

**ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 3 (2022)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано

Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

<https://doi.org/10.48081/KWJR9225>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,342

Абишев Кайратолла Кайроллинович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (заместитель главного редактора);
Мусина Жанара Керейовна – к.т.н., профессор (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Клецель Марк Яковлевич – д.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Богомоллов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Кажыбаева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);

Зарубежные члены редакционной коллегии:

Waigang Sun – профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magin Laruerta – д.т.н., профессор (СьюДад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Ronny Berndtsson – профессор (Лунд, Швеция);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

МАШИНОСТРОЕНИЕ

МРНТИ 55.01.81

<https://doi.org/10.48081/ZFSP1647>**А. А. Барзов¹, *В. С. Пузаков², А. В. Кузнецов³**

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация, г. Москва;

²ООО «Бюро Энергетика», Российская Федерация, г. Раменское;

³Филиал АО «ОДК» «НИИД», Российская Федерация, г. Москва

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭРОЗИИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭНЕРГОЭКСТРЕМАЛЬНОМ ГИДРОСТРУЙНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Предложена вероятностная модель интенсивности процесса эрозионного разрушения поверхностного слоя материала при действии на него энергоэкстремальной гидроструи. Описана принципиальная схема практического определения физически-обусловленных характеристик сопротивляемости материала объекта исследований появлению поверхностных технологических дефектов и их развитию до критических значений в процессе эксплуатации. Представлена концепция ускоренного определения трудноидентифицируемых параметров состояния поверхностного слоя исследуемого объекта (например концентрация субмикрододефектов, характеризующих состояние материала изделия) путём анализа информативных признаков энергоэкстремальной гидроструйной эрозии (ЭГЭ), в первую очередь, макро- и микротопографии поверхности локально сформированной гидрокаверны и масс-геометрического распределения эродированных при её образовании частиц. Экспериментальная верификация информационно-диагностических признаков модели обеспечивает возможность оперативного определения параметров материала, которые характеризуют его эксплуатационно-технологические свойства, в том числе с учётом их случайных отклонений. Эти трудноопределяемые параметры состояния конструкционных материалов необходимы для повышения достоверности различных функционально-ресурсных расчётов, в первую очередь для изделий повышенной надёжности. Дальнейшее развитие предложенной методики и более детальное вероятностно-формализованное описание процесса ЭГЭ и его функционально-физических результатов, позволит реализовать возможность малоинвазивной диагностики состояния материала объекта анализа и/или изучения тонких механизмов формирования его поврежденности, в первую очередь с учётом фактора эксплуатационно-технологической наследственности.

Ключевые слова: диагностика свойств материалов, энергоэкстремальная гидроструйная эрозия, напряженно-деформированное состояние, теоретическая вероятностная модель, наследственность.

Введение

Процесс интенсивной эрозии поверхностного слоя материала под действием энергоэкстремальной гидроструи (ЭГС) является физической основой различных операционных технологий, в первую очередь сложно-профильного раскроя листовых заготовок и очистки поверхностей изделий от трудноудаляемых наслоений типа следов коррозии или накипи [1, 2]. В последнее время этот процесс предложено использовать для получения уникальных нано- и микросуспензий, формируемых на основе диспергируемых ЭГС частиц материала твердотельной мишени [3], а также как средства экспресс-определения физико-механических свойств (ФМС) поверхностного слоя объекта исследования, например степени его поврежденности [4, 5]. Поэтому разработка моделей, связывающих информативно-диагностические признаки, главным образом масс-геометрические характеристики массива эродируемых ЭГС частиц материала-мишени, с параметрами его функционального состояния и режимами эрозионного воздействия гидроструи является актуальной научно-прикладной задачей.

Выполненные в этом направлении исследования, представленные, например в классических работах [6, 7], не в полном объеме учитывают реально существующий локальный разброс и/или микроанизотропию ФМС материалов, которые оказывают значимое влияние на кинетику протекания процесса энергоэкстремальной гидроструйной эрозии (ЭГЭ) и, как следствие, на его результирующие характеристики в виде масс-геометрического распределения эродированных ЭГС частиц материала поверхностного слоя объекта исследования. В связи с этим вероятностная формализация степени влияния параметров нестабильности свойств материала, подвергнутого действию ЭГС, на отличительные физические признаки процесса ЭГЭ может оказаться весьма полезной, как инструмент получения дополнительной контрольно-диагностической и/или научно-исследовательской информации о параметрах функционального качества поверхностного слоя самых различных объектов анализа (ОА) на ключевых этапах их жизненного цикла.

Материалы и методы

С физической точки зрения единичный акт ЭГЭ, состоящий в отделении от поверхности материала твердотельной мишени дисперсной частицы под действием ЭГС определяется как результирующая совокупность двух симультанно-взаимосвязанных процессов:

- дискретно-кинетического формирования эродированной частицы, имеющей соответствующий характерный размер;
- временем, за которое произошло отделение данной дисперсной частицы от исходной поверхности.

Следует подчеркнуть, что основным фактором, влияющим на эти характеристики ЭГЭ, анализ которых позволяет оценить масс-геометрическую кинетику данного процесса и рассчитать его интенсивность, является наличие определенных несовершенств, например субмикро- и микротрещин в поверхностном слое твердотельной мишени в зоне воздействия на него ЭГС. Тогда, следуя логике математической формализации степени влияния

масштабного фактора [8, 9] на возможность наличия потенциально опасного дефекта в рассматриваемом объёме материала вероятность его появления в поверхностном слое ОА толщиной h будет определяться как:

$$P(h)=1-\exp (-\beta h) \quad (1)$$

где $P(h)$ – вероятность наличия потенциально опасного, функционально значимого для кинетики протекания процесса ЭГЭ дефекта в данный момент времени анализа, расположенного в поверхностном слое материала ОА при действии на него ЭГС;

$\beta = \text{const}$ – квазипостоянный структурный параметр, характеризующий среднюю концентрацию этих дефектов в материале ОА, который в данном случае имеет размерность $[h]^{-1}$.

Схематично, расчётная схема процесса ЭГЭ и, в частности, изменение экспоненциально-вероятностной зависимости (1) представлена на рисунке 1.

Необходимо подчеркнуть весьма сложную, по сути, функциональную структуру параметра β , которая фактически определяется наличием в анализируемом объёме материала ОА исходных технологических дефектов, а также возможностью зарождения новых микроструктурных несовершенств при действии ЭГС на рассматриваемую поверхность. Кроме этого, физически обусловленная сопротивляемость конкретного материала ОА появлению, а главное, развитию до критических значений размеров данных дефектов является важнейшей эксплуатационно-технологической характеристикой практически всех конструкционных материалов и изделий из них в условиях жёсткого термосилового нагружения. В связи с этим, условно значение β в (1) можно представить в следующем символическом виде:

$$\beta(l)=\beta_T(l_T, l_i)+\beta_{\text{Э}}(l_j, l_j) \quad (2)$$

где $\beta(l)$ – комплексный, пока функционально-латентный параметр, интегрально отражающий координатно-кинетическую топографию дефектности (l) материала ОА на ключевых этапах его жизненного цикла, в частности при изготовлении и/или эксплуатации;

$\beta_T(l_T, l_i)$ и $\beta_{\text{Э}}(l_j, l_j)$ – соответственно слагаемые $\beta(l)$, ответственные за исходную топографию (l_i и l_i) дефектности материала и её изменения во времени (l_T, l_i) на этапах технологического формирования (Т) и эксплуатации (Э) конкретного ОА.

Таким образом (1) с учётом (2) позволяют количественно формализовать масс-геометрический результат процесса ЭСЭ. Действительно, используя стандартную методику проведения имитационного моделирования, например методом Монте-Карло [10], не сложно получить массив значений h_k , которые определяют геометрию эродируемых частиц, например их характерный размер в виде осредненного диаметра d_k , где $k=1,2,\dots,n$ – общее число разыгрываний,

событий, состоящих в отделении эродированных частиц. Эта процедура позволяет получить функцию распределения: $m_k = f(d_k)$, где m_k – число эродированных частиц с диаметром d_k , который находится в интервале изменения: $d_{k-1} \leq d_k \leq d_{k+1}$, где k – в данном случае, общее число градаций частиц по размерам.

Результаты и обсуждения

Проблема состоит в том, что совокупность вычислений по (1) с учётом (2) позволяет, по сути, рассчитать только интегральное масс-геометрическое распределение частиц, как функцию от концентрации физически значимых потенциально «диспергирующих» поверхностный слой материала ОА дефектов. Поэтому для конкретизации процесса ЭГЭ необходимо определить время, за которое происходит отделение эродируемой частицы от поверхности материала ОА. В этом случае появляется реальная возможность дифференциальной оценки кинетики процесса ЭГЭ, в том числе расчёта изменения глубины гидрокаверны, в месте воздействия на поверхность изучаемого материала ЭГС, как информационно важного и весьма технологично измеряемого диагностического параметра его состояния, связанного с ФМС поверхностного слоя ОА.

Анализ показал, что одной из зависимостей, позволяющих ситуационно-адекватно рассчитать время до разрушения локальной зоны поверхностного слоя материала ОА, является кинетическая или термофлуктуационная теория длительной прочности твердых тел акад. С. Н. Журкова, развиваемая его учениками [11]. В канонической форме эти фундаментально-классическая зависимость имеет следующий вид:

$$t_p = t_o \exp[(U_o - \gamma\sigma)/kT] \quad (3)$$

где t_p – время до разрушения материала ОА при действии на него механических растягивающих напряжений σ при абсолютной температуре T ;

t_o – постоянная, близкая к периоду тепловых колебаний атомов;

U_o – энергия квазиактивации процесса разрушения материала, близкая к энергии его сублимации;

k – постоянная Больцмана;

γ – структурно-чувствительный коэффициент, отражающий степень перенапряжения на межатомных связях и во многом определяемый технологией формирования материала конструкции ОА.

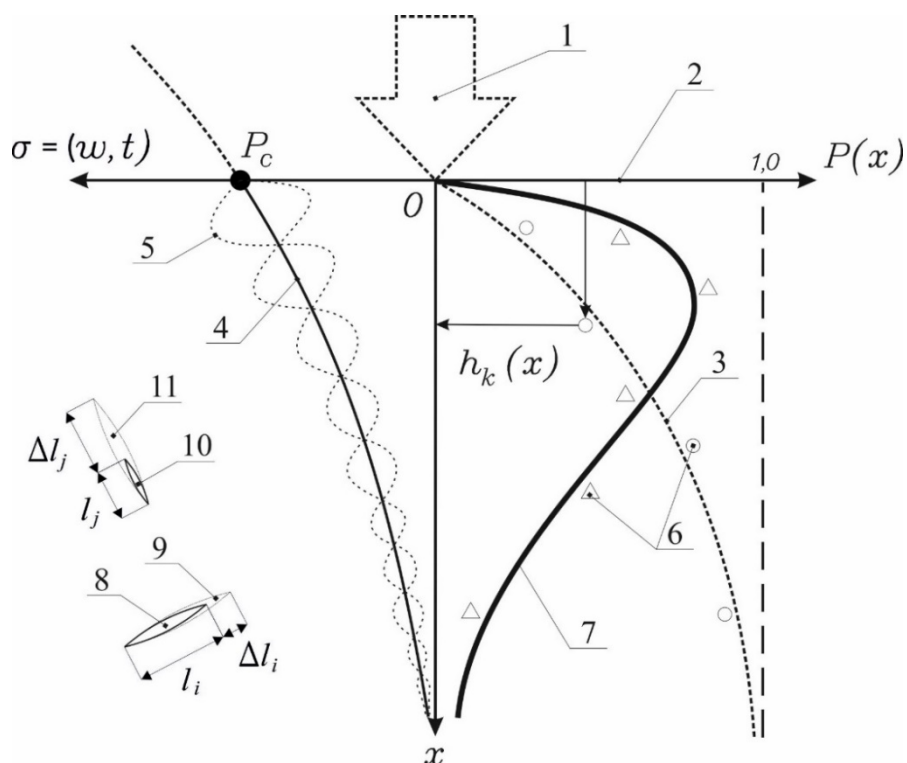


Рисунок 1 – Расчетная схема для вероятностного моделирования процесса энергоэкстремальной гидроструйной эрозии (ЭГЭ)

На рисунке обозначено: 1 – энергоэкстремальная гидроструя (ЭГС); 2 – поверхность материала объекта анализа (ОА); 3 – вероятностная зависимость наличия эрозионно-формирующих дефектов в материале ОА, например субмикро- и микротрещин; 4 – координатное изменение квазистабильных механических напряжений; 5 – характер изменения нестационарно-волновых напряжений; 6 – результаты имитационного моделирования методом Монте-Карло; 7 – результирующая вероятность формирования эродированной частицы с учётом напряженно-деформированного состояния (НДС) поверхностного слоя материала ОА; 8 – исходный микродефект длиной l_i ; 9 – приращение Δl_i ; 10 – формирующийся новый дефект длиной l_j ; 11 – приращение 10 на величину Δl_j .

Тогда подстановка в (3) значений $\sigma(hk)$ и $T(hk)$, т.е. параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние (НДС) и температуру на глубине hk поверхностного слоя материала ОА в зоне воздействия на него ЭГС, позволяет определять время до разрушения tk . Очевидно, что в рамках данной теории [11] это время tk необходимо на формирование эродированной частицы с диаметром, примерно равным hk .

Таким образом, появляется возможность путем применения (3) в симультанном сочетании с расчётами по (1) с использованием результатов имитационного моделирования для конкретных значений, согласно (2), рассчитывать соответствующие численные реализации изменений масс-геометрических характеристик процесса ЭГЭ. Причём информационно-диагностически важно, что

эти характеристики функционально связаны с ФМС материала поверхностного слоя ОА и его НДС, которое определяется уровнем термосилового воздействия ЭГС. Заметим, что эффективным средством вычисления НДС в зоне воздействия ЭГС является аппарат конечно-элементного моделирования [12], который в последнее время все чаще используется для решения данной и аналогичных задач энергоэкстремальной гидродинамики [13].

На практике использование выше предлагаемой модели позволяет подойти к эффективному экспресс-решению, по сути, обратной задачи, которая состоит в следующем: по результатам кратковременного тестового воздействия ЭГС на материал ОА путём анализа информативных признаков ЭГЭ, в первую очередь, макро- и микротопографии поверхности локально сформированной гидрокаверны и масс-геометрического распределения эродированных при её образовании частиц, производится сравнительная оценка трудноопределяемых иным способом параметров. Эти параметры, например исходная концентрация неидентифицируемых субмикродофектов, характеризует технологическое и/или ресурсно-эксплуатационное состояние поверхностного слоя изучаемого изделия или исследуемого образца. Причем предлагаемый подход к интерпретации экспериментально полученных параметров ЭГЭ в сочетании с общей структурой вероятностной модели этого процесса обеспечивает её необходимую для научно-прикладного использования конкретизирующую верификацию численных коэффициентов в соответствующих зависимостях.

Таким образом, экспериментально верифицированная вероятностная модель процесса ЭГЭ является неотъемлемой составляющей аппарата малоинвазивной технологии экспресс-определения параметров функционального качества поверхностного слоя различных ОА, в первую очередь ответственного назначения, на основных этапах их жизненного цикла. Схематично, роль предлагаемой модели в общей структуре информационно-диагностического обеспечения качества представлена на рисунке 2.

Следует подчеркнуть, что для повышения достоверности результатов моделирования необходимо уточнить характер взаимодействия ЭГС с диагностируемым поверхностным слоем материала ОА. В первую очередь требуется оценить степень влияния динамических изменений в его НДС, которые обусловлены ударно-волновым характером воздействия ЭГС, в том числе на координатную кинетику формирования критической поврежденности [12–14] в зоне диагностирования. Именно эти быстропротекающие изменения во многом ответственны за информационно-значимые особенности образования дискретного массива дисперсных эродированных частиц и в целом за размеры гидрокаверны. Поэтому для снятия допущения о квазистационарном характере изменения НДС проведем следующие феноменологически обоснованные рассуждения.

Пусть на протяжении достаточно малого интервала времени НДС материала поверхностного слоя можно считать стабильным. Тогда, с учётом (3) вероятность формирования поврежденности критического уровня [14, 15] в этой анализируемой зоне следует оценить отношением вида:

$$\Delta p_i = \Delta t_i / t_{pi}(\sigma_i, T_i) \tag{4}$$

где t_{pi} – прогнозируемое время до разрушения, т.е. время, затрачиваемое на формирование критической поврежденности в зоне анализа, при стабильных значениях σ_i и T_i , определяемый по соотношению (3).

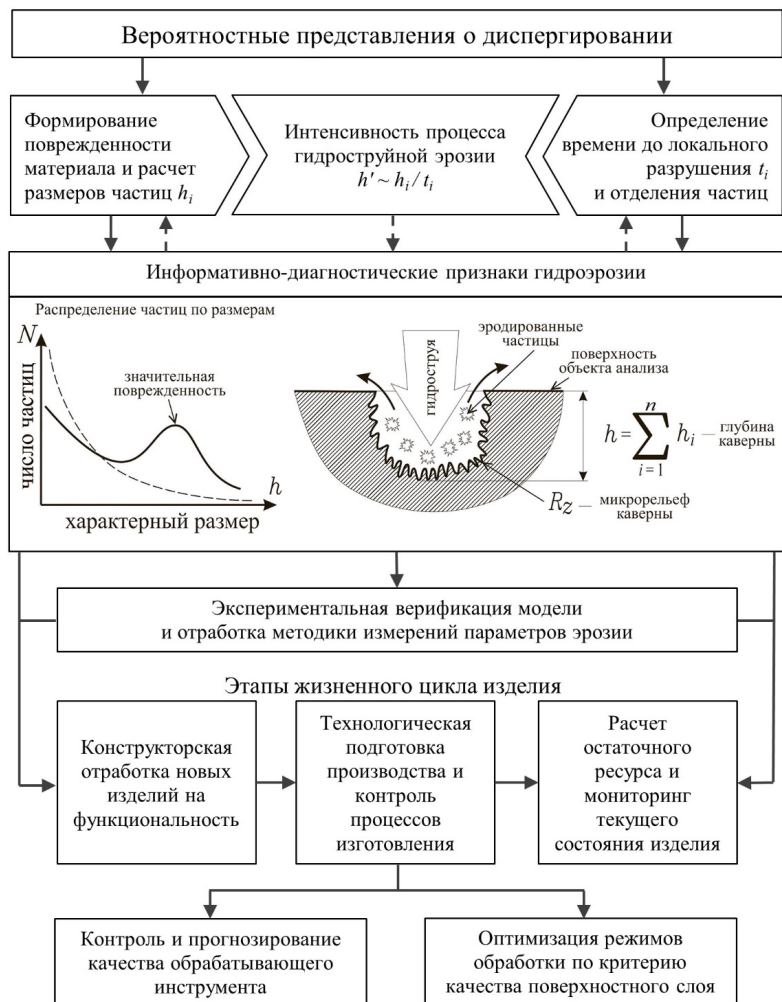


Рисунок 2 – Применение модели для информационно-диагностического обеспечения поэтапного формирования функционального качества изделий

Тогда, вполне очевидно, что для реализации процесса разрушения при изменяющихся значениях необходимо выполнение условия вида:

$$1 = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \tag{5}$$

или после предельного перехода в (5), т.е. при $n \rightarrow \infty$, а $\Delta t_i \rightarrow 0$; с а с учётом (3) и (4) будем иметь:

$$1 = \int_0^{t_p} \{t_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(\tau)/kT(\tau))]\} d\tau \quad (6)$$

где t_p – время до разрушения локальной зоны материала при ярко выраженном нестабильном термосиловом воздействии на него, т.е. при вариативном НДС.

Заметим, что фактически (5) и интегральное соотношение (6) полностью соответствуют известному в механике разрушения принципу Бейли или возможности линейного суммирования поврежденностей [11,15]. Схематично данное обстоятельство отражено позицией (5) на рисунке Рисунок 1 в виде наложения волн упругой деформации на квазистабильную картину НДС.

Заключительным этапом расширения функциональных возможностей предлагаемого вероятностного подхода к моделированию ЭГЭ, а также других физически аналогичных процессов диспергирования твёрдых тел, например фрикционного износа контактных поверхностей, следует считать установление взаимно-однозначного соответствия между, по сути, вероятностным характером топографии распределения и изменения дефектности (поврежденности) материала и его НДС. Для формализации этой взаимообусловленности используем одну из основополагающих зависимостей механики разрушения [7] в каноническом виде:

$$\sigma\sqrt{l} = K_c \quad (7)$$

где l – критическая длина трещины, а

σ – напряжение, растяжение, приводящее к самопроизвольному увеличению ;

K_c – коэффициент интенсивности напряжений, являющейся важнейшей характеристикой ФМС исследуемого материала.

Далее, вполне обосновано полагая что β в (2) обратнопропорционально длине весьма локальной трещины или характерному размеру микродефекта с учётом (7) базовая зависимость (1) примет после некоторых преобразований вид:

$$P(h) = 1 - \exp\{-p_c^4 h / [K_c^2 (p_c - k_p h)^2]\} \quad (8)$$

где $P(h)$ – как и ранее, вероятность отделения эродированной частицы с характерным размером, например диаметром h , из-за развития диспергирующего дефекта на данной глубине от поверхности ОА под действием ЭГС;

p_c – давление торможения ЭГС о поверхность ОА;

k_p – коэффициент, уравнивающий размерности в знаменателе (8) и определяющий глубину эффективного действия ЭГС:

$$k_p = p_c/h_0.$$

На рисунке 1 показан характер изменения (8), который физически вполне соответствует реалиям взаимодействия НДС и топографии микродефектов в материале поверхностного слоя ОА.

Таким образом, вычисления по (8), например путём имитационного моделирования, в сочетании с оценками по (6) дают возможность определить количественно локальную интенсивность процесса ЭГЭ и, как следствие, формализовать кинетику образования информационно-значимой гидрокаверны глубиной h :

$$\dot{h} = h_i/t_{pi}; g = \sum_{i=1}^n h_i \quad (9)$$

где \dot{h} - локальная скорость увеличения глубины гидрокаверны (мм/с);

n – количество последовательно анализируемых диспергированных ЭГС частиц материалов ОА.

Сопоставление \dot{h} , h_i и h с экспериментально наблюдаемыми закономерностями ЭГЭ позволит разработать инженерно-физическую методику экспресс-определения параметров функционального состояния поверхностного слоя материала различных ОА, что подчеркивает научно-прикладную значимость предлагаемого подхода. В дальнейшем, еще более детальное вероятностно-формализованное описание процесса ЭГЭ и его функционально-физических результатов, даст реальную возможность диагностирования и/или изучения тонких механизмов формирования поврежденности материала, в первую очередь с учётом фактора эксплуатационно-технологической наследственности [16].

Выводы

Вероятностное моделирование процесса ЭГЭ создаёт формализованную основу для целенаправленного экспериментального изучения и интегро-дифференциального анализа масс-геометрических характеристик массива эродированных ЭГС частиц материала поверхностного слоя различных ОА. Причем отличительной чертой предлагаемого подхода является симультанное сочетание необходимых и достаточных условий для осуществления процесса ЭГЭ. К необходимым условиям относится вариативная топография дефектности материала, а к достаточным – требуемый уровень термосилового воздействия на него в течении определенного времени. Таким образом, в результате реализации процедуры моделирования появляется возможность адекватного формирования соответствующих информационно-диагностических признаков ЭГЭ, ответственных за состояние материала поверхностного слоя, его локальные ФМС. В перспективе предлагаемая модель и её некоторые экспериментально

определяемые параметры могут оказаться весьма востребованными при расчётах остаточного ресурса конструкций с высокими требованиями по надёжности, а также на этапе технологической подготовки производства изделий из новых, в том числе композиционных и аддитивно получаемых материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Development of water jet cutting and study on different parameters [Text] / W. Khalid, M. Hussain, M. Nasir Bashir, M. M. Quaz, Imran Ali, Jahanzeb Bhatti, Hammad Ur Rehman // Journal of Applied and Physical Sciences. – 2019. – Vol. 5(3). – P. 81–87. – ISSN 2414-3103.

2 An experimental and numerical study of water jet cleaning process [Text] / Anirban Guhaa, Ronald M. Barrona, B. Ram Balachandarc. // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – P. 610–618. – ISSN 0924-0136.

3 **Балашов, О. Е.** Ультразвуковая технология получения микросуспензий [Текст] : монография. / О. Е. Балашов, А. А. Барзов, А. Л. Галиновский, Н. К. Литвин, Н. Н. Сысоев, В. Д. Шашурин. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 352 с.

4 **Абашин, М. И.** Ультразвуковая мезодиагностика [Текст]: монография. / М. И. Абашин, А. А. Барзов, А. Л. Галиновский, Н. Н. Сысоев, П. Н. Сысоев. – М. : МГУ имени М. В. Ломоносова. Физический факультет. 2020. – 250 с.

5 **Барзов, А. А.** Ультразвуковая 3D-диагностика [Текст] : монография. / А. А. Барзов, А. Л. Галиновский, Н. Н. Сысоев, Цзя Чженьюань. – М. : МГУ имени М. В. Ломоносова. Физический факультет, 2020. – 142 с.

6 **Прис, К.** Эрозия [Текст] : учеб. для вузов / Под ред. К. Прис. – М. : Мир, 1982. – 464 с.

7 **Черепанов, Г. П.** Механика хрупкого разрушения [Текст] : учебное пособие / Г. П. Черепанов. – М. : Наука, 1974. – 640 с.

8 **Фрейденталь, А. М.** Статистический подход к хрупкому разрушению [Текст] / А. М. Фрейденталь // Разрушение / Под ред. Г. Либовица. – М. : Мир. 1975. – Т.2. – С. 616–645.

9 **Барзов, А. А.** Масштабный фактор (феноменология и физико-технологические применения) [Текст] : монография. / А. А. Барзов, А. И. Денчик, М. А. Прохорова, Н. Н. Сысоев. – М. : МГУ имени М. В. Ломоносова. Физический факультет. – 2020. – 194 с.

10 **Гмурман, В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] : учеб. для вузов / В. Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2004. – 479 с.

11 **Регель, В. Р.** Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] : монография / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М. : Наука. 1974. – 560 с.

12 **Колпаков, В. И.** Импульсные технологии [Текст] : учебное пособие / В. И. Колпаков, А. Л. Галиновский, Л. В. Судник, А. А. Илюхина. – Старый Оскол : ТНТ, 2022. – 432 с.

12 **Абашин, М. И.** Ультраструйная гидродинамика [Текст]: монография / М. И. Абашин, А. А. Барзов, А. Л. Галиновский, И. В. Мазаева, Н. Н. Сысоев. – М.: МГУ имени М. В. Ломоносова. Физический факультет. 2015. – 308 с.

13 **Работнов, Ю. Н.** Введение в механику разрушения [Текст] : учебное пособие / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука. 1987. – 79 с.

14 **Барзов, А. А.** Эмиссионная технологическая диагностика [Текст]: учебное пособие / А. А. Барзов. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.

15 **Баданина, Ю. В.** Диагностика физико-технологической наследственности [Текст]: монография / Ю. В. Баданина, А. А. Барзов, Галиновский А. Л., Н. Н. Сысоев. – М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, 2018. – 304 с.

REFERENCES

1 Development of water jet cutting and study on different parameters [Text] / W. Khalid, M. Hussain, M. Nasir Bashir, M. M. Quaz, Imran Ali, Jahanzeb Bhatti, Hammad Ur Rehman // Journal of Applied and Physical Sciences – 2019, – Vol. 5(3) – P. 81-87. – ISSN: 2414-3103.

2 An experimental and numerical study of water jet cleaning process [Text] / Anirban Guhaa, Ronald M. Barrona,b, Ram Balachandarc // Journal of Materials Processing Technology – 2011, – Vol. 211 – P. 610-618. – ISSN: 0924-0136.

3 Ultrajet technology for obtaining microsuspensions [Text] / O.E. Balashov, A.A. Barzov, A.L. Galinovsky, N.K. Litvin, N.N. Sysoev, V.D. Shashurin. – Moscow : Bauman Moscow State Technical University, 2011. – 352 p.

4 Ultrajet mesodiagnosics [Text] / M. I. Abashin, A. A. Barzov, A. L. Galinovsky, N. N. Sysoev, P. N. Sysoev. – Moscow : Lomonosov Moscow State University. Department of Physics. 2020. – 250 p.

5 Ultrajet 3D diagnostics [Text] / A. A. Barzov, A. L. Galinovsky, N. N. Sysoev, Jia Zhenyuan. – Moscow : Lomonosov Moscow State University. Department of Physics, 2020. – 142 p.

6 Erosion [Text] / K. Pris. – Moscow : Mir, 1982. – 464 p.

7 Brittle fracture mechanics [Text] / G.P. Cherepanov. – М.: Science, 1974. – 640 p.

8 Statistical approach to brittle fracture [Text] / A. M. Freudenthal // Destruction / Ed. G. Liebovica. Moscow : Mir. 1975. – V.2. – С. 616–645.

9 Scale factor (phenomenology and physical and technological applications) [Text] / A. A. Barzov, A. I. Denchik, M. A. Prokhorova, N. N. Sysoev. – Moscow : Lomonosov Moscow State University. Department of Physics. – 2020, – 194 p.

10 Probability theory and mathematical statistics [Text] / V. E. Gmurman. – Moscow : Higher school, 2004. – 479 p.

11 Kinetic nature of the strength of solids [Text] / V. R. Regel, A. I. Slutsker, E. E. Tomashevsky. – Moscow : Science. 1974. – 560 p.

12 Impulse technologies [Text] / V. I. Kolpakov, A. L. Galinovsky, L. V. Sudnik, A. A. Ilyukhin. – Stary Oskol : TNT, 2022. – 432 p.

13 Ultrajet hydrodynamics [Text] / M. I. Abashin, A. A. Barzov, A. L. Galinovsky, I. V. Mazaeva, N. N. Sysoev. – Moscow : Lomonosov Moscow State University. Department of Physics, 2015. – 308 p.

14 Introduction to fracture mechanics [Text] / Yu. N. Rabotnov. – Moscow : Science, 1987. – 79 p.

15 Emission technological diagnostics [Text] / A. A. Barzov. – Moscow : Mashinostroenie, 2005. – 384 p.

16 Diagnosis of physical and technological heredity [Text] / Yu. V. Badanina, A. A. Barzov, Galinovsky A. L., N. N. Sysoev. – Moscow : Lomonosov Moscow State University. Department of Physics, 2018. – 304 p.

Материал поступил в редакцию 16.09.22.

*A. A. Barzov*¹, **V. S. Puzakov*², *A. V. Kuznetsov*³

¹Lomonosov Moscow State University, Russian Federation, Moscow

²LLC «Bureau Energy», Russian Federation, Ramenskoye

³JSC «United Engine Corporation» Branch «NIID»

Material received on 16.09.22

PROBABILISTIC MODEL FOR EXTREME-ENERGY HYDROJET IMPACT PROCESS OF MATERIAL EROSION

Probabilistic model of the intensity of the erosion destruction process of the material surface layer under the action of an extreme-energy hydrojet is proposed. A schematic diagram, shows the practical determination of the physically determined characteristics of the research object material resistance to the surface technological defects appearance and to its development to critical values during operation is described. Represented the concept of accelerated determination of hard-to-identify parameters of the surface layer state of the studying object (for example, the concentration of submicrodefects characterizing the state of the material of the product) by informative features of extreme energy hydrojet erosion (EHE), first of all, the macro- and microtopography of the locally formed hydrocavern surface and eroded during its formation of particles mass-geometric distribution.

Experimental verification of the information-and-diagnostic features of the model provides the possibility for quickly determining the material parameters that characterize its operational and technological properties, including their random deviations. These difficult-to-determine parameters of the structural materials state are necessary to improve the reliability of various functional resource calculations, primarily for increased reliability products. Further development of the proposed methodology and a more detailed probabilistic-formalized description of the EHE process and its functional and physical results will make it possible to realize the ability of minimal-invasive diagnostics of the object of analysis material state and/or study of the subtle mechanisms of its damage formation, primarily considering with the operational and technological heredity factor.

Keywords: material-properties diagnostics, extreme-energy hydrojet erosion, stress-strain state, theoretical probabilistic model, heredity.

*А. А. Барзов¹, *В. С. Пузаков², А. В. Кузнецов³*

¹М. В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті,
Ресей Федерациясы, Мәскеу қ;

²«Бюро Энергетика» ЖШҚ, Ресей Федерациясы, Раменское қ;

³«ОДК» «НИИД» АҚ филиалы, Ресей Федерациясы, Мәскеу қ;

Материал баспаға түсті 16.09.22

ЭНЕРГИЯ ЭКСТРЕМАЛДЫ ГИДРОҚҰРЫЛЫСТЫҢ ӘСЕРІНЕН МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ЭРОЗИЯ ПРОЦЕСІНІҢ ЫҚТИМАЛДЫ МОДЕЛІ

Материалдың беткі қабатының эрозиялық бұзылу процесінің қарқындылығының ықтималды моделі оған экстремалды гидрострукция әсер еткен кезде ұсынылады. Зерттеу объектісі материалының беттік технологиялық ақаулардың пайда болуына және оларды пайдалану процесінде сыни мәндерге дейін дамытуға төзімділігінің физикалық негізделген сипаттамаларын практикалық анықтаудың схемалық диаграммасы сипатталған. Зерттелетін объектінің беткі қабатының жай-күйінің қиын анықталатын параметрлерін (мысалы, өнім материалының жай-күйін сипаттайтын субмикродефекттердің концентрациясы) энергетикалық экстремалды гидроструальды эрозияның (ЭГЭ) ақпараттық белгілерін, ең алдымен жергілікті қалыптасқан гидрокаверна бетінің макро-және микротопографиясын және оның пайда болуы кезінде эрозияға ұшыраған бөліктердің массалық-геометриялық таралуын талдау арқылы жедел анықтау тұжырымдамасы ұсынылған. Модельдің ақпараттық-диагностикалық сипаттамаларын эксперименттік тексеру оның операциялық және технологиялық қасиеттерін сипаттайтын материалдың параметрлерін, соның ішінде олардың кездейсоқ ауытқуларын ескере отырып, жедел анықтауға мүмкіндік береді. Құрылымдық материалдар жағдайының бұл қиын анықталатын параметрлері әр түрлі функционалды-ресурстық есептеулердің сенімділігін арттыру үшін қажет, ең алдымен сенімділігі жоғары өнімдер үшін. Ұсынылған Әдістемені одан әрі дамыту және ЭЭЖ процесін және оның функционалды-физикалық нәтижелерін негүрлым егжей-тегжейлі ықтималды-формальды сипаттау талдау объектісі материалының жай-күйін аз инвазивті диагностикалау және/немесе оның зақымдануын қалыптастырудың нәзік тетіктерін, ең алдымен пайдалану-технологиялық тұқым қуалаушылық факторын ескере отырып зерттеу мүмкіндігін іске асыруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: материалдар қасиеттерінің диагностикасы, энергиялық экстремалды гидрожүйелік эрозия, кернеулі-деформацияланған күй, теориялық ықтималдық моделі, тұқым қуалаушылық.

Теруге 16.09.22 ж. жіберілді. Басуға 30.09.22 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,07 Mb RAM

Шартты баспа табағы 11,05 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 3998

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

nitk.tou.edu.kz