

УДК 620.1

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-104

М.А. Скотникова¹, Г.В. Иванова², Г.В. Цветкова³, Е.О. Куома⁴

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КАПЛЕУДАРНОЙ ЭРОЗИИ ОТДЕЛЬНОЙ КАПЛЕЙ



¹Маргарита Александровна Скотникова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (921)987-8752, E-mail: skotnikova@mail.ru



²Галина Валерьевна Иванова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (921)575-9143, E-mail: galura@yandex.ru



³Галина Викторовна Цветкова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (911)902-9933, E-mail: tsvetkova_gv@mail.ru



⁴Егор Олегович Куома,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого,
Россия, Санкт-Петербург,
Тел.: (952)486-7009, E-mail: kuk.kukob@yandex.ru

Аннотация

Предложена математическая модель возникновения каплеударной эрозии (износа) рабочих лопаток паровых турбин отдельной каплей. Средствами теории упругости и компьютерных программ *Mathcad* и *Abacus* рассчитано напряженное состояние материала входной кромки, возникающее вследствие ударов частиц пара со скоростью 150...600 м/с. Установлены величины нагрузки и расстояния от поверхности, при которых начиналось пластическое деформирование. Обоснованность предложенной модели подтвердили экспериментальные данные авторов, в результате

проведённых исследований на 3-х этапах характерной кривой каплеударного износа металла во времени и соответствующие этим этапам формы эродированной поверхности.

Ключевые слова: каплеударная эрозия; контактное взаимодействие; напряжения в полупространстве; условие пластической деформации; компьютерная математика; лопатка паровой турбины; титановый сплав.

Введение

Сегодня в энергетическом машиностроении все более возрастает удельный вес современных высокопроизводительных паровых турбин большой мощности с увеличенной длиной рабочих лопаток и, следовательно, с их повышенной окружной скоростью. При этом возрастает эрозионное изнашивание (разрушение) поверхностей лопаток паровых турбин в результате увеличения скорости их соударения с частицами водяного пара (рис.1).



Рис. 1. Эрозионное разрушение входных кромок периферийных зон рабочих лопаток паровых турбин.

Эрозия, вызванная потоком влажного пара, снижает эффективность лопаток ротора последней ступени паровых турбин и сокращает срок их службы. На сегодняшний день пока недостаточно данных для понимания причин возникновения эрозии лопаток во время эксплуатации и разработки математических моделей для оценки их срока службы. Большое практическое значение для изучения этого сложного вопроса имеют работы

как теоретического [1-8], так и экспериментального характера [9-17].

Целью работы явилось экспериментальное обоснование математического и цифрового моделирования возникновения каплеударной эрозии (КЭ) посредством решения контактной задачи, оценки величины нагрузки и расстояния от поверхности, при которых начинается пластическая деформация и далее обоснование всех этапов характерной кривой КЭ металла лопатки.

Методы

Авторы считают причиной КЭ накопление пластических контактных деформаций в результате деформирования тела циркулирующей ударной нагрузкой по усталостному механизму. Удары капель жидкости по поверхности тела, вызывающие эрозию, рассматривали как упругое контактное взаимодействие. Расчеты проводил средствами теории упругости и компьютерной математики.

Тело считали упругим полупространством, а каплю – шариком радиусом R , падающим с некоторой скоростью v (рис. 2). Работа опиралась на литературу по контактным задачам [1-3], а также компьютерные программы *Mathcad* и *Abacus*, что позволило довести классическое решение контактной задачи по Герцу до полной картины распределения контактных напряжений в материале входной кромки [1].

В результате решения задачи линейной теории упругости о контактном взаимодействии полупространства и шара (рис. 2) выведены следующие известные формулы Герца [11]:

$$\frac{1}{R} = \frac{3Q\beta}{4a^3}, \delta = \left(\frac{3Q\beta}{4}\right)^{2/3} R^{-1/3};$$
$$Q = p_0 \frac{2}{3} \pi a^2, \beta \equiv \frac{1-\nu_0^2}{E_0} + \frac{1-\nu^2}{E}$$
(1)

где Q – сила прижима, a – радиус контактного круга, δ – сближение тел; E, E_0 – модули Юнга и ν, ν_0 – коэффициенты Пуассона для титана и шара, соответственно.

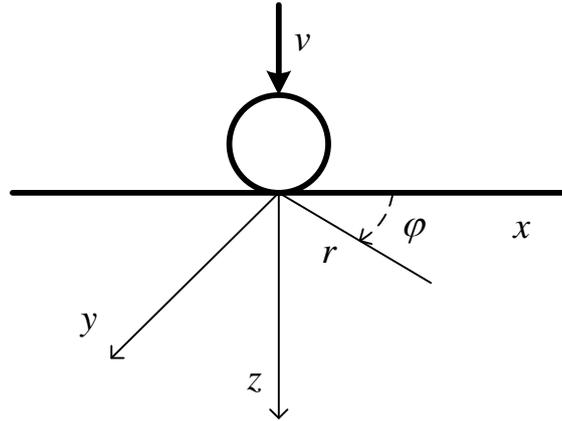


Рис. 2. Расчетная схема контакта [1].

Для контактного давления и силы воспользовались формулой

$$p(r) = p_0 \sqrt{1 - (r/a)^2}, Q = 2\pi \int_0^a p(r) r dr \quad (2)$$

где p_0 – значение в центре.

Были введены компактные выражения частных производных. Подставив (2) в закон Гука, определяли напряжения $\sigma_r, \sigma_\phi, \sigma_z, \tau_{rz}$. Далее найдены компоненты девиатора напряжений и норма Мизеса τ [2]:

$$S_r = (2\sigma_r - \sigma_\phi - \sigma_z)/3, \dots, S_{rz} = \tau_{rz};$$

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{2}(S_r^2 + S_\phi^2 + S_z^2) + \tau_{rz}^2} \quad (3)$$

где выражения компонент S_ϕ, S_z отличаются заменой индексов.

Начало пластической деформации определяли из условия текучести

$$\tau(r, z) = k \quad (4)$$

где k – предел текучести материала. Для титана $k = 500$ МПа. При достаточно слабом контактном воздействии (малой скорости капли) в материале будет $\tau < k$. Эрозия начнется, предположительно, при выполнении условия (4) в некоторой точке полупространства.

Результаты и обсуждение

Контактные напряжения по глубине от поверхности

Средствами теории упругости и компьютерной математики определялось напряженное состояние материала входной кромки лопатки, были найдены параметры нагрузки и расстояние от поверхности, при которых начиналась пластическая деформация.

В силу симметрии, достаточно рассмотреть норму Мизеса в осях координат $T(Z) - Z$. На рис. 3 представлен, разработанный в программе *Mathcad*, график зависимости нормы Мизеса по глубине от поверхности.

На графике видна типичная картина распределения напряжения вблизи области контактного взаимодействия, на которой максимум нормы Мизеса достигается не на поверхности, а очень близко от нее в глубине тела.

Построение графика проводили при следующих параметрах: радиус контактного круга $a = 10^{-4}$ (м), $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,3$, $p_0 = 1$, $k = 5 \cdot 10^8$ Па (для титана). Максимум на рис. 3 оказался равен $T_1 = 5,06 \cdot 10^4$ МПа и достигался на глубине $z_1 = 3,96 \cdot 10^{-3}$ мм.

При начале пластической деформации будет

$$p_0 T_1 = k \Rightarrow p_0 = 9.88 \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

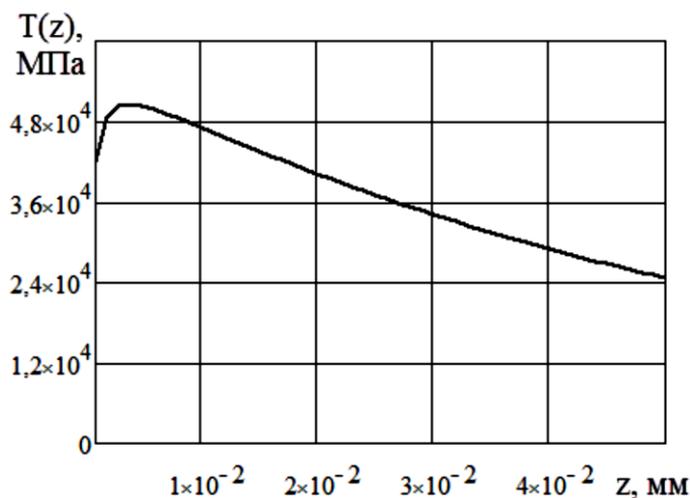


Рис. 3. Зависимость нормы Мизеса от расстояния от поверхности [1].

Расчет скорости удара капли, вызывающей пластическое деформирование

На основании закона сохранения энергии, был проведен расчет капли массой (m), при скорости (v) которой, начиналось пластическое деформирование. Потенциальная энергия взаимодействия Π равна кинетической энергии капли.

$$\Pi = 1/2 mv^2 \quad (6)$$

Далее из определяли соответствующую скорость капли

$$v = \frac{\beta^2 \pi^2}{2\sqrt{10\rho_0}} p_0^{5/2} = \frac{1.56 \cdot \beta^2}{\sqrt{\rho_0}} \cdot \left(\frac{k}{T_1}\right)^{2.5} \quad (7)$$

где T_1 - константа, R - радиус капли, k - предела текучести и β - параметр.

При расчётах были использованы экспериментальные данные по упругим свойствам воды [7, 13]: $\nu = 0,5$, $\mu = 1,3 \cdot 10^{-5}$. Используя эти значения

вместе с результатом (5) по формуле (7), получили критическое значение скорости капли $v = 177$ м/с.

Моделирование контактного взаимодействия отдельной частицы пара с поверхностью материала лопатки.

В компьютерной программе *Abaqus* рассчитывали процесс удара капли со скоростью 177 м/с в воздушной среде о твердую поверхность материала лопатки.

На рис. 4 представлена модель распределения напряжения в поперечном и продольном сечении лопатки относительно направления движения капли, вблизи области контактного взаимодействия, на которой максимум нормы Мизеса достигался не на поверхности, а очень близко от нее в глубине тела.

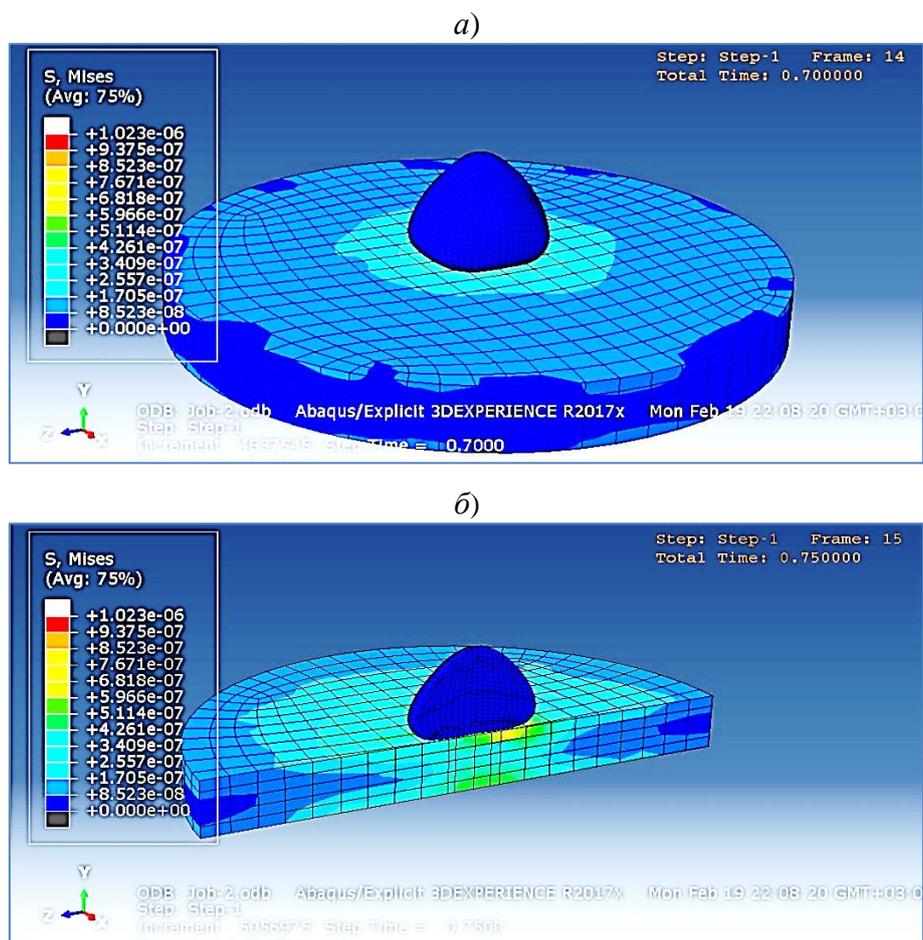


Рис. 4. Модель контактного взаимодействия отдельной частицы пара, налетающей на поверхность материала лопатки паровой турбины: а) в поперечном; и б) продольном сечении относительно направления движения капли.

Результаты мониторинга и исследования 3-х этапов характерной кривой каплеударного разрушения лопаток паровых турбин во

времени и соответствующих этим этапам форм эродированной поверхности

Наибольший эрозионный износ входных кромок паровых лопаток, работающих на влажном паре, появляется на последних ступенях турбин. Установлено, что эрозионный износ на периферийной части может достигать 30 % от хорды входного профиля лопатки.

Мониторинг и исследование закономерностей процесса эрозии были экспериментально проведены на 3-х этапах характерной кривой каплеударного износа металла во времени и соответствующие этим этапам формы эродированной поверхности.

В табл. 1, на рис. 5 и рис. 6 представлены результаты нарастания ширины эрозионного повреждения лопатки Δb (мм) и снижения КПД турбины от времени её работы, а также результаты исследования 3-х этапов характерной кривой величины и скорости каплеударного износа.

Таблица 1. Влияние эрозионного износа на снижение КПД турбины за период работы

Этап работы	Второй этап, τ_2				Третий этап, τ_3				
Время работы, ч.	6292	10413	12946	23521	30171	44598	72854	101490	131071
Величина эрозии, мм.	0,3	1,2	1,13	3,2	3,75	4,34	5,05	5,67	6,38
Снижение КПД турбины, %	0,12	0,25	0,5	1,7	1,8	3,2	6,5	-	-

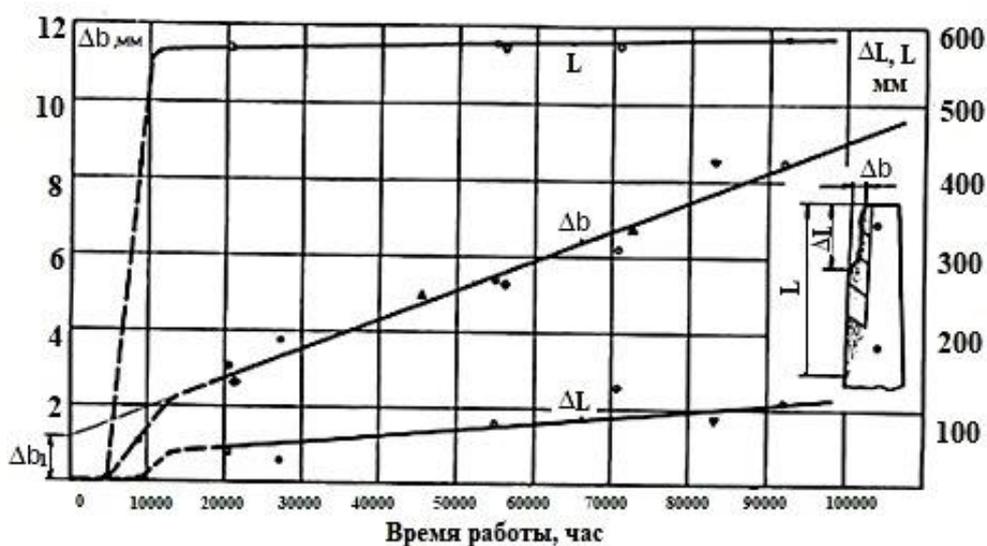


Рис. 5. Зависимость ширины Δb (мм), длины ΔL (мм) и общей длины L (мм), эрозионного повреждения лопатки от времени работы турбины.

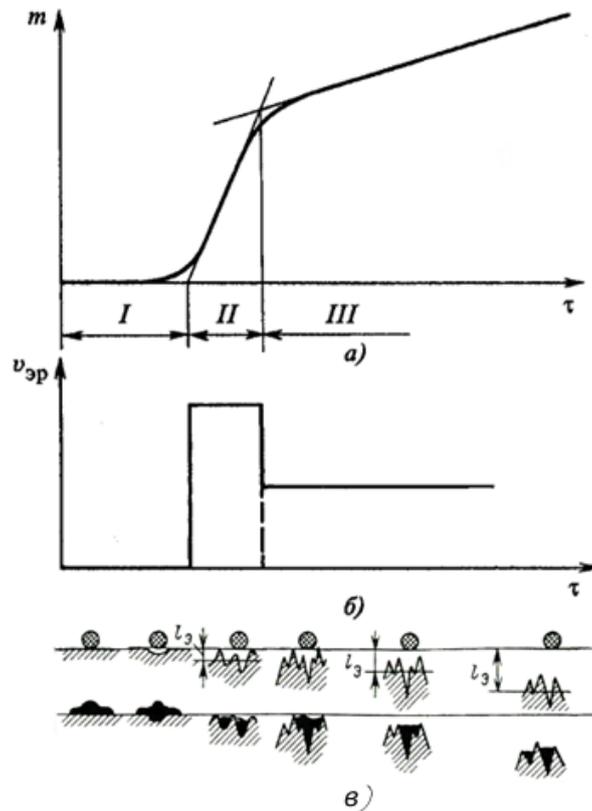


Рис. 6. Характерная кривая каплеударного износа (а), скорость эрозионного износа (б) и отвечающие её этапам, формы эродированной поверхности (в).

Различают три характерных этапа протекания КЭ (глубины эрозионного износа $l_{\text{э}}$) во времени.

На *первом этапе* τ_1 , так называемом *инкубационном периоде*, видимых повреждений поверхности не было. На этом этапе под действием каплеударных циклических волн напряжений происходило накопление подповерхностных дефектов и усталостных трещин и в дальнейшем их возможное выкрашивание с поверхности (рис. 7). На этом этапе эрозионный износ (потеря массы материала) отсутствовал и скорость эрозии, соответственно, была равна нулю.

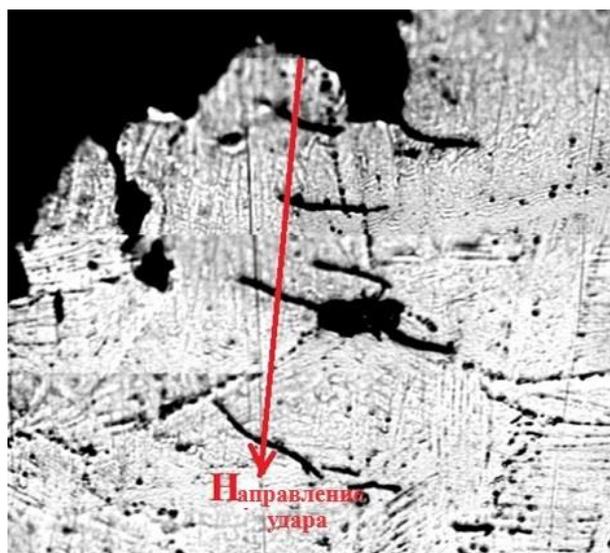


Рис. 7. Зарождение подповерхностных дефектов и усталостных трещин

Второй этап τ_2 характеризовался тем, что на нем имела место максимальная скорость эрозии в течение всего отрезка времени (рис. 6, б). В интервале времени работы турбины от 6292 до 23521 часов (табл.1), величина ширины износа Δb мм возрастала в 11 раз, в то же время, КПД турбины снижался в 14 раз. В конце второго этапа на поверхности лопатки турбины, вследствие роста размера и количества трещин, сформировалась устойчивая «горная» структура с расстоянием между вершинами 400...700 мкм и глубиной впадин 1100 мкм (рис.8).



Рис. 8. «Горная» структура эродированной поверхности лопатки турбины: а) в поперечном; и б) продольном сечении относительно направления движения капли. х40.

Во время третьего этапа τ_3 скорость эрозии снижалась по сравнению с этапом 2. Можно полагать, что это связано с изменением шероховатости, формы и твердости эродируемой поверхности. В интервале времени работы турбины от 30171 до 72854 часов (табл.1), величина ширины износа Δb мм возрастала только в 1,3 раза, в то же время, КПД турбины снижался в 3,6 раз. Можно полагать, что на этой стадии поверхность турбинной лопатки

«самоорганизовывала» защиту от КЭ, поэтому скорость эрозии приобрела постоянное значение (рис. 6, б).

Уже через 30171 часов работы, поверхность лопатки с «горной» структурой имела достаточно высокие и острые выступы, которые дробили крупные капли и тем самым снижали интенсивность воздействия капель на поверхность лопатки. Во впадина (кавернах) скапливалась вода, которая, вероятно, смягчала удар капель о поверхность.

Измерения микротвердости производили на микрошлифах, приготовленных в поперечном сечении лопатки вдоль направления движения ударной волны сжатия, с интервалом 20 мкм при нагрузке 20 г.

Результаты измерения микротвердости имели волнообразный характер с периодом 400...700 мкм (рис. 9), что согласовывалось с расстоянием между вершинами микрорельефа поверхности.

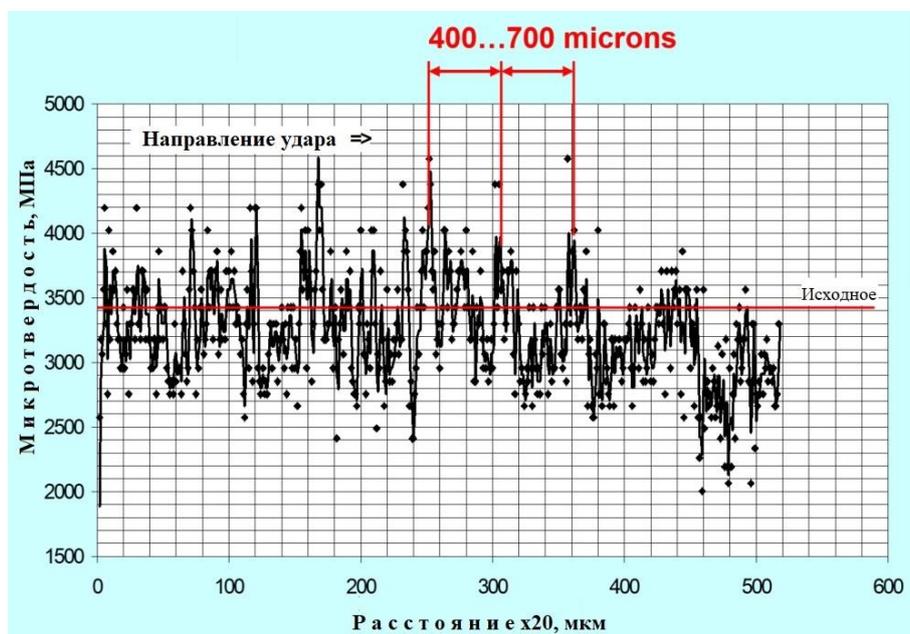


Рис. 9. Результаты изменения микротвердости в материале лопатки из сплава титана вдоль направления движения ударной волны.

На основе измерений и наблюдений за КЭ было установлено, что лопатки турбины в течение срока службы в основном работают в третьем этапе с более низкой и относительно линейной скоростью эрозии (рис. 5, рис. 6). Поэтому, оценив скорость повреждения ширины износа лопатки (Δb) на третьем этапе и измерив время этого этапа, можно оценить приблизительный срок службы лопаток турбины.

Согласно этим представлениям во время первого этапа, под поверхностью появляются и накапливаются повреждения (инкубационный этап износа), далее накопленные подповерхностные дефекты и трещины выкрашивают поверхность, возрастает глубина впадин (этап высокой

скорости износа), углубления впадин до нескольких диаметров капель и заострение перемычек между кавернами (замедление износа), формирование «горной» формы поверхности, типичной для эродированных поверхностей турбинных лопаток (этап минимальной скорости износа).

Таким образом, для управления эрозионной стойкостью металла лопаток, большое значение имеет первый (начальный) этап, продолжительность которого в значительной степени характеризует сопротивляемость материала микроударному разрушению.

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Разработана удобная для реализации на ПЭВМ универсальная математическая модель возникновения каплеударной эрозии (износа) рабочих лопаток паровых турбин отдельной каплей.

2. Средствами теории упругости и компьютерных программ *Mathcad* и *Abacus* определено распределение напряжения вблизи области контактного взаимодействия, на которой максимум нормы Мизеса достигался не на поверхности, а очень близко от нее в глубине тела.

3. Проведенный мониторинг и исследование закономерностей процесса эрозии, экспериментально проиллюстрировали 3 этапа характерной кривой каплеударного разрушения металла во времени и соответствующие этим этапам формы эродированной поверхности.

4. Авторы считают причиной КЭ накопление пластических контактных деформаций в результате деформирования тела циркулирующей ударной нагрузкой по усталостному механизму.

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Skotnikova M.A., Eliseev V.V., Moskalets A.A., Krylov N.A. Application of the theory of contact elastic deformations for assessing the risk of destruction of turbine blades as a result of high-speed impact by steam particles *International Review of Mechanical Engineering*. 2017. 11(5), pp. 350-355.
- [2] Елисеев, В.В. *Механика деформируемого твердого тела*. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 231 с.
- [3] Eliseev V.V., Moskalets A.A. *Vibrations of turbine blades as elastic shells Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2018. pp. 53-60.

- [4] Zinovieva T.V., Moskalets A.A. Modal analysis of turbine blade as one- and three-dimensional body Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2018. pp. 195-204.
- [5] Лагерев А.В. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход. В 3 томах. Т. 2. Вероятностное прогнозирование эрозии паровых турбин: монография / А.В. Лагерев. М.: Машиностроение. 1, 2006. 295 с.
- [6] Ковальский А.Э. Математическая модель высокоскоростного удара эрозионно-опасной капли конденсата по рабочей лопатке влажно-паровой ступени энергетической турбины // Вестник двигателестроения. 2004. №2. С. 51-59.
- [7] Чижов А.В., Шмидт А.А. Высокоскоростной удар капли о преграду // Журн. технической физики. 2000. Т. 70, вып. 12. С. 18 – 26.
- [8] Варавка В.Н. Прогнозирование эрозионного износа титановых сплавов в условиях длительного каплеударного воздействия / В.Н. Варавка, О.В. Кудряков, А.Ф. Медников // Вестник Донского государственного технического университета, 2011. № 9. С. 1574-1585.
- [9] Кудряков, О.В. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях / О.В. Кудряков, В.Н. Варавка // Материаловедение. 2012. № 5. С. 36-43.
- [10] Skotnikova M.A., Krylov N.A. About the nature of dissipative processes in cutting treatments of titanium vanes. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2017. pp. 115-123.
- [11] Skotnikova M.A., Krylov N.A., Tsvetkova G.V. Structural and phase transformation in material of steam turbines blades after high-speed mechanical effect. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016. pp. 159-168.
- [12] Перельман Р.Г. Эрозия элементов паровых турбин / Р.Г. Перельман, В.В. Пряхин. М.: Энергоатомиздат. 1986. 184 с.
- [13] Бойко В. М., Поплавский С. В. Особенности динамики капли воды в потоке за ударной волной // Известия РАН. Физика жидкости и газа. 2007. №3. С. 110–120.
- [14] Skotnikova M.A., Chizhik T.A., Tsybulina I.N., Lanina A.A., Krylov N.A., Use of titanium alloys as shovel material of steam turbines // Materials Science Questions. 2007. 51(3). 61-70.
- [15] Шубенко А.Л. Влияние эрозии на основные эксплуатационные характеристики рабочей лопатки последней ступени цилиндра низкого давления мощной паровой турбины / А.Л. Шубенко, А.Э. Ковальский, Ю.С. Воробьев, Г.Н. Картмазов, В.Н. Романенко // Проблемы машиностроения. 2010. Т. 13. № 1. С. 3-11.
- [16] Haller K.K., Ventikos Y., Poulikakos D., Monkewitz P. Computational study of High-speed liquid droplet impact // J. of Applied Physics. 2002. Vol. 92. № 5. P. 2821 – 2828.

- [17] Qulan Zhou. Water Drop Erosion on Turbine Blades: Numerical Framework and Applications / Qulan Zhou, Na Li, Xi Chen, Akio Yonezu, Tongmo Xu, Shien Hui, Di Zhang // Materials Transactions, 2008. T. 49. № 7. C. 1606-1615.

M.A. Skotnikova, G.V. Ivanova, G.V. Tsvetkova, E.O. Kuoma

MODELING THE OCCURRENCE OF IMPACT EROSION BY A SINGLE DROP

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

A mathematical model of the occurrence of drop-impact erosion (wear) of the working blades of steam turbines by a separate drop is proposed. By means of elasticity theory and computer programs Mathcad and Abacus, the stress state of the input edge material resulting from impacts of steam particles at a speed of 150 is calculated...600 m/s. The values of the load and the distance from the surface at which plastic deformation began were determined. The validity of the proposed model was confirmed by the experimental data of the authors, as a result of studies conducted at 3 stages of the characteristic curve of drop-impact wear of metal over time and the shapes of the eroded surface corresponding to these stages.

Key words: drop-impact erosion; contact interaction; stresses in half-space; plastic deformation condition; computer mathematics; steam turbine blade; titanium alloy.

REFERENCES

- [1] Skotnikova M.A., Eliseev V.V., Moskalets A.A., Krylov N.A. Application of the theory of contact elastic deformations for assessing the risk of destruction of turbine blades as a result of high-speed impact by steam particles International Review of Mechanical Engineering. 2017. 11 (5), pp. 350-355.
- [2] Eliseev V.V. Mechanics of a deformable solid. – St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. 2006. 231 p. (rus.)
- [3] Eliseev V.V., Moskalets A.A. Vibrations of turbine blades as elastic shells. 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 53-60.
- [4] Zinovieva T.V., Moskalets A.A. Modal analysis of turbine blade as one- and three-dimensional body. 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 195-204.

- [5] Lagerev A.V. Erosion of steam turbines: a probabilistic approach. In 3 vols. 2. Probabilistic forecasting of erosion of steam turbines: monograph / A.V. Lagerev. - M.: Mashinostroenie. 1. 2006. 295 p. (rus.)
- [6] Kovalsky A.E. Mathematical model of high-speed impact of an erosively dangerous condensate drop on the working blade of a wet-steam stage of an energy turbine // Bulletin of engine building. 2004. No. 2. pp. 51-59. (rus.)
- [7] Chizhov A.V., Schmidt A.A. High-speed impact of a drop on an obstacle // Journal of Technical Physics. 2000. Vol. 70, vol. 12. pp. 18-26. (rus.)
- [8] Varavka, V.N. Forecasting of erosive wear of titanium alloys under conditions of prolonged drop impact / V.N. Varavka, O.V. Kudryakov, A.F. Mednikov // Bulletin of the Don State Technical University. 2011. No. 9. pp. 1574-1585.
- [9] Kudryakov, O.V. Mechanisms of formation erosive wear of metal materials in high-speed drip collisions / O.V. Kudryakov, V.N. Varavka // Materials science. 2012. No. 5. pp. 36-43. (rus.)
- [10] Skotnikova M.A., Krylov N.A. About the nature of dissipative processes in cutting treatments of titanium vanes Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2017. pp. 115-123.
- [11] Skotnikova M.A., Krylov N.A., Tsvetkova G.V. Structural and phase transformation in material of steam turbines blades after high-speed mechanical effect. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2016. pp. 159-168.
- [12] Perelman, R.G. Erosion of steam turbine elements / R.G. Perelman, V.V. Pryakhin. – M.: Energoatomizdat, 1986. 184 p. (rus.)
- [13] Boyko V. M., Poplavsky S. V. Features of dynamics of a water drop in a stream behind a shock wave // Izvestiya RAS. Physics of liquid and gas. – 2007. No.3. pp. 110-120. (rus.)
- [14] Skotnikova M.A., Chizhik T.A., Tsybulina I.N., Lanina A.A., Krylov N.A., Use of titanium alloys as shovel material of steam turbines // Materials Science Questions 2007. 51(3), pp. 61-70.
- [15] Shubenko A.L. The effect of erosion on the main operational characteristics of the working blade of the last stage of the low-pressure cylinder of a powerful steam turbine / A.L. Shubenko, A.E. Kovalsky, Yu.S. Vorobyov, G.N. Kartmazov, V.N. Romanenko // Problems of mechanical engineering. 2010. Vol. 13. No. 1. pp. 3-11. (rus.)
- [16] Haller K.K., Ventikos Y., Poulidakos D., Monkewitz P. Computational study of High-speed liquid droplet impact // J. of Applied Physics. 2002. Vol. 92. № 5. P. 2821 – 2828.
- [17] Qulan Zhou. Water Drop Erosion on Turbine Blades: Numerical Framework and Applications / Qulan Zhou, Na Li, Xi Chen, Akio Yonezu, Tongmo Xu, Shien Hui, Di Zhang //Materials Transactions. 2008. T. 49. № 7. pp. 1606-1615.