

*А. А. ТАРЕЛИН, Н. В. СУРДУ, А. В. НЕЧАЕВ*

### ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ВЛАЖНОПАРОВОГО ПОТОКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

**АННОТАЦИЯ** Приведены экспериментальные данные влияния электрически заряженного влажнопарового потока и электрических полей на механические свойства лопаточных материалов, которые оценивали при помощи измерения микротвёрдости. Установлено, что знак заряда парового потока оказывает влияние на изменение микротвёрдости и степень наводороживания лопаточного материала. Установлено влияние полярности электрических воздействий на кинетику изменения микротвёрдости лопаточных материалов и рассмотрены возможные механизмы этих изменений.

**Ключевые слова:** электризация влажнопарового потока, ударно-капельная эрозия, инкубационный период, микротвёрдость, наводороживание, адсорбционно-пластифицирующий эффект, водородная хрупкость, микропластификация, разупрочнение.

*A. A. TARELIN, N. V. SURDU, A. V. NECHAEV*

### INFLUENCE OF THE ELECTRIZATION OF WET STEAM FLOW AND ELECTRIC FIELDS ON A CHANGE IN MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIALS OF TURBINE ROTOR BLADES

**ABSTRACT** This scientific paper gives consideration to experimental data obtained for the influence produced by electrically charged wet steam flow and electric fields on the mechanical properties of materials used for rotor blades. It was established that the charge sign of the steam flow affects a change in microhardness and a degree of the hydrogen saturation of blade material. The microhardness and the degree of hydrogen saturation of the blade material are affected not only by the flow charge but also by the availability of the electric charge on the specimen and its sign. A linear correlation between the degree of change in the concentration of hydrogen in the metal and the degree of change in its microhardness in test conditions is not observed. This scientific paper gives the analysis of experimental data and it also studies possible mechanisms of changes in the mechanical properties of test materials.

**Key words:** wet steam flow electrization, shock-drop erosion, incubation period, microhardness, hydrogen saturation, adsorption-&-plasticizing effect, hydrogen brittleness, microplasticification, loss of strength.

#### Введение

Известно, что рабочее тело перед последней ступенью и на выходе из паровой турбины (в патрубке) представляет собой двухфазную, электрически заряженную среду с объёмной плотностью зарядов от  $10^{-7}$  до  $10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup> [1, 2]. Возникновение зарядов начинается в зоне Вильсона при образовании капель влаги, которая конденсируется на поверхностях проточной части турбины [3]. Образование зарядов в проточной части паровых турбин, имеет особенности, связанные с большими скоростями потока, сложным химическим составом конденсата, а также с наличием естественных электрических полей высокой напряжённости. Процессы зарядообразования, движение в паровом потоке электрически заряженных капель, а также возникающие при их столкновении с рабочими лопатками электрические явления, сопровождаются возникновением импульсных электрических токов и электромагнитных полей и излучений. Наличие электрических полей при механических воздействиях может снижать предел пластичности металлов [4–6], оказывая тем самым заметное влияние на их прочностные свойства в сторону ухудшения. В свою очередь, это будет способствовать

ускоренному развитию эрозионного разрушения рабочих лопаток, что не учитывается в известных физических представлениях и математических моделях ударно-капельной эрозии [7–10].

#### Анализ состояния проблемы

Микропластическая деформация металлов начинается обычно с поверхности [11], поэтому механические и эксплуатационные показатели ответственных деталей энергосиловых установок во многом зависят от качества поверхности, упругонапряжённого состояния приповерхностного слоя, наличия и воздействия различных технологических сред, электрических и физических явлений (электрические и магнитные поля и токи, механические колебания и пр.).

Основной причиной эрозии лопаток ступеней цилиндра низкого давления (ЦНД), и особенно рабочих лопаток последней ступени, которые имеют наибольшую длину, является ударное воздействие водных капель [7, 8], образующихся в результате аэродинамического диспергирования конденсатной плёнки влаги с поверхности кромок направляющих лопаток [12]. Анализ научнотехнической информации [7–10], посвящённой

изучению и моделированию процесса ударно-капельного эрозионного разрушения металлов, возникающего при воздействии влажно-парового потока, показал, что разработанные теоретические модели возникновения, трансформации и взаимодействия капельной влаги с элементами проточной части пока не дают удовлетворительных объяснений многим физическим эффектам, в том числе связанным с присутствием в паровом потоке электрически заряженной капельной влаги различной дисперсности. Кроме того, эти модели не отражают причин формирования губчато-игольчатой формы эродированной поверхности (рис. 1). При этом, во всех известных нам физических моделях [7–10] и методах борьбы с капельно-ударной эрозией лопаточных материалов обнаруженные нами электрические явления и сопутствующие им физико-химические процессы, возникающие во влажно-паровом потоке, не только не учитываются, но даже и не рассматриваются.

Следует, однако заметить, что наложение на материал высоковольтных электрических полей различной полярности, может либо ускорять, либо замедлять процесс его эрозионной деградации, поэтому изучение влияния полярности электрически заряженного влажно-парового потока на физико-механические свойства лопаточных материалов, в условиях воздействия электрических полей и токов, является актуальной проблемой.

Также нужно обратить внимание на то, что в настоящее время широкое распространение получает пассивный метод предотвращения эрозионной опасности рабочих лопаток, который заключается в применении тех или иных методов упрочнения эрозионно-опасных участков поверхности рабочих лопаток. Это применение специальных стеллитовых накладок, нанесение защитных многослойных вакуумных покрытий или применение специальных методов локального термического упрочнения. Все эти методы существенно усложняют и без того сложную технологию изготовления длинномерных рабочих лопаток и естественно значительно удорожают их. Поэтому, на наш взгляд, правильнее и дешевле бороться с причинами, а не со следствием, для чего необходимо хорошо понимать физическую природу эрозии.

### Постановка задачи

Для уточнения и лучшего понимания физической природы эрозионного разрушения лопаточных материалов и экспериментальной проверки высказанных предположений, была поставлена задача изучения степени влияния полярности электрически заряженного влажного пара и высоковольтных электрических полей, накладываемых на обрабатываемую поверхность, на характер и кинетику изменения механических свойств лопаточных материалов, которые было предложено

оценивать с помощью измерения микротвёрдости поверхности. Как известно [1–2] крупные капли влажно парового потока, набегающие на поверхность рабочих лопаток и вызывающие ударно-капельную эрозию, заряжены преимущественно положительно, при этом ротор с закреплёнными на нем рабочими лопатками рекомендуется заземлять. Сталкиваясь с поверхностью лопаток положительно заряженные капли будут разряжаться, «стягивая» на себя электроны, в результате чего, рабочая лопатка по отношению к земле приобретает положительный потенциал. Если же в потоке содержится отрицательно заряженная мелкодисперсная влага, то, разряжаясь на поверхности лопатки она «сбрасывает» избыточные электроны и создаёт на лопатке по отношению к земле отрицательный потенциал.

Таким образом, для исследования практический интерес представляют четыре варианта. Первые два – когда влажнопаровой поток заряжен положительно, а образец в одном случае заземлён, в другом – находится под высоковольтным положительным потенциалом. И следующие два варианта – когда паровой поток заряжен отрицательно, а образец либо заземлён, либо находится под высоковольтным отрицательным потенциалом.

### Оборудование, материалы и методика экспериментальных исследований

На первом этапе экспериментального изучения влияния электрического заряда и поля на изменение микротвёрдости поверхности исследуемых образцов, использовали метод обдува поверхности образца низкоскоростной струей парок капельного потока, который заряжался при помощи коронирующего электрода в виде сетки.

Результаты анализа состояния образцов показали, что, микротвёрдость поверхностей образцов из стали 20Х13, подвергаемых обдуву низкоскоростной струей положительно заряженного влажно-парового потока, уменьшается в 1,6...2,8 раза. Это подтвердило наше предположение о том, что наличие заряда во влажном паре, взаимодействующем с лопаточным материалом, способно приводить к изменениям его прочности.

Далее, на втором этапе исследований, образцы подвергали воздействию высокоскоростного электрически заряженного влажно-парового потока, при различной его полярности, и наличии электрического поля, действующего на поверхность образца. Для этой цели был изготовлен паровой стенд, который был снабжён системой ионизации пара и позиционирования образца, с обеспечением для влажно-парового потока термодинамических условий, приближенных к условиям в зоне выхлопной части ЦНД.

Вначале провели серию экспериментов по определению влияния различных режимов непре-

рывной обработки поверхности исследуемых образцов, на изменение микротвёрдости и содержание водорода. С этой целью опытные образцы, после замера исходной микротвёрдости, подвергались непрерывному воздействию высокоскоростного парового потока в течение 5–6 часов в соответствии с режимами, указанными в табл. 1. После обработки снова замерялась микротвёрдость обработанной поверхности не менее чем в 10 местах при нагрузках 10 и 50 г. Затем методом термодесорбционной масс-спектрометрии (ТДС) определяли спектры десорбции водорода из исходных образцов и прошедших различную обработку (Измерения выполнил А.Н. Морозов в Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт»). Суммарное количество выделившегося водорода определялось по площади фигуры, лежащей под кривой зависимости скорости десорбции газа от времени.

Измерение спектров термодесорбции были выполнены на экспериментальной установке «СКИФ», детально описанной в работе [13]. Выделение водорода в измерительной камере регистрировалось с помощью масс-спектрометра АПДМ-1 настроенного на массу 2 а.е.м. (H<sub>2</sub>) и одновременно регистрировалось изменение интегрального давления в камере измерений (газовыделение) с помощью вакуумметра ВИТ-2.

### Результаты и их обсуждение

Режимы обработки высокоскоростной струей влажного пара представлены в табл. 1.

Результаты первой серии экспериментов, в которых определялось влияние непрерывного (в течение 5...6 часов) воздействия высокоскоростного потока сухого и влажного пара (в том числе электрически заряженного) в соответствии с режимами, оговорёнными в табл. 1, сведены в табл. 2.

Анализ полученных данных показывает, что полярность электрически заряженного пара, и прикладываемого к образцу высоковольтного потенциала оказывают заметное влияние, как на степень его наводороживания, так и на степень и характер изменения микротвёрдости исследуемого металла. При этом, если судить о влиянии полярности высоковольтного потенциала образца, по изменению содержания водорода, то минимальное, а точнее отсутствие, наводороживания наблюдалось на режиме 3В, когда и образец был под высоковольтным положительным потенциалом, и влажный пар был положительно заряженным. В этом случае концентрация водорода практически осталась такой же, как в исходном состоянии (0,4 ат.%). Однако микротвёрдость  $H_{\mu}^{10}$  образца выросла с 100,7±7,5 кг/мм<sup>2</sup> в исходном состоянии до 125,5±5,8 кг/мм<sup>2</sup>. По нашему мнению, это может быть связано отчасти с модификацией поверх-

ности ионами азота (ионное азотирование), отчасти с образованием сложно окисных комплексных плёнок, более прочных нежели основной металл.

Таблица 1 – Режимы обработки образцов первой серии экспериментов

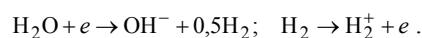
Обознач. режима / № образца	Полярность и значение стекающего тока, мкА		Высоковольтное напряжение, кВ	
	образец	ионизатор	Ионизатор	образец
<b>0/0</b>	нет	нет	нет	нет
Перегретый (сухой) пар				
<b>0П/1</b>	нет	нет	нет	нет
Влажный пар				
<b>0В/2</b>	нет	нет	нет	нет
<b>1В/4</b>	5,1	35	8,05	нет
<b>2В/3</b>	-5,1	63	-8,3	нет
<b>5В/8</b>	-70	-100	-6,7	-4,5
<b>3В/10</b>	70	100	8,8	4,2

Таблица 2 – Изменение микротвёрдости поверхности образцов из стали 20Х13 первой серии второго этапа экспериментов

Обознач. режима / № образца	Время обработки, ч	Микротвёрдость $H_{\mu}$ , кг/мм <sup>2</sup> нагрузка, Р, г		Кол-во водорода Н, ат.%
		10	50	
0/0	нет	100,7±7,5	175±1,5	0,4
Перегретый (сухой) пар				
0П/1	6	109±3	185,5±1,1	0,65
Влажный пар				
0В/2	6	97,7±8,2	184,5±1,3	0,65
1В/4	6	104,7±4,7	190,5±1	2,2
2В/3	6	97,8±7,4	174,5±1,1	4,0
5В/8	5	105,6±4,1	197±2,1	2,0
3В/10	5	125,5±5,8	220,5±3	0,4

Неожиданным оказался результат максимального наводороживания заземлённого образца при его обдуве отрицательно заряженным влажным паром (режим 2В). Концентрация водорода выросла в 10 раз (с 0,4 ат.% до 4 ат.%), а микротвёрдость  $H_{\mu}^{10}$  по отношению к исходному состоянию (100,7±7,5 кг/мм<sup>2</sup>) незначительно снизилась до 97,8±7,4 кг/мм<sup>2</sup>.

Одним из возможных механизмов насыщения металла водородом в этом случае может быть механизм, предложенный в работе [14]



Следует заметить, что линейной корреляции между степенью изменения концентрации водорода в металле и степенью изменения его микро-

твёрдости в исследуемых условиях не наблюдается.

В процессе отладки методики экспериментальных исследований на первом этапе нами была замечена нелинейность кинетики изменения микротвёрдости поверхности исследуемых образцов при варьировании только временем воздействия уже в пределах 1–3 часа воздействия. В связи с этим возникла необходимость в экспериментальной проверке кинетики изменения микротвёрдости поверхности исследуемых образцов на тех же режимах обработки в пределах до 10 часов суммарного воздействия. Для этого была проведена вторая серия экспериментов в которой, через каждый час воздействия, образец снимался со стенда, делались замеры микротвёрдости его поверхности, и он снова устанавливался на стенд и подвергался дальнейшему воздействию. Общее время воздействия составляло 10 часов. Обработанные результаты исследований представлены в виде графиков на рис. 2–5. Для наглядности строились графики кинетики относительного изменения микротвёрдости  $\varepsilon(H_\mu)_\tau^P$  поверхности, каждая точка определялась по зависимости

$$\varepsilon(H_\mu)_\tau^P = \frac{(H_\mu)_\tau^P - (H_\mu)_0^P}{(H_\mu)_0^P},$$

где  $(H_\mu)_0^P$  – исходное (начальное) значение микротвёрдости поверхности образца ( $P$  – нагрузка на пирамидку),  $(H_\mu)_\tau^P$  – текущее значение микротвёрдости, или значение микротвёрдости определённое после обработки паром в течение некоторого времени  $\tau$  час.

Из анализа результатов, представленных в виде графиков (рис. 2–5), можем сделать следующие наблюдения.

При воздействии высокоскоростного отрицательно заряженного потока влажного пара на заземлённый образец № 1, вначале (рис. 2), в течение первого часа, наблюдается увеличение относительного изменения микротвёрдости поверхности металла на 50 % для  $H_\mu^{10}$  и на 30 % для  $H_\mu^{50}$ , что может быть вызвано как имплантацией ионов азота (микро азотирование), так и образованием окисных (в том числе комплексных) плёнок, более прочных, нежели основной металл. В последующем, после 2...10 часов обработки, наблюдается уже разупрочнение металла, которое проявляется как уменьшение микротвёрдости, что связано уже с его локальной микропластификацией [15, 16], вызванной, прежде всего, превалирующим наводороживанием. Причём степень влияния на микротвёрдость образующихся плёнок и наводороживания находятся как бы в конкурентной борьбе, о

чем свидетельствует сложный характер зависимости

$$\varepsilon(H_\mu)_\tau^P = f(\tau).$$

При воздействии же на заземлённый образец (№ VI) положительно заряженного высокоскоростного потока влажного пара (рис. 3), процесс наводороживания (по типу катодной поляризации) превалирует над химическими преобразованиями в тонком поверхностном слое. Поэтому относительное изменение микротвёрдости исследуемого образца в течение первых двух часов, за счёт локальной микропластификации монотонно уменьшается на –40 % для  $H_\mu^{10}$  и на –10 % для  $H_\mu^{50}$ , а затем колеблясь по сложной зависимости достигает максимального (по сравнению с исходной) изменения на –(45...50)% для  $H_\mu^{10}$  и примерно на –(15...20) % для  $H_\mu^{50}$ . Больше (по модулю) относительное изменение микротвёрдости при малых нагрузках говорит о том, что процессы влияния происходят в основном в тонком поверхностном слое и проявляются при проникновении алмазной пирамидки на глубину до 4 мкм.

Наложение на образец (№ 3) отрицательно го потенциала при воздействии отрицательно заряженным потоком влажного пара, приводит к тому, что относительное изменение микротвёрдости  $H_\mu^{10}$ , в течение первого часа воздействия и меняется на –12 %, и на –17 % по истечении 2 часов для  $H_\mu^{50}$ . Затем, монотонно уменьшаясь, после 4 часов воздействия относительное изменение микротвёрдости  $H_\mu^{10}$  достигает 2,5 %, а  $H_\mu^{50}$  достигает нулевого значения (рис. 4). И по истечении 10 часов относительное изменение микротвёрдости для  $H_\mu^{10}$  достигает 5 %, для  $H_\mu^{50}$  2,5 %. По-нашему мнению, такое поведение микротвёрдости связано с тем, что вначале превалирует водородная микропластификация поверхностных слоёв металла, а затем начинает больше сказываться влияние ионного азотирования и образование сложных окисных плёнок, обладающих повышенной прочностью.

Такое сочетание полярности заряженного влажно-парового потока и поверхности лопатки будет способствовать снижению вероятности возникновения эрозионного износа как за счёт формирования более прочных сложно-окисных плёнок, так и за счёт того, что отрицательный заряд влажно-парового потока свидетельствует о малом содержании крупнодисперсной влаги, которая в основном и ответственна за возникновение ударно-капельной эрозии.

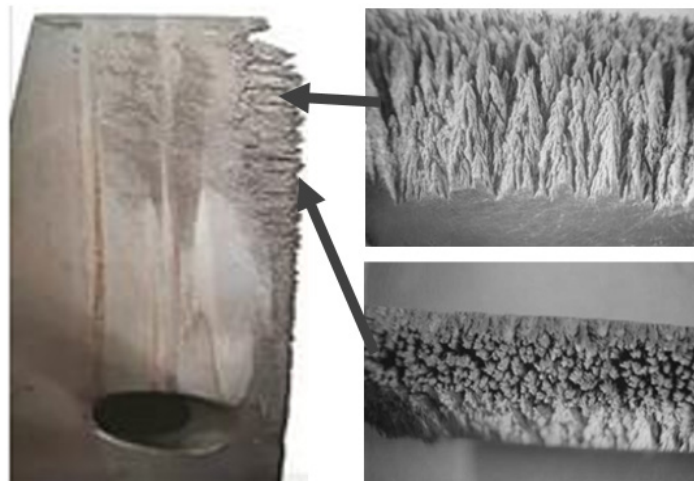


Рис. 1 – Внешний вид эродированных участков поверхности входной кромки рабочей лопатки паровой турбины из сплава ТС5 отработавшей 70000 часов на Южно-Украинской АЭС (увеличение в 40 раз)

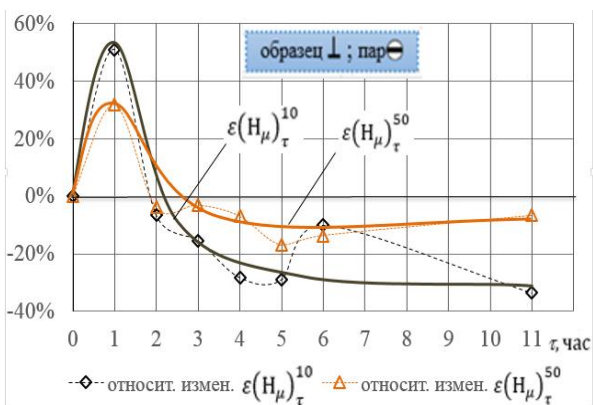


Рис. 2 – Кинетика относительного изменения микротвердости поверхности заземленного образца (№ 1) из стали 1Х11МФШ при воздействии высокоскоростным потоком отрицательно заряженного пара (режим 2В)

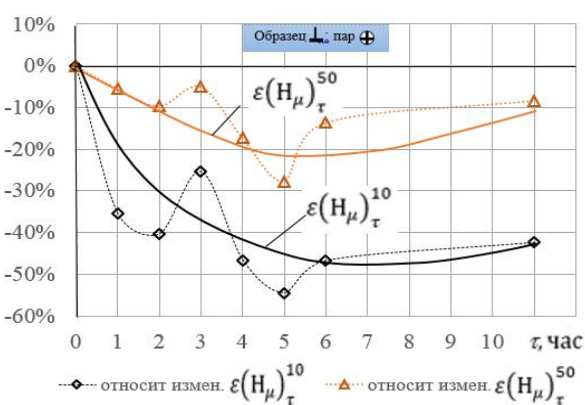


Рис. 3 – Кинетика относительного изменения микротвердости поверхности заземленного образца (№ VI) из стали 1Х11МФШ при воздействии высокоскоростным потоком положительно заряженного пара (режим 1В)

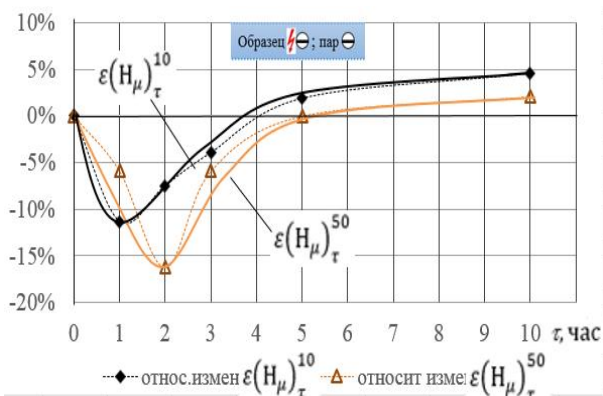


Рис. 4 – Кинетика относительного изменения микротвердости поверхности образца (№ 3) из стали 1Х11МФШ, находящегося под высоковольтным отрицательным потенциалом при воздействии высокоскоростным потоком отрицательно заряженного пара (режим 5В)

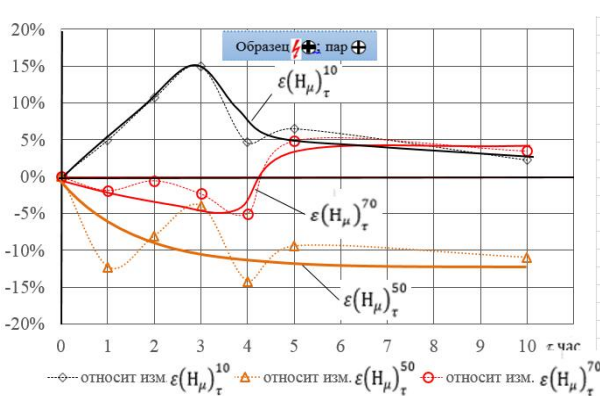


Рис. 5 – Кинетика относительного изменения микротвердости поверхности образца (№ 13) из стали 1Х11МФШ, находящегося под высоковольтным положительным потенциалом при воздействии высокоскоростным потоком положительно заряженного пара (режим 3В)

При воздействии на исследуемый образец (№ 13), находящийся под высоковольтным положительным потенциалом, высокоскоростной струей положительно заряженного влажно-парового потока (рис. 5), наблюдается довольно сложная кинетика относительного изменения микротвёрдости поверхности, определяемой при нагрузке на индентор 10, 50 и 70 грамм. По-нашему мнению это связано с тем, что в этом случае в поверхностном слое металла происходят два конкурирующих процесса: наводороживание и ионно-плазменное азотирование. При этом в тонком поверхностном слое превалирующее влияние на относительное изменение микротвёрдости  $H_{\mu}^{10}$  вначале оказывает повышение прочности за счёт ионно-плазменного азотирования, которое достигает максимального влияния 14 % через 3 часа от начала воздействия. Затем начинает сказываться локальное микропластифицирующее влияние протонного водорода, в результате чего по истечении 10 часов воздействия относительное изменение микротвёрдости  $H_{\mu}^{10}$  достигает 2 % и имеет тенденцию на уменьшение. Относительное изменение микротвёрдости  $H_{\mu}^{50}$  носит сложный полиэкстремальный, гармонический характер, но обладает общей превалирующей тенденцией повышения степени разупрочнения материала за счёт локальной микропластификации из-за наводороживания, которое по истечении 10 часов достигает -12 %. Более сложный характер относительного изменения микротвёрдости наблюдается для  $H_{\mu}^{70}$ . В этом случае, в первые 4 часа воздействия незначительное превалирующее влияние оказывает локальная микропластификация из-за наводороживания, в результате чего относительное изменение микротвёрдости находится в пределах -2 %, а затем в промежутке с 4 до 5 часов воздействия изменяется в сторону упрочнения и достигает изменения 5 % и затем имеет тенденцию уменьшения до 4 % к концу 10 часов воздействия. Такой сложный характер поведения относительного изменения микротвёрдости поверхности образца, находящегося под высоковольтным положительным потенциалом при воздействии положительно заряженного парового потока, говорит о сложных физико-химических и диффузионных процессах, протекающих в поверхностном слое металла, и оказывающих сложное конкурирующе-доминирующее влияние на прочность металла. Основным в этом случае следует считать тот момент, что в реальных условиях паровой турбины положительно заряженный паровой поток свидетельствует о наличии крупнодисперсной влаги, которая является основным «носителем» механической энергии, необходимой для осуществления микропластических деформаций и развития эрозионного разрушения лопаточного материала.

## Выводы

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы.

1 Наличие электрически заряженной влаги во влажнопаровом потоке, обдувающим металлическую поверхность, оказывает электро-физико-химическое влияние на процессы взаимодействия влаги и металла, что приводит к наводороживанию, образованию окисных плёнок, в результате чего происходит изменение микротвёрдости поверхности. При этом степень её изменения зависит от полярности электрического заряда и наличия на образце высоковольтного электрического потенциала.

2 Наибольшее уменьшение микротвёрдости наблюдается при обдуве заземлённого образца положительно заряженным влажно паровым потоком. При этом относительное уменьшение микротвёрдости, определённое при нагрузке на 10 г, может достигать -(45...50) %, а при нагрузке 50 г -(25...30) % (см. рис. 3). В плане интенсификации эрозионного разрушения металлов при ударно-капельном воздействии это наиболее опасный, чаще всего наблюдающийся на практике [2] случай. В этом случае наложение на лопатку высоковольтного положительного потенциала приводит к созданию условий для повышения микротвёрдости (см. рис. 5), что конечно же снижает эрозионную опасность разрушения лопаточного материала. Поэтому можно рекомендовать не заземлять ротор, а поддерживать положительный потенциал на определённом уровне, обеспечивая при этом электронную защиту от электрического пробоя (короткого замыкания) через подшипниковый узел.

3 Впервые установлено, что воздействие на лопаточный материал электрически заряженного влажного пара приводит к наводороживанию металла как при положительном, так и при отрицательном знаке заряда, причём, при отрицательной полярности, содержание водорода в обработанных паром образцах почти в два раза выше нежели при воздействии положительно заряженного пара, что хорошо согласуется с данными работы [17].

4 Процесс ударно-капельного эрозионного разрушения металлов в условиях электрически заряженного влажно-парового потока нельзя свести к чисто механическим представлениям. Он состоит из целого комплекса параллельно-последовательных, взаимно обуславливающих, электро-физико-химических явлений, которые протекают в тонком поверхностном слое, и оказывают решающее влияние на процесс в целом. Для изучения и идентификации указанных явлений требуется проведение специальных исследований с применением методов и подходов нано уровня.

Таким образом, при разработке математических моделей для диагностики и прогнозирования процесса ударно-капельной эрозии лопаточных материалов, а также при разработке мероприятий

по снижению или предотвращению опасности эрозионного разрушения лопаточных материалов обязательно необходимо учитывать явление электризации влажнопарового потока, при котором наблюдается возникновение электро-физико-химических явлений и процессов приводящих как и к наводороживанию с развитием водородной деградации лопаточных материалов, так и к электрохимической коррозии. Применение пассивных методов защиты от эрозии, таких как нанесение композиционных (многослойных) вакуумно-плазменных покрытий, использование различного рода высокопрочных вставок, специальных методов локального термического упрочнения кромок и пр., конечно же могут помочь решать эту проблему, однако они значительно удорожают капитальные затраты на готовые лопатки, а без чёткого понимания физики процесса эрозионных явлений могут оказаться не оптимальными. По нашему убеждению, изучение и понимание электрических процессов и явлений их порождающих во влажнопаровом потоке проточной части паровых турбин позволит вести борьбу не с последствиями, а с причинами эрозионных явлений, что окажется значительно и дешевле, и надёжнее.

#### Список литературы

- 1 **Тарелин, А. А.** 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.
- 2 **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. – ISBN 978-966-02-6237-9.
- 3 **Семенов, И. П.** Определение объёмной плотности зарядов в потоке конденсирующегося пара при различных водно-химических режимах [Текст] / **И. П. Семенов, Л. И. Троицкий, А. Л. Тарелин, В. П. Скляр, К. Р. Дули** // Пробл. машиностроения. – 2001. – Т. 3, № 3–4. – С. 12–22.
- 4 **Коновалов, С. В.** Управление пластичностью металлов слабыми электрическими воздействиями [Текст] / **С. В. Коновалов, Н. В. Котова, О. А. Столбоушкина** [и др.] // Вестник Новосибирского государственного университета (НГУ). Серия: Физика. -2009. -Том 4, выпуск 4 – С. 65–70 – ISSN 1818-7994.
- 5 **Зуев, Л. Б.** О влиянии контактной разности потенциалов и электрического потенциала на микротвёрдость металлов [Текст] / **Л. Б. Зуев, В. И. Данилов, С. В. Коновалов** [и др.] // Физика твёрдого тела. – 2009. – Т. 51, Вып. 6. – С. 1077–1080. – ISSN 0367-3294
- 6 **Коновалов, С. В.** Влияние магнитного поля на поверхность разрушения алюминия при ползучести [Текст] / **С. В. Коновалов, Д. В. Загуляев, Ю.Ф. Иванов** [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №2 (1). – С. 33–37. – ISSN 1993-1778
- 7 **Ковальский, А. Э.** Развитие теории каплеударной эрозии и создание эффективной противозерозионной защиты рабочих лопаток паровых турбин [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.16 «Турбомашин и турбоустановки» / **Ковальский Александр Эдуардович**. – Харьков, 2007. – С. 100–108.
- 8 **Шубенко, А. Л.** Каплеударная эрозия лопаточных аппаратов паровых турбин. Прогнозирование и методы защиты [Текст] / **А. Л. Шубенко, А. Э. Ковальский** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2012. – № 7. – С. 76–87. – Бібліогр. : 27 назв. – ISSN 2078-774X.
- 9 **Медников, А. Ф.** Определение длительности инкубационного периода процесса каплеударной эрозии рабочих лопаток последних ступеней проектируемых паровых турбин большой мощности [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.12 «Турбомашин и комбинированные турбоустановки» / **Медников Алексей Феликсович**. – М., 2012. – 20 с.
- 10 **Фаддеев, И. П.** Эрозия влажнопаровых турбин [Текст] / **И. П. Фаддеев**. – Ленинград : Машиностроение, 1974. – 208 с.
- 11 **Алехин, В. П.** Физика прочности и пластичности поверхностных слоёв материалов [Текст] / **В. П. Алехин**. – М. : Наука, 1983. – 280 с.
- 12 **Тищенко, В. А.** Разработка и реализация методики определения параметров жидкой фазы влажнопарового потока в элементах проточных частей турбомашин [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.12 «Турбомашин и комбинированные турбоустановки» / **Тищенко Виктор Александрович**. – М., 2014. – 213 с.
- 13 **Ружицкий, В. В.** Многоцелевая экспериментальная установка «СКИФ» [Текст] / **В. В. Ружицкий, Ю. А. Грибанов, В. Ф. Рыбалко, С. М. Хазан, А. Н. Морозов, И. С. Мартынов** // ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 1989. – Вып. 4/51. – С. 84–89.
- 14 **Гаркунов, Д. Н.** Водородное изнашивание деталей машин [Текст] : моногр. / **Д. Н. Гаркунов, Г. И. Суранов, Ю. А. Хрусталев**. – Ухта : УГТУ (расшифровать), 2003. – 199 с. – ISBN 5-88179-319-6.
- 15 **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 : Сб. науч. трудов. – Харьков : НАКУ «ХАИ», 2001. – Вып. 24(1). – С. 139–147.
- 16 **Сурду, Н. В.** Микромеханизм адсорбционного влияния сред на свойства деформируемых металлов [Текст] / **Н. В. Сурду** // Труды III Международной конференции «ВОМ-2001»: Водородная обработка материалов. – Донецк : ДГТУ, 2001. – Т. 2. – С. 374–376.
- 17 **Сміян, О. Д.** Водень в металі як бозонна рідина [Текст] / **О. Д. Сміян** // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т. 5, № 4. – С. 750–757.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Tarelin, A. A., Skljarov, V. P., Veres, O. and Surdu N. V.** (1999), "Jelektrofizicheskie javlenija v parovyh turbi-



- nah [Electrophysical phenomena in steam turbines]", *Prom. teplotehnika* [Industrial heat engineering], no. 4–5, pp. 98–102.
- 2 **Tarelin, A. A. and Skljarov, V. P.** (2011), *Jelektrofiziicheskie javlenija i neravnovesnye processy v parovyh turbinah* [Electrophysical phenomena and non-equilibrium processes in steam turbines], NAN Ukrainy, Institut problem mashinostroenija, FLP Ivanchenko I.S., Kharkov, Ukraine, ISBN 978-966-02-6237-9.
  - 3 **Semenov, I. P., Troickij, L. I., Tarelin, A. L., Skljarov, V. P. and Duli, K. R.** (2001), "Opredelenie ob'emnoj plotnosti zarjadov v potoke kondensirujushhegosja para pri razlichnyh vodno-himicheskikh rezhimah [The definition of volume charge density in the flow of condensing steam at different water-chemical regimes]", *Probl. mashinostroenija* [Institute of problems of mechanical engineering], vol. 3, no. 3–4, pp. 12–22.
  - 4 **Konovalov, S. V., Filip'ev, R. A. and Stolboushkina, O. A.** et al. (2009), Upravlenie plastichnost'ju metallov slabymi jelektricheskimi vozdeystvijami [Management plasticity of metals weak electrical influences], *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo Universiteta* [Vestnik of Novosibirsk state University (NSU). Series: Physics] vol. 4, no. 4, pp. 65–70., ISBN 1818-7994
  - 5 **Zuev, L. B., Danilov, V. I. and Konovalov, S. V.** et al. (2009), "O vlijanii kontaktnoj raznosti potencialov i jelektricheskogo potenciala na mikrotverdost' metallov [The influence of contact potential difference and electrical potential on the microhardness of metals]", *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics], vol. 51, issue 6, pp. 1077–1080, ISSN 0367-3294
  - 6 **Konovalov, S.V., Zaguljaev, D. V. and Ivanov Ju. F.** et al. (2011), "Vlijanie magnitnogo polja na poverhnost' razrushenija aljuminija pri polzuchesti [Effect of magnetic field on fracture surface of aluminum under creep], *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky], no. 2(1), pp. 33–37, ISSN1993-1778
  - 7 **Kovalsky, A. E.** (2007), "Razvitie teorii kapleudarnoj jerozii i sozdanie jeffektivnoj protivojerozionnoj zashhity rabochih lopatok parovyh turbin [The development of the theory of drop-impact erosion and the building of effective anti-erosion protection of rotor blades of steam turbines]", D. Sc. Thesis, 05.05.16 The turbo machines and turbine installations, Institute of problems of mechanical engineering, Kharkov, Ukraine.
  - 8 **Shubenko, A. L. and Kovalsky, A. E.** (2012), "Kapleudarnaja jerozija lopatochnyh apparatov parovyh turbin. Prognozirovanie i metody zashhity [Dropstroke Erosion of Blades Devices of Steam Turbines. Forecast and Methods of Safeguard]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 7, pp. 76–87, ISSN 2078-774X.
  - 9 **Mednikov, A. F.** (2012), "Opredelenie dlitel'nosti inkubacionnogo perioda processa kapleudarnoj jerozii rabo-  
chih lopatok poslednih stupenej proektiruemyh parovyh turbin bol'shoj moshnosti [The duration of the incubation period, the process dropstroke erosion of the blades of the last stages of the designed high power steam turbines]", Abstract of Ph.D. dissertation, 05.04.12 "Turbomashiny i kombinirovannye turboustanovki [Turbomachines and combined turbo-installation]", National research University "MEI", Moscow, Russia.
  - 10 **Faddeev, I. P.** (1974), *Jerozija vlazhnoparovyh turbin* [Erosion in wet steam turbines], Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
  - 11 **Alehin, V. P.** (1983), *Fizika prochnosti i plastichnosti poverhnostnyh sloev materialov* [Physics of strength and plasticity of surface layers of materials], Nauka, Moscow, Russia.
  - 12 **Tishhenko, V. A.** (2014), "Razrabotka i realizacija metodiki opredelenija parametrov zhidkoj fazy vlazhno parovogo potoka v jelementah protochnyh chastej turbomashin [Development and implementation of methods for determining the para-meters of the liquid phase of wet steam flow in elements flowing parts of turbo machines], Abstract of Ph.D. dissertation, 05.04.12 Turbomachines and combined turbo-installation, National research University "MEI", Moscow, Russia.
  - 13 **Ruzhickij, V. V., Gribanov, Ju. A., Rybalko, V. F., Hazan, S. M., Morozov, A. N. and Martynov, I. S.** (1989), "Mnogocелеvaja jeksperimental'naja ustanovka "SKIF" [Multipurpose test bench "SKIF" ], *VANT. Ser. FRP i RM* [Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of radiation damages and radiation materials science"], issue 4/51, pp. 84–89.
  - 14 **Garkunov, D. N., Suranov, G. I. and Hrustalev, Ju. A.** (2003), *Vodorodnoe iznashivanie detalej mashin: Monografija* [Hydrogen wear of machine parts], UGTU [Ukhta State Technical University], Uhta, Russia.
  - 15 **Surdu, N. V.** (2001), "Mikromehanizm vlijaniya sred na plasticheskoe deformirovanie i razrushenie metallov. Chast' 2. Model' mikromehanizma [Micro mechanisms of media influence on plastic deformation and fracture of metals. Part 2. Model micromechanism], *Voprosy proektirovanija i proizvodstva letatel'nyh apparatov* [The design and production of aircraft], issue 24(1), pp. 139–147.
  - 16 **Surdu, N. V.** (2001), "Mikromehanizm adsorbcionnogo vlijaniya sred na svojstva deformiruemyh metallov [Micro mechanisms of adsorption the influence of environments on the properties of wrought metals], *Trudy III Mezhdunarodnoj konferencii «VOM-2001»: Vodorodnaja obrabotka materialov* [Proceedings of III International conference "HPM-2001": Hydrogen processing of materials], vol. 2, pp. 374–376.
  - 17 **Smijan, O. D.** (2004), "Voden' v metali jak bozonna ridyna [Hydrogen in the metal as Bozena liquid]", *Fizyka i himija tverdogo tila* [Physics and chemistry of solids], vol. 5, no. 4, pp. 750–757.

## Сведения об авторах (About authors)

**Тарелин Анатолий Алексеевич** – доктор технических наук, член-кор НАН Украины, зав. отделом, Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного, г. Харьков, Украина; e-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua.

**Tarelin Anatolij Alexeyevich** – Doctor of Technical Sciences, member-correspondent of National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

**Сурду Николай Васильевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела общетехнических исследований в энергетике, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины; г. Харьков, Украина; e-mail: surdunick@mail.ru.



**Surdu Nikolay Vasilievich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior researcher of the Department for General research in power engineering, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

**Нечаев Андрей Викторович** – ведущий инженер отдела общетехнических исследований в энергетике, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины; г. Харьков, Украина; e-mail: a\_nechaev@inbox.ru

**Nechaev Andrey Viktorovic** – Leading engineer of Department for General research in power engineering, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Тарелин, А. А.** Влияние электризации влажнопарового потока и электрических полей на изменение механических свойств материалов рабочих лопаток турбин [Текст] / **А. А. Тарелин, Н. В. Сурду, А. В. Нецаев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 107–115. – Бібліогр. : 17 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.15.

*Please cite this article as:*

**Tarelin, A. A., Surdu, N. V. and Nechaev, A. V.** (2016), “Influence of the Electrization of Wet Steam Flow and Electric Fields on a Change in Mechanical Properties of the Materials of Turbine Rotor Blades”, *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 107–115, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.15.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Тарелін, А. О.** Вплив електризації вологопарового потоку та електричних полів на зміну механічних властивостей матеріалів робочих лопаток турбін [Текст] / **А. О. Тарелін, М. В. Сурду, А. В. Нецаєв** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 107–115. – Бібліогр. : 17 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.15.

**АНОТАЦІЯ** Наведено експериментальні дані впливу електрично зарядженого потоку вологої пари і електричних полів на механічні властивості лопаткових матеріалів, які оцінювали за допомогою виміру мікротвердості. Встановлено, що знак заряду потоку вологої пари спричиняє зміну мікротвердості і ступені насичення лопаткового матеріалу воднем. Встановлено вплив полярності електричних збуджень на кінетику зміни мікротвердості лопаткових матеріалів та розглянуто можливі механізми прояву зазначених змін.

**Ключові слова:** електризація потоку вологої пари, ударно-краплинна ерозія, інкубаційний період, мікротвердість, насичення воднем, адсорбційно-пластифікуючий ефект, воднева крихкість, мікропластифікація, знеміцнення.

*Поступила (received) 16.01.2016*