

УДК 621.165.620.193

В. Л. ШВЕЦОВ, канд. техн. наук; главный конструктор паровых и газовых турбин ОАО «Турбоатом», Харьков;
А. Э. КОВАЛЬСКИЙ, д-р техн. наук; вед. н.с. ИПМаш НАНУ, Харьков;
Г. Н. КАРТМАЗОВ, канд. техн. наук, с.н.с. нач. лаб. ННЦ ХФТИ, Харьков;
В. Г. СОЛОДОВ, д-р техн. наук, проф.; проф. ХНАДУ, Харьков;
И. И. КОЖЕШКУРТ, начальник отдела ОАО «Турбоатом», Харьков;
В. А. КОНЕВ, начальник сектора ОАО «Турбоатом», Харьков

КОМБИНИРОВАННАЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В работе представлено теоретическое и экспериментальное обоснование нового подхода к созданию высокоэффективной противоэрозионной защиты комбинированного типа рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин производства ОАО «Турбоатом». Показано, что с помощью численного эксперимента на базе комплексной математической модели эрозии, учитывающей основные рабочие процессы в проточной части, а также современных технологий создания новых эрозионно-стойких покрытий методом атомно-ионного распыления материалов в вакууме (АИР), возможно существенное увеличение эрозионной стойкости рабочих лопаток за счет рационального комбинирования мер активной и пассивной защиты от эрозии последних ступеней мощных паровых турбин, разрабатываемых в ОАО «Турбоатом».

Ключевые слова: ступень, рабочие лопатки, математическая модель эрозии, эрозионная стойкость, методы защиты от эрозии, атомно-ионное распыление.

Введение

Несмотря на большой опыт создания различных активных и пассивных способов противоэрозионной защиты, накопленный к настоящему времени, по-прежнему наблюдаются случаи серьезных повреждений рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин, обусловленные возникновением в проточной части эрозионно-опасной капельной влаги.

Указанное обстоятельство объясняет необходимость в реализации новой современной постановки проблемы создания эффективной защиты от эрозии последних ступеней ЦНД комбинированного типа и обоснования, как теоретическое, так и экспериментальное, путей её решения.

1 Формулирование проблемы

В настоящее время известны и широко применяются на практике различные активные и пассивные способы повышения эрозионной стойкости рабочих лопаточных аппаратов последних ступеней ЦНД.

Повышение эрозионной стойкости рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин путем выбора их рациональных характеристик можно рассматривать как один из активных способов противоэрозионной защиты, который в настоящее время недостаточно хорошо разработан. Такой способ может быть эффективно реализован только на базе комплексной математической модели эрозии, в основе которой лежат физически обоснованные математические модели различных рабочих процессов в проточной части, которые связаны с эрозионным износом рабочих лопаток.

© В.Л. Швецов, А.Э. Ковальский, Г.Н. Картмазов, В.Г. Солодов, И.И. Кожешкурт, В.А. Конев, 2014

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное обоснование возможности создания для последних ступеней ЦНД нового эффективного способа противоэрозионной защиты рабочих лопаток комбинированного типа методами численного эксперимента на комплексной модели эрозии и стендового эксперимента на образцах лопаточного материала с защитным покрытием.

Данные исследования предполагают анализ влияния на эрозию рабочих лопаток, как традиционных активных способов их противоэрозионной защиты, так и нового способа пассивной защиты от эрозии, который основан на технологии создания защитных покрытий различного назначения методом атомно-ионного распыления материалов в вакууме (АИР).

2 Решение проблемы

2.1 Структура комплексной математической модели эрозии

Возможная структура комплексной математической модели эрозии рабочих лопаток последних ступеней ЦНД турбин ТЭС и АЭС, способная обеспечить решение сформулированной выше проблемы, а также иерархия структурных элементов, которые должны обмениваться между собой необходимыми данными в процессе её решения, имеет вид, представленный на рис. 1.

Основными элементами такой математической модели являются:

– математическая модель термо-газодинамического процесса расширения пара в последней ступени, которая сохраняет свою работоспособность при варьировании режимных параметров ступени в достаточно широком диапазоне значений и учитывает влияние штатных устройств по выведению влаги из проточной части, а также трехмерность потока влажного пара, транспортирующего вторичные капли конденсата на рабочее колесо;

– универсальная математическая модель каплеударной эрозии материала рабочих лопаток и метод прогнозирования эрозионных характеристик последних ступеней;

– метод создания защитного покрытия входных кромок рабочих лопаток нового типа, базирующийся на технологии АИР и позволяющий создавать эффективную пассивную противоэрозионную защиту, которая отвечает конкретным условиям эрозионного воздействия вторичной капельной влаги на входные кромки рабочих лопаток последней ступени ЦНД.

2.2 Модель течения рабочего тела через ступень с учетом 3-х мерности потока

Выхлопной отсек ЦНД составлен из последней ступени и фрагмента осерадиального диффузора. Ступень имеет цельнофрезерованный полочный бандаж, промежуточную демпферную связь и развитую систему влагоудаления. Рабочее колесо уплотнено надбандажным кольцом. На номинальном режиме зазор между лопаткой и наружной поверхностью бандажа составляет 8,5 мм, в зоне стыка отдельных полок – 7,68 мм. Высота сопла ступени 1000 мм, угол периферийного меридионального раскрытия 40°, высота РЛ – 1030 мм, веерность РЛ – 2,46; межвенцовый зазор – 61,5 мм; частота вращения ротора – 50 с⁻¹.

Между торцом обода диафрагмы и полкой козырька существует канал влагоудаления из межвенцового пространства ступени. Обтекаемая поверхность козырька профилирована и является частью обечайки диффузора выхлопного патрубка. Проточная часть ступени завершается фрагментом осерадиального диффузора с

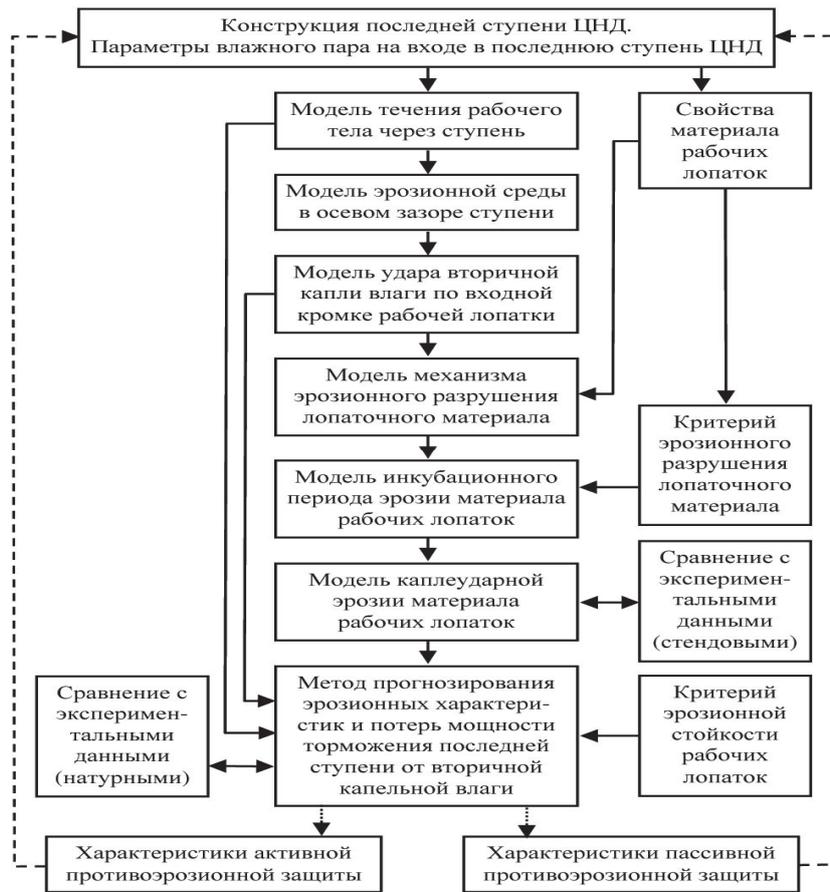


Рис. 1 – Структура комплексной математической модели эрозии рабочих лопаток последних ступеней ЦНД мощных паровых турбин

расширительными камерами на периферии и у корня рабочего венца. Перечисленные элементы отсека составляют расчетную область. Течение описывается системой нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу-Фавру. Система дополняется дифференциальными уравнениями SST модели турбулентности. Интегрирование системы уравнений Навье-Стокса и ассоциированных уравнений осуществляется с помощью программного комплекса *MTFS*[®] [1]. Расчетная область аппроксимируется неструктурированными гексаэдральными сетками с выделением погранслоев. Солвер использует неявную разностную TVD схему конечных объемов 2-го порядка точности. Твердые стенки предполагаются адиабатическими, на них задается условие прилипания и равенство нулю эффективной вихревой вязкости. В исследовании применена стационарная модель ступени. Расчеты выполнены при задании на входе распределений полных параметров – давления, температуры, влажности и направления потока, взятых из теплового расчета. На выходе из фрагмента диффузора и щели отсоса влаги задавалась величина противодействия, совпадающая с давлением в конденсаторе. Все расчеты выполнены на основе модели влажного пара, заданного таблицами водяного пара, с использованием односкоростного приближения равновесной конденсации (без учета переохлаждения).

2.3 Модель эрозии и метод прогнозирования эрозионных характеристик последних ступеней ЦНД мощных паровых турбин

В основе метода прогнозирования лежат математические модели рабочих процессов, которые являются существенными для процесса эрозионного разрушения

лопаточного материала при каплеударном нагружении. Данные модели необходимо правильно интегрировать в математическую модель эрозии лопаточных материалов, приобретающую в этом случае свойство универсальности и способность обеспечивать численные исследования характеристик эрозионного износа рабочих лопаток последних ступеней ЦНД различного типоразмера.

Основными моделями, входящими в универсальную математическую модель эрозии являются следующие:

а) математическая модель эрозионной среды в осевом зазоре турбинной ступени, оказывающей интенсивное эрозионное воздействие на входные участки профильной поверхности рабочей лопатки;

б) математическая модель удара вторичной капли по входной кромке рабочей лопатки;

в) математическую модель механизма эрозионного разрушения лопаточного материала;

г) математическая модель инкубационного периода эрозии.

Из перечисленных математических моделей модель удара вторичной капли и модель физического механизма разрушения лопаточного материала непосредственно связаны с решением проблемы о длительности инкубационного периода эрозии.

Проведенные ранее теоретические и экспериментальные исследования показали, что инкубационный период является основной характеристикой эрозионного процесса и позволяет дать обоснованную оценку эрозионной стойкости рабочих лопаток в заданных условиях эксплуатации, а также прогнозировать развитие эрозии на всех её стадиях.

В работе [2] было показано, что с ростом скоростей нормального удара по входной кромке рабочей лопатки эрозионно-опасных капель влаги ($W'_H > 200$ м/с), определяющую роль в эрозионном разрушении её профильной поверхности начинают играть волновые процессы в поверхностном слое лопаточного материала, которые обусловлены возникновением и распространением волны Рэлея.

Расчетные исследования параметров соударения с рабочей лопаткой длиной 1030 мм достаточно крупных вторичных капель, представленные на рис. 2, показывают, что наибольший интерес для прогнозирования эрозионной опасности на периферии последней ступени ЦНД представляют процессы, которые развиваются в капле и в материале входной кромки при скоростях нормального удара $W'_H > 200$ м/с.

Таким образом, можно сделать вывод, что при оценке эрозионной стойкости длинных рабочих лопаток на периферии последних ступеней мощных паровых турбин можно ограничиться рассмотрением только динамических напряжений в волне Рэлея в качестве основного фактора силового воздействия на материал входных кромок.

При этом следует отметить, что возникающая в поверхностном слое преграды (образца лопаточного материала, рабочей лопатки) система разрушающих напряжений даже от удара одной капли имеет очень сложный и быстро изменяющийся как во времени, так и в пространстве характер [3].

Развитие эрозионного процесса в заданной точке профильной поверхности рабочей лопатки удобно отслеживать феноменологическим параметром эрозионной поврежденности лопаточного материала ω .

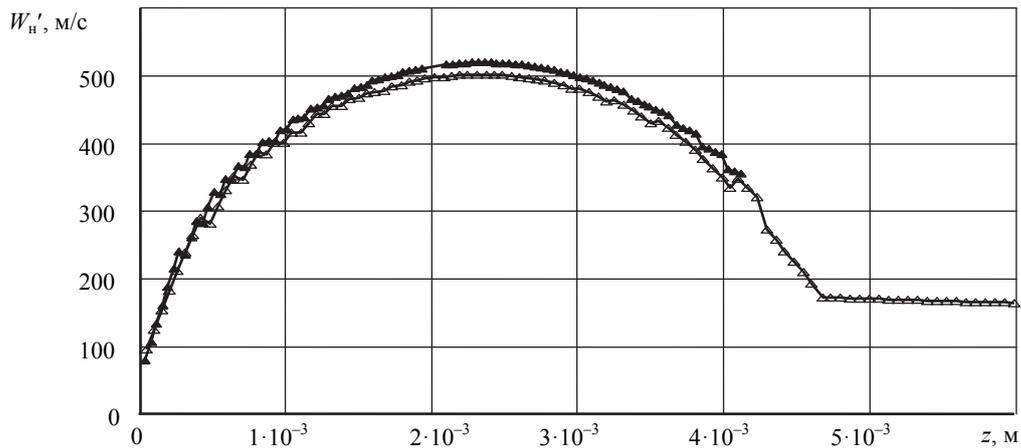


Рис. 2 – Распределение скорости нормального удара ($W'_н$) вторичных капель модального размера по профилю рабочей лопатки длиной 1030 мм на периферии последней ступени мощной паровой турбины; L_z – осевой зазор ступени; C_1 – скорость выхода пара в осевой зазор ступени:
 ▲ – $L_z = 49,5$ мм; Δ – $L_z = 89,5$ мм; $C_1 = 280$ м/с

Его использование, а также учет выявленных в результате численных исследований на комплексной модели эрозии параметров соударения вторичных капель с входной кромкой длинной рабочей лопатки на периферии последней ступени, позволило привести зависимость для инкубационного периода эрозии к виду

$$t_{\text{инк}} = \frac{1}{\pi (1 + k_{\text{Э}}) C_{\text{Э}} \sum_{j=1}^{j=10} n_j \int_{r_{\text{к, max}}}^{\infty} r dr \left[\int_{t_0}^{t_{\text{уд}}} |\sigma_{1, \text{д}}(r, t)|^{k_{\text{Э}}} dt \right]}, \quad (1)$$

где $C_{\text{Э}}$, $k_{\text{Э}}$ – константы эрозионной прочности лопаточного материала (для сталей, использующихся при изготовлении рабочих лопаток последних ступеней ЦНД, имеем следующие значения: $C_{\text{Э}} = 1,7 \cdot 10^{-14} \text{ с}^{-1} (\text{МПа})^{-k_{\text{Э}}}$, $k_{\text{Э}} = 6,3$); $t_{\text{уд}}$ – время ударного

взаимодействия капли с лопаткой; $t_0 = 2 \frac{r_{\text{к}} W'_н}{C_R^2}$ (характерный начальный момент

времени процесса ударного взаимодействия капли с поверхностью); $r_{\text{к, max}}$ – наибольший радиус капли, находящейся в кромочном потоке вторичных капель; r – радиальная координата, отсчитываемая вдоль поверхности лопатки от центра удара капли; $\sigma_{1, \text{д}}$ – главные нормальные напряжения в волне Рэлея, распространяющиеся в поверхностном слое лопатки при соударении с каплей; C_R – скорость распространения волны Рэлея в лопаточном материале; $W'_н$ – скорость нормального удара капли в рассматриваемой точке входной кромки; n – количество вторичных капель, выпадающих на единицу площади поверхности лопатки в единицу времени.

Поток капель, орошающий входную кромку рабочей лопатки, рассматривается как полидисперсный, который представляется совокупностью отдельных групп капель, выпадающих на входную кромку в данном месте, а каждой группе выпавших капель ставятся в соответствие свои параметры каплеударного нагружения: n_j , $r_{\text{к, j}}$, $W'_{н, j}$, где

j – целочисленный индекс, указывающий на принадлежность капель к группе с некоторым средним фиксированным радиусом $r_{k,j}$ ($j = 1 \dots 10$).

Адекватность теоретической зависимости (1) реальному процессу эрозионного разрушения лопаточного материала подтверждена результатами испытаний образцов различных лопаточных сталей на эрозионных стендах [2]. Численные исследования по прогнозированию характеристик эрозионного износа и потерь от крупно-дисперсной капельной влаги показали, что механизмы эрозионного разрушения рабочих лопаток и формирования основных потерь в последней ступени от влаги оказываются весьма «чувствительными» к диапазону скоростей нормального удара вторичных капель, выпадающих на профильную поверхность рабочих лопаток [4, 5].

2.4 Возможности использования активных мер противоэрозионной защиты последних ступеней ЦНД мощных паровых турбин

С помощью предложенной комплексной математической модели эрозии (рис. 1) были выполнены расчетные исследования по изучению влияния различных параметров последних ступеней энергетических турбин, работающих на номинальном режиме, на эрозионную стойкость рабочих лопаток в периферийном сечении.

Оценка интенсивности эрозионного износа в различных точках поверхности рабочих лопаток выполнялась по критерию относительной эрозионной опасности \bar{E}_M , который был предложен и обоснован в работе [6].

Величину, обратную \bar{E}_M , то есть $\bar{E}_{st} = 1/\bar{E}_M$, следует рассматривать как характеристику относительной эрозионной стойкости рабочих лопаток.

Результаты проведенного численного анализа относительной эрозионной опасности, возникающей в рассмотренных последних ступенях ЦНД различного типоразмера, представлены на рис. 3.

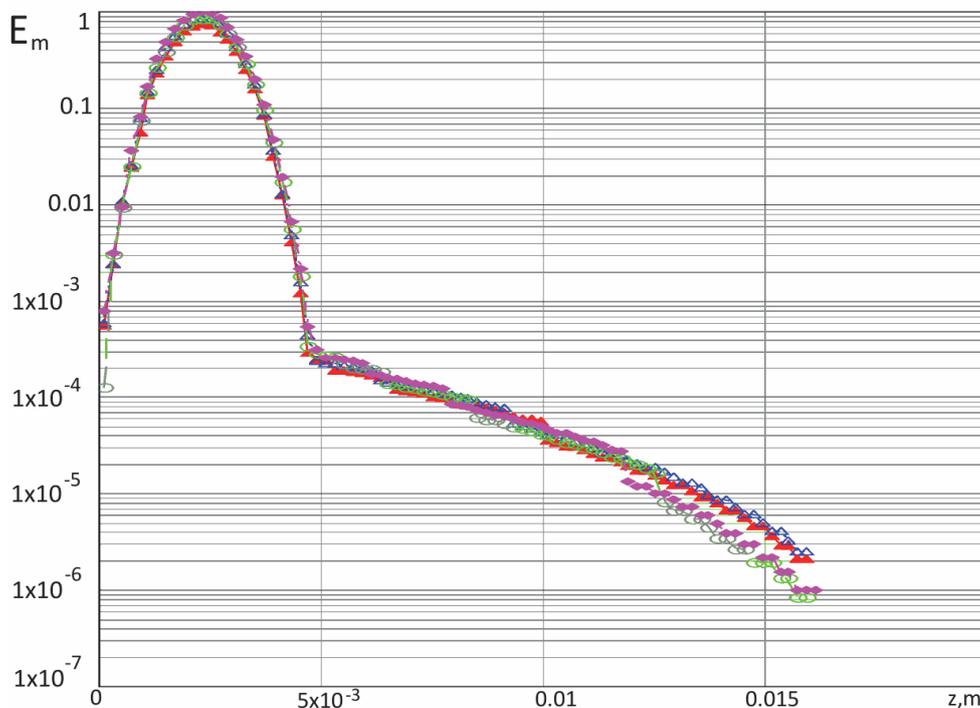


Рис. 3 – Эрозионная опасность на входной кромке в периферийном сечении рабочей лопатки последней ступени ЦНД мощной паровой турбины при варьировании её параметров: z – координата, отсчитываемая по оси ступени от фронта рабочей решетки; \blacktriangle – \bar{E}_{M1} ; \triangle – \bar{E}_{M2} ; \circ – \bar{E}_{M3} ; \blacklozenge – \bar{E}_{M4}

На рис. 3 маркерами отмечены расчетные значения эрозионной опасности \bar{E}_M :
 $\bar{E}_{M1} - C_1 = 246$ м/с; $L_Z = 56$ мм; $\bar{E}_{M2} - C_1 = 246$ м/с; $L_Z = 49,5$ мм;
 $\bar{E}_{M3} - C_1 = 280$ м/с; $L_Z = 56$ мм; $\bar{E}_{M4} - C_1 = 280$ м/с; $L_Z = 49,5$ мм.

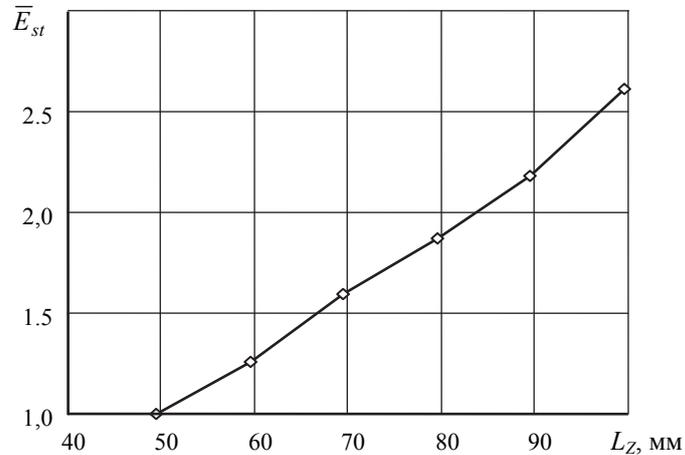


Рис. 4 – Зависимость относительной эрозионной стойкости (\bar{E}_{st}) рабочей лопатки последней ступени в периферийном сечении от осевого зазора ступени (L_Z):
 C_1 – скорость выхода пара из соплового аппарата ступени; L_Z – осевой зазор ступени

Из результатов расчетов видно, что при создании и модернизации последних ступеней ЦНД для обеспечения необходимой эрозионной стойкости рабочих лопаток требуется проводить численные исследования на базе комплексной универсальной математической модели эрозии, способной «чувствовать» даже сравнительно малые изменения режимных и геометрических параметров рассматриваемых ступеней.

Именно такая комплексная математическая модель способна обеспечить высокую эффективность мер противоэрозионной защиты активного типа, в основе которой лежит целенаправленный численный эксперимент по обоснованию и рациональному выбору режимных и геометрических характеристик вновь создаваемых и модернизируемых последних ступеней.

Так, например, результаты проведенных численных исследований показали, что, увеличение осевого зазора последней ступени, позволяющее уменьшить скорость нормального удара капель по входной кромке примерно на 4,5 % (см. рис. 2), при прочих равных условиях обеспечивает увеличение эрозионной стойкости рабочих лопаток более чем в 2,5 раза (рис. 4).

Вывод о том, что величина скорости нормального соударения капель с профильной поверхностью рабочей лопатки имеет сильное нелинейное влияние на интенсивность её эрозионного износа, вытекающий из численного эксперимента на комплексной модели эрозии, имеет принципиальный характер, поскольку позволяет путем незначительных изменений основных параметров последних ступеней существенно повысить эрозионную стойкость рабочих лопаток.

В конкретной реализации рассмотренного подхода с учетом результатов, полученных в ходе численного эксперимента на модели эрозии, заключается смысл активных мер противоэрозионной защиты, разрабатываемых для выбранной ступени.

На рис. 5 представлены результаты численных исследований влияния отсоса влагеёмкого пара из межвенцового зазора на относительную эрозионную опасность,

которая возникает на периферии последней ступени мощной паровой турбины с рабочей лопаткой длиной 1030 мм, работающей на номинальном режиме.

Из приведенных результатов видно, что отсос влагеомкого пара из периферийной части межвенцового зазора ступени через кольцевую щель позволяет на порядок снизить относительную максимальную эрозионную опасность на периферии ступени (эталон Em на рис. 2 и рис. 5 приняты разные).

Расчетные исследования выполнялись на базе представленной выше комплексной математической модели эрозии с учетом особенностей пространственного течения влажного пара в периферийной зоне ступени.

2.5 Возможности использования пассивных мер противоэрозионной защиты

Для установленных расчетным путем зон профильной поверхности рабочей лопатки, которые характеризуются повышенной опасностью эрозионного износа, была предложена и обоснована новая технология создания вакуумного противоэрозионного покрытия и предложен метод расчета его параметров, при которых может быть обеспечена эффективная защита рабочей лопатки от эрозии пассивного типа [7].

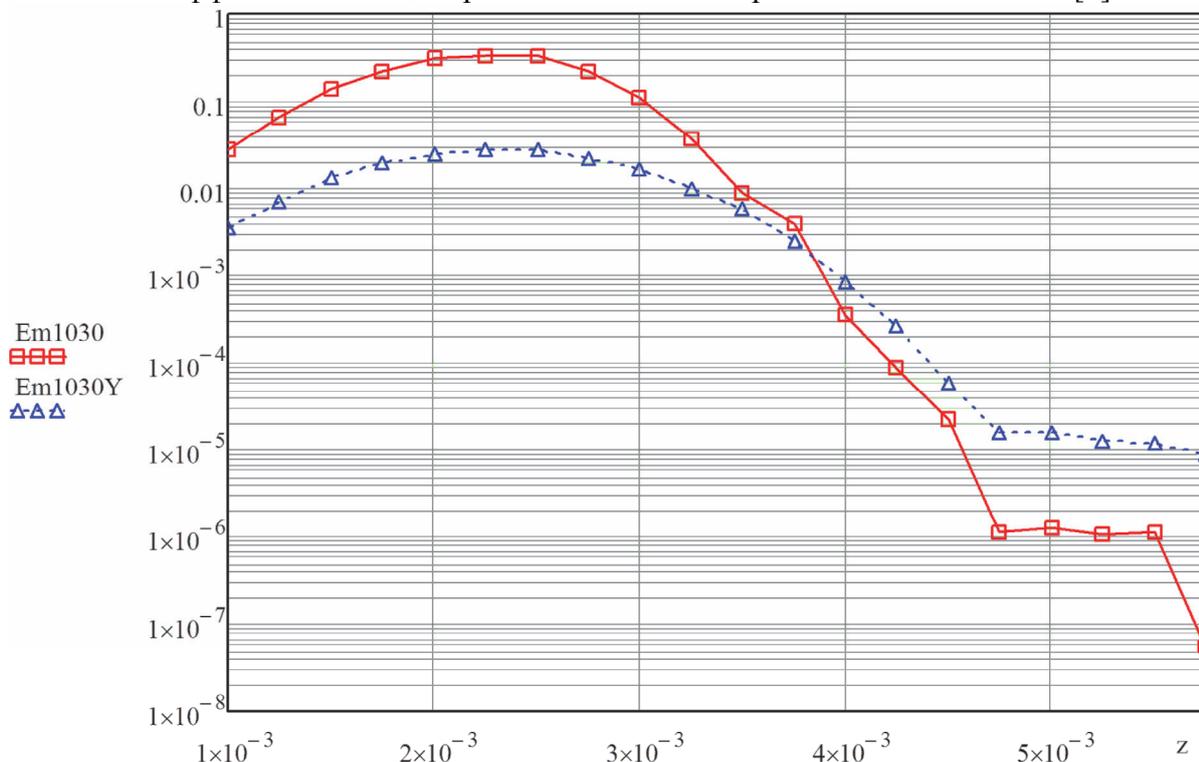


Рис. 5 – Влияние отсоса влагеомкого пара в кольцевую щель влагуудаления на относительную эрозионную опасность, возникающую в периферийном сечении рабочей лопатки длиной 1030 мм последней ступени ЦНД на номинальном режиме работы: Em_{1030} – относительная эрозионная опасность на периферии ступени без отсоса влагеомкого пара из межвенцового зазора; Em_{1030Y} – относительная эрозионная опасность на периферии ступени с отсосом влагеомкого пара из межвенцового зазора

Предлагаемый способ пассивной противоэрозионной защиты основывается на накопленном в ННЦ «ХФТИ» большом опыте создания защитных покрытий различного назначения методом атомно-ионного распыления материалов в вакууме (АИР).

При разработке комбинированной защиты рабочих лопаток от эрозии данный способ должен рассматриваться как дополнительная мера, способная существенно

увеличить эффективность противоэрозионной защиты активного типа.

Выбор параметров вакуумного покрытия для рабочих лопаток должен производиться с учетом параметров волновых напряжений, возникающих на входной кромке при её соударении с эрозионно-опасными каплями.

Основным вопросом, который при этом должен решаться с помощью предложенной комплексной математической модели эрозии, является вопрос о величине и знаке структурных макронапряжений, возникающих в защитном покрытии на поверхности раздела «подложка-покрытие», и результате их суперпозиции с макронапряжениями, возникающими в слое покрытия на входной кромке при её соударении с эрозионно-опасными каплями.

Суперпозиция изменяющихся по толщине противоэрозионного покрытия внутренних напряжений и напряжений в волне Рэлея, которая распространяется в покрытии при соударении рабочей лопатки с крупными вторичными каплями влаги, позволяет осуществлять оценку эффективности разрабатываемой пассивной защиты рабочих лопаток от эрозии. Данную оценку следует выполнять в наиболее эрозионно-опасной («критической») точке поверхности рабочей лопатки, которая определяется расчетным путем с помощью предложенной комплексной модели эрозии.

В результате проведенных расчетно-экспериментальных исследований удалось обосновать высокую эффективность тонкого хромового вакуумного покрытия, наносимого методом АИР на входные кромки рабочих лопаток последней ступени, в качестве способа их пассивной защиты от эрозии.

В эксперименте на эрозионном стенде ННЦ «ХФТИ» было установлено, что эрозионная стойкость разработанного защитного покрытия, полученного методом АИР, в 5,7 раз превышает эрозионную стойкость защитного покрытия, полученного методом электроискрового упрочнения входных кромок, который является штатным способом пассивной защиты рабочих лопаток последних ступеней турбин ОАО «Турбоатом».

На рис. 6 представлен экспериментальный образец с противоэрозионным защитным покрытием, которое используется в ОАО «Турбоатом», а на рис. 7 – образец с разработанным новым противоэрозионным защитным покрытием, нанесенным методом АИР.



Рис. 6 – Экспериментальный образец из лопаточного материала с противоэрозионным защитным покрытием, нанесенным методом электроискрового упрочнения

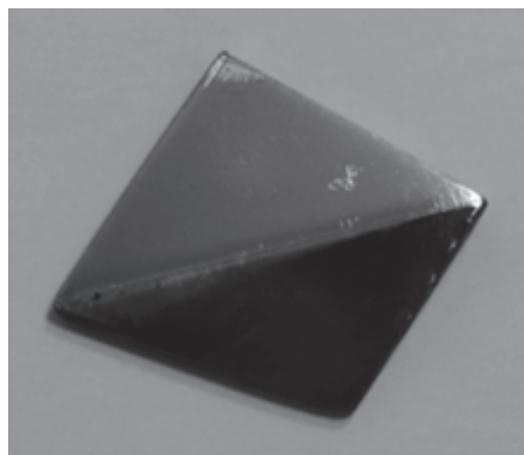


Рис. 7 – Экспериментальный образец из лопаточного материала с тонким хромовым противоэрозионным защитным покрытием (светлая часть поверхности образца), нанесенным методом АИР

Выводы

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Численные исследования эрозионной стойкости рабочих лопаток последних ступеней, выполненные с помощью предложенной универсальной математической модели эрозии, способной реагировать на достаточно малые изменения режимных и геометрических параметров ступеней, позволили обосновать для них основные меры противоэрозионной защиты активного типа.

В результате проведенных расчетно-экспериментальных исследований удалось обосновать высокую эффективность тонкого хромового вакуумного покрытия, наносимого методом АИР на входные кромки рабочих лопаток, в качестве дополнительной меры противоэрозионной защиты пассивного типа.

Список литературы: 1. Исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД «ступень-диффузор» [Текст] / В. Л. Швецов, И. И. Кожешкурт, В. А. Конев, В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 12(1055). – С. 12–20. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. 2. Ковальский, А. Э. Универсальная математическая модель инкубационного периода каплеударной эрозии материала рабочих лопаток влажно-паровых турбин [Текст] / А. Э. Ковальский // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 107–116. 3. Ковальский, А. Э. Теоретическое обоснование механизма каплеударной эрозии рабочих лопаток осевых турбомашин [Текст] / А. Э. Ковальский // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосмический университет «ХАИ», 2001. – Вып. 23. Двигатели и энергоустановки. – С. 33–41. 4. Ковальский, А. Э. Метод расчета мощности торможения рабочего колеса последней ступени мощной паровой турбины вторичной капельной влагой [Текст] / А. Э. Ковальский // Пробл. машиностроения. – 2011. – № 4. – С. 5–12. 5. Шубенко, А. Л. Расчет механических потерь от влажности в последней ступени мощной паровой турбины [Текст] / А. Л. Шубенко, И. С. Стрельников, В. Л. Швецов // Пробл. машиностроения. – 2009. – № 1. – С. 8–15. 6. Шубенко, А. Л. Кинетическая модель каплеударной эрозии рабочих лопаточных аппаратов паровых турбин [Текст] // А. Л. Шубенко, А. Э. Ковальский // Изв. АН СССР. – Энергетика и транспорт. – 1989. – № 5. – С. 94–101. 7. Ковальский, А. Э. Обоснование толщины и условий нанесения вакуумного противоэрозионного покрытия для рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин [Текст] // А. Э. Ковальский, Г. Н. Карتماзов, В. В. Кунченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 6(32). – С. 5–18.

Bibliography (transliterated): 1. Shvecov, V. L., et al. "Issledovanie ajerodinamicheskikh i jenergeticheskikh harakteristik vyhlopnogo otseka CND "stupen'-diffuzor". *Visnyk NTU "HPI". Serija: Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja*. No. 12(1055). Kharkiv: NTU "HPI", 2014. 12–20. ISSN 2078-774X. Print. 2. Koval'skij, A. Je. "Universal'naja matematicheskaja model' inkubacionnogo perioda kapleudarnoj jerozii materiala rabochih lopatok vlazhno-parovyh turbin". *Vestnik dvigatelestroenija*. No. 3. 2006. 107–116. Print. 3. Koval'skij, A. Je. "Teoreticheskoe obosnovanie mehanizma kapleudarnoj jerozii rabochih lopatok osevyh turbomashin". *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. Ser.: Dvigateli i jenergoustanovki*. No. 23. Kharkov: Nac. ajerokosmicheskij universitet "HAI", 2001. 33–41. Print. 4. Koval'skij, A. Je. "Metod rascheta moshhnosti tormozhenija rabochego kola poslednej stupeni moshhnoj parovoj turbiny vtorichnoj kapel'noj vlagoj". *Probl. mashinostroenija* 4 (2011): 5–12. Print. 5. Shubenko, A. L., I. S. Strel'nikov and V. L. Shvecov. "Raschet mehanicheskikh poter' ot vlazhnosti v poslednej stupeni moshhnoj parovoj turbiny". *Probl. mashinostroenija* 1 (2009): 8–15. Print. 6. Shubenko, A. L., and A. Je. Koval'skij. "Kineticheskaja model' kapleudarnoj jerozii rabochih lopatochnyh apparatov parovyh turbin". *Izv. AN SSSR. Ser.: Jenergetika i transport* 5 (1989). 94–101. Print. 7. Koval'skij, A. Je., G. N. Kartmazov and V. V. Kunchenko. "Obosnovanie tolshhiny i uslovij nanesenija vakuumnogo protivojerozionnogo pokrytija dlja rabochih lopatok poslednih stupenej moshhnyh parovyh turbin". *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija* 6 (32) (2006). 5–18. Print.

Поступила (received) 20.02.2014