

01.07.13

Динамическое разрушение поверхности сплава алюминия в условиях высокоскоростной эрозии

© Ю.В. Петров^{1,2}, С.А. Атрошенко^{1,2,¶}, Н.А. Казаринов², А.Д. Евстифеев², В.Ю. Соловьев²

¹ Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: satroshe@mail.ru

(Поступила в Редакцию 11 мая 2016 г.

В окончательной редакции 14 сентября 2016 г.)

Исследована кинетика разрушения и деформирования стандартного алюминиевого сплава АД1 и аналогичного сплава, подвергнутого интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК) в условиях высокоскоростной эрозии. Показано, что с ростом скорости нагружения хрупкая составляющая поверхности разрушения стандартного материала растет более значительно, чем для материала после ИПДК, как и толщина разрушенного слоя. Установлена взаимосвязь шероховатости поверхности материала после эрозии со скоростью нагружения и толщиной поврежденного при эрозии слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-01-00814, 16-51-53077, 16-01-00638, 16-31-60003 мол_а_дк, 16-31-60047 мол_а_дк), РФФИ–ГФЕН (грант № 16-51-53006), СПбГУ (проект 6.39.319.2014), Минобрнауки РФ (грант Правительства РФ 14.B25.31.0017).

DOI: 10.21883/FTT.2017.04.44264.173

1. Введение

Надежность и эффективность современного оборудования, работающего в агрессивных эрозионных условиях, в значительной степени зависят от качества поверхности металлов и сплавов, для улучшения механических свойств которых в последнее время все чаще применяется создание ультрамелкозернистой структуры. Интенсивному эрозионному воздействию подвергаются, в частности, некоторые детали реактивных двигателей, ядерных реакторов, паровых турбин и котлов. При этом повреждение поверхностей происходит при обтекании изделий потоком твердых, жидких и газообразных частиц или при электрических разрядах. Вследствие ударов потока мельчайших частиц разрушается поверхностный слой металла. Эрозионное воздействие является динамическим процессом, так как характерное время контакта частицы с поверхностью образца является очень малой величиной, связанной со временем прохода упругой волны по частице. Для изучения такого рода явлений следует применять методы и критерии динамической механики разрушения [1]. При этом важнейшим аспектом исследования эрозионного воздействия на материал является определение различных пороговых характеристик процесса, например пороговой скорости абразивных частиц в потоке. Пороговые параметры разрушения (критические скорости, амплитуды, длительности, энергия) являются важнейшими характеристиками, позволяющими выявить структурно-временные особенности процесса и соответствующие им эффекты [2,3].

Повышение устойчивости поверхностей к эрозионному воздействию невозможно без экспериментального и теоретического изучения их динамических прочностных свойств. Это обуславливает важность определения динамических прочностных свойств ультрамелкозернистых и наноматериалов при интенсивных воздействиях с длительностями микросекундного диапазона, что является сравнительно новой областью исследований. В настоящей работе приводятся результаты изучения свойств поверхности ультрамелкозернистого сплава алюминия АД1 в сравнении с аналогичными свойствами того же материала в состоянии поставки в условиях высокоскоростной эрозии.

Исследуемый материал изготавливался методом интенсивной пластической деформации. Данная технология является предметом исследований многочисленных групп ученых на протяжении последних десятилетий [4]. Изучено влияние уменьшения характерного размера структуры материала на такие его свойства, как статическая и динамическая прочность [5], пластичность, усталостная прочность [6], износ и адгезия защитных покрытий [7], электрическая проводимость [8]. В настоящей работе исследована шероховатость поверхности образцов обычного (в состоянии поставки) и ультрамелкозернистого сплава алюминия АД1, полученного методом интенсивной пластической деформации кручением (ИПДК), после высокоскоростного эрозионного воздействия частицами корунда. Частицы ускорялись потоком воздуха до скоростей 40–200 м/с в специальной аэродинамической установке, позволяющей ускорять двухфазный поток (воздух с твердой фазой — абразив-

ными частицами) до необходимых скоростей, варьируя давление в системе. Образцы дистанционно вводятся в рабочую камеру на определенное оператором время. При этом специальный регулируемый дозатор твердой фазы обеспечивает контроль расхода абразивных частиц. Таким образом, используемая экспериментальная установка позволяет регулировать скорость абразивных частиц, их расход и время экспозиции образцов [9].

2. Материал и методика исследования

Образцы изготавливались из дисков диаметром 20 mm и толщиной 1 mm и представляли собой полукруги радиусом 8.1 mm. Конструкция крепления образцов в двухфазном потоке позволяла испытывать ультрамелкозернистый и исходный материалы в абсолютно одинаковых эрозионных условиях. При этом одинаковые условия полировки образцов обеспечивали одинаковую исходную шероховатость образцов R_a обоих материалов ($0.95 \mu\text{m}$).

Процесс обработки исходного материала проводился при следующих параметрах: давление 6 GPa, количество оборотов 10, скорость обработки 1 грм. Измерения микротвердости образцов по Виккерсу продемонстрировали однородность образцов, подвергнутых ИПДК (отклонение значений микротвердости вдоль радиуса заготовки от среднего значения составляло не более 1%). В среднем микротвердость образцов увеличилась на 87% (от 28.6 HV до 53.7 HV). Результаты изучения структуры образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии до и после ИПДК указывают на уменьшение размера зерна сплава с 20 до $0.9 \mu\text{m}$.

Образцы сплава после стандартной обработки и в ультрамелкозернистом состоянии были испытаны попарно при следующих скоростях частиц: 40, 80, 160 и 200 m/s. Для всех испытаний было выбрано фиксированное значение расхода порошка 3.5 g/s. Средний диаметр абразивных частиц $100 \mu\text{m}$. Испытания проводились при комнатной температуре. Каждая пара образцов испытывалась в течение 10 min. При этом испытания с различным временем экспозиции при скорости частиц 100 m/s подтвердили правомерность выбранной длительности, поскольку увеличение времени экспозиции не приводит к существенным изменениям шероховатости поверхности уже после 5 min (рис. 1).

Шероховатость поверхности определяется по ее профилю, который представляет собой ломаную линию пересечения поверхности плоскостью, перпендикулярной направлению неровностей. Профиль рассматривается на длине базовой линии, в пределах которой оцениваются параметры шероховатости поверхности.

Для получения основных параметров шероховатости поверхности в исследовании применялся пертометр M1, предназначенный для определения наиболее часто используемых характеристик (согласно ISO 4287): среднего отклонения профиля R_a (среднего арифметического

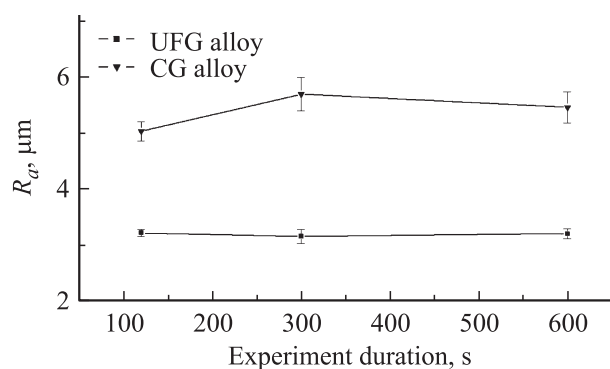


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности R_a крупнозернистых (CG) и ультрамелкозернистых (UFG) образцов от времени их экспозиции.

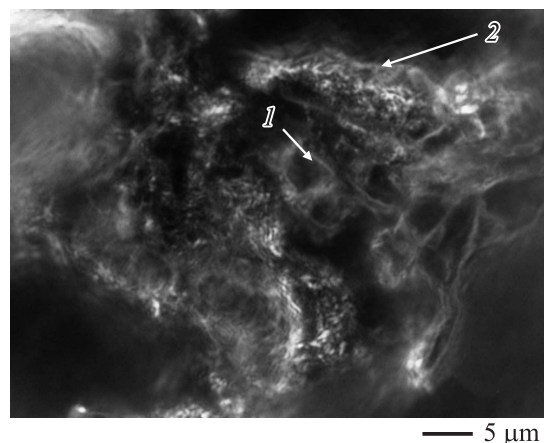


Рис. 2. Вязкая (чашечная) (1) и хрупкая (кристаллическая) (2) составляющие поверхности разрушения образца (после ИПДК) после эрозии со скоростью 160 m/s.

отклонения всех точек профиля шероховатости от средней линии на длине оценки), средней высоты неровностей профиля R_z (среднего арифметического высот наибольшего выступа и наибольшей впадины профиля), наибольшей глубины неровностей профиля R_{max} и числа выбросов на 1 cm RP_c (числа элементов профиля, которые последовательно пересекают одну верхнюю и одну нижнюю линии сечения).

Исследование поверхностей разрушения и толщины разрушенного эрозионного слоя образцов осуществлялось на оптическом микроскопе Axio-Observer Z1-M в темном поле. Поверхность вязкого разрушения имеет тусклый серый вид с характерными „волоками“. Поверхность хрупкого разрушения кристаллическая без видимых следов пластической деформации на поверхности разрушения. Пример волокнистой и хрупкой составляющей приведен на рис. 2. Количество вязкой составляющей на поверхности разрушения S (shear) определялось по формуле $S = 100\% - X$, где X — доля хрупкой составляющей в рассматриваемой площади по-

верхности разрушения. Площадь хрупкой составляющей определялась ее измерением по фотографии. Структура материала после нагружения исследовалась на поперечных шлифах после соответствующего травления.

3. Результаты и обсуждение

В представленном исследовании в качестве параметра, описывающего свойства поверхности до и после эрозионного воздействия, была выбрана шероховатость поверхности, измеряемая при помощи профилографа контактным методом. Суть метода заключается в перемещении алмазной иглы по нормали к поверхности, колеблющейся в местах неровностей. Эти колебания позволяют судить о характере исследуемой поверхности — высоте микронеровностей. Шероховатостью поверхности при этом называется совокупность микронеровностей, образующих рельеф поверхности. В качестве численного параметра выбрано среднее арифметическое значение отклонения профиля (R_a).

При этом для каждого образца проводилось три измерения, результирующим значением считалось среднее по трем измерениям. Основной измеряемой величиной являлось изменение шероховатости поверхности $\Delta R_a = R_a - R_{a_{init}}$, где $R_{a_{init}} = 0.95 \mu\text{m}$ — начальное значение шероховатости образца. Значения ΔR_a для различных скоростей частиц приведены на рис. 3.

Линейная аппроксимация с последующей экстраполяцией результатов для ΔR_a позволила определить пороговые значения скорости частиц как для исходного материала, так и для обработанного с помощью ИПДК сплава. Пороговым значением скорости абразивных частиц считается величина скорости, превышение которой приводит к изменению шероховатости поверхности образца. Скорости ниже пороговой не приводят ни к

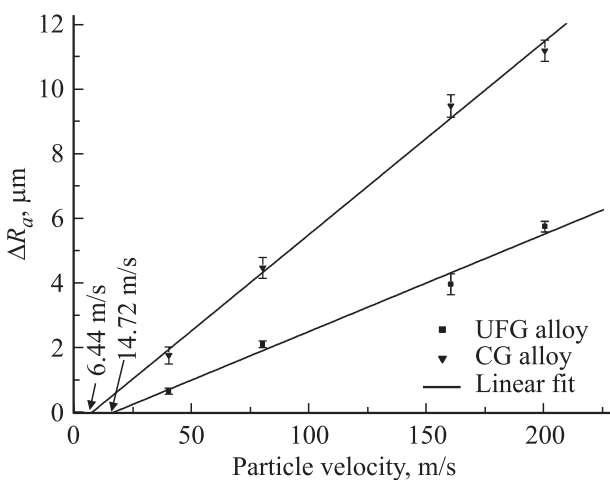


Рис. 3. Зависимость прироста шероховатости поверхности крупнозернистых (CG) и ультрамелкозернистых (UFG) образцов от скорости абразивных частиц. Стрелками отмечены пороговые скорости частиц для обоих материалов.

Таблица 1. Дegradaция поверхности образцов после эрозии (в состоянии поставки)

Номер образца	Скорость, m/s	S, %	Толщина слоя, μm
4	40	92.4 ± 0.2	27.8 ± 0.1
10	80	91.3 ± 0.2	28.4 ± 0.1
9	160	90.7 ± 0.2	28.9 ± 0.1
8	200	74.2 ± 0.2	29.6 ± 0.1

Таблица 2. Дegradaция поверхности образцов после эрозии (после ИПДК)

Номер образца	Скорость, m/s	S, %	Толщина слоя, μm
4	40	88.4 ± 0.2	16.1 ± 0.1
10	80	97 ± 0.2	17.7 ± 0.1
9	160	91.6 ± 0.2	19.2 ± 0.1
8	200	89.5 ± 0.2	26.7 ± 0.1

каким изменениям поверхности. Полученные пороговые скорости для стандартного материала и подвергнутого ИПДК равны 6.44 и 14.72 м/с соответственно.

Проведенные эксперименты показали, что исследованный материал в исходном и ультрамелкозернистом состоянии имеет различную сопротивляемость поверхности по отношению к высокоскоростному потоку твердых частиц, производящих кратковременные удары субмикросекундного диапазона длительности. Пороговая скорость для ультрамелкозернистого сплава АД1 существенно превышает таковую для исходного материала. Данная особенность может быть связана как с увеличением статических прочностных свойств сплава, подвергнутого ИПДК, так и с изменением динамических свойств наноструктурированного материала. Примененный метод может быть использован для дальнейшего исследования более крупных образцов, что позволит изучать как динамическую прочность, так и устойчивость материала к высокоскоростной эрозии с помощью традиционных методов (например, по изменению потерянной массы образца).

В табл. 1 и 2 приведены результаты замера процентного содержания волокна на поверхности разрушения и толщины разрушенного в результате эрозии слоя для материала АД1 в состоянии поставки (табл. 1) и после ИПДК (табл. 2). Чем больше процент волокна на поверхности разрушения, тем более вязко разрушается материал, а снижение этого показателя свидетельствует о более хрупком его разрушении. Как видно из представленных данных, после эрозионной обработки по сравнению с исходным состоянием разрушение материала становится более хрупким. С повышением скорости эрозии материала без обработки (в состоянии поставки)

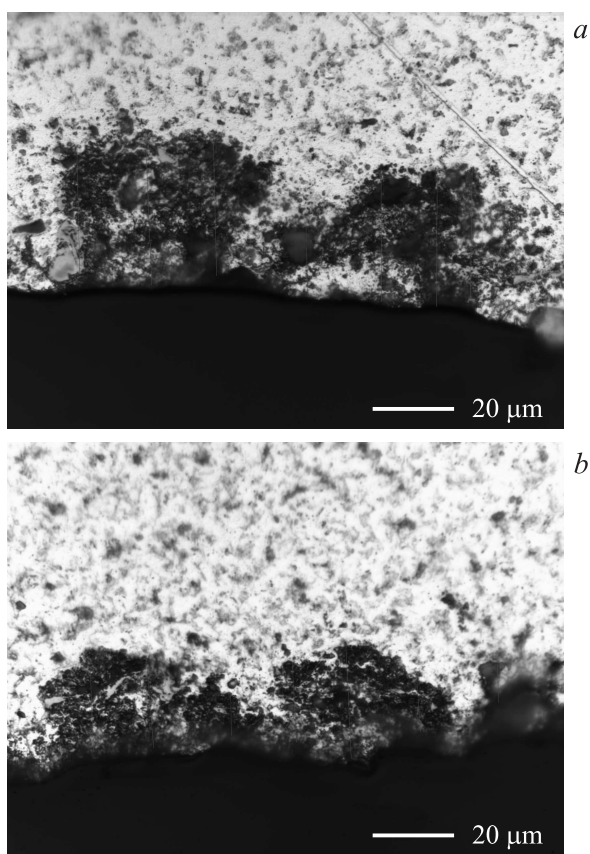


Рис. 4. Разрушенный слой после эрозии со скоростью 80 м/с образца без обработки (а) и после ИПДК (b) ($\times 1000$).

хрупкая составляющая поверхности разрушения монотонно возрастает (табл. 1). Что касается обработки ИПДК, то при скорости 40 м/с вязкая составляющая поверхности разрушения материала оказалась минимальной, т.е. наблюдается ее провал (табл. 2). Материал ведет себя аналогично трубной стали, в которой провал вязкости имеет место в интервале скоростей 8.12–10.33 м/с [10]. При скорости 80 м/с наблюдается максимум вязкой составляющей на поверхности разрушения материала, которая близка к величине в исходном состоянии (97%). При дальнейшем повышении скорости эрозии происходит увеличение хрупкой составляющей поверхности разрушения у образцов после обработки ИПДК, что связано с измельчением зерна и увеличением границ и стыков зерен, где и начинается разрушение.

Толщина разрушенного слоя у материала без обработки больше, чем в случае материала после ИПДК. Разрушенный слой после эрозии со скоростью 80 м/с (для примера) представлен на рис. 4. Отношение толщин разрушенного слоя материала без обработки и материала после ИПДК примерно равно отношению шероховатости этих материалов. При скорости эрозии 40 м/с отношение толщины разрушенного слоя материала без обработки к аналогичной величине материала после

ИПДК равно 1.7, а отношение шероховатостей — 1.65. При скорости эрозии 80 м/с эти отношения равны 1.6 и 1.7 соответственно; при скорости 160 м/с они незначительно различаются (1.6 для толщин разрушенного слоя и 2.1 для шероховатости), также различия наблюдаются при скорости 200 м/с (1.1 для толщин разрушенного слоя и 1.75 для шероховатости). С учетом этого можно сделать вывод, что величина шероховатости R_a может служить характеристикой повреждаемости материала.

На основании исследования структуры материала после эрозии можно сделать вывод, что материал, подвергнутый ИПДК, после динамической эрозии деформируется с большим количеством полос скольжения, расположенных как вдоль направления потока частиц, так и под разными углами к нему (см., например, рис. 5, направление потока частиц снизу вверх). Следует отметить, что указанные полосы отсутствуют в исходном (до эрозии) материале. В материале же без обработки наблюдаются лишь отдельные полосы скольжения, и расположены они, как правило, под углом 45° к направлению потока частиц. Кроме того, присутствует большое количество пор, которые с ростом скорости эрозии объединяются в микротрещины, иногда расположенные вдоль фронта волны, которые могут служить зародышами разрушения.

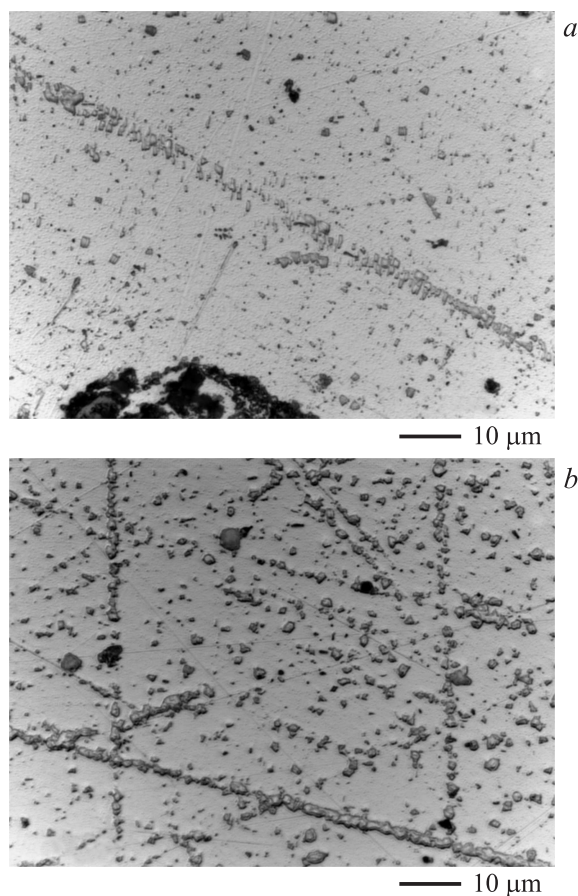


Рис. 5. Полосы скольжения после эрозии со скоростью 40 м/с образца без обработки (а) и после ИПДК (b) ($\times 1600$).

4. Заключение

Проведенные испытания показали, что исследованный материал в исходном и ультрамелкозернистом состоянии имеет различную сопротивляемость поверхности по отношению к высокоскоростному потоку твердых частиц, производящих кратковременные удары субмикросекундного диапазона длительности. Пороговая скорость для ультрамелкозернистого сплава АД1 существенно превышает таковую для исходного материала. Данная особенность может быть связана как с увеличением статических прочностных свойств сплава, подвергнутого ИПДК, так и с изменением динамических свойств наноструктурированного материала. Показано, что величина шероховатости R_a может служить характеристикой повреждаемости материала. Фрактографический анализ показал, что хрупкая составляющая поверхности разрушения исходного материала АД1 в процессе эрозии при увеличении ее скорости возрастает линейно, а образцы после ИПДК демонстрируют провал вязкой составляющей поверхности разрушения при скорости 40 м/с. Микроструктурный анализ показал, что материал после ИПДК имеет более развитую деформационную структуру: полосы скольжения формируются под разными углами к направлению потока частиц. В материале без обработки наблюдаются лишь отдельные полосы скольжения, расположенные под углом 45° . Кроме того, в объеме материала присутствует большое количество пор, объединяющихся с ростом скорости эрозии в микротрещины, которые могут служить зародышами разрушения. Примененный метод может быть использован для дальнейшего исследования более крупных образцов, что позволит исследовать как динамическую прочность, так и устойчивость материала к высокоскоростной эрозии с помощью традиционных методов (например, по изменению потерянной массы образца).

Список литературы

- [1] Ю.В. Петров, В.И. Смирнов. ЖТФ **80**, 2, 71 (2010).
- [2] А.Н. Березкин, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров, А.А. Уткин. ДАН **375**, 121 (2000).
- [3] В.А. Братов, А.А. Груздков, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров. ДАН **396**, 345 (2004).
- [4] R. Valiev. Nature Materials, 3, 511 (2004).
- [5] Q. Wei. Acta materialia, 54, 4079 (2006).
- [6] Y. Estrin, A. Vinogradov. Int. J. Fatigue **32**, 898 (2010).
- [7] C.T. Wang, N. Gao, M.G. Gee, R.J. Wood, T.G. Langdon. J. Mater. Sci. **48**, 4742 (2013).
- [8] M.Y. Murashkin, I. Sabirov, V.U. Kazykhanov, E.V. Bobruk, A.A. Dubravina, R.Z. Valiev, J. Mater. Sci. **48**, 4501 (2013).
- [9] В.А. Лашков. Инж.-физ. журн. **60**, 197 (1991).
- [10] С.А. Атрошенко, В.И. Смирнов. Морские интеллектуальные технологии 2, 32 (2010).