes, R.J. Dowding, L. Magness, K. Cho. *Acta Mater.* **54**, 4079 (2006).
- [4] Y. Estrin, A. Vinogradov. *Int. J. Fatigue* **32**, 898 (2010).
- [5] Н.А. Казаринов, А.Д. Евстифеев, Ю.В. Петров, В.А. Лашков. *ДАН* **468**, 159 (2016).
- [6] Р.З. Валиев, И.В. Александров. *Объемные наноструктурные металлические материалы*. Академкнига, М. (2007). 398 с.
- [7] Г.В. Клевцов, Р.З. Валиев, Г.И. Рааб, Н.А. Клевцова, М.В. Фесенюк, М.Р. Кашапов. *Деформация и разрушение материалов* **8**, 9 (2011).
- [8] R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov, Y.T. Zhu. *J. Mater. Res.* **17**, 5 (2002).
- [9] S.V. Zherebtsov, G.A. Salishchev, R.M. Galeev, O.R. Valiakhmetov, S.Yu. Mironov, S.L. Semiatin. *Scripta Mater.* **51**, 1147 (2004).
- [10] N.A. Kazarinov, A.D. Evstifeev, Y.V. Petrov, S.A. Atroshenko, V.A. Lashkov, R.Z. Valiev, A.S. Bondarenko. *J. Mater. Eng. Performance* **25**, 3573 (2016).
- [11] Ю.В. Петров, А.М. Брагов, Н.А. Казаринов, А.Д. Евстифеев. *ФТТ* **59**, 92 (2017).
- [12] Г.В. Гаркушин, О.Н. Игнатова, Г.И. Канель, Л. Мейер, С.В. Разоренов. *МТТ* **4**, 155 (2010).
- [13] N. Herzig, L.W. Meyer, D. Musch, T. Halle, V.A. Skripnyak, E.G. Skripnyak, S.V. Razorenov, L. Krüger. In: *3rd Int. Conf. on high speed forming*. Dortmund, Germany (2008). P. 65.
- [14] I. Semenova, G. Salimgareeva, G. Da Costa, W. Lefebvre, R. Valiev. *Adv. Eng. Mater.* **12**, 803 (2010).