(cc) BY

Медников Алексей Феликсович

Макеева Анастасия Александровна

Тхабисимов Александр Борисович

канд. техн. наук, младший научный сотрудник

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский

университет «МЭИ»

г. Москва

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРАХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КАПЛЕУДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Аннотация: *в статье представлена методика обработки изображений металлографических шлифов экспериментальных образцов из алюминиевого сплава Д16Т после эрозионных испытаний при варьируемых параметрах высокоскоростного каплеударного воздействия.*

Ключевые слова: *эрозионный износ, металлографические исследования, алюминиевый сплав, приповерхностный слой, каплеударное воздействие.*

Введение

Проведение исследований эрозионного износа металлов при каплеударном воздействии определяется, прежде всего, практическими задачами, связанными с повышением их эрозионной стойкости, в частности, это касается рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин, работающих во влажном паре. По этой причине основная доля проводимых в мире исследований посвящена определению закономерностей процесса эрозионного износа различных металлов и сплавов на гидроударных стендах и установках, моделирующих высокоскоростное каплеударное воздействие [1; 2]. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия капли или струи жидкости с твердой поверхностью свидетельствуют о значительной сложности явлений, происходящих при соударении [3; 4]. Для решения данной

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

проблемы необходимо глубокое понимание физики процессов эрозионного износа, основанной на всестороннем изучении системы «капля-поверхность» и ее характеристик. На сегодняшний день отсутствует достаточно полное понимание кинетики разрушения пластичных материалов при высокоскоростном каплеударном воздействии при варьируемых параметрах соударения.

В настоящей работе с использованием современного измерительно-диагностического и испытательного оборудования были проведены экспериментальные исследования и разработана методика определения закономерностей разрушения приповерхностного слоя образцов из алюминиевого сплава Д16Т при варьируемых параметрах высокоскоростного каплеударного воздействия. В качестве выявляемых параметров влияния каплеударной нагрузки выбраны средняя и максимальная глубина поврежденного слоя и распределение пиков и впадин, характеризующих разрушение, связанное с расположением и размером капель.

Порядок проведения испытаний

Испытания образцов из алюминиевого сплава Д16Т (см. таблицу 1) проводились с использованием УНУ «Гидроударный стенд Эрозия-М» [5], внесенным в реестр уникальных стендов и установок РФ. Выбор алюминиевого сплава Д16Т обусловлен свойствами этого материала, позволяющего за счет своих эрозионных характеристик проводить исследования в широком диапазоне скоростей соударения и размеров частиц.

Таблица 1

Химический состав алюминиевого сплава Д16Т

Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примесей
До 0,5	До 0,5	0,3–0,9	До 0,1	До 0,15	90,9–94,7	3,8–4,9	1,2–1,8	До 0,25	Каждая 0,05; всего 0,15

На стенде возможно моделировать различные условия взаимодействия капель жидкости с поверхностью экспериментальных образцов: скорость удара, размер (диаметр) капель жидкости, число потоков капель, угол атаки. Схема

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

соударения капель с поверхностью исследуемых образцов представлена на рисунке 1. В результате высокоскоростного взаимодействия капель жидкости с образцом на его поверхности возникала область с «эрозионным следом» (см. рисунок 2).

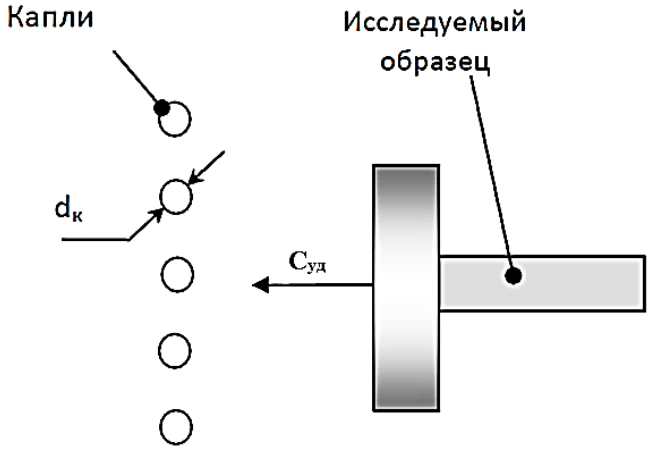
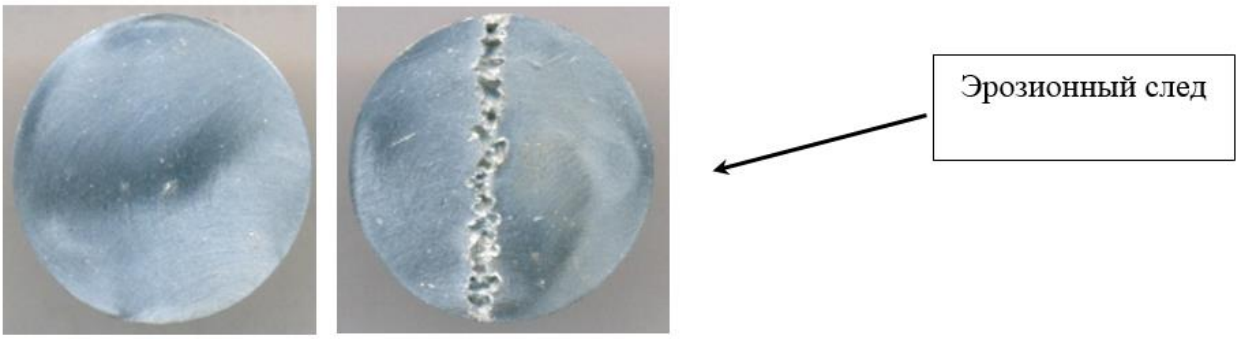


Рис. 1. Схема взаимодействия образцов с каплями жидкости: $d_к$ – диаметр капли; $C_{уд}$ – скорость образца



а) б)

Рис. 2. Внешний вид образца до (а) и после (б) эрозионных испытаний

Испытания проводились при различных параметрах, а именно – изменялась скорость соударения образцов с монодисперсной цепочкой капель жидкости (воды), а также диаметр капель. Конфигурации вариантов «скорость – диаметр» приведены в таблице 2.

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

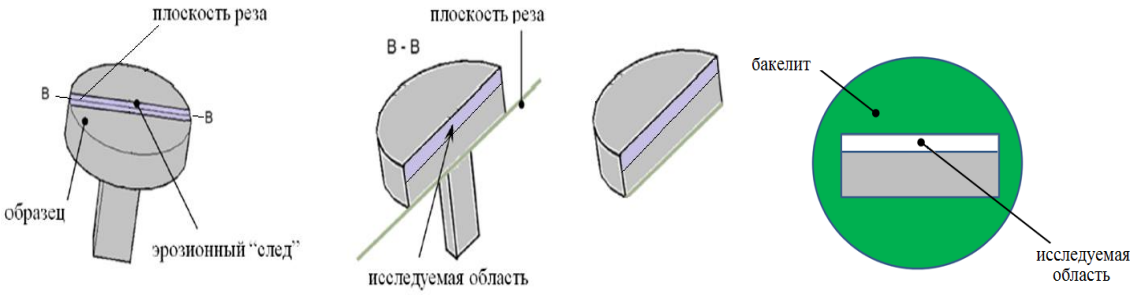
Таблица 2

Параметры испытаний

200 м/с – 800 мкм	250 м/с – 800 мкм	300 м/с – 800 мкм
200 м/с – 1000 мкм	250 м/с – 1000 мкм	300 м/с – 1000 мкм
200 м/с – 1200 мкм	250 м/с – 1200 мкм	300 м/с – 1200 мкм

Методика определения закономерностей эрозионного разрушения приповерхностного слоя материалов

Для получения изображений приповерхностного слоя испытанных образцов были изготовлены металлографические продольные шлифы. Схема изготовления шлифа и расположение исследуемой области приповерхностного слоя представлены на рисунке 3.



а) б)

Рис. 3. Схема приготовления продольного щлифа (а) и его запрессовки (б) в бакелит

Для обработки полученных изображений продольных металлографических шлифов использовался программный комплекс *Grafula*.

Ниже представлен пошаговый порядок обработки данных на примере образца из алюминиевого сплава Д16Т после эрозионных испытаний.

Шаг 1. Запуск программного комплекса *Grafula* и загрузка исследуемого изображения.

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

Шаг 2. Установка координатной оси и нанесение точек в месте впадин и пиков по всему изображению шлифа образца в режиме «расстановка точек» (см. рисунок 4).

Шаг 3. Перенесение численных значений координат точек в программный комплекс Excel и построение профиля поверхности образца.

Шаг 4. Вычисление среднего арифметического значений графы «Координата точки по высоте h, мм» и значение $h_{ср} = h/2$, нанесение этих линий на имеющийся график (см. рисунок 5). Расчет расстояний между пиками *a*, мм по принципу вычитания значений координат точек по оси 0X: A2-A1; A3-A2 и т. д. (см. рисунок 5).

Шаг 5. После определения расстояний между пиками a_i вычисление значения a_{cp} по формуле $a_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_i}{i}$.

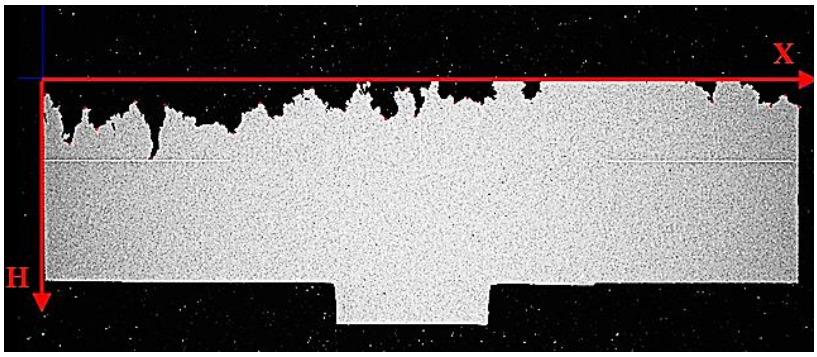
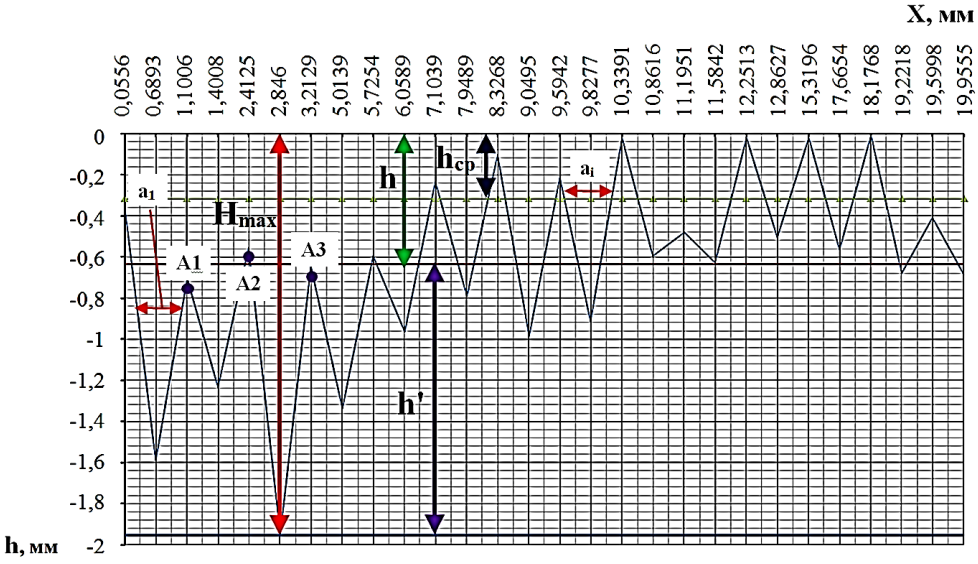


Рис. 4. Нанесение координатной оси и точек в программе Grafula на изображение продольного шлифа образца после эрозионных испытаний



Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

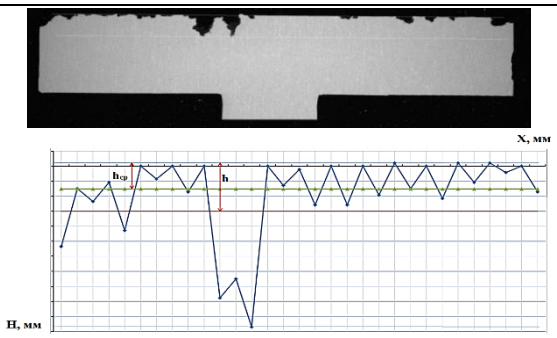
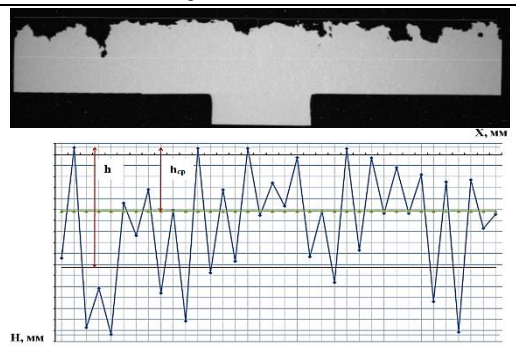
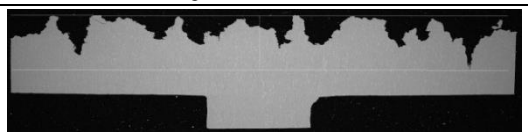
Рис. 5. Обработка профиля поверхности образца после эрозионных испытаний

Пример реализации разработанной методики

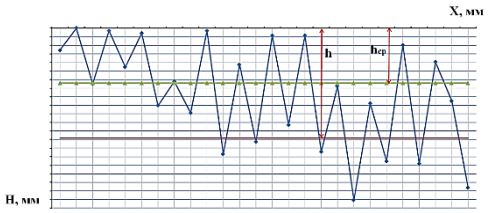
Согласно разработанной методике получены изображения металлографического шлифа образцов из алюминиевого сплава Д16Т после эрозионных испытаний и результаты исследований изменения максимальной и средней глубины поврежденного слоя и распределения пиков и впадин, характеризующих разрушение, связанное с расположением и размером капель (см. таблицу 3).

Таблица 3

Изображения металлографического шлифа и профиля поверхности образцов из алюминиевого сплава Д16Т после эрозионных испытаний

Диаметр капель, мкм	Изображение металлографического шлифа
800	 h=0,151 мм; $h_{ср}$=0,075 мм; h_{max}=0,61 мм
1000	 h=0,513 мм; $h_{ср}$=0,257 мм; h_{max}=0,86 мм
1200	

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

	 h=0,640 мм; $h_{ср}$=0,320 мм; h_{max}=1,01 мм

Выводы

С использованием УНУ «Гидроударный стенд Эрозия-М» проведены экспериментальные исследования образцов из алюминиевого сплава Д16Т при варьируемых параметрах каплеударного воздействия.

Разработана методика определения закономерностей эрозионного разрушения приповерхностного слоя материалов на примере образцов из алюминиевого сплава Д16Т.

Благодарности

Результаты работы получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-2911.2017.8 (Договор №14.Z56.17.2911-МК от 22.02.2017).

References

1. Tobin E.F. Comparison of liquid impingement results from whirling arm and water-jet rain erosion test facilities / E.F. Tobin, T.M. Young, D. Raps, O. Rohr // Wear. – 2011. – 271 (9–10). – P. 2625–2631.

2. Ahmad M. Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials / M. Ahmad, M. Casey, N. Sürken // Wear. – 2009. – 267 (9–10). – P. 1605–1618.

3. Luiset B. Mechanisms of stainless steels erosion by water droplets / B. Luiset, F. Sanchette, A. Billard, D. Schuster // Wear. – 2013. – 303 (1–2). – P. 459–464.

4. Hattori S. Effect of impact angle on liquid droplet impingement erosion / S. Hattori, M. Kakuichi // Wear. – 2013. – 298–299 (1). – P. 1–7.

5. Mednikov A.F. Experimental research results of the aluminum alloy erosion wear at variable parameters of the high droplet impact | A.F. Mednikov,

Content is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)

A.B. Tkhabisimov, O.S. Zilova, A.A. Burmistrov // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – 891. – P. 1–6.

Содержимое доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 license (CC-BY 4.0)