

УДК 621.165.620.193

А.Э. КОВАЛЬСКИЙ¹, Г.Н. КАРТМАЗОВ², В.В. КУНЧЕНКО²¹ *Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины*² *Национальный Научный Центр «Харьковский Физико-технический институт»*

ОБОСНОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ И УСЛОВИЙ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНОГО ПРОТИВОЭРОЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЕЙ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Работа посвящена обоснованию технологических условий получения методом атомно-ионного распыления материала (АИР) тонкого хромового вакуумного покрытия для защиты от эрозии входных кромок рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин. Теоретически определены основные характеристики предложенного противоэрозионного покрытия, которые были апробированы экспериментально на кавитационном стенде. Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод об обоснованности выбора параметров хромового вакуумного противоэрозионного покрытия, нанесенного методом АИР, как эффективного способа пассивной защиты рабочих лопаток от эрозии.

эрозия, рабочая лопатка, влажно-паровая турбина, противоэрозионное вакуумное защитное покрытие

Введение

Для защиты от эрозии рабочих лопаток первых ступеней компрессоров ГТД и последних ступеней ЦНД мощных паровых турбин разработаны различные противоэрозионные мероприятия пассивного типа.

Так, например, ОАО «ЛМЗ» и ОАО «УТМЗ» защищают входные кромки рабочих лопаток с помощью стеллитовых пластин, поскольку стеллит хорошо противостоит высокоскоростному ударному воздействию крупных вторичных капель влаги.

Однако, натурные исследования паровых турбин сверхкритического давления мощностью 300 – 800 МВт, рабочие лопатки которых защищались стеллитовыми пластинами, обнаружили недостаточно высокую эффективность этого способа противоэрозионной защиты [1].

ОАО «Турбоатом» применяет закалку ТВЧ входных кромок рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин, а также их электроискровое упрочнение нанесением сплавов повышенной твердости (например, Т15К6) [2, 3].

В работе [4] предлагается эрозионную стойкость лопаточного материала рассматривать как прочно-

стную характеристику, которая определяется наличием и общим количеством стопоров, затрудняющих движение дислокаций. В качестве таких стопоров авторы работы [4] предлагают использовать межзеренные границы, а их количество связывать с размером зерен.

В работе [5] отмечалось, что высокая эффективность противоэрозионного защитного покрытия может быть достигнута только при условии физически обоснованного учета основного фактора эрозионного разрушения – больших растягивающих напряжений, которые возникают в покрытии вследствие ударов эрозионно-опасных капель влаги и распространения в нем поверхностной волны (волны Рэлея).

В работах [6, 7], подробно рассматривающих проблему создания эрозионно-стойких лопаточных материалов и покрытий, также как и в работе [4], которая посвящена разработке нового способа пассивной защиты от эрозии – межфазной циклической обработке сталей, позволяющего значительно уменьшить размер зерен, данное обстоятельство не учитывалось.

Формулирование проблемы. Совершенствование существующих и поиск новых способов защиты

от эрозии рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин может быть эффективным только при условии использования информационной подсистемы прогнозирования эрозионной опасности, учитывающей основные рабочие процессы в проточной части, которые связаны с эрозионным износом рабочих венцов [8, 9].

Существенно повысить эрозионную стойкость последних ступеней энергетических турбин путем совершенствования способов пассивной защиты рабочих лопаток от эрозии можно только с помощью информационной подсистемы прогнозирования эрозионной опасности в проточной части, базирующейся на универсальной математической модели эрозии лопаточных материалов.

Решение проблемы

Универсальная математическая модель физического механизма каплеударной эрозии материала рабочих лопаток (противоэрозионных покрытий) влажно-паровых турбинных ступеней. Накопление эрозионной поврежденности лопаточных материалов (противоэрозионных покрытий) при каплеударном воздействии крупных вторичных капель влаги происходит в соответствии с кинетическим уравнением [10, 11]:

$$\frac{d\omega}{dt} = C_{\text{Э}} \left(\frac{\sigma_1}{1-\omega} \right)^{k_{\text{Э}}}, \quad (1)$$

где ω – параметр эрозионной поврежденности материала в выбранной точке рабочей лопатки; $C_{\text{Э}}$, $k_{\text{Э}}$ – константы эрозионной прочности лопаточного материала; $\sigma_1(r, t)$ – функция наибольшего главного нормального напряжения в рассматриваемой точке поверхности рабочей лопатки, где исследуется процесс эрозионного разрушения.

Феноменологический параметр поврежденности лопаточного материала ω с точки зрения протекающих в нем микропроцессов разрушения при эрозионном воздействии капельной влаги можно ин-

терпретировать следующим образом.

Если ρ_D – плотность микродефектов материала рабочей лопатки (вакансий, дислокаций), образующихся вследствие ее соударения с эрозионно-опасными каплями, а $\rho_{D,\text{max}}$ – плотность микродефектов, при которой в материале рабочей лопатки возникают характерные эрозионные повреждения в виде трещин, то параметр эрозионной поврежденности ω можно рассматривать как относительную текущую плотность микродефектов.

Таким образом, параметр эрозионной поврежденности материала рабочей лопатки ω можно интерпретировать как отношение вида

$$\omega = \frac{\rho_D}{\rho_{D,\text{max}}}. \quad (2)$$

Например, разрушение экспериментального образца из никеля при ударном воздействии на него капель воды, выражающееся в выкрашивании фрагментов материала с его поверхности, происходит только тогда, когда текущая плотность дислокаций становится равной своему предельному значению:

$$\rho_D = \rho_{D,\text{max}} \approx 10^{12} \text{ см}^{-2} \quad [12, 13].$$

При этом параметр поврежденности принимает значение $\omega = 1$.

Такой подход к проблеме эрозионного разрушения рабочей лопатки предполагает при определении эрозионной поврежденности лопаточного материала в заданной точке профильной поверхности использование эквивалентного напряжения, обусловленного ударами эрозионно-опасных капель влаги. В качестве эквивалентного напряжения может быть использовано наибольшее главное нормальное напряжение σ_1 .

На базе кинетического уравнения (1) с учетом эрозионно-опасных капель различного размера, выпадающих на входную кромку, можно получить закон накопления эрозионной поврежденности материала рабочей лопатки (покрытия) в произвольно выбранной точке ее поверхности в виде [14]:

$$\int_0^{\omega} (1 - \omega)^{k_{\mathcal{E}}} d\omega =$$

$$= \pi \cdot t \cdot C_{\mathcal{E}} \sum_{j=1}^{j=10} n_j \int_{r_{k,\max}}^{\infty} r dr \left[\int_{t_{cm}}^{t_k} \sigma_{1,cm}(r,t)^{k_{\mathcal{E}}} \cdot dt + \right. \quad (3)$$

$$\left. + \int_{t_{cm}}^{t_k} \sigma_{1,cm}(r,t)^{k_{\mathcal{E}}} \cdot dt \right],$$

где $r_{k,\max}$ – радиус наибольшей капли, движущейся в кромочном потоке вторичной капельной влаги на высоте заданного сечения рабочей лопатки; $t_k = r_k / W'_H$ – время ударного взаимодействия [15]; $t_0 = 2r_k \cdot W' / C_R^2$ – начальный момент времени, когда сферическая капля заменяется эквивалентной цилиндрической; n_j – количество капель фиксированного размера, выпадающих на единицу площади выпуклой поверхности рабочей лопатки в данном месте в единицу времени; $r_{k,j}$ – радиус эрозионно-опасной капли; $W'_{H,j}$ – скорость ее нормального удара по входной кромке; j – целочисленный индекс, указывающий на принадлежность вторичных капель к группе с фиксированным средним радиусом $r_{k,j}$ ($j=1 \div 10$); $C_{\mathcal{E}} = 1,7 \cdot 10^{-14} \text{ c}^{-1} (\text{МПа})^{-k_{\mathcal{E}}}$, $k_{\mathcal{E}} = 6,3$ (для лопаточной стали 20X13).

Параметры каплеударного нагружения (n_j , $r_{k,j}$, $W'_{H,j}$) входной кромки рабочей лопатки в заданном по высоте сечении турбинной ступени определяются по методу расчета [11].

Функция динамических напряжений $\sigma_{1,\delta}$ определяет величину главных нормальных напряжений в волне Рэлея; функция квазистатических напряжений $\sigma_{1,cm}$ определяет величину главных нормальных напряжений, которые обусловлены действием на пятне контакта нестационарного давления удара.

Влияние квазистатических напряжений на процесс эрозионного разрушения материала рабочей лопатки становится существенным, начиная с момента времени ее ударного взаимодействия с каплей

$t \geq t_{cm}$, который по данным работы [16] определяется выражением

$$t_{cm} \geq \frac{5 \cdot L(\tilde{t}_1)}{C_1}, \quad (4)$$

где $L(\tilde{t}_1)$ – радиус пятна контакта капли с поверхностью рабочей лопатки, который соответствует моменту времени \tilde{t}_1 отрыва от расширяющегося пятна контакта продольной волны, распространяющейся в лопаточном материале со скоростью C_1 вследствие удара капли.

В соответствии с предложенной математической моделью (3) процесса эрозионного разрушения лопаточного материала (покрытия) при каплеударном воздействии, накопление эрозионной поврежденности материала в заданной точке поверхности будет происходить только тогда, когда главное нормальное напряжение в этой точке от ударов капель будет растягивающим, то есть тогда, когда будет выполняться условие: $\sigma_1 > 0$.

Напряжение $\sigma_{1,\delta}$ определяется по формуле [5]:

$$\sigma_{1,\delta} = [-B_i \cdot (\lambda h^2 + 2G \cdot s^2) - 2A_i \cdot G \cdot s \sqrt{s^2 - k^2}] \cdot \cos(\omega t - sr), \quad (5)$$

где $s^2 = \frac{\omega^2}{C_R^2}$; $h^2 = \frac{\rho_M \cdot \omega^2}{\lambda + 2 \cdot G}$; $\omega^2 = \left(\frac{2\pi \cdot C'_{\mathcal{M}}}{r_k \cdot W'_H} \right)^2$;

ρ_M – плотность материала рабочей лопатки (покрытия); C_R – скорость распространения волны Рэлея в материале рабочей лопатки (покрытия); $C'_{\mathcal{M}}$ – скорость распространения ударной волны в воде; λ , G – константы упругости лопаточного материала (покрытия); A_i и B_i – постоянные коэффициенты, которые определяются на каждом шаге по времени ударного взаимодействия эрозионно-опасной капли с рабочей лопаткой по методу расчета [5].

Напряжение $\sigma_{1,cm}$, обусловленное действием на пятне контакта эрозионно-опасной капли с рабочей лопаткой нестационарного давления удара, определяется по формуле [14]:

$$\sigma_{1,cm} = \frac{(1-2\nu)}{2} \cdot p \cdot \frac{L(t)^2}{r^2}, \quad (6)$$

где p – нестационарное давление удара, действующее на пятне контакта эрозионно-опасной капли с рабочей лопаткой, которое определяется на каждом шаге по времени ударного взаимодействия капли с лопаткой по методу расчета [14].

При ударе эрозионно-опасной капли влаги сферической формы по входной кромке рабочей лопатки текущий радиус ее пятна контакта с лопаткой определяется по формуле [16]:

$$L(t) = \sqrt{2 \cdot r_k \cdot W'_H \cdot t}, \quad (7)$$

где t – текущий момент времени ударного взаимодействия эрозионно-опасной капли с рабочей лопаткой.

Интегрируя (3) в пределах от $\omega = 0$ до $\omega = 1$, можно определить продолжительность инкубационного периода эрозионного разрушения материала рабочей лопатки (покрытия) в любой точке профильной поверхности, орошаемой полидисперсным потоком эрозионно-опасных капель влаги.

Представленная универсальная математическая модель эрозионного разрушения лопаточных материалов (покрытий) (3) позволяет оценивать эрозионную стойкость выпуклой поверхности рабочей лопатки в различных точках в условиях эрозионного воздействия на нее вторичной капельной влаги.

С помощью данной математической модели, интегрированной в информационную подсистему прогнозирования эрозионной опасности в проточной части [8, 9], была определена относительная эрозионная стойкость рабочей лопатки последней ступени турбины КТ-40/32-6,4 ОАО «Турбоатом» в различных точках ее поверхности в заданных по высоте сечениях по критерию $1/\bar{E}_M$ [17] (рис. 1).

Представленные на рис. 1 результаты численного анализа позволили выделить на выпуклой поверхности рабочей лопатки, рассмотренной в качестве примера, зоны с пониженной эрозионной стойкостью. При определении этих зон были учтены ре-

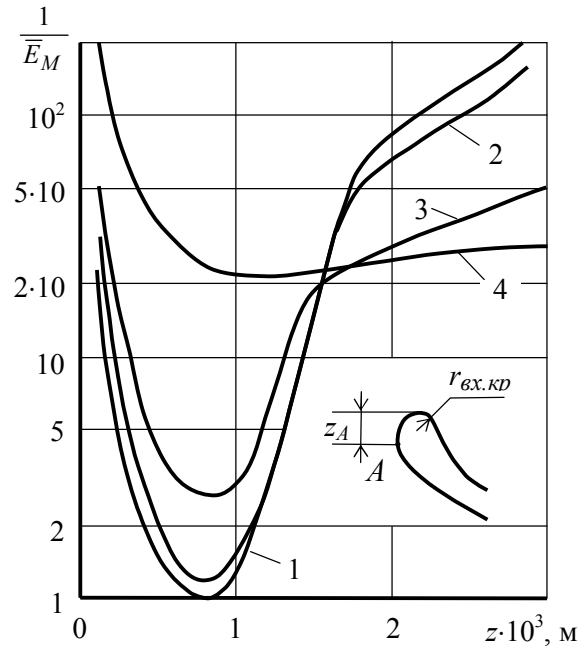


Рис. 1. Сравнительная оценка эрозионной стойкости выпуклой поверхности рабочей лопатки в различных точках на высоте заданных сечений последней ступени турбины КТ-40/32-6,4 ОАО «Турбоатом» (Z_A – осевая координата, отсчитанная от фронта рабочей решетки, точки сопряжения A) окружности, описывающей носик рабочей лопатки в заданном сечении, и дуги окружности, непосредственно к ней примыкающей, которая описывает начальный участок входной кромки рабочей лопатки в том же сечении):

$$1 - \bar{l} = 1; Z_A = 1,611 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$2 - \bar{l} = 0,986; Z_A = 1,611 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$3 - \bar{l} = 0,924; Z_A = 1,534 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$4 - \bar{l} = 0,724; Z_A = 0,966 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

зультаты численного эксперимента [9] по выявлению зон концентрации вибрационных напряжений, появляющихся на выпуклой поверхности рабочей лопатки после возникновения достаточно развитых признаков эрозионного износа.

На рис. 2 представлены результаты расчета эквивалентного напряжения (наибольшего главного нормального напряжения σ_1) в волне Рэлея, возникающего на выпуклой поверхности рабочей лопатки последней ступени турбины КТ-40/32-6,4 ОАО «Турбоатом» в периферийном сечении ($l = 1$) вблизи носика вследствие удара эрозионно-опасной капли влаги модального размера.

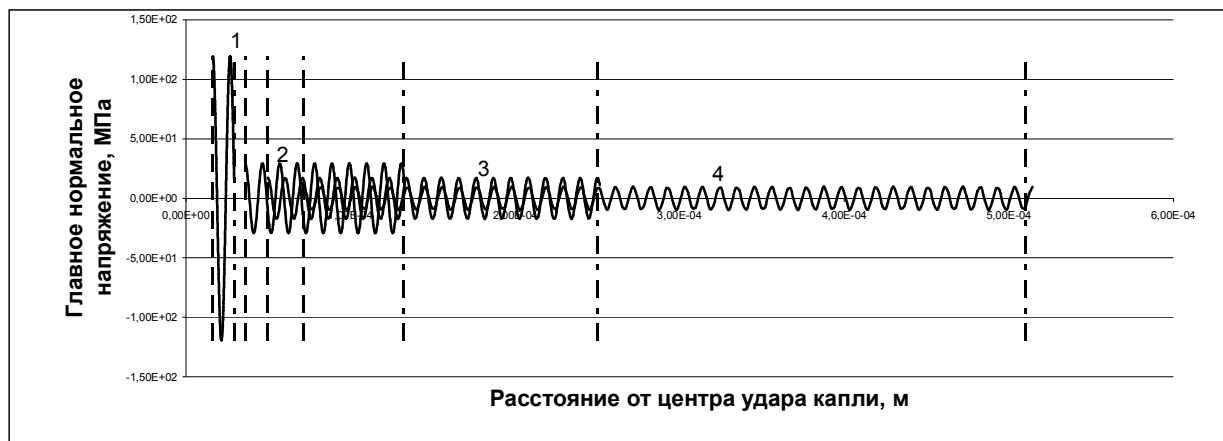


Рис. 2. Наибольшее главное нормальное напряжение в волне Рэлея (σ_1) на периферии профильной поверхности рабочей лопатки последней ступени турбины КТ-40/32-6,4 ОАО «Турбоатом», изготовленной из материала 20X13 ($E = 218$ ГПа, $\nu = 0,3$), в различные моменты времени ударного взаимодействия рабочей лопатки с эрозионно-опасной каплей влаги модалного размера ($r_k = 50$ мкм, $W'_H = 300$ м/с):

1: $t = 0,0033$ мкс; 2: $t = 0,043$ мкс; 3: $t = 0,083$ мкс; 4: $t = 0,16$ мкс (окончание процесса ударного взаимодействия); ----- фронт давления; ----- фронт волны Рэлея

Теоретическое обоснование характеристик тонкого хромового вакуумного покрытия, полученного методом АИР, для защиты рабочих лопаток влажно-паровых ступеней от эрозии. Для установленных таким образом зон с пониженной эрозионной стойкостью были определены технология нанесения и основные параметры противозерозионного покрытия, способного обеспечить эффективную защиту входной кромки рабочей лопатки, рассмотренной в качестве примера, от эрозии.

С учетом ранее накопленного опыта создания противозерозионных вакуумных покрытий был выбран метод АИР, который позволяет получать плазменные покрытия при сравнительно низких температурах, на подложке, что позволяет избежать изменений механических характеристик материала подложки в ее поверхностном слое при нанесении покрытий методом АИР.

В данной работе объектом электронно-лучевого распыления, ионизации полученного пара в высокочастотном электромагнитном поле (ВЧ ЭМП) и его последующей конденсации в виде тонкого покрытия на образцах из материала 20X13 был малолегированный сплав хрома ВХ2К. Степень ионизации паров хрома составляла 9%.

Электронно-микроскопические исследования структуры полученного тонкого хромового покрытия были выполнены с помощью электронного микроскопа JEM-1000CX (ХГНУ). Толщина покрытия составляла $\delta \approx 25$ мкм.

Результаты данных исследований представлены на рис. 3. Они позволили определить преимущественный размер зерен в тонком хромовом покрытии, который оказался равным 4 мкм.

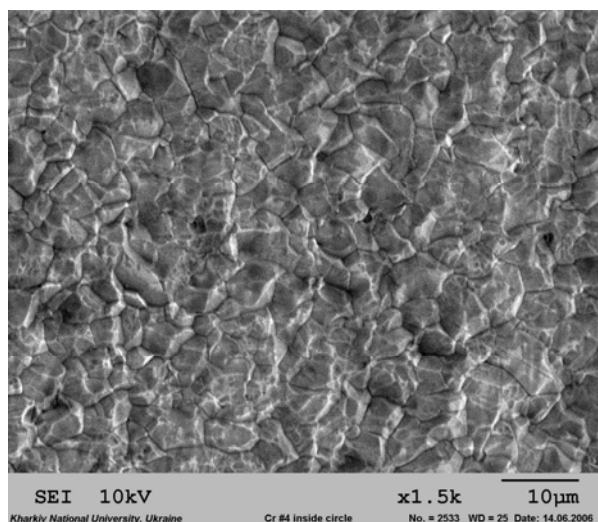


Рис. 3. Структура тонкого ($\delta \approx 25$ мкм) хромового противозерозионного защитного покрытия, полученного методом АИР на подложке из лопаточной стали 20X13 при $T_k = 500^\circ\text{C}$

Основным моментом 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 при эксплуатации рабочей лопатки.

Суперпозиция изменяющихся по толщине противозерозионного покрытия внутренних напряжений и напряжений в волне Рэлея, которая распространяется в покрытии при соударении рабочей лопатки с эрозионно-опасными каплями, позволяет, используя (3), осуществлять оценки эффективности покрытия по скорости роста эрозионной поврежденности его материала.

Данную оценку следует проводить в наиболее эрозионно-опасной точке входной кромки рабочей лопатки.

Предложенный подход к оценке эффективности полученного покрытия согласуется с подходом к данной проблеме, который был сформулирован ранее В.В. Фоминым в работе [19].

Автор работы [19] отмечает, что сопротивление эрозионному разрушению оказывает в основном поверхностный слой металла. Поэтому свойства поверхностного слоя в основном и определяют эрозионную прочность металла.

Результаты экспериментальных исследований [20] показывают, что хромовым покрытиям, которые наносятся в вакууме на стальную подложку, присущи напряжения сжатия, величина которых изменяется по мере удаления от поверхности подложки (рис. 4). Из экспериментальных данных, представленных на рис. 4, хорошо видно, что ближайшие к подложке слои хромового покрытия имеют сравнительно малые по величине напряжения сжатия, которые вблизи поверхности раздела “подложка-покрытие” переходят в напряжения растяжения.

Результаты, представленные кривой 4 на рис. 4, корреспондируют экспериментальным данным [21, 22], которые подтверждают сильное влияние толщины покрытия на величину и знак структурных

макронапряжений, возникающих на поверхности раздела “покрытие-подложка” при температуре конденсации $T_k = 500^\circ\text{C}$.

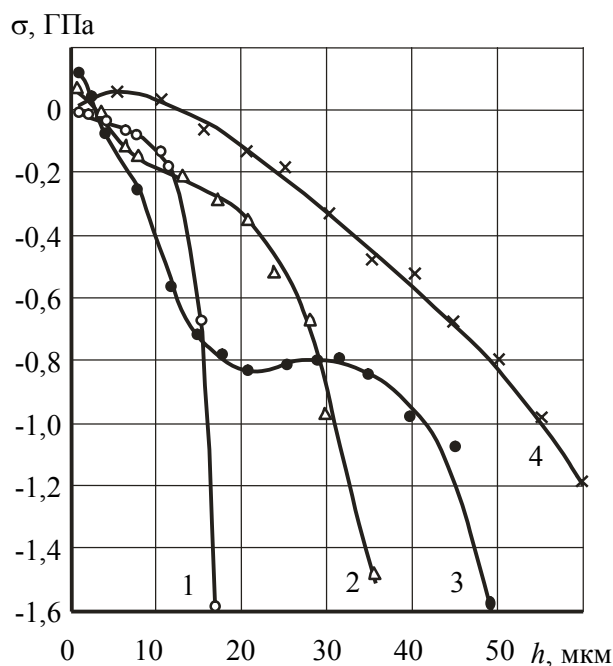


Рис. 4. Кривые распределения внутренних напряжений по толщине h хромового покрытия, наносимого на стальную подложку в вакууме при различной температуре конденсации: 1 – толщина покрытия 15 мкм, температура конденсации 500°C ; 2 – толщина покрытия 37 мкм, температура конденсации 500°C ; 3 – толщина покрытия 50 мкм, температура конденсации 650°C ; 4 – толщина покрытия 65 мкм, температура конденсации 550°C .

В соответствии с данными исследований [20] величина растягивающих внутренних напряжений, возникающих вблизи поверхности раздела “покрытие-подложка” при нанесении хромового вакуумного покрытия толщиной $\delta = 65\text{ мкм}$ на стальную подложку ($T_k = 550^\circ\text{C}$), составляет $\sigma \cong 0,06\text{ ГПа}$.

При увеличении толщины хромового вакуумного покрытия в 1,5 – 2 раза, наносимого методом АИР на стальную подложку, и сохранении той же температуры конденсации величина структурных макронапряжений на поверхности раздела “покрытие-подложка” увеличивается более чем на порядок ($\sigma \cong 0,8\text{ ГПа}$) [22]. Учитывая эти экспериментальные данные, а также результаты проведенных численных исследований (рис. 2), можно сделать вы-

вод, что величина растягивающих внутренних напряжений на поверхности раздела “покрытие-подложка” в толстом хромовом вакуумном покрытии может оказаться соизмеримой с величиной наибольших растягивающих напряжений в волне Рэлея, возникающих на его внешней поверхности от ударов эрозионно-опасных капель.

Таким образом, в толстых хромовых покрытиях ($\delta = 80 \div 125 \text{ мкм}$), получаемых методом АИР на стальной подложке при температуре конденсации $T_k = 500 \div 550^\circ\text{C}$, вблизи поверхности раздела “покрытие-подложка” могут возникать условия для интенсивного роста поврежденности материала покрытия под действием больших внутренних растягивающих напряжений.

С учетом кинетики данного процесса, который описывается уравнением вида (1), большие растягивающие внутренние напряжения могут достаточно быстро привести к возникновению в покрытии трещин на поверхности раздела “покрытие-подложка” и, таким образом, вызвать отслаивание нанесенного на рабочую лопатку толстого хромового вакуумного покрытия.

Отсюда следует, что толщина хромового вакуумного противозэрозионного защитного покрытия на рабочих лопатках последних ступеней ЦНД энергетических турбин должна быть минимальной, но достаточной для того, чтобы исключалась возможность суперпозиции на поверхности раздела “покрытие-подложка” действующих в нем растягивающих внутренних напряжений и растягивающих напряжений в волне Рэлея от ударов эрозионно-опасных капель.

Для хромовых вакуумных покрытий, которые имеют наилучшие защитные свойства, параметр толщины имеет значение: $\delta = 15 \div 20 \text{ мкм}$ [20]. При такой толщине хромового вакуумного покрытия величина осредненных по толщине внутренних сжимающих напряжений составляет $\sigma_{cp} \cong 0,3 \text{ ГПа}$ [22], а величина растягивающих внутренних напряжений на поверхности раздела “покрытие-подложка” ока-

зывается близкой к нулю.

С другой стороны, результаты исследований [21, 22] показывают, что для толстых хромовых вакуумных покрытий ($\delta = 80 \div 125 \text{ мкм}$), получаемых методом АИР при тех же температурах конденсации ($T_k = 500 \div 550^\circ\text{C}$), величина осредненных внутренних сжимающих напряжений равна только $\sigma_{cp} \cong 0,25 \text{ ГПа}$, а величина растягивающих внутренних напряжений вблизи поверхности раздела “покрытие-подложка” оказывается равной $\sigma \cong 0,8 \text{ ГПа}$.

Таким образом, значительное увеличение толщины хромового противозэрозионного покрытия в рассмотренном диапазоне температур конденсации не приводит к улучшению условий компенсации растягивающих волновых напряжений, возникающих на его внешней поверхности от ударов эрозионно-опасных капель. При этом существенно возрастает опасность отслаивания покрытия вследствие действия больших растягивающих внутренних напряжений на поверхности раздела “покрытие-подложка”.

Микропроцессы разрушения в материале хромового покрытия в этих условиях протекают с достаточно высокой скоростью. Это объясняется структурой кинетического уравнения (1), в котором экспериментальная константа $k_{\text{Э}}$ для металлов обычно удовлетворяет условию $k_{\text{Э}} > 4$ [10].

В работе [5] было показано, что наибольшее растягивающее напряжение в волне Рэлея, которое возникает вблизи границы пятна контакта твердой подложки с крупной каплей влаги, где волновое напряжение характеризуется максимальным амплитудным значением, для различных материалов, но одинаковых условий их каплеударного нагружения (скорости нормального удара и радиуса падающей капли) оказывается пропорциональным коэффициенту $1/\sqrt{C_R/C_1}$ (C_R, C_1 – скорости распространения в материале твердой подложки волны Рэлея и продольной волны соответственно).

Принимая во внимание то, что для материала 20X13 [23] $1/\sqrt{C_R/C_1} = 1,421$ ($C_R = 3039,30$ м/с; $C_1 = 6133,78$ м/с), а для хрома $1/\sqrt{C_R/C_1} = 1,331$ ($C_R = 3500,0$ м/с; $C_1 = 6200,0$ м/с [23]), получаем для наибольших растягивающих напряжений в хромовом вакуумном покрытии от ударов эрозионно-опасных капель следующее соотношение:

$$\sigma_{r,Cr,max} = 0,935 \cdot \sigma_{r,20X13,max} \quad (8)$$

Учитывая соотношение (8), результаты расчета, приведенные на рис. 2, а также то, что в данном случае $\sigma_1 \equiv \sigma_r$, получим оценку наибольшего главного нормального растягивающего напряжения, которое будет возникать на внешней поверхности хромового покрытия в наиболее эрозионно-опасной точке выпуклой поверхности рассматриваемой рабочей лопатки: $\sigma_{1,max} \cong 116,875$ МПа.

Таким образом, достаточно тонкое ($\delta \cong 20$ мкм) хромовое вакуумное покрытие позволяет полностью компенсировать наибольшие растягивающие волновые напряжения, которые могут возникнуть на его внешней поверхности от ударов эрозионно-опасных капель. Это означает, что для эффективной защиты от эрозии рабочей лопатки, рассмотренной в качестве примера, можно использовать тонкое хромовое вакуумное покрытие. При этом следует учесть наибольшую глубину проникновения в покрытие волны Рэлея.

Принимая во внимание результаты работы [5], а также данные, приведенные в работе [23], оценить эту глубину можно с помощью следующей приближенной формулы:

$$\sigma_{1,max}(z) = \sigma_{1,max}(0) \cdot e^{-\sqrt{s^2-h^2} \cdot z}, \quad (9)$$

где z – координата по нормали к внешней поверхности нанесенного покрытия, отсчитанная вглубь покрытия; $\sigma_{1,max}(0)$ – наибольшее главное нормальное волновое напряжение, возникающее на внешней поверхности покрытия (при $z = 0$) от ударов эрозионно-опасных капель.

Наибольшую глубину проникновения волны Рэлея в хромовое покрытие можно принять равной $z = 15$ мкм, поскольку значение наибольшего главного нормального напряжения в волне Рэлея в покрытии на этой глубине от внешней поверхности равно только $\sigma_{1,max} = 0,131$ МПа, что составляет менее 0,01% его величины на внешней поверхности покрытия.

Таким образом, для эффективной защиты рабочих лопаток последней ступени турбины КТ-40/32-6,4 ОАО “Турбоатом” от эрозии можно использовать тонкое хромовое покрытие, нанесенное методом АИР в вакууме на входные кромки при следующих условиях (эти условия учитывают результаты ранее выполненных исследований [24]):

а) температура конденсации паров хрома при нанесении противоэрозионного защитного покрытия на рабочую лопатку из материала 20X13 поддерживается на уровне $T_k \cong 500^\circ\text{C}$;

б) давление в вакуумной камере поддерживается на уровне $p \cong (3 \div 6) \cdot 10^{-3}$ Па;

в) хром испаряется под действием электронного луча мощностью 12кВА;

г) плазма возбуждается ВЧ полем с частотой 440kHz;

д) на подложку подается отрицательный электрический потенциал 250V.

Обоснованность выбора тонкого хромового вакуумного противоэрозионного покрытия, наносимого методом АИР, подтверждается следующими данными.

Известно [20], что наилучшие противокоррозионные свойства проявляют хромовые вакуумные покрытия толщиной: $\delta = 15 \div 20$ мкм.

С другой стороны, известно [25], что хромовые гальванические покрытия толщиной $\delta \leq 20$ мкм плохо противостоят микроударному кавитационному воздействию воды.

Таким образом, толщина хромового противоэро-

зионного покрытия, наносимого методом АИР на входную кромку рабочей лопатки, должна быть $\delta \geq 20$ мкм, чтобы полностью исключалась возможность действия на его внутренней поверхности больших растягивающих напряжений, обусловленных волной Рэлея.

С другой стороны, толщина хромового вакуумного противозерозионного покрытия должна быть $\delta \leq 30$ мкм, чтобы полностью исключалась возможность его вспучивания на поверхности раздела «покрытие-подложка» за счет действия больших внутренних растягивающих напряжений.

С учетом указанных требований, для эффективной защиты от эрозии рабочих лопаток последней ступени турбины КТ-40/32-6,4 ОАО «Турбоатом» можно рекомендовать хромовое вакуумное противозерозионное покрытие толщиной $\delta = 25$ мкм, нанесенное методом АИР.

Экспериментальная оценка эрозионной стойкости тонкого хромового вакуумного покрытия, полученного методом АИР на подложке из лопаточного материала 20X13. Для экспериментальной проверки обоснованности выбранной толщины противозерозионного покрытия был использован стенд ИФТТМТ ННЦ ХФТИ [27].

Данный экспериментальный стенд позволяет испытывать различные лопаточные материалы и противозерозионные защитные покрытия на эрозионную (кавитационную) стойкость.

Принципиальная схема стенда ИФТТМТ ННЦ ХФТИ представлена на рис. 5.

Относительное сопротивление испытываемого материала эрозионному (кавитационному) износу определяется по углу наклона линейного участка характерной кинетической кривой эрозионного процесса, построенной в координатах «потери массы материала – время испытаний».

Указанный участок кривой отвечает 2-му основному периоду процесса эрозионного износа экспериментального образца, который протекает с максимальной скоростью (E_M).

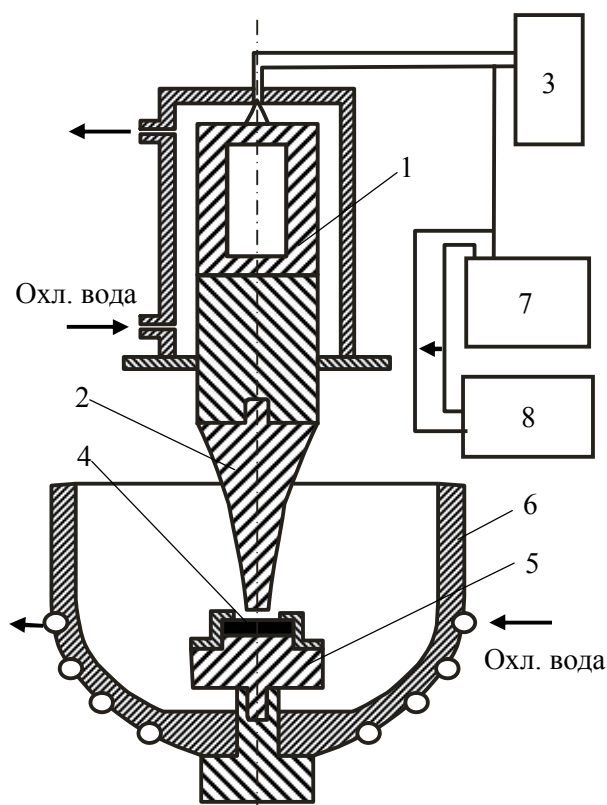


Рис. 5. Принципиальная схема экспериментального стенда для оценки эрозионной стойкости лопаточных материалов и противозерозионных защитных покрытий рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин: 1 – УЗ преобразователь; 2 – концентратор; 3 – генератор УЗ колебаний; 4 – экспериментальный образец; 5 – держатель; 6 – испытательная камера; 7 – осциллограф; 8 – частотомер

Другими словами, эрозионная стойкость лопаточного материала (противозерозионного покрытия) определяется величиной, обратной максимальной скорости процесса эрозионного износа экспериментального образца ($1/E_M$), которая определяется тангенсом угла наклона линейного участка характерной кинетической кривой износа, соответствующей 2-му основному периоду эрозионного процесса.

Данному участку кривой предшествует короткий инкубационный период эрозионного разрушения материала экспериментального образца.

На эрозионном стенде ИФТТМТ ННЦ ХФТИ были выполнены экспериментальные исследования основной характеристики процесса эрозионного износа (E_M), определяющей эрозионную стойкость хромового противозерозионного защитного покры-

тия рабочих для лопаток последних ступеней ЦНД, наносимого на входные кромки методом АИР.

На рис. 6 приведены результаты испытаний на эрозионную стойкость тонкого ($\delta = 25$ мкм) хромового противозэрозионного покрытия и противозэрозионного покрытия для рабочих лопаток последних ступеней ЦНД, получаемого методом электроискрового упрочнения.

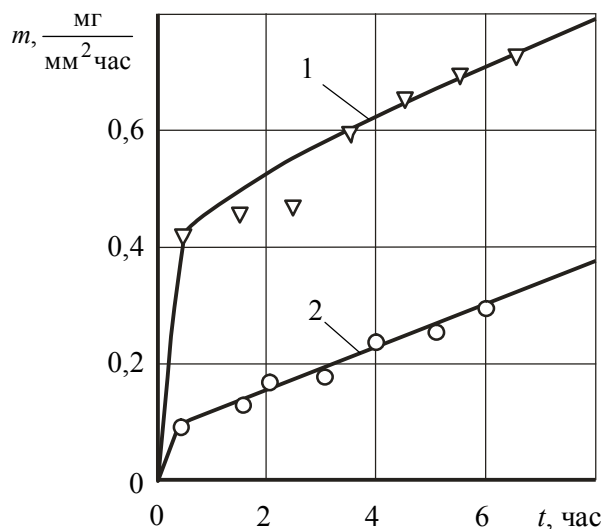


Рис. 6. Экспериментальные кинетические кривые эрозионного износа противозэрозионных защитных покрытий, нанесенных на поверхность образцов из лопаточного материала 20Х13 различными методами: 1 – электроискровое упрочнение поверхности образца, применяемое в ОАО “Турбоатом” для защиты рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин от эрозии; 2 – тонкое ($\delta = 25$ мкм) хромовое противозэрозионное покрытие, наносимое методом АИР в вакууме

Из экспериментальных данных, приведенных на рис. 6, можно сделать следующие выводы.

Кривая 1 (электроискровое упрочнение) и кривая 2 (метод АИР) не имеют явно выраженного инкубационного периода эрозионного износа. Такая особенность полученных кинетических кривых эрозионного износа объясняется характером создаваемого на данном стенде эрозионного (кавитационного) воздействия воды на поверхность.

Характер поведения приведенных на рис. 6 кинетических кривых износа позволяет говорить о том, что эрозионный процесс в рассматриваемых защит-

ных покрытиях сравнительно быстро переходит в 3-ю основную стадию эрозионного процесса.

Данный вывод особенно хорошо просматривается по поведению кинетической кривой 1.

На кривой 2 такой участок выделить не удалось. Характер ее поведения говорит о том, что продолжительность переходного процесса эрозионного износа, протекающего с убывающей скоростью, оказывается для тонкого хромового покрытия, наносимого методом АИР, очень незначительной. Для данного покрытия процесс эрозионного износа сравнительно быстро переходит в 3-ю основную стадию и развивается далее с характерной для нее установившейся скоростью.

Сравнение кинетических кривых 1 и 2 позволяет сделать вывод о том, что установившиеся скорости эрозионного износа для рассмотренных покрытий оказываются весьма близкими.

Таким образом, можно утверждать, что на поздних стадиях развития эрозионного процесса в исследуемых покрытиях их противозэрозионные свойства оказываются примерно одинаковыми.

С другой стороны, развитие процесса эрозионного износа данных покрытий на его начальных стадиях имеет существенные отличия.

Так, например, 2-й основной период процесса эрозионного износа, который начинается с момента времени окончания очень короткого инкубационного периода, близкого по своей продолжительности к нулю, и завершается моментом времени, когда скорость эрозионного износа начинает убывать, для рассмотренных покрытий характеризуется значительно отличающимися по величине максимальными скоростями износа.

Максимальная скорость эрозионного износа защитного покрытия, полученного методом электроискрового упрочнения ($E_{M,1}$), оказывается в 5,7 раз выше аналогичной скорости эрозионного износа тонкого хромового защитного покрытия ($E_{M,2}$), полученного методом АИР.

В свою очередь, это означает, что на начальных стадиях процесса эрозионного износа рассмотренных защитных покрытий эрозионная стойкость тонкого хромового покрытия ($1/E_{M,2}$), полученного методом АИР, будет в 5,7 раз превышать эрозионную стойкость ($1/E_{M,1}$) покрытия, полученного методом электроискрового упрочнения.

Учитывая зрительное различие в эрозионной стойкости тонкого хромового покрытия, получаемого методом АИР, и покрытия, получаемого методом электроискрового упрочнения, можно утверждать следующее.

Эрозионный износ рабочих лопаток с электроискровым упрочнением входных кромок, возникающий на начальных стадиях эрозионного процесса, окажется примерно в 5,7 раз больше износа, который возникнет на тех же стадиях данного процесса на рабочих лопатках с тонким хромовым покрытием, нанесенным методом АИР при указанных выше технологических условиях.

На третьей стадии эрозионного процесса износ входных кромок будет увеличиваться в обоих случаях с одинаковой скоростью.

Для анализа кинетики процесса покрытия дополнительно были проведены исследования изменений микротвердости поверхностного слоя покрытия.

Данные исследования проводились путем измерения на приборе ПМТ-3 микротвердости покрытия.

Результаты этих экспериментальных исследований представлены на рис. 7.

Характер полученной экспериментальной зависимости относительной микротвердости поверхностного слоя тонкого хромового покрытия как функции времени экспозиции под кавитационным воздействием воды позволяет заключить следующее.

В начальный период микроударного (кавитационного) воздействия воды на материал покрытия его относительная микротвердость резко возрастает (за время экспозиции $\Delta t = 5$ мин.). При последующем увеличении времени экспозиции рост относительной микротвердости материала покрытия замедляется.

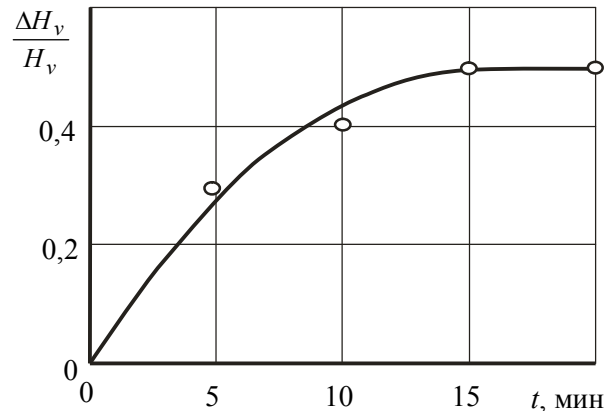


Рис. 7. Экспериментальная зависимость относительной микротвердости поверхностного слоя тонкого хромового противоэрозионного защитного покрытия, нанесенного методом АИР на подложку из материала 20X13, от продолжительности испытаний на кавитационном стенде

Начиная с момента времени экспозиции $t = 15$ мин. кавитационное воздействие воды на образец не приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя нанесенного покрытия.

Время экспозиции $t = 15$ мин, истекшее с начала проведения эрозионных испытаний на стенде ИФТТМТ ННЦ ХФТИ образцов с тонким хромовым вакуумным покрытием, соответствует продолжительности инкубационного периода эрозионного разрушения материала покрытия в условиях испытаний на данном стенде.

Действительно, в соответствии с результатами экспериментальных исследований [19] заметный эрозионный износ поверхности образцов из различных металлов начинается именно с того момента времени экспозиции, когда в поверхностном слое образцов прекращается повышение микротвердости.

Это означает, что второй основной период эрозионного износа рассматриваемого тонкого хромового вакуумного покрытия, который отвечает процессу полного или частичного разрушения микрочастиц материала покрытия в его поверхностном слое и характеризуется максимальной скоростью уноса массы материала с внешней поверхности образца, подвергаемой кавитационному воздействию воды, составляет $t_{II} \cong 0,75$ часа.

Учет малого по продолжительности инкубационного периода эрозионного разрушения материала вакуумного покрытия ($t_{инк.} = 15$ мин) не может существенно повлиять на полученную оценку его эрозионной стойкости. Поэтому приведенная выше сравнительная оценка эрозионной стойкости тонкого хромового вакуумного покрытия, полученного методом АИР, и покрытия, полученного методом электроискрового упрочнения, представляется вполне обоснованной.

Установленное в эксперименте значительное превышение скорости износа покрытия, нанесенного методом электроискрового упрочнения, над скоростью износа тонкого хромового покрытия, нанесенного методом АИР, во втором периоде эрозионного процесса при эрозионных испытаниях на кавитационном стенде объясняется не столько различиями в прочностных свойствах их материалов, сколько особенностями формирующейся поверхности данных покрытий.

Действительно, уровень шероховатости покрытия, полученного методом электроискрового упрочнения, значительно превосходит уровень шероховатости тонкого хромового покрытия, полученного методом АИР, что хорошо видно на рис. 8.

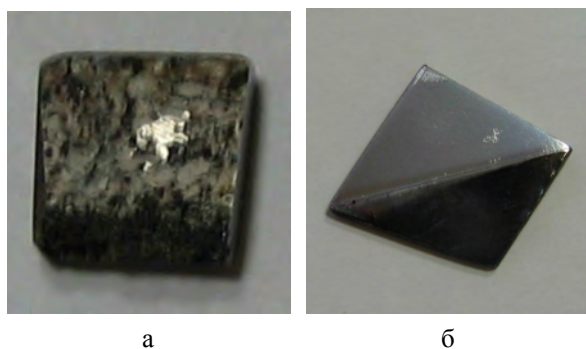


Рис. 8. Экспериментальный образец из материала 20X13: а – с противозэрозионным защитным покрытием, нанесенным методом электроискрового упрочнения; б – с тонким хромовым противозэрозионным защитным покрытием (светлая часть образца), нанесенным методом АИР в вакууме

При этом известно [19], что большое влияние на процесс разрушения металлов при кавитационном

воздействии воды оказывают различные макроскопические дефекты (надрезы, царапины, поры, острые углы рельефа и т.п.), которые могут присутствовать на поверхности образцов, испытываемых на кавитационном стенде.

Эти макродефекты являются концентраторами напряжений, возникающих в поверхностном слое образца при микроударном (кавитационном) воздействии воды, и вызывают более интенсивное его эрозионное разрушение.

Таким образом, макродефекты (повышенный уровень шероховатости) внешней поверхности противозэрозионного защитного покрытия, полученного методом электроискрового упрочнения, являются искусственно созданными в процессе его нанесения на рабочую лопатку сильными концентраторами напряжений, которые обуславливают его интенсивный эрозионный износ.

Подобного рода концентраторы напряжений на внешней поверхности тонкого хромового покрытия, полученного методом АИР, полностью отсутствуют.

Следует также отметить, что, поскольку начальная шероховатость электроискрового покрытия значительно превосходит начальную шероховатость покрытия, нанесенного методом АИР, то профильные потери во влажно-паровых ступенях, в которых для защиты рабочих лопаток будет использоваться электроискровое упрочнение входных кромок, всегда будут выше, чем в ступенях, в которых будет использоваться тонкое хромовое вакуумное противозэрозионное покрытие.

Дальнейшие исследования по совершенствованию защитных свойств тонких вакуумных противозэрозионных покрытий, получаемых методом АИР, которые смогут обеспечить еще более высокую эффективность пассивной защиты рабочих лопаток последних ступеней энергетических турбин от эрозии, будут развиваться в направлении создания и анализа характеристик тонких противозэрозионных покрытий, получаемых на основе хрома путем его легирования углеродом.

Указанное направление исследований представляется весьма перспективным, поскольку легирование хрома углеродом позволяет существенно уменьшить размер зерен в получаемом тонком вакуумном покрытии.

Ожидаемым эффектом от уменьшения размера зерен в хром-углеродном вакуумном покрытии будет повышение его эрозионной стойкости.

Требуется проведение исследований величины и знака структурных макронапряжений, возникающих в таком покрытии на поверхности раздела "покрытие-подложка", а также влияния толщины хром-углеродного вакуумного покрытия на величину возникающих в нем осредненных внутренних напряжений.

Заключение

1. Предложен научный подход к решению проблемы создания эффективных противэрозионных вакуумных покрытий для рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин.

2. Предложена универсальная математическая модель эрозионного разрушения лопаточных материалов и противэрозионных защитных покрытий, учитывающая кинетику данного процесса.

3. Теоретически и экспериментально обоснованы толщина и технологические условия нанесения методом АИР в вакууме тонкого хромового противэрозионного защитного покрытия на входные кромки рабочих лопаток последних ступеней мощных паровых турбин.

Литература

1. Особенности эрозионного износа рабочих лопаток последних ступеней турбин мощностью 300 МВт и выше / Н.В. Аверкина, Е.Б. Долгопоск, Ю.Я. Качуринер, В.Г. Орлик // Теплоэнергетика. – 2001. – № 11. – С. 34-40.

2. Разработка последних ступеней паровых турбин НПО «Турбоатом» / Е.В. Левченко, В.П. Сухинин, Б.А. Аркадьев и др. // Теплоэнергетика. – 1994. – № 4. – С. 7-11.

3. Явельский М.Б. Исследования методов антиэрозионной защиты рабочих лопаток паровых турбин: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Л., 1971. – 19 с.

4. Повышение эрозионной стойкости сталей, применяемых в энергомашиностроении / И.И. Новиков, Г.А. Филиппов, А.М. Мордухович, О.А. Кривда, И.А. Шалобасов, Б.Я. Ивницкий // Энергомашиностроение. – 1989. – № 12. – С. 15-17.

5. Ковальский А.Э. Теоретическое обоснование механизма каплеударной эрозии рабочих лопаток осевых турбомашин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т "ХАІ", 2001. – Вип.23: Двигуни і енергоустановки. – С. 33-41.

6. Исследование перспективных защитных покрытий для лопаток последних ступеней паровых турбин / В.Ф. Резинских, А.Ф. Богачев, А.И. Лебедева и др. // Теплоэнергетика. – 1996. – № 12. – С. 28-31.

7. Рыженков В.А., Бодров А.А., Филиппенко В.А. Эрозионный износ металла при сверхзвуковых скоростях влажного пара // Труды МЭИ. – 1989. – Вып. 203. – С. 76-80.

8. Исследование показателей эрозионной и вибрационной надежности рабочих лопаток влажнопаровых турбин на различных эксплуатационных режимах / А.Э. Ковальский, С.П. Канило и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т "ХАИ", 1999. – Вып. 9: Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 438-442.

9. Влияние эрозии на вибрационные характеристики рабочих лопаток влажно-паровых турбин / А.Л. Шубенко, А.Э. Ковальский и др. // *Проблемы машиностроения*. – 2003. – Т.6, №1. – С. 10-26.

10. Шубенко-Шубин Л.А., Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Кинетическая модель процесса и оценка инкубационного периода разрушения материалов, подвергаемых воздействию капельных потоков // Теплоэнергетика. – 1987. – № 2. – С. 46-50.

11. Ковальский А.Э. Моделирование процесса каплеударной эрозии рабочих лопаток паровых турбин с целью совершенствования их противэрози-

онных показателей: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Л., 1987. – 16 с.

12. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Ч. 2 / Под ред. В.Т. Трощенко. – К.: Наук. думка, 1994. – 701 с.

13. Дьяченко С.С., Рабухин В.Б. Физические основы прочности металлов. – Х.: Вища школа, 1982. – 200 с.

14. Ковальский А.Э. Универсальная математическая модель инкубационного периода каплеударной эрозии материала рабочих лопаток влажно-паровых турбин // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 107-116.

15. Ковальский А.Э. Математическая модель продолжительности стадии ударного взаимодействия эрозионно-опасной капли влаги с входной кромкой рабочей лопатки влажно-паровой турбинной ступени // Проблемы машиностроения. – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 9-16.

16. Эрозия / Под ред. К. Прис. – М.: Мир, 1982. – 464 с.

17. Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Кинетическая модель каплеударной эрозии рабочих лопаточных аппаратов паровых турбин // Изв. АН СССР. – Энергетика и транспорт. – 1989. – №5. – С. 94-101.

18. Зеленский В.Ф., Картмазов Г.Н. Вакуумно-плазменные и другие физические способы получения покрытий – важный резерв повышения надежности и долговечности деталей машин и инструментов // Научно-практ. конф. по защите деталей машин от износа методами покрытий и наплавки износостойкими порошками на базе Навоийского горно-металлургического комбината им. 50-летия СССР (тезисы докладов). – Навои, 1984. – С. 20-22.

19. Фомин В.В. Гидроэрозия металлов. – М.: Машиностроение, 1977. – 287 с.

20. Ройх И.Л., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. – М.: Машиностроение, 1976. – 367 с.

21. Исследование параметров микро- и субструктуры толстых покрытий, полученных вакуумной конденсацией высокоплотных атомных и атомно-

ионных потоков. Ч. 1. Влияние температуры конденсации на микро- и субструктуру, макронапряжения и текстуру ионно-плазменных покрытий из малолегированного хрома ВХ2К, полученных конденсацией атомных и атомно-ионных потоков / И.В. Алексенко, Л.В. Булатова, Н.П. Дикий и др. // ВАНТ, сер. ФРП и РМ. – 1987. – Вып. 1 (2). – С. 73-82.

22. Исследование параметров микро- и субструктуры толстых покрытий, полученных вакуумной конденсацией высокоплотных атомных и атомно-ионных потоков. Ч. 2. Сравнение структурных характеристик покрытий из малолегированного хрома ВХ2К, полученных конденсацией атомных и атомно-ионных потоков / И.В. Алексенко, Л.В. Булатова, Н.П. Дикий и др. // ВАНТ, сер. ФРП и РМ. – 1987. – Вып. 1 (2). – С. 83-90.

23. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 245 с.

24. Исследование кавитационно-эрозионной стойкости толстых покрытий системы (Ti, Cr, Nb)-С, полученных методом атомно-ионного осаждения / Г.Н. Картмазов, Ю.И. Поляков, Ю.В. Лукирский, С.П. Щербак // Сб. трудов 5-й межд. конф. “Вакуумные технологии и оборудование”. – Х., 22-27 апреля 2002. – Вакуумные процессы получения пленок и покрытий. Раздел II. – С. 129-133.

25. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

26. Ворошнин Л.Г., Абачараев М.М., Хусид Б.М. Кавитационностойкие покрытия на железоуглеродистых сплавах / Под ред. М.Н. Бодяко. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 248 с.

27. Коваленко В.І., Маринін В.Г. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікроударному діянні // ВАНТ, сер. ФРП и РМ. – 1998. – Вып. 5 (71). – С. 83-85.

Поступила в редакцию 7.10.2006

Рецензент: д-р. техн. наук, проф. В.И. Змий, Национальный Научный Центр «Харьковский Физико-технический институт», Харьков.