

*Раздел четвертый*  
**ФИЗИКА РАДИАЦИОННЫХ  
И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

УДК 533.9:621.793

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
ЛОПАТОЧНОЙ СТАЛИ 15X11МФ ПРИ МИКРОУДАРНОМ  
ВОЗДЕЙСТВИИ**

*В.А. Белоус<sup>1</sup>, Г.И. Ищенко<sup>2</sup>, М.Г. Ищенко<sup>2</sup>, В.И. Коваленко<sup>1</sup>,  
Л.И. Мартыненко<sup>1</sup>, В.Г. Маринин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина*

*E-mail: belous@kfti.kharkov.ua;*

<sup>2</sup>*Публичное акционерное общество «Турбоатом», Харьков, Украина*

На стендах ННЦ ХФТИ и ПАО «Турбоатом» проведены исследования по измерениям эрозии образцов из лопаточной стали 15X11МФ в условиях воздействия кавитации и капельно-ударного нагружения. Исследованы образцы в состоянии поставки, а также прошедшие ультразвуковую обработку, прокатку, закалку, закалку+ультразвуковую обработку, азотирование, закалку токами высокой частоты (ТВЧ)+покрытие. Установлено, что в зависимости от способа упрочнения поверхностного слоя скорость разрушения образцов уменьшается от 1,7 до 5 раз по отношению к скорости разрушения образцов в состоянии поставки. Показано, что сплавы TiNi, ВЗК, ВР27 обладают более высокой стойкостью, близкой к 9–10 раз, по отношению к таким же образцам в состоянии поставки.

**ВВЕДЕНИЕ**

Опубликованные в 1935 г. работы С.Р. Soderberg [1, 2] очевидно являются одними из первых, посвященных разрушению турбинных лопаток при капельно-ударном воздействии. Особенностью такого воздействия является высокая скорость нагружения, малая его продолжительность, многократность, локальность. При этом в поверхностных слоях материалов возникают напряжения, которые могут быть сравнимы с пределом его прочности и сосредоточены в объемах, сравнимых с размерами структурных составляющих. Одной из ранних публикаций, обобщающих данные по эрозии широкого круга материалов при микроударном нагружении поверхности материалов быстролетающими каплями жидкости и кавитацией, является работа J.M. Mouson [3], опубликованная в 1937 г. В ряде работ и монографий [4–10] обобщены результаты исследований, выполненных к концу 90-х годов XX столетия, в частности, содержащие данные о процессах, происходящих на поверхности материалов при эрозии, связи ее с некоторыми механическими характеристиками и линейном характере соотношения между величиной эрозии при струеударном и кавитационном воздействиях [11]. Для повышения износостойкости материалов разрабатывались различные способы их упрочнения: деформацией, термообработкой, нанесением покрытий. Вопросам по увеличению износостойкости стальных лопаток паровых турбин и изучению эрозионных процессов на них, а также разработке способов защиты от эрозии посвящено значительное число работ [12–18].

Целью исследования является определение способа увеличения эрозионной стойкости стали 15X11МФ при микроударном воздействии и возможности его применения при изготовлении

рабочих лопаток последней ступени части низкого давления паровых турбин АЭС.

**ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Стойкость образцов из стали 15X11МФ к микроударному нагружению с учетом линейного характера соотношения между величиной эрозии при струеударном, каплеударном, кавитационном воздействиях определяли на стенде ННЦ ХФТИ, в котором кавитационную зону создавали ультразвуковым излучателем [19]. Сигнал от генератора УЗ-колебаний подавали на магнитострикционный преобразователь механически соединенный с концентратором экспоненциального профиля, что обеспечивало увеличение амплитуды колебаний торцевой поверхности концентратора до  $(30 \pm 2)$  мкм при частоте 20 кГц. Под торцевой поверхностью концентратора, установленного в сосуде с водой, формируется зона с развитой кавитацией. Образец устанавливали на расстоянии 0,50 мм от поверхности концентратора. Эрозию образцов измеряли гравиметрическим методом. Точность измерения весовых потерь, обусловленных эрозией, равна  $\pm 0,015$  мг. По данным измерений величины весовых потерь в зависимости от времени воздействия кавитации строили кинетические кривые разрушения образцов. По кинетическим кривым определяли глубину и скорость разрушения с последующим вычислением стойкости по отношению к эталону ( $V = 1$  мкм/ч).

Эффективность различных стандартных методов упрочнения исследовали на дискообразных образцах из стали 15X11МФ, прошедших преимущественно механические виды обработки [20]. В частности, прокатка проводилась на

специальных вальцах при температуре 300 К. Степень деформации 5...6%. УЗ-обработку проводили при времени воздействия УЗ-волн 10 ч, амплитуде колебаний излучателя 14 мкм, температуре 310 К. Закалку выполняли в соляной ванне (50% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 50% KCl) с охлаждением в масле по схеме, описанной в работе [21], в течение 18 ч при температуре 823 К. Азотирование образцов выполнено в вакуумно-дуговой разрядной плазме азотосодержащего газа, что обеспечивает упрочнение образцов. Осаждение покрытий проводили с использованием вакуумного дугового разряда с титановым и никелевым катодами. Разрядный ток равен 110 А, отрицательный потенциал на образце изменяли от 100 до 200 В. Время осаждения покрытий – 5,4 кс. Толщина TiN-покрытия – более 10 мкм. При этом проводили измерение температуры хромель-алюмелевой термопарой, установленной внутри образца.

Микротвердость ( $H_{\mu}$ ) образцов измеряли на приборе ПМТ-3. Структуру основы и покрытий изучали на металлографических шлифах при помощи световой оптики. Образцы из стали 15X11МФ изготавливали в форме дисков диаметром 18 мм, толщиной 3 мм, а также в форме, соответствующей верхней части рабочей лопатки пятой ступени части низкого давления паровой турбины. Исследованы образцы из исходной стали в состоянии поставки. Стали 15X11МФ, 20X13 в соответствии с ГОСТ 5949, ГОСТ 5632 являются мартенситными и поставляются в термически обработанном состоянии, сталь 15X12ВНМФ – мартенситно-ферритная, рабочие температуры, соответственно: 823, 773, 853 К. Стали предназначены для изготовления деталей турбин (лопаток, клапанов, штоков и др.).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерения разрушения образцов стали 15X11МФ при воздействии кавитации в виде кинетических кривых зависимости усредненной глубины разрушения от времени воздействия кавитации представлены на рис. 1.

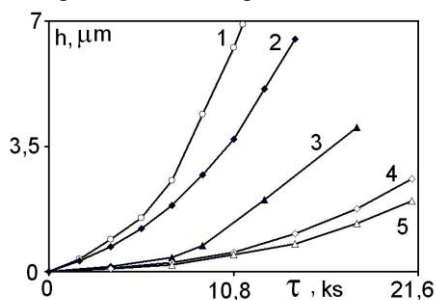


Рис. 1. Зависимости средней глубины разрушения ( $h$ ) образцов от продолжительности воздействия кавитации ( $\tau$ ): 1 – в состоянии поставки; 2 – после УЗ-обработки; 3 – после прокатки при 300 К; 4 – после закалки; 5 – после закалки и УЗ-обработки

Данные рис. 1 показывают, что во всех вариантах обработки образцов наблюдается увеличение их стойкости к воздействию кавитации

по отношению к необработанным образцам в интервале значений от 1,7 до, практически, 5 раз. Исследовано также влияние азотирования на эрозионную стойкость сталей. На рис. 2 для сравнения приведены результаты по разрушению стали 15X12ВНМФ, лопаточной стали 20X13 и никелида титана (TiNi).

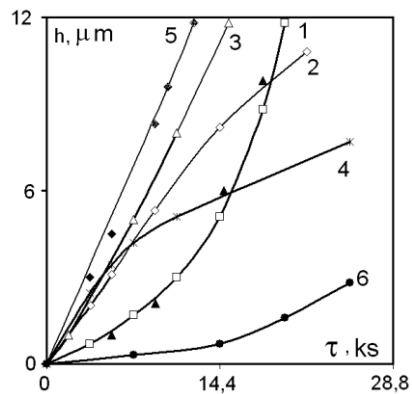


Рис. 2. Зависимости средней глубины разрушения ( $h$ ) от продолжительности кавитационного воздействия ( $\tau$ ): 1 – сталь 15X11МФ и сталь 20X13 (▲) в состоянии поставки; 2, 4 – стали 15X11МФ и 15X12ВНМФ после азотирования; 3, 5 – после снятия азотированного слоя; 6 – никелид титана

Результаты, приведенные на рис. 2, показывают, что азотирование образцов сталей 15X11МФ и 15X12ВНМФ обеспечивает увеличение их стойкости к разрушению от 3,5 до 5 раз соответственно. После снятия азотированного слоя уже в интервале немногим более 14,4 кс кавитационного воздействия скорости разрушения сталей близки к скорости разрушения образцов из стали в состоянии поставки.

Для получения данных о стойкости материалов, которые возможно применять для защиты лопаточных сталей 15X11МФ и 20X13 от разрушения потоками капель сконденсировавшейся влаги в зоне фазового перехода паровых турбин, проведены исследования на стенде СКБ «Турбоатом», описанном также в работе [19].

Результаты исследований приведены на рис. 3.

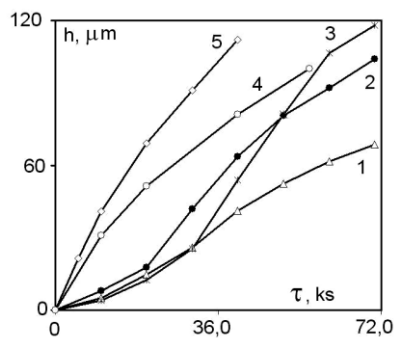


Рис. 3. Зависимости средней глубины разрушения ( $h$ ) от времени каплеударного воздействия ( $\tau$ ): 1 – поликристалл вольфрама (значения  $h$  уменьшены в 8 раз); 2 – сплав ВР27; 3 – сплав ВЗК; 4, 5 – сталь 15X11МФ, микротвердость 2,7 и 2,4 ГПа соответственно (значения  $h$  уменьшены в 10 раз)

Данные этого рисунка показывают, что по сравнению со сталью 15X11МФ в состоянии поставки вольфрам в 2,3 раза, сплавы ВЗК в 9 раз, а ВР27 в 10 раз более стойкие к каплеударному воздействию.

Из приведенных рис. 1–3 видно, что имеется ряд материалов, которые обладают значительной эрозионной стойкостью к воздействию капель воды и кавитации. Кроме того, установлено (см. рис. 1), что стойкость стали существенно возрастает после закалки, УЗ-обработки, нанесения покрытия. Однако возможность их совместного применения

для увеличения стойкости стали не изучена. С учетом этого проведено исследование влияния процесса формирования нитрид-титанового покрытия на стойкость приповерхностного закаленного с использованием ТВЧ слоя стали из реальных лопаток. На рис. 4 показано поперечное сечение фрагмента верхней части лопатки с обозначением точек, в которых производили измерения микротвердости поверхности закаленного слоя и разрушения при воздействии кавитации.

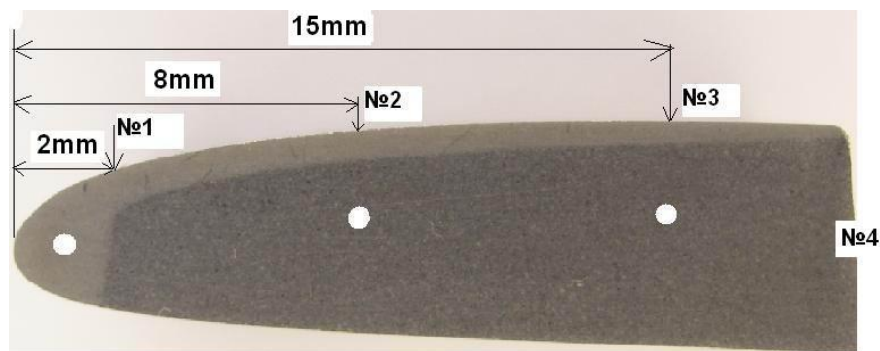


Рис. 4. Фрагмент лопатки с обозначением мест измерения микротвердости поверхностного закаленного слоя лопатки (x6)

Измерения проведены на поверхности и в средней части фрагмента лопатки (рис. 5).

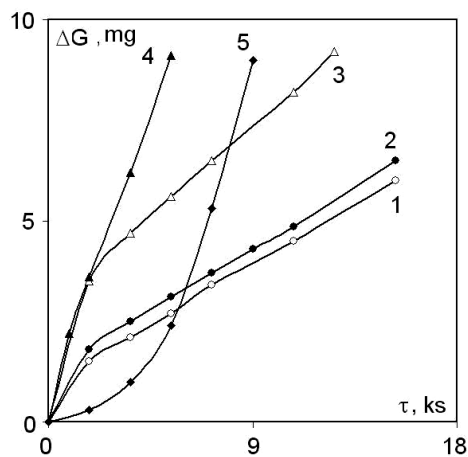


Рис. 5. Кинетические кривые разрушения поверхностных слоев образцов из стали 15X11МФ при воздействии кавитации: 1, 2 – после закалки ТВЧ соответственно в точках №1 и 2, обозначенных на рис. 4; 3 – точка №3 на расстоянии 15 мм от верхней части («носика») лопатки; 4 – на торцевой части образца, соответствующей зоне отрезка от основной части лопатки; 5 – исходная незакаленная сталь;  $\Delta G = 10 m$  ( $m$  – потеря массы за счет разрушения)

Для трех указанных на рис. 4 точек проведены измерения зависимости величины разрушения от времени воздействия кавитации. Скорости эрозии, вычисленные по кинетическим кривым разрушения образца из упрочненной части лопатки, в 1,7 раза меньше неупрочненной, а по отношению к образцам из стали в состоянии поставки в – 3 раза. Проведенные измерения показывают, что

микротвердость по мере удаления от верхней точки («носика») к низу лопатки уменьшается. Для лопатки, закаленной по оптимальному режиму, на расстоянии 8 мм от верхней точки микротвердость уменьшается на 8...10%, а в точке №3 с уменьшением толщины закаленного слоя эта величина достигает 12%. Максимальные значения микротвердости, измеренные на расстоянии около 200 мкм от верха («носика») лопатки, у различных образцов изменяются в интервале  $(5,4 \pm 0,2)$  ГПа при толщине закаленного слоя 2...3 мм.

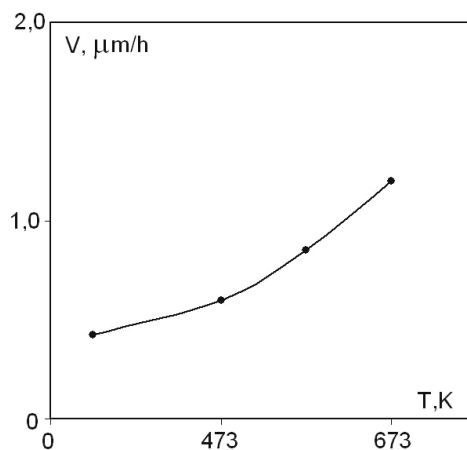


Рис. 6. Зависимость средней скорости разрушения поверхностного слоя стали 15X11МФ от температуры осаждения покрытия

Для получения данных о влиянии ионно-плазменного метода формирования покрытий на закаленный поверхностный слой стали проведено осаждение TiN- и TiNi-покрытий по вышеописанной схеме. После нанесения покрытий микротвердость, измеренная на поверхности с TiN-покрытием, равна

12,5 ГПа. После механического удаления с поверхности образца покрытия проведены измерения скорости эрозии поверхности при воздействии кавитации. Из полученных кинетических кривых определены скорости разрушения поверхностного слоя в зависимости от температуры нанесения покрытия. Результаты измерений показаны на рис. 6.

Из этого рисунка следует, что эрозионная стойкость закаленного ТВЧ слоя при увеличении температуры осаждения TiN-покрытия уменьшается. Однако при температуре 673 К она

еще в 2,4 раза выше незакаленной стали. Предварительное исследование изменения структуры при нагревании показывает, что за выбранное время термообработки происходит только частичная деградация структуры закаленного слоя (рис. 7).

На этом рисунке показаны изменения микротвердости в различных местах элемента рабочей лопатки, который закален по оптимальному технологическому режиму, с последующим его нагревом в вакууме при температуре 773 К в течение 3,6 кс.

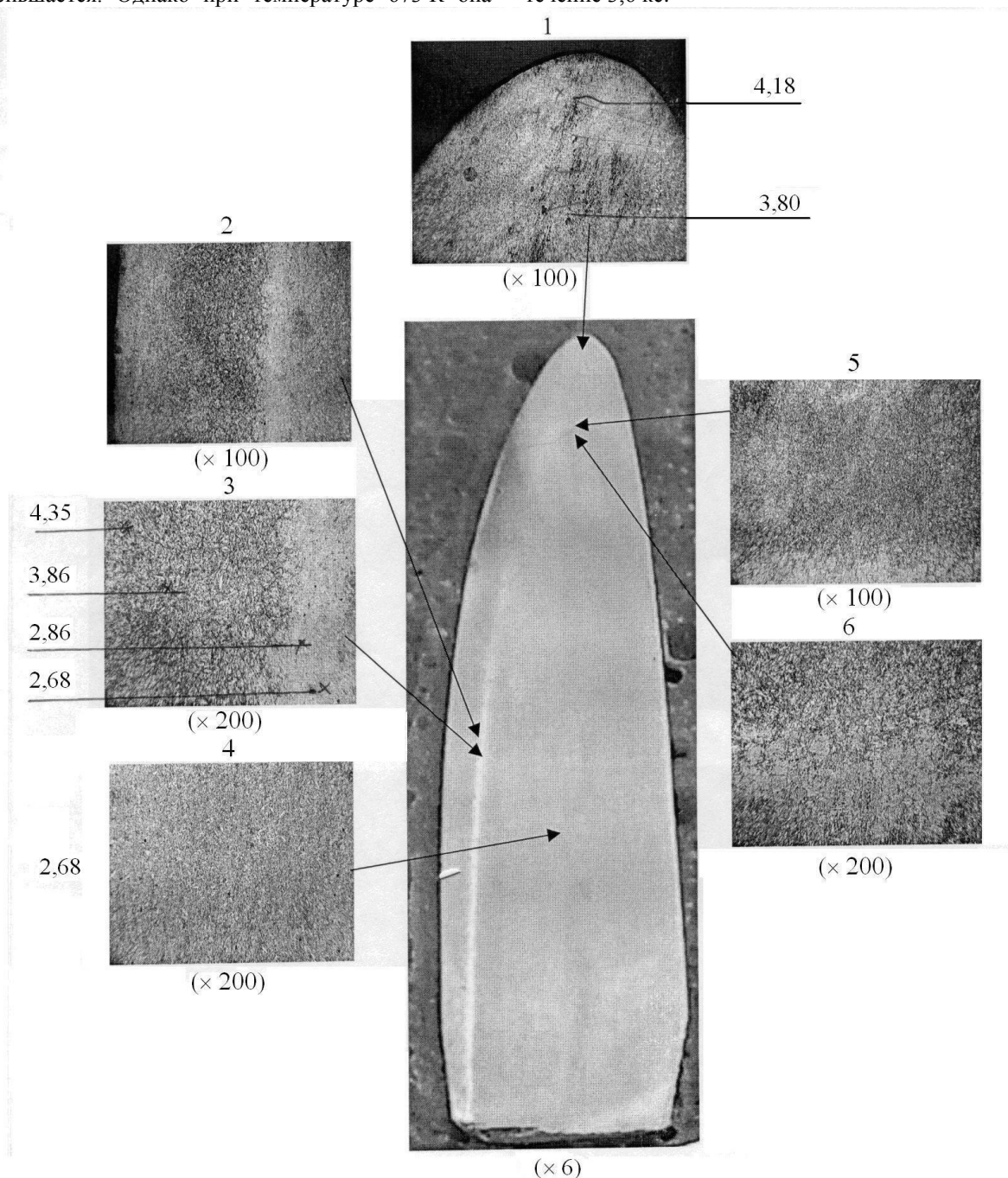


Рис. 7. Фрагмент верхней части лопатки из стали 15X11МФ после закалки ТВЧ и нагрева при температуре 773 К в течение 3,6 кс: 1 – верхняя часть лопатки («носик»); 2, 3 – общий вид переходной зоны от поверхности к сердцевине и изменение микротвердости с глубиной; 4 – незакаленная средняя часть лопатки; 5, 6 – переход от закаленной верхней части («носика») к средней незакаленной части. Величина микротвердости измерена в гигапаскалях

## ВЫВОДЫ

Исследования показали, что при создании защитного слоя на поверхности образцов из стали 15X11МФ механическим и термическим способами, нанесением ионно-плазменным или комбинированным методами покрытий микротвердость слоя повышается от 4,5 до 12 ГПа, а эрозионная стойкость при воздействии кавитации и каплеударном нагружении в зависимости от применяемого способа защиты возрастает по отношению к исходным образцам в 1,7–5 раз.

Оптимизацией параметров реализации комбинированного метода возможно увеличение эрозионной стойкости по сравнению с существующими способами защиты более чем в 2 раза, в частности, при использовании системы закалка + покрытие (нитинол) эрозионная стойкость системы возрастает по сравнению с применяемой на практике закалкой ТВЧ в 2,3 раза.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. C.R. Soderberg. Recent Developments in Steam Turbines // *Mech. End.* 1935, v. 57, p. 165-173.
2. C.R. Soderberg. Turbines Blade Erosion // *Elec. Jr.* (London), 1935, v. 32, p. 533-536.
3. J.M. Mousson. Pittinds Resistance of Metals under Cavitations Conditions // *Trans. ASME.* 1937, v. 59, p. 399-408.
4. N. Coroly. *Erosion.* London: "Prelcem", 1979, 462 p.
5. С. Спринжер. *Эрозия при воздействии капель жидкости.* М.: «Машиностроение», 1981, 200 с.
6. T.R. Knapp, J.W Daily, F.C. Hawkul. *Cavitation.* Magraw-Kill Book company, 1970, 678 p.
7. *Эрозия* / Под редакцией К. Прис. М.: «Мир», 1982, 464 с.
8. F.J. Heymann. *Toward Quantitative Prediction of Ligurd impact Erosion* // *ASTM STP.* 1970, v. 474, p. 212-244.
9. F.J. Heymann. On the Prediction of Erosion in Steam Turbines // *Proc. VI Conf. on Larde Steam Turbines.* Czechoslovakia, Plzen, 1975, с. 484-494.
10. Р.Г. Перельман, В.В. Пряхин. *Эрозия элементов паровых турбин.* М.: «Энергоатомиздат», 1986, 184 с.
11. И. Пирсол. *Кавитация.* М.: «Мир», 1975, 93 с.
12. В.Н. Амелюшкин. *Эрозия входных кромок рабочих лопаток паровых турбин.* М.: «Энергомашиностроение», 1989, с. 2-4.
13. V.G. Marinin. Effects of Surface Treatment on the Cavitation Erosion of High Cheome Steel. Zirconium, Titanium and Their Alloys // *Proceedings spccialisle mealing on Erosion and Corrosion of Nuclear Power plant materials organized by JATA.* Kiev, 19–22 sept. 1994, IWG-LMNPP-94/8. Reproduced by the IAEA, Vienna, 1994.
14. В.Ф. Резинских. Исследование перспективных защитных покрытий для лопаток последних ступеней паровых турбин // *Теплоэнергетика.* 1996, №12, с. 28-31.
15. В.Г. Маринин. Защитные покрытия для увеличения срока эксплуатации рабочих лопаток зоны разового перехода паровых турбин тепловых и атомных электростанций // *Сборник научных трудов СНУЭЭП.* 2005, с.136-142.
16. Г.М. Картмазов, Ю.В. Лукирский, Г.В. Кириков, В.Г. Маринин, Ю.И. Поляков, А.Л. Дейнека. Коррозионно-эрозионно-стойкие покрытия для рабочих лопаток паровых турбин // *Наука та інновації.* 2012, т. 8, с. 17-23.
17. А.М. Смыслов. Нанослойные покрытия для лопаток турбомашин из титановых сплавов // *Вестник УГАТУ. Серия Машиностроение.* 2014, т. 15, №1(41), с. 109-112.
18. В.Н. Варавка, О.В. Кудряков, А.В. Рыженков, Г.В. Качалин, О.С. Зилова. Применение нанокompозитных покрытий для защиты энергетического оборудования от каплеударной эрозии // *Теплоэнергетика.* 2014, №11, с. 29-35.
19. В.И. Коваленко, В.Г. Маринин. Оборудование для исследования эрозии покрытий при микроударном действии // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ.* 1998, в. 5, с. 83-85.
20. И.А. Гиндин, И.М. Неклюдов. *Новые методы повышения прочности конструкционной стали и сплавов.* М.: «Металлургиздат», 1966, с. 17-19.
21. *Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник* / Под ред. Л.С. Ляховича. М.: «Металлургия», 1981, 424 с.

Статья поступила в редакцию 13.03.2018 г.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЛОПАТКОВОЇ СТАЛІ 15X11МФ ПРИ МІКРОУДАРНІЙ ДІЇ

**В.А. Білоус, Г.І. Іщенко, М.Г. Іщенко, В.І. Коваленко, Л.І. Мартиненко, В.Г. Маринін**

На стендах ННЦ ХФТІ і ПАТ «Турбоатом» проведено дослідження за вимірюваннями ерозії зразків з лопаткової сталі 15X11МФ в умовах впливу кавітації і крапельно-ударного навантаження. Досліджено зразки в стані поставки і ті, що пройшли ультразвукову обробку, прокатку, гартування, гартування+ультразвукову обробку, азотування, загартування струмами високої частоти (СВЧ)+покриття. Встановлено, що в залежності від способу зміцнення поверхневого шару швидкість руйнування зразків зменшується від 1,7 до 5 разів по відношенню до швидкості руйнування зразків у стані поставки. Показано, що сплави TiNi, ВЗК, ВР27 мають більш високу стійкість, близьку 9–10 разів, по відношенню до таких же зразків у стані поставки.

## **RESEARCH OF EROSION OF SUPERFICIAL LAYER OF SHOULDER-BLADE STEEL OF 15Kh11MF AT MICROIMPACT INFLUENCE**

*V.A. Belous, G.I. Ischenko, M.G. Ischenko, V.I. Kovalenko, L.I. Martynenko, V.G. Marynin*

On the stands of NSC KhIPT and Public joint-stock company “Turboatom” is conducted research on measuring of erosion of specimens from shoulder-blade steel of 15Kh11MF in the conditions of influence of cavitation and microimpact influence. Specimens are investigational in a state of delivery, and also passing ultrasonic treatment, rolling, tempering, tempering+ultrasonic treatment, nitriding, tempering by the currents of high-frequency+coverage. It is set that depending on the method of work-hardening of superficial layer speed of destruction of specimens diminishes from 1.7 to 5 times in relation to speed of destruction of specimens in a state of delivery. It is shown that alloys of TiNi, W3K, WR27 possess by higher firmness near to 9–10 times, in relation to the same specimens in a state of delivery.