

УДК 621.165

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ И ХИМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМЫ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ВЛАЖНОПАРОВЫХ ТУРБИН ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЗОВАННОЙ ВЛАГИ

<sup>1</sup> **А. А. Тарелин**, член-кор. НАН Украины  
[tarelin@ipmach.kharkov.ua](mailto:tarelin@ipmach.kharkov.ua)  
 ORCID: 0000-0001-7160-5726

<sup>2</sup> **В. Л. Швецов**, канд. техн. наук  
[shvetsov@turboatom.com.ua](mailto:shvetsov@turboatom.com.ua)  
 ORCID: 0000-0002-2384-1780

<sup>1</sup> **В. Г. Михайленко**, канд. техн. наук  
[port342017@gmail.com](mailto:port342017@gmail.com)  
 ORCID: 0000-0003-3082-6148

<sup>1</sup> **А. В. Нечаев**, канд. техн. наук  
[nechaev@ipmach.kharkov.ua](mailto:nechaev@ipmach.kharkov.ua)  
 ORCID: 0000-0001-6586-4713

<sup>1</sup> **А. Е. Хиневич**  
[port342017@gmail.com](mailto:port342017@gmail.com)  
 ORCID: 0000-0003-1902-534X

<sup>1</sup> Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 61046, Украина, г. Харьков, ул. Пожарского, 2/10

<sup>2</sup> Акционерное общество «Турбоатом», 61037, Украина, г. Харьков, пр. Московский, 199

*Статья посвящена электрохимическому и химическому аспектам эрозионно-коррозионного разрушения поверхностного слоя рабочей лопатки влажнопаровой турбины под воздействием электризованного рабочего тела. Рассмотрена гипотеза о комплексном механо-химико-электрохимическом механизме вымывания хрома и железа из поверхностного слоя металла рабочей лопатки при разрушении оксидной пленки под воздействием высокоскоростного потока влажного пара. Проанализированы различные варианты этого процесса для положительной, отрицательной, квазинейтральной и нейтральной электризации влажного пара. Теоретически показана возможность наводороживания поверхности рабочих лопаток под воздействием отрицательно заряженных капель. Повреждение лопаток в этом случае подобно повреждению от анодного травления. Также показано, что процесс наводороживания поверхности лопатки имеет место в любом случае и для электрически заряженных капель, и для нейтральных. Однако в случае нейтральных капель интенсивность процесса незначительна. Проведено экспериментальное исследование поверхности рабочей лопатки с эрозионным повреждением из последней ступени турбины ВК-50 ЛМЗ, отработавшей свой ресурс. Определено количественное содержание хрома в вырезанном из лопатки образце стали. Обнаружено уменьшение содержания хрома в поврежденном эрозией поверхностном слое лопатки. Для проверки гипотезы о схожести процесса анодного электротравления с процессом разрушения поверхности под действием отрицательно заряженных капель проведен электрохимический эксперимент на модельном образце хромистой стали 20Х13. Показано, что рельефы поврежденных участков на модельном образце после анодного травления и на исследуемой лопатке в зоне действия отрицательно заряженных капель подобны. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили наличие комплексного механо-химико-электрохимического процесса разрушения лопатки. На основе полученных данных сформулированы рекомендации по продлению ресурса лопаток турбомашин.*

**Ключевые слова:** электризация пара, наводороживание, эрозия лопаток.

### Введение

В настоящее время в качестве ведущего механизма эрозионного повреждения поверхности рабочих лопаток влажнопаровых турбин рассматривают механические усталостные явления, возникающие под действием волн Рэлея. Механическим эрозионным процессам, протекающим под действием капельной влаги, сопутствуют и коррозионные процессы, которые полагают вторичными по значимости. Коррозионные повреждения лопаточного аппарата обычно начинаются в зоне фазового перехода и распространяются на рабочие лопатки всех ступеней, работающих в области влажного пара [1].

Эрозионно-коррозионное разрушение поверхностного слоя металла может сопровождаться изменением химического состава металла, в первую очередь за счет электрохимического наводороживания. В научной литературе есть данные о существенном увеличении (в 10 раз и более) концентрации водорода в поврежденном поверхностном слое рабочей лопатки [2]. Обсуждается влияние

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Международная.  
 © А. А. Тарелин, В. Л. Швецов, В. Г. Михайленко, А. В. Нечаев, А. Е. Хиневич, 2021

активного водорода, образующегося в результате электрохимических процессов на поверхностях лопаток, на разрушение металла при высокоскоростных капельных ударах [3]. Дополнительным фактором, влияющим на поглощение водорода поверхностью металла, может быть электрический заряд капель и электрические поля, возникающие в проточной части цилиндра низкого давления в случае электризации влажнопарового потока [4, 5].

### Механо-химико-электрохимическое воздействие на рабочие лопатки

На наш взгляд, кроме механического и электрохимического, высокоскоростной поток оказывает механо-химико-электрохимическое воздействие на поверхность рабочих лопаток в более сложной конфигурации. Рассмотрим подробнее особенности этого воздействия для различных случаев электрической заряженности влажнопарового потока: положительной, отрицательной и нейтральной с квазинейтральной.

В случае положительно заряженных капель, ударяющих по поверхности, металл является катодом. Полный заряд положительно заряженной капли можно представить в виде

$$\Sigma Q^+ = (H_2O)_n \cdot zH^+,$$

где  $n$  – количество молекул, связанных с ионами водорода;  $z$  – количество ионов, захваченных каплей.

При контакте капли и поверхности лопатки протекает реакция разряда (нейтрализации) ионов в капле



При этом водород первоначально выделяется в атомарном виде  $H$  и поглощается металлом, наводороживая его и соответственно ухудшая его прочностные свойства. Детально процесс негативного влияния положительно заряженных капель на прочностные свойства поверхностного слоя лопаточных материалов показан в ряде работ [4, 5, 6].

Положительно заряженными, как правило, являются крупные капли, воздействующие на периферийную часть рабочей лопатки. В этой зоне наблюдается наибольшая абсорбция водорода и, как следствие – интенсивная эрозия лопатки (рис. 1). По этим причинам для защиты поверхности лопаток от воздействия крупнодисперсной влаги в качестве одного из распространенных материалов могут быть использованы стеллитовые пластины.



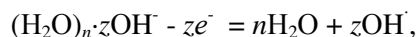
*Рис.1. Примеры эрозионных повреждений периферийной части рабочих лопаток под действием крупнодисперсных, положительно заряженных капель*

Следуя классической электрохимической концепции, логично было бы ожидать, что когда пар заряжен отрицательно по отношению к металлу, наводороживание последнего будет отсутствовать, так как на аноде водород выделяться не может. Однако, как следует из экспериментальных данных [5], при обработке металла отрицательно заряженным паром наводороживание также имеет место. Чисто механо-электрохимическая гипотеза это явление объяснить не может, и в данном случае действующие факторы требуют детального изучения. Одним из них может быть следующий.

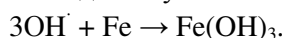
Удар отрицательно заряженной капли с полным зарядом  $\Sigma Q^-$

$$\Sigma Q^- = (H_2O)_n \cdot zOH^-,$$

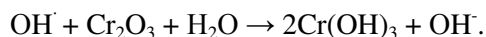
по поверхности лопатки, для случая поврежденной оксидной пленки на поверхности сопровождается протеканием химической реакции вида



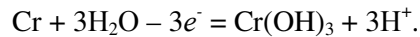
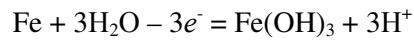
с образованием радикала  $OH^{\cdot}$ . Радикал взаимодействует с атомом железа с образованием гидроксида



Образующийся радикал агрессивен для оксидной пленки на поверхности металла вследствие протекания следующих реакций:



В результате оксидная пленка может быть локально химически разрушена и заряженные капли воды могут прореагировать с атомами железа и хрома. В данном случае будет протекать процесс коррозии, в котором свободный атомарный водород не выделяется, а происходит образование аморфных гидроксидов, не защищающих активную металлическую поверхность и ионов водорода  $H^+$



Образовавшаяся смесь гидроксидов железа и хрома не держится на поверхности металла и легко удаляется с нее под воздействием капельной влаги. Таким образом, поверхность металла активируется и, поскольку и железо, и хром в ряду напряжений металлов находятся значительно левее (активнее) водорода, они химически взаимодействуют с водой, образуя атомарный водород



Образовавшийся атомарный водород внедряется в металл. При этом, прежде всего, с водой реагирует наиболее активный металл, которым в данном случае является хром. В результате происходит уменьшение содержания хрома в поверхностном слое металла и развивается процесс коррозии, подобный электротравлению. Этот же процесс химического растворения (реакция (2), (3)) идет и в случае положительно заряженных капель, но он пренебрежимо мал по сравнению с образованием катодного водорода (реакция (1)).

Кроме взаимодействия радикала  $OH$  с оксидом  $Cr_2O_3$ , может иметь место и иной способ химического разрушения пассивной пленки на поверхности металла. Поскольку оксидная пленка на поверхности не является абсолютно непроницаемой для радикалов  $OH$  и электронов, возможна диффузия радикала  $OH$  под пленку и химическое взаимодействие радикала с атомами хрома. В этом случае гидроксид может образовываться под пленкой, постепенно накапливаясь, таким образом локально вспучивая пленку и разрушая ее.

В случае электрически нейтрального пара воздействие капельной влаги главным образом механическое. Это имеет место и при квазинейтральном заряде пара (в квазинейтральном варианте капли имеют как положительный, так и отрицательный заряды). Такие заряженные капли при попадании на поверхность взаимно нейтрализуются, и, таким образом, водород выделяется в результате химического взаимодействия металла с водой только в случае повреждения оксидной пленки: реакции (2) и (3). Для нейтрального и квазинейтрального заряда пара это единственный химический процесс.

Результаты проведенных исследований показали, что под воздействием отрицательно заряженных капель происходит анодное травление поверхности лопатки, которое сильно активирует (открывает) поверхность и реакции (2) и (3) ускоряются. Это объясняет увеличение количества водорода в металле и природу его разупрочнения.

### Экспериментальная часть

Для исследования механо-химико-электрохимического воздействия на поверхность металла было проведено соответствующее обследование рабочей лопатки последней ступени одноцилиндровой турбины ВК-50 ЛМЗ, полностью отработавшей свой ресурс, с эрозийным повреждением поверхности в средней ее части вплоть до стеллитовой пластины, защищающей входную кромку лопатки от разрушения.

Как известно из результатов экспериментальных исследований [4], распределение знака заряда потока пара вдоль длины лопатки для наиболее распространенных водно-химических режимов выглядит следующим образом (рис. 2): периферийная часть пера лопатки (приблизительно верхняя треть) подвергается воздействию крупнодисперсных положительно заряженных капель, а остальная часть пера почти до корня лопатки подвергается воздействию мелких капель, заряженных преимущественно отрицательно.

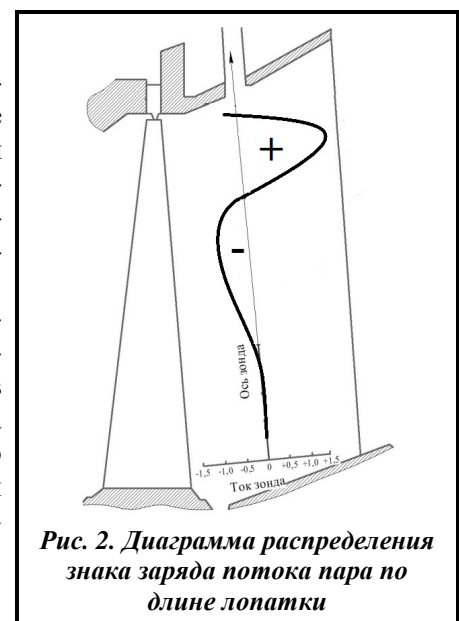


Рис. 2. Диаграмма распределения знака заряда потока пара по длине лопатки

Представленная на рис. 2 схема дает основания предполагать, что у исследуемой лопатки наиболее эродированная часть (рис. 3) была в зоне действия крупных положительно заряженных капель, а середина лопатки, из которой был вырезан фрагмент для анализа, – в зоне действия

мелких отрицательно заряженных капель. В данном случае на периферийной части лопатки была стеллитовая защитная пластина и область максимальной эрозии находилась ниже пластины. На этой части поверхности рельеф эрозии менее глубокий с отдельными очагами повреждения, напоминающими каверны электротравления.

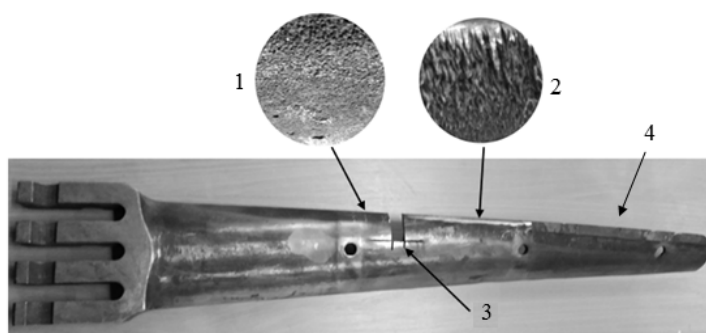
Детальное изучение поверхности выявило схожесть характера разрушения в зоне воздействия отрицательно заряженного пара с разрушениями поверхности при электротравлении хромистой стали (рис. 4). Для проверки гипотезы о схожести процессов анодного электротравления с процессами разрушения поверхности под действием отрицательно заряженных капель проведен электрохимический эксперимент на специально подготовленном отполированном электроде из хромистой стали 20X13. Образец был подвергнут ускоренному анодному травлению в растворе  $\text{NaCl}$   $100 \text{ г/дм}^3$ ,  $\text{NaHCO}_3$   $20 \text{ г/дм}^3$  при анодной плотности тока  $1000 \text{ А/м}^2$  с периодическим протравливанием азотной кислотой для обновления поверхности металла в образовавшихся порах. Как видно из рис. 4, характер рельефа образца подобен рельефу поверхности лопатки в зоне воздействия отрицательных капель (рис. 3).

Количественное определение содержания хрома в поверхностном слое лопатки было проведено методом рентгеновской спектроскопии на рентгено-флуоресцентном спектрометре

Спрут СЭФ-01 с графитовым монохроматором. На рис. 5 показана модель фрагмента стали, вырезанного из лопатки для анализа.

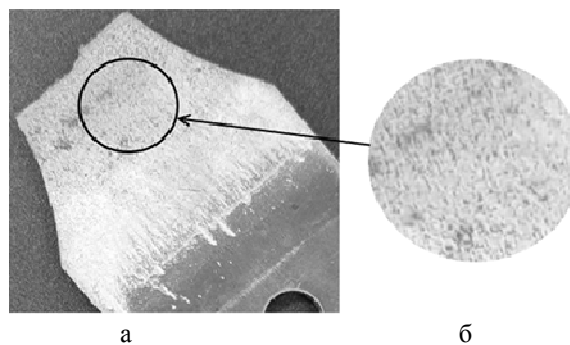
Было обнаружено, что концентрация хрома в поверхностном эродированном слое меньше, чем в других участках образца металла. Данные исследования приведены ниже.

Место анализа	Концентрация хрома в металле, %
Шлифованная поверхность	18,53
Спинка лопатки	18,06
Эродированная поверхность	17,64



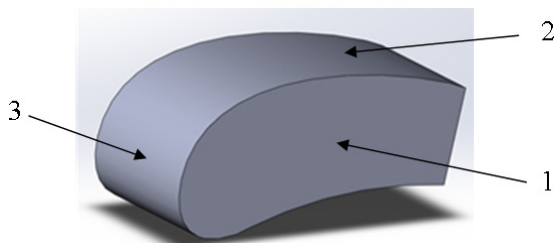
**Рис. 3. Общий вид поврежденной лопатки:**

1, 2 – участки эродированной поверхности в зонах воздействия мелких отрицательных и крупных положительных капель соответственно; 3 – область выреза фрагмента лопатки для анализа; 4 – участок поверхности, защищенный стеллитовой пластиной



**Рис. 4. Образец стали 20X13:**

а – фрагмент поверхности, подвергнутой электротравлению; б – крупный план рельефа протравленной поверхности



**Рис. 5. Участки, на которых определялось содержание хрома:**

1 – шлифованная поверхность; 2 – спинка лопатки; 3 – эродированная поверхность

**Выводы**

На поверхности рабочих лопаток под действием сверхзвукового потока влажного пара могут протекать электрохимические процессы, подобные электротравлению. При воздействии сверхзвукового влажнопарового потока на металл происходит механическое разрушение пассивирующей пленки оксида хрома на его поверхности. При этом поверхность металла активизируется и вступает во взаимодействие с водой. Отрицательно заряженные капли могут не только оказывать разрушающее химическое воздействие на пассивную оксидную пленку, но и вызывать анодную коррозию металла поверхности лопатки, а также механическое удаление продуктов коррозии. При этом поверхность металла активизируется и его химическое взаимодействие с водой ускоряется. Процесс повреждения поверхности металла подобен электротравлению, при этом разрушение металла происходит, но не интенсивное. В данном случае количество водорода в металле должно коррелировать с количеством металла, разрушенного химической коррозией, которая больше, чем в реакции металла лопатки с нейтральным паром.

Таким образом, надо констатировать, что наводороживание материала лопатки имеет место при ударном воздействии капель в любом случае – заряжены они или нейтральны, отличие лишь в интенсивности процесса. Наиболее негативное влияние на лопатку оказывает положительно заряженный поток пара, отрицательный поток оказывает повреждающее воздействие в меньшей степени. По сравнению с положительно и отрицательно заряженными потоками пара нейтральный и квазинейтральный потоки оказывают наименьшее, преимущественно механическое, повреждающее воздействие. И именно такой (нейтральный) электрофизический режим рабочего тела можно рекомендовать для поддержания во влажнопаровых турбинах для продления ресурса лопаток, что достигается за счет рационального выбора водно-химического режима, путем нейтрализации потока и применения других методов.

**Литература**

1. Шубенко А. Л., Ковальский А. Э., Стрельников И. С., Шевякова И. Н. Оценка влияния наводороживания и коррозионных сред на процесс каплеударной эрозии элементов проточной части цилиндров низкого давления паровых турбин. *Пробл. машиностроения*. 1998. Т. 1. № 3–4. С. 9–15.
2. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Электрофизические аспекты каплеударного разрушения элементов проточной части паровых турбин. *Вестн. НТУ «ХПИ». Сер.: Энерг. теплотехн. процессы и оборудование*. 2012. № 7. С. 88–96.
3. Варавка В. Н., Кудряков О. В., Морозкин И. С., Забияка И. Ю. Исследования в области каплеударной эрозии энергетического оборудования: ретроспективный обзор и анализ текущего состояния. *Вестн. Дон. техн. ун-та*. 2016. Т. 16. № 1 (84). С. 67–76. <https://doi.org/10.12737/18260>.
4. Тарелин А. А. Теплоэлектрофизические процессы в паровых турбинах: монография. Харьков: Изд-во Иванченко И. С., 2020. 184 с.
5. Tarelin A. A., Surdu N. V., Nechaev A. V. The influence of wet-steam flow electrization on the surface strength of turbine blade materials. *Thermal. Eng.* 2020. Vol. 67. P. 60–67. <https://doi.org/10.1134/S0040601520010073>.
6. Tarelin A. A. Electrization of a wet steam flow and its influence on reliability and efficiency of turbines. *Thermal Eng.* 2014. Vol. 61. P. 790–796. <https://doi.org/10.1134/S004060151411010X>.

Поступила в редакцию 19.02.2021

**Електрохімічний і хімічний механізми ерозійно-корозійного процесу руйнування робочих лопаток вологопарових турбін під дією електризованої вологи**

<sup>1</sup> А. О. Тарелін, <sup>2</sup> В. Л. Швецов, <sup>1</sup> В. Г. Михайленко, <sup>1</sup> А. В. Нечаєв, <sup>1</sup> О. Є. Хінсвіч

<sup>1</sup> Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, 61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

<sup>2</sup> Акціонерне товариство «Турбоатом», 61037, Україна, м. Харків, пр. Московський, 199

*Стаття присвячена електрохімічному та хімічному аспектам ерозійно-корозійного руйнування поверхневого шару робочої лопатки вологопарової турбіни під дією електризованого робочого тіла. Розглянуто гіпотезу*

щодо комплексного механо-хіміко-електрохімічного механізму вимивання хрому та заліза з поверхневого шару металу робочої лопатки під час руйнування оксидної плівки під дією високошвидкісного потоку вологої пари. Теоретично показана можливість наводнювання поверхонь робочих лопаток під дією негативно заряджених крапель. Пошкодження лопаток в цьому випадку подібне пошкодженню від анодного травлення. Також показано, що процес наводнювання поверхні лопатки має місце в будь-якому випадку і для електрично заряджених крапель, і для нейтральних. Однак в разі нейтральних крапель інтенсивність процесу незначна. Проведено експериментальне дослідження поверхні робочої лопатки з ерозійним пошкодженням з останнього ступеня турбіни ВК-50 ЛМЗ, яка відпрацювала свій ресурс. Визначено кількісний вміст хрому у вирізаному з лопатки зразку сталі. Виявлено зменшення вмісту хрому в пошкодженому ерозією поверхневому шарі лопатки. Для перевірки гіпотези про схожість процесу анодного електротравлення з процесом руйнування поверхні під дією негативно заряджених крапель проведено електрохімічний експеримент на модельному зразку хромової сталі 20Х13. Показано, що рельєфи пошкоджених ділянок на модельному зразку після анодного травлення і на досліджуваній лопатці в зоні дії негативно заряджених крапель подібні. Проведені експериментальні дослідження підтвердили наявність комплексного механо-хіміко-електрохімічного процесу руйнування лопатки. На основі отриманих даних сформульовані рекомендації щодо продовження ресурсу лопаток турбомашин.

**Ключові слова:** електризація пари, наводнення, ерозія лопаток.