

УДК 621.165

*А.А. ТАРЕЛИН*, чл.-корр. НАНУ; ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
*Н.В. СУРДУ*, канд. техн. наук; ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
*А.В. НЕЧАЕВ*, ИПМаш НАН Украины, Харьков

### **ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КАПЛЕУДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

Рассмотрены электрофизические аспекты капельно-ударного разрушения элементов проточной части паровых турбин. Обращено внимание на отличии надкритического разрушения капель воды, которые сопровождаются комплексом электрических зарядно-разрядных явлений и приводят к насыщению металлических поверхностей водородом, который вызывает деградацию их механических свойств и ускоряет эрозионный износ. Приведено объяснения возможных механизмов возникновения электрофизических и электрохимических явлений, которые побуждают и усиливают коррозионные процессы, которые влияют на прочность и эрозию конструктивных элементов паровых турбин.

Розглянуто електрофізичні аспекти крапельно-ударного руйнування елементів проточної частини парових турбін. Звернено увагу на відмінності надкритичного руйнування крапель води, що супроводжуються комплексом електричних зарядно-розрядних явищ та призводять до насичення металевих поверхонь воднем, який викликає деградацію їх механічних властивостей та прискорює ерозійне зношення. Приведено пояснення можливих механізмів виникнення електрофізичних та електрохімічних явищ, що спонукають та підсилюють корозійні процеси, які впливають на міцність та ерозію конструктивних елементів парових турбін.

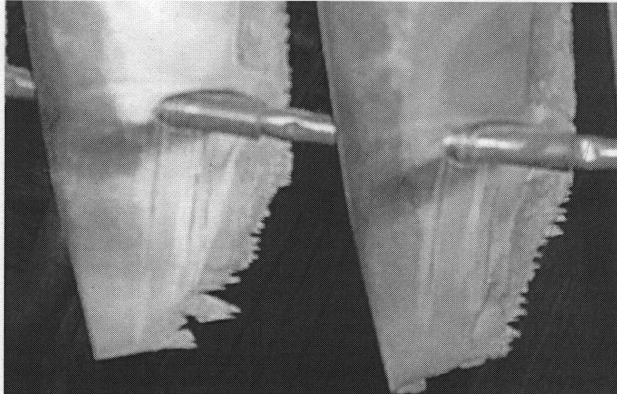
Electrophysical aspects of drop-shock destruction elements of a steam turbines flowing part are considered. It is brought to a focus to features of supercritical destruction of water drops which is accompanied by a complex of the electric charge-discharge phenomena and leads to saturation of metal surfaces by hydrogen which causes degradation of their mechanical properties and accelerates erosive deterioration. Possible mechanisms of occurrence of the electrophysical and electrochemical phenomena which initiate and strengthen the corrosion processes influencing hardness and erosion of constructive elements of steam turbines are discussed.

Опыт эксплуатации влажно-паровых турбин (ВПТ) показывает, что одной из актуальных задач повышения их эффективности является предотвращение или снижение опасности эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) материалов. Наиболее известной разновидностью ЭКИ является каплеударная эрозия [1, 2], которой подвержены в основном рабочие лопатки последних ступеней ЦНД, что существенно снижает надёжность и экономичность энергоблоков. При этом снижение экономичности связано не только с потенциальным ущербом от повреждения чрезвычайно дорогих лопаток, но и с длительностью простоя для их замены.

Анализ модельных представлений процесса каплеударной эрозии металлов [3, 4] показывает, что, несмотря на безусловные успехи в создании программных продуктов, позволяющих оценивать вероятность эрозионного износа турбинных лопаток, природа этого явления до конца еще не выяснена. Поэтому, исследования по установлению скрытых (или ранее не замеченных) явлений, сопутствующих процессу эрозии, актуальны, а их результаты могут послужить основой для разработки новых, более эффективных методов противоэрозионной защиты.

Основной целью математического моделирования каплеударной эрозии материалов является обеспечение возможности обоснованного назначения сроков регламентных работ путем прогнозирования кинетики эрозионного разрушения рабочих лопаток и оценки долговечности их работы. Опираясь на, казалось бы, очевидные экспериментальные данные натурных испытаний в качестве основного

механизма каплеударной эрозии рассматривают процесс развития и накопления структурных дефектов, вызванных упругопластическими деформациями от поверхностных колебаний (волны Релея), приводящих к усталостным разрушениям. При этом на обоснование и анализ механизма получения развитого «игольчато-пилообразного» рельефа (рис.) эродированной поверхности при исключительно механическом воздействии, должного внимания не обращали. Повышения же эрозионной стойкости лопаточных материалов пытаются достигать путем применения более высокопрочных материалов (например, формируя кромки из стеллитовых вставок, или применяя термическое упрочнение (закалка) кромок, или наносят специальные покрытия и т.п.).



а)



б) × 40

Рис. Внешний вид эродированной поверхности рабочих лопаток турбины (а) и увеличение в 40 раз (б)

На наш взгляд, для решения проблемы усовершенствования противоэрозионной защиты лопаток последних ступеней ЦНД, работающих в условиях влажнопарового потока, необходимо путем анализа явлений, возникающих при каплеударной эрозии, выявить скрытые (ранее не учитываемые) явления и эффекты, которые могут оказывать управляющее влияние на процесс (или явления его составляющие) эрозионной деградации металлов.

Частичному решению поставленных задач и посвящена данная работа.

Для определения путей их решения рассмотрим физические явления, возникающие при ударном разрушении каплей воды [5, 6], а также явления, обнаруженные авторами при проведении натурных испытаний системы для электрофизической интенсификации процесса конденсации водяного пара. К таковым следует отнести экспериментально установленное явление самопроизвольной электризации рабочего тела [7, 8] в проточной части паровых турбин. Специальными экспериментальными исследованиями, проводимыми на Украине (ТЭЦ-2, г. Харьков) и в США (ТЭЦ Наваго, штат Аризона) на турбоустановках мощностью 50 и 800 МВт соответственно, удалось выявить ряд физических особенностей этих процессов. К этим особенностям [9] следует отнести:

- *рабочее тело на выходе из турбины несет в себе электрически заряженные частицы (капли) преимущественно положительного знака;*
- *среднемассовая плотность зарядов в потоке может достигать  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup>;*
- *напряженность электрического поля на отдельных участках пароводяного потока в патрубках турбин может достигать  $2 \cdot 10^5$  В/м;*
- *движение заряженного потока порождает в трубке электромагнитное поле с широким частотным спектром и сложным пространственным*

распределением;

• материал кромок турбинных лопаток и другие поверхности элементов турбоустановки, участвующие в электризации рабочего тела, подвергаются наводораживанию.

Из анализа результатов комплексных исследований электрофизических процессов, возникающих в выхлопной части паровых турбин, следует, что каплеударная эрозия – это сложный механо-электро-химический процесс разрушения материала, состоящий из целого ряда взаимовлияющих и взаимно обуславливающих явлений, комплексное параллельно-последовательное протекание которых может, как усиливать, так и ослаблять деградацию эродируемого материала. К таковым явлениям следует отнести:

1) Образование потока электрически заряженных капель влаги, которые возникают при распылении паровым потоком пленочной влаги, выпадающей, например, на поверхностях лопаток направляющих аппаратов.

2) Высокоскоростной удар электрически заряженных крупных капель влаги о поверхность лопаток рабочих колес, который сопровождается:

– возникновением поверхностных волн упругопластической деформации (волны Релея);

– стеканием положительного заряда с паро-капельного потока на рабочую лопатку в момент касания капель поверхности лопатки;

– хрупким разрушением крупных капель (по механизму «химического взрыва» [5]) и образованию большого количества очень мелких, преимущественно отрицательно заряженных, капель (баллоэлектрический эффект), вызывая возникновение электромагнитных полей и излучений в широком диапазоне частот (в том числе СВЧ);

– возникновением боковых капельных струек со скоростями, на порядок превышающими скорость прямого удара капли о твердую поверхность;

– возникновением локальных импульсных механических нагрузок и электрических токов (искровой разряд), способствующих локальной пластификации металла за счет электронно-пластифицирующего эффекта;

– возникновением кавитации с сопутствующими ей высокочастотными электрическими, магнитными, акустическими и электромеханическими явлениями.

Возникающие в проточной части электрические явления могут вызвать:

– электроэрозионное или электроискровое разрушение металла;

– возникновение локального ВЧ нагрева металла до температур фазово-структурных превращений;

– катодное наводораживание металла, способствующее интенсификации процесса деградации материала, например, путем проявления водородной хрупкости (ВХ) по механизму адсорбционно-пластифицирующего эффекта (АПЭ), либо в связи с фазово-структурными превращениями (образование гидридов металлов);

– локальное разрушение металла по механизму анодного растворения;

– электрохимическую коррозию металла;

– коррозионное растрескивание;

– возникновение объемного (тлеющего или коронного) разряда, интенсифицируя адсорбционные и химические явления на поверхности механически напряженного металла.

Поведение жидких капель при ударе о поверхность твердого тела является одним из ключевых моментов построения расчетной модели процесса эрозии. Кроме того, этот вопрос очень важен и для понимания возникающих при этом взаимодействии

электрических и физико-химических явлений.

*Рассмотрим кинетику изменения формы капли при ударе о твердую поверхность.* Картину деформации жидкой сферической капли при ее ударе о твердую поверхность представляют обычно так, что капля жидкости при столкновении с твердой поверхностью вначале деформируется, а затем растекается по поверхности, образуя поперечные струи. При этом решение вопроса о том, в какой момент после удара капли начинается поперечное струйное растекание жидкости, оказывается не простым. Характер взаимодействия капли при ударе о твердую поверхность исследовался (в том числе с использованием фотосъемок) многими авторами [5, 6, 10, 11]. Было установлено, что в момент первого контакта возникает волна давления, которая в последующие моменты удара проходит внутрь капли. В конце концов, волна давления отходит от границ капли, однако поперечное течение в этот момент еще не возникает; растекание начинается чуть позже, после того как края волны продвинулись немного выше границ капли. В углах капли возникают большие градиенты давления, даже если растекание уже началось. Наличие этих градиентов указывает, что при боковом растекании значения давления на границе зоны контакта велики. Скорость бокового растекания при этом практически в 10 раз превышает скорость удара.

Полученные результаты поведения жидкой капли при ударе о твердую поверхность обычно распространялись и на скорости, значительно превосходящие исследованный диапазон. Однако в работе [9] авторы обращали внимание на экспериментальные результаты, полученные Л.М. Черняком в [5], которые качественно отличаются от вышеописанного характера поведения жидких капель при критических скоростях удара. Экспериментально им было установлено, что при скорости удара выше 70 м/с капли воды начинают вести себя как квазитвердое тело, при этом, взаимодействие капли с твердой поверхностью происходит в очень тонком слое (3–5 % от диаметра капли) в области непосредственной границы «жидкость-твердое тело». Причем характер вылета вторичных капель и вид кратера, образующегося после исчезновения капли полностью аналогичны характеру выброса вторичных продуктов от места обычного химического взрыва. Такое разрушение капель жидкости было определено им как «ударно-взрывное».

Во всех наблюдаемых ударных взаимодействиях капель с твердой поверхностью мы имеем дело со структурной перестройкой жидкости внутри капли, которая выражается в изменении ближнего порядка молекул. Это изменение может протекать лишь с ограниченной скоростью, значение которой во многом будет определяться энергией активации изменения положения молекулы. Вводя понятие времени релаксации структурной перестройки  $\tau_p$  на основании поведения капли при взаимодействии с твердой поверхностью можно провести его оценку следующим образом. Так, если скорость удара капли о твердую поверхность равна  $V \sim 100$  м/с, а размер капли порядка  $d = (0,1-1) \cdot 10^{-4}$  м, то время полного разрушения капли не превышает:  $\tau_p \geq d/V = 10^{-6}-10^{-5}$  сек. Почти такой же результат был получен в работе [12], в которой авторы установили, что время релаксации сдвиговых колебаний в бидистилляте составляет  $10^{-5}$  сек.

Таким образом, за промежуток времени  $10^{-6}-10^{-5}$  сек капля, как определенная структура, не успевает молекулярным способом перестроиться в соответствующее взаимодействию новое состояние и поэтому ведет себя, как твердое вещество, со всеми вытекающими из этого последствиями.

Траектория движения крупных капель влаги в парокapельном потоке может отличаться от задаваемой профилем проточной части, что приведет к соударению

капель воды с поверхностью турбинных лопаток под разными углами, в том числе со скоростью значительно превышающей критическую (70 м/с). Поэтому, их разрушение может иметь характер хрупкого ударно-взрывного разрушения, сопровождающееся комплексом сложных взаимодействующих и взаимно обуславливающих электрофизических явлений.

В [9] авторами описан механизм образования так называемой «магма-плазмы», возникающей в зоне субмикроскопической деформации, в момент удара летящей с большой относительной скоростью капли. В соответствии с рассматриваемой моделью наивысшие возбужденные состояния, называемые трибоплазмой, возникают сразу в процессе удара. Они характеризуются наличием нестационарных высоковозбужденных фрагментов кристалла и окружающей реакционной сферы в виде компонентов решетки, ионов и электронов.

Следует заметить также, что электризация влажного пара в проточной части паротурбинных установок может происходить под действием нескольких физических эффектов (электролитический, баллоэлектрический, трибоэлектрический и др.), каждый из которых может доминировать в том или ином месте проточной части, оказывая преимущественное влияние на полярность заряженных частиц. При разрушении адсорбционного слоя сконденсировавшейся на поверхности лопаток соплового аппарата (СА) влаги, срывающиеся капельки воды будут приобретать (за счет отрыва зарядов от диффузионной части двойного электрического слоя [7]) преимущественно положительный заряд, а лопатки СА отрицательный заряд, который через корпусные детали будет стекать на землю. Сорвавшиеся с СА заряженные (и не заряженные) капельки воды, увлекаются паровым потоком и, увеличиваясь, например, в размерах за счет объемной конденсации, будут ударяться с высокими скоростями о прикромочную поверхность турбинных лопаток. При этом могут возникать зарядо-разрядные процессы, которые приведут к появлению электрического потенциала на поверхности элементов проточной части турбоустановки. В результате этих процессов, пароводяной поток будет приобретать электрический заряд одной полярности, а элементы проточной части будут приобретать заряд противоположный пароводяному потоку. Следует отметить, что, при прочих равных условиях, интенсивность и интегральный характер этих процессов во многом будет зависеть от химсостава воды и режима работы турбоустановки.

Двигаясь вместе с потоком заряженные частицы рабочего тела, будут разряжаться на поверхности корпусных элементов патрубка и конденсатора. В зависимости от скорости взаимодействия заряженных (и незаряженных) капель влаги с поверхностью корпусных элементов патрубка и конденсатора, на их поверхности могут также происходить зарядо-разрядные явления и электрохимические процессы. Таким образом, между участками поверхности элементов турбоустановки, участвующими в электризации рабочего тела и участками поверхностей, на которых электрически заряженные частицы рабочего тела разряжаются, протекает постоянный импульсный электрический ток. В соответствии с законом Фарадея, при протекании постоянного электрического тока в электролитах на электродах происходит выделение ионов составных химических частей электролита. В данном случае на катоде будут выделяться ионы водорода  $H^+$  и другие положительно заряженные ионы, содержащиеся в воде, а на аноде – ионы  $OH^-$  и другие отрицательно заряженные хим. элементы.

Таким образом, *катодные участки поверхностей деталей проточной части будут подвергаться наводороживанию, а анодные участки – анодному травлению.*

Кроме того, эти же участки подвергаются импульсным механическим (и акустическим) нагрузкам от ударяющихся капель влаги, сопровождающиеся импульсными воздействиями электрического тока.

Для проверки предположения о наводороживании были проведены экспериментальные исследования, результаты которых отражены в работе [9]. Было установлено, что участки поверхности металлов, подвергнутые капельно-ударному эрозионному износу, имеют повышенное содержание водорода. Так, например, концентрация водорода в металле подверженном эрозии в 3–10 раз выше, чем в исходном состоянии даже по истечении 6 месяцев после испытаний. Аналогичные результаты получены и для нержавеющей проволоки, используемой для крепления в конденсаторе электрических кабелей системы электрофизической интенсификации процесса конденсации водяного пара. Таким образом, капельно-ударное воздействие воды на металлическую поверхность приводит к наводороживанию. В качестве возможных причин повышения содержания водорода при капельно-ударном воздействии, может быть следующее:

– разряджение положительно заряженных капель воды вызывает наводороживание по механизму катодной поляризации;

– абсорбция протонов, образующихся при диссоциации молекул воды, в том числе в результате объемных зарядо-разрядных явлений (возникающих при высокоскоростном ударно-взрывном разрушении капель воды), стимулированная упругопластическими деформациями поверхностных слоев;

– хемосорбция молекул воды на участках выхода дислокаций на поверхность с дальнейшей абсорбцией и диффузией атомов водорода вдоль оси [13] ядер подвижных дислокаций активируемых деформациями (по механизму адсорбционно-пластифицирующего эффекта [14]), которые возбуждаются поверхностными волнами от ударов капель.

Водородной хрупкости (ВХ) металлов и сплавов посвящено много работ (см., например [15]). Известно, что при концентрации водорода, на порядок превышающей начальное (допустимое) содержание, необратимо ухудшаются свойства металлических материалов, интенсифицируется процесс их коррозии. Согласно имеющимся экспериментальным данным можно полагать, что в ходе эрозионного разрушения рабочих лопаток реализуется несколько механизмов водородной дегградации металлов:

1) Образование гидридов металлов, которые в дальнейшем довольно легко «вымываются» из металлической матрицы (исследования Фуджита). Данный механизм, по-видимому, интенсифицирует повреждения поверхности металла вследствие ударов капель особенно в начальный период износа, а также облегчает отрыв и унос металла в образующихся кавернах и трещинах [16].

2) Наводороживание приводит к локализации пластической деформации (закрепление дислокаций [17]). Водород способствует зарождению и росту микротрещин, т.к. блокирует дислокации [17]. Вследствие затруднения водородом пластических сдвигов при растяжении более интенсивно упрочняется насыщенный водородом слой образца, создается критическая плотность дислокаций и трещины появляются раньше, чем в ненасыщенной водородом сердцевине [18]. Микротрещины, возникая в большом количестве в приповерхностном слое, впоследствии под действием растягивающих напряжений выходят на поверхность, резко интенсифицируя процесс разрушения.

3) Имеющийся в железе и стали водород, блокируя дислокации и затрудняя пластические сдвиги, приводит к увеличению критического напряжения сдвига и

напряжения течения на всех стадиях пластического деформирования, кроме того, способствует снижению сопротивления отрыву.

Началом разрушения является зарождение трещин в хрупких фазах, у твердых включений или других неоднородностей. Скопление краевых дислокаций у препятствий (границы зерен, твердые включения и др.) приводит к появлению высоких нормальных напряжений. Если нормальные напряжения не могут быть сняты локальной пластической деформацией, они достигают величины, достаточной для разрыва межзатомных связей, в результате чего образуется трещина.

Подводя итог краткому анализу возможных путей влияния водорода на эрозионный износ лопаточных материалов, нам представляется, что в данном случае к основным способам влияния следует отнести *водородное разупрочнение по механизму адсорбционно-пластифицирующего эффекта* [14] и *образование гидридов*. Однако данный вопрос требует дальнейших исследований.

Немаловажное значение на процесс эрозионного разрушения может оказывать и *электрохимическая коррозия*, представления о механизме которой, основываются на следующих фактах: электрохимическая коррозия возникает при наличии разности потенциалов (сдвига потенциала) участков поверхности, образующих гальваническую пару, при нарушении пассивирующей защитной пленки на поверхности в присутствии электролита. Величина сдвига потенциала при этом должна превышать средний уровень электрохимической гетерогенности поверхности [19].

Интенсивность процесса электрохимической коррозии определяется величиной электропроводности электролита. Уровень электропроводности воды в обычных условиях мал и даже при условии нарушения водно-химического режима составляет ~ 1 мкСим/см., т.е., вода является слабым электролитом.

Величина ЭДС образующихся при этом гальванических пар на непассивированной поверхности металла с достаточно крупными локальными дефектами невелика и составляет примерно 0,015–0,035 В. При данных условиях скорость коррозии низкая, соответственно и вклад электрохимической коррозии в процесс разрушения по сравнению с каплеударной эрозией незначителен.

Сопутствующим электрохимической коррозии процессом, как известно, является электролитическое наводораживание. Различные подходы, основанные на каком-либо определенном механизме наводораживания, дают соответственно различную качественную и количественную оценку величины наводораживания металла и ее влияния на процесс разрушения деталей проточной части.

В классическом случае протекания электрохимической реакции на поверхности металла (лопатки) величина и интенсивность наводораживания определяются главным образом адсорбционными процессами. При этом концентрация водорода, проникающего в металл незначительна, поэтому считается, что в этом случае водород не оказывает заметного влияния на свойства металла и на процесс его разрушения [18].

Обнаружение электризации пароводяного потока [7] позволяет объяснить возникшее противоречие в данных о различной степени влияния электрохимической коррозии и наводораживания на эрозионный процесс. В условиях электризации пароводяного потока процесс электрохимической коррозии интенсифицируется, что в конечном итоге оказывает существенное влияние на формирование соответствующего эрозионного рельефа поверхности (рис. б).

Материал рабочих лопаток, в особенности последних ступеней, находится в сложнапряженном состоянии, поскольку подвергаются большому растягивающим нагрузкам от действия центробежных сил и переменным аэродинамическим нагрузкам

от парового потока, при этом поверхностные слои испытывают еще и импульсные переменные нагрузки от удара капель. Такое сложноподвиженное состояние может привести к возникновению усталостных микротрещин, а наличие влаги способствует развитию такого явления, как *коррозионное растрескивание (коррозия под напряжением)*. Известно [20], что образование трещины сопряжено с возникновением новой металлической поверхности, на которой будет протекать, по крайней мере, одна из двух реакций: 1) растворение металла; 2) поглощение водорода. Возможность протекания этих реакций, а также скорости каждой из них будут определяться значением электрохимического потенциала обнаженной металлической поверхности. Эксперименты показали, что непосредственно в трещине создаются и активно функционируют короткозамкнутые коррозионные гальванические элементы (ГЭ). Условием возникновения в трещине ГЭ «вершина-стенки трещины», является возникновение деформационно-водородного псевдосдвига электродного потенциала вершины трещины  $\Delta\phi$  в отрицательную сторону не менее чем на 0,025 В, т.е. на величину, достаточную уже для устойчивой работы коррозионного ГЭ. В результате нагружения (разрыва) поверхности создается качественно новая коррозионная гальванопара: свежесформированная поверхность (СОП) – исходная «старая» поверхность.

Замена ненаводороженного образца в гальванопаре наводороженным продемонстрировала, что предварительное наводороживание даже без приложения растягивающего напряжения весьма существенно (более чем в 1150 раз) ускоряет коррозию стали [21]. Однако ускорение это по истечении 30 мин с момента наводороживания электрода снижается вдвое из-за десорбции водорода; после 80 мин скорость коррозии стабилизируется. Ускорение коррозии за счет наводороживания электрода (по сравнению с ненаводороженным) в данном случае 150...200 кратное.

Таким образом, коррозионное растрескивание может выступать в качестве рельефообразующего фактора.

#### ВЫВОДЫ:

1 Математические модели, используемые в современных программных продуктах, позволяют с приемлемой для эксплуатационников точностью оценивать вероятность эрозионного износа турбинных лопаток, однако они не отражают в полной мере физику всех явлений, сопутствующих формированию рельефа эрозионной поверхности.

2 Процессы ударно-взрывного разрушения капель и адсорбционных пленок влаги сопровождаются комплексом электрофизикохимических явлений, в результате которых капли парокapельного потока электризуются, приобретая заряд, величина и полярность которого зависит от режима работы турбины, свойств воды (химсостав, *pH*) и конструкционного материала.

3 Процесс электризации сопровождается возникновением электромагнитных полей и излучений в широком диапазоне частот, которые могут способствовать как локальному ВЧ разогреву материалов (скин-эффект) так и возникновению объемных разрядных процессов (коронный, тлеющий, искровой или дуговой разряды).

4 В проточной части паровой турбины возникают импульсные электрические токи, которые приводят к наводороживанию катодных (и травлению анодных) участков поверхностей деталей. Кроме того, они могут способствовать локальной пластификации металлов за счет проявления электронно-пластического эффекта, повышая вероятность коррозионно-эрозионного разрушения конструкционных материалов.

5 Формирование эрозионного рельефа рабочих лопаток последних ступеней

состоит из комплекса параллельно-последовательно протекающих взаимно обуславливающих механических и электрохимических процессов. При этом интегральный характер и интенсивность эрозионного разрушения лопаточного материала во многом зависит от проявления адсорбционно-пластифицирующего эффекта, обусловленного наводораживанием, и коррозионными явлениями.

Таким образом, при разработке соответствующих мероприятий по повышению эрозионной безопасности обязательно надо учитывать комплексное влияние возникающих в проточной части электрофизических и сопутствующих им явлений на прочностные характеристики конструкционных материалов.

**Список литературы:** 1. *Фаддеев, И.П.* Эрозия влажнопаровых турбин [Текст] / И.П. Фаддеев. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1974. – 208 с. 2. *Шубенко-Шубин, Л.А.* Кинетическая модель процесса и оценка инкубационного периода разрушения материалов, подвергаемых воздействию капельных потоков [Текст] / Л.А. Шубенко-Шубин, Л.А. Шубенко, А.Э. Ковальский // Теплоэнергетика. – 1987. – № 2. – С. 46-50. 3. Теоретическое обоснование механизма каплеударной эрозии рабочих лопаток осевых турбомашин [Текст] / А.Э. Ковальский // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2001. – Вып. 23. Двигатели и энергоустановки. – С. 33-41. 4. Электронная система прогнозирования эрозии рабочих лопаток турбин атомных станций [Текст] / К.В. Дергачев // Известия ВУЗов, Ядерная энергетика. – 2001. – № 3. – С. 5-15. 5. *Черняк, Л.М.* Интенсификация межфазного теплообмена в контактных аппаратах на основе низкоэнергетического диспергирования жидкостей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Л.М. Черняк. – Сумы: СГУ, 1995. – 387 с. 6. *Рожков, А.Н.* Динамика и разрушение капель сложных жидкостей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / А.Н. Рожков. – Москва: ИПМ РАН, 2004. – 335 с. 7. *Тарелин, А.А.* Электрофизические явления и неравновесные процессы в паровых турбинах [Текст] / А.А. Тарелин, В.П. Скляр; НАН Украины, Институт проблем машиностроения – Харьков: ФЛП Иванченко И.С., 2011. – 280 с. 8. Электрофизические явления в паровых турбинах [Текст] / А.А. Тарелин, В.П. Скляр, О. Верес, Н.В. Сурду // Пром. теплотехника. – 1999. – № 4-5. – С. 98-102. 9. Влияние электрофизических явлений в проточной части паровых турбин на физико-механические свойства элементов [Текст] / А.А. Тарелин, Н.В. Сурду // Проблемы машиностроения. – 1999. – № 3-4. – С. 100-108. 10. The Row of a Liquid Drop During Impact [Text] / J.H. Brunton, J.J. Camus // In: Proc 3rd Int. Conf. Rain Erosion and Assoc. Phenomena. – Elvetham Hall, Hampshire, England, 1970. – P. 327. 11. Высокоскоростной удар капли о преграду [Текст] / А.В. Чижов, А.А. Шмидт // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, Вып. 12. – С. 18-27. 12. Выбор частотного диапазона для определения эффективности магнитной обработки водных систем методом диэлектротрии [Текст] / Л.П. Семихина, А.М. Салецкий // Химия и технология воды. – 1991. – Т. 13, № 1. – С. 80-82. 13. Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 1. О наличии полости вдоль оси дислокации [Текст] / Н.В. Сурду // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2000. – Вып. 23(6). – С. 116-123. 14. *Сурду, Н.В.* Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 2. Модель микромеханизма [Текст] / Н.В. Сурду // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2001. – Вып. 24(1). – С. 139-147. 15. *Арчаков, Ю.И.* Водородная коррозия стали [Текст] / Ю.И. Арчаков. – М.: Металлургия, 1985. – 192 с. 16. Кинетика усталостных трещин в железе при электролитическом наводораживании [Текст] / В.И. Похмурский, Л.М. Билый // Физико-химическая механика материалов. – 1984. – № 6. – С. 45-48. 17. Зарождение и рост микротрещин, порождаемых заблокированными дислокациями [Текст] / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.С. Харин // ФХММ. – 1985. – № 2. – С. 5-15. 18. Роль водорода в охрупчивании железа и стали [Текст] / М.М. Швед // ФХММ. – 1981. – № 1. – С. 11-17. 19. Механохимия коррозионного растрескивания [Текст] / Л.Н. Петров // Докл. АН УССР. Сер. А. Физ.-мат. и техн. науки. – 1983. – № 10. – С. 28-32. 20. *Логан, Х.Л.* Коррозия материалов под напряжением [Текст]: пер. с англ. / Х.Л. Логан. – М.: Металлургия, 1970. – 340 с. 21. Воздействие деформации и наводораживания на коррозию стали типа 12ХН в гальванопаре [Текст] / Л.Н. Петров, А.Ю. Калинин, А.Н. Магденко // ФХММ. – 1986. – № 3. – С. 34-37.

© Тарелин А.А., Сурду Н.В., Нечаев А.В., 2012  
Поступила в редколлегию 15.02.12