УДК 621.165

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

# ВЛИЯНИЕ КАТОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПАРОКАПЕЛЬНОМ ПОТОКЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕЕ МИКРОТВЕРДОСТИ

Проведено экспериментальное исследование влияния полярности электрического заряда парокапельного потока на изменение микротвердости поверхностного слоя стального образца, обдуваемого потоком. Обнаружено, что при катодной поляризации поверхности исследуемых образцов металла парокапельным потоком микротвердость поверхности снижается более чем на 50 % в диапазоне нагрузки на пирамидку индентора от 10 до 50 грамм. В случае обдува воздухом катодная поляризация приводит к незначительному увеличению микротвердости.

Ключевые слова: микротвердость, наводороживание, катодная поляризация, турбинные лопатки.

### Введение

Раннее, в работах [1, 2] авторами было выдвинуто предположение о безусловном влиянии электрофизических явлений проточной части ЦНД, на развитие процесса эрозионного разрушения рабочих лопаток. Причем, возникновение катодной поляризации поверхности рабочих лопаток, сопровождающейся наводороживанием лопаточного материала, является определяющим фактором с позиции интенсификации процесса эрозии. Это обусловлено тем, что наводороживание лопаточного материала оказывает большое влияние на изменение его механических свойств, которое может проявляться в значительном уменьшении инкубационного периода развития эрозионных явлений. В этой связи возникает актуальная задача выяснения степени влияния полярности электрических процессов, возникающих на поверхности обдуваемого влажнопаровым потоком металла, на характер изменения его прочностных свойств.

### Основная часть

Накопившиеся у нас экспериментальные факты и модельные представления о физических условиях и явлениях, протекающих на поверхностях сопловых лопаток в ЦНД, позволяют выдвинуть рабочую гипотезу о том, что образующиеся в проточной части положительно заряженные капли влаги, взаимодействуя с поверхностью рабочих лопаток, приводят преимущественно к ее катодной поляризации, способствуя тем самым ее наводороживанию. Ион водорода (протон), обладая определенными физикохимическими и геометрическими свойствами, «захватывается» ядром дислокации и, нейтрализуя электростатические силы отталкивания между механически поляризованными атомами ядра дислокации, способствует уменьшению размеров и энергоемкости ядер дислокаций [3-5], повышая их подвижность. Это должно способствовать заметному снижению микротвердости наводороженного металла.

Для проверки этой гипотезы нами была изготовлена экспериментальная установка (см. рис. 1), позволяющая отчасти имитировать электрофизические явления, возникающие на поверхности рабочих лопаток при воздействии электрически заряженного влажнопарового потока.

В качестве генератора влажного пара использовали лабораторный котел емкостью © А.А. Тарелин, Н.В. Сурду, А.В. Нечаев, 2013



Рис. 1 – Схема экспериментальной установки

8 л, из которого по подогреваемому паропроводу пар попадал в направляющую стеклянную трубку и, проходя через мелкоячеистую нержавеющую сетку, на которую подавали напряжение порядка 13 кВ, заряженный влажнопаровой поток обдувал поверхность исследуемого образца. В качестве модели фрагмента поверхности рабочей лопатки был образец В виде параллелепипеда с размерами 56×18×17 мм. Одна из поверхностей

исследуемого образца полировалась до зеркальной чистоты и ориентировалась параллельно сетке на расстоянии порядка 15 мм.

## Методика экспериментальных исследований.

Исследования проводились на образце, изготовленном из стали 20Х13. Поверхность образца шлифовалась, а затем полировалась в соответствии с требованиями для определения микротвердости. На подготовленном образце выбиралась область поверхности для исследований, и при помощи прибора ПМТ-3 проводились измерения исходной микротвердости при трех различных нагрузках на индентор – 10, 30 и 50 грамм. После определения исходных значений микротвердости заземленный образец подвергался воздействию парокапельной струи, приходящей на поверхность образца через сетчатый электрод под положительным потенциалом 13,4 кВ. Пар направлялся на выбранную для исследований область поверхности. Расход пара составлял не более 1 кг в час. Скорость пара порядка 300 мм/с. Температура перед выходом в атмосферу в диапазоне (100-102) °С. В цепи заземления образца был включен стрелочный микроамперметр на 100 микроампер. В процессе обработки образца стрелка микроамперметра вздрагивала, но амплитуда колебаний была менее 1 мкА. Время обработки составляло 1,5 часа. После обработки поверхность образца подвергали повторным испытаниям на микротвердомере. Для измерения микротвердости область отметок оставленных при предварительных находили измерениях и повторные проводили в их непосредственной близости.

При испытании на микротвердость численным значением результата измерения является частное от деления нагрузки P (в кг) на боковую поверхность F отпечатка (в мм<sup>2</sup>) в предположении, что углы у отпечатка такие же, как у самой пирамиды

$$H_{\mu} = \frac{P}{F} = \frac{2P\sin\frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1,854P}{d^2},$$
 (1)

где  $\alpha$  – угол при вершине алмазной пирамиды (136° или 2,47 радиан). Если *P* выразить в граммах, а *d* – в микронах, то формула для вычисления принимает вид, кг/мм<sup>2</sup>

$$H_{\mu} = \frac{1854P}{d^2} \,. \tag{2}$$

При вычислении глубины *h* отпечатка для пластичных материалов, у которых нет упругого становления, можно воспользоваться формулой

$$h = \frac{d}{2\sqrt{2} \cdot \operatorname{tg}(0,5\alpha)},\tag{3}$$

которая для  $\alpha = 136^{\circ}$  принимает вид  $h \approx d/7$ .

При нагрузке на индентор равной P = 10 грамм замеры производились по 20 точкам. Для нагрузок 30 и 50 грамм замеры производились по 12. Из полученных замеров отбрасывались наибольшее и наименьшее значение, для остальных производились расчеты и статистическая обработка. Значение микротвердости в каждой точке рассчитывалось по формуле (2), а глубина внедрения – по формуле (3). Среднее значение  $\langle H_{\mu} \rangle$  микротвердости определялось по формуле

$$\left\langle H_{\mu}\right\rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(H_{\mu}\right)_{i}, \qquad (4)$$

где  $(H_{\mu})_{i}$  – результат *i*-го измерения микротвердости; *n* – количество измерений.

Среднеквадратичная погрешность измерений оценивалась по формуле

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[ \left\langle H_\mu \right\rangle - \left( H_\mu \right)_i \right]^2}{n(n-1)}} .$$
(5)

Степень относительного изменения микротвердости поверхности, обработанной парокапельным или воздушным потоком, рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon \left( H_{\mu} \right) = \frac{\left( H_{\mu} \right)_{i} - \left( H_{\mu} \right)_{i}^{*}}{\left( H_{\mu} \right)_{i}} \cdot 100 \% , \qquad (6)$$

где  $(H_{\mu})_i$  – значение микротвердости в *i*-ой точке необработанной поверхности;  $(H_{\mu})_i^*$  – значение микротвердости в *i*-ой точке обработанной поверхности.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений микротвердости поверхности исследуемого образца в исходном состоянии и после ее катодной поляризации в парокапельном потоке представлены в таблицах 1–3. На рис. 2–4 представлены гистограммы размеров отпечатков индентора при различных нагрузках обработанных и необработанных поверхностей.

Таблица 1

Значение  $H_{\mu}$  обработанной и необработанной паром поверхности при P = 10 грамм

|          | Исхо                                     | одное сост   | гояние поверхн                                      | юсти                                    | После к  | атодной п                                  | оляризации пове   | ерхности                                |                     |
|----------|--|--|---|---|--|--|---|---|---------------------|
| №<br>п/п | Диагональ<br>отпечатка<br><i>d</i> , мкм | ( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i>,<br/>кг/мм<sup>2</sup></sub> | $\left[\langle H_{\mu} angle - (H_{\mu})_i ight]^2$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> <sup>*</sup> , мкм | $(H_{\mu})_{i}^{*},$<br>kg/mm <sup>2</sup> | $[\langle H_{\mu}^{*} \rangle - (H_{\mu}^{*})_{i}]^{2}$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм | $\epsilon(H_{\mu})$ |
| 1        | 8,68                                     | 246,08   | 3681,65   | 1,24                                    | 11,780   | 133,60                                     | 1867,44   | 1,68                                    | 45,71               |
| 2        | 8,99                                     | 229,40   | 1935,86   | 1,28                                    | 12,400   | 120,58                                     | 911,29  | 1,77                                    | 47,44               |
| 3        | 9,30                                     | 214,36   | 838,68  | 1,33                                    | 12,555   | 117,62                                     | 741,40  | 1,79                                    | 45,13               |
| 4        | 9,30                                     | 214,36   | 838,68  | 1,33                                    | 13,020   | 109,37                                     | 360,14  | 1,86                                    | 48,98               |
| 5        | 9,61                                     | 200,75   | 235,73  | 1,37                                    | 13,020   | 109,37                                     | 360,14  | 1,86                                    | 45,52               |
| 6        | 9,61                                     | 200,75   | 235,73  | 1,37                                    | 13,330   | 104,34                                     | 194,59  | 1,90                                    | 48,03               |
| 7        | 9,61                                     | 200,75   | 235,73  | 1,37                                    | 13,485   | 101,95                                     | 133,75  | 1,93                                    | 49,21               |
| 8        | 9,92                                     | 188,40   | 9,01  | 1,42                                    | 13,795   | 97,42                                      | 49,48   | 1,97                                    | 48,29               |
| 9        | 10,23                                    | 177,16   | 67,95   | 1,46                                    | 13,950   | 95,27                                      | 23,83   | 1,99                                    | 46,22               |
| 10       | 10,23                                    | 177,16   | 67,95   | 1,46                                    | 14,570   | 87,34                                      | 9,33  | 2,08                                    | 50,70               |
| 11       | 10,23                                    | 177,16   | 67,95   | 1,46                                    | 14,880   | 83,73                                      | 44,30   | 2,12                                    | 52,73               |

| Окон  | Окончание таблицы 1 |              |         |   |        |              |         |                |       |  |  |
|---|---------------------|--------------|---------|---|--------|--------------|---------|----------------|-------|--|--|
| 12  | 10,23               | 177,16       | 67,95   | 1,46                                    | 15,035 | 82,02        | 70,11   | 2,15           | 53,70 |  |  |
| 13  | 10,23               | 177,16       | 67,95   | 1,46                                    | 15,655 | 75,65        | 217,30  | 2,24           | 57,30 |  |  |
| 14  | 10,54               | 166,89       | 342,65  | 1,51                                    | 15,810 | 74,17        | 262,99  | 2,26           | 55,56 |  |  |
| 15  | 10,85               | 157,49       | 779,02  | 1,55                                    | 16,895 | 64,95        | 647,09  | 2,41           | 58,76 |  |  |
| 16  | 10,85               | 157,49       | 779,02  | 1,55                                    | 17,515 | 60,44        | 897,29  | 2,50           | 61,63 |  |  |
| 17  | 11,47               | 140,92       | 1978,17 | 1,64                                    | 17,980 | 57,35        | 1091,67 | 2,57           | 59,30 |  |  |
| 18  | 11,77               | 133,83       | 2659,36 | 1,68                                    | 18,910 | 51,85        | 1485,53 | 2,70           | 61,26 |  |  |
| $\langle H_{\mu} \rangle = \langle 185, 40 \rangle$ |                     | $S_n = 6,98$ | (1,44)  | $\langle H_{\mu}^{*} \rangle = \langle$ | 90,39> | $S_n = 5,53$ | (1,97)  | <b>(56,99)</b> |       |  |  |

Таблица 2

Значение  $H_{\mu}$  обработанной и необработанной паром поверхности при P = 30 грамм

|   | Исхо                                      | одное сос  | тояние поверхн                                      | юсти                                    | После к  | атодной п  | оляризации пове   | ерхности                                |                    |
|---|---|--|---|---|--|--|---|---|--------------------|
| №<br>п/п  | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> , мкм | ( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i>,<br/>кг/мм<sup>2</sup></sub> | $\left[\langle H_{\mu} angle - (H_{\mu})_i ight]^2$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> <sup>*</sup> , мкм | $(H_{\mu})_{i}^{*},$<br>$_{\mathrm{KF}/\mathrm{MM}^{2}}$ | $[\langle H_{\mu}^{*} \rangle - (H_{\mu}^{*})_{i}]^{2}$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм | ε(Η <sub>μ</sub> ) |
| 1   | 14,26                                     | 273,52   | 1168,39   | 2,04                                    | 21,855   | 116,45   | 109,15  | 3,12                                    | 57,43              |
| 2   | 14,26                                     | 273,52   | 1168,39   | 2,04                                    | 20,305   | 134,90   | 835,44  | 2,90                                    | 50,68              |
| 3   | 14,88                                     | 251,20   | 140,73  | 2,12                                    | 20,925   | 127,03   | 442,18  | 2,99                                    | 49,43              |
| 4   | 15,19                                     | 241,05   | 2,94  | 2,17                                    | 22,785   | 107,14   | 1,29  | 3,25                                    | 55,56              |
| 5   | 15,50                                     | 231,51   | 61,33   | 2,21                                    | 22,32  | 111,65   | 31,88   | 3,19                                    | 51,77              |
| 6   | 15,50                                     | 231,51   | 61,33   | 2,21                                    | 25,11  | 88,21  | 316,34  | 3,59                                    | 61,90              |
| 7   | 15,50                                     | 231,51   | 61,33   | 2,21                                    | 24,645   | 91,57  | 208,10  | 3,52                                    | 60,44              |
| 8   | 15,50                                     | 231,51   | 61,33   | 2,21                                    | 25,73  | 84,01  | 483,39  | 3,67                                    | 63,71              |
| 9   | 16,12                                     | 214,04   | 639,94  | 2,30                                    | 24,8   | 90,43  | 242,33  | 3,54                                    | 57,75              |
| 10  | 16,12                                     | 214,04   | 639,94  | 2,30                                    | 22,63  | 108,61   | 6,80  | 3,23                                    | 49,26              |
| $\langle H_{\mu} \rangle = \langle 239, 34 \rangle$ |   | $S_n = 6,67$   | <b>(2,18)</b>                                       | $\langle H_{\mu}^{*} \rangle = \langle$ | 106,0>   | $S_n = 5,45$   | (3,30)  | <b>(56,27)</b>                          |                    |

Таблица 3

Значение  $H_{\mu}$  обработанной и необработанной паром поверхности при P = 50 грамм

|   | Исхо                                      | одное сос   | тояние поверхн                             | ности                                     | После н  | атодной п                                  | оляризации пове   | рхности                                 |                    |
|---|---|---|--|---|--|--|---|---|--------------------|
| №<br>п/п  | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> , мкм | ( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i></sub> ,<br>кг/мм <sup>2</sup> | $[\langle H_{\mu}  angle - (H_{\mu})_i]^2$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм   | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> <sup>*</sup> , мкм | $(H_{\mu})_{i}^{*},$<br>kg/mm <sup>2</sup> | $[\langle H_{\mu}^{*} \rangle - (H_{\mu}^{*})_{i}]^{2}$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм | ε(Η <sub>μ</sub> ) |
| 1   | 21,70                                     | 196,86  | 2053,79                                    | 3,10                                      | 27,280   | 124,56                                     | 52,76   | 3,90                                    | 36,73              |
| 2   | 18,91                                     | 259,24  | 290,93                                     | 2,70                                      | 27,125   | 125,99                                     | 75,54   | 3,87                                    | 51,40              |
| 3   | 19,22                                     | 250,94  | 76,77                                      | 2,74                                      | 28,055   | 117,78                                     | 0,23  | 4,01                                    | 53,07              |
| 4   | 20,46                                     | 221,45  | 429,89                                     | 2,92                                      | 27,745   | 120,42                                     | 9,75  | 3,96                                    | 45,62              |
| 5   | 18,91                                     | 259,24  | 290,93                                     | 2,70                                      | 29,295   | 108,02                                     | 86,17   | 4,18                                    | 58,33              |
| 6   | 20,15                                     | 228,31  | 192,31                                     | 2,88                                      | 27,900   | 119,09                                     | 3,20  | 3,98                                    | 47,84              |
| 7   | 18,91                                     | 259,24  | 290,93                                     | 2,70                                      | 27,435   | 123,16                                     | 34,34   | 3,92                                    | 52,49              |
| 8   | 19,84                                     | 235,50  | 44,58                                      | 2,83                                      | 29,605   | 105,77                                     | 133,01  | 4,23                                    | 55,09              |
| 9   | 19,53                                     | 243,04  | 0,74                                       | 2,79                                      | 27,900   | 119,09                                     | 3,20  | 3,98                                    | 51,00              |
| 10  | 18,60                                     | 267,95  | 664,10                                     | 2,66                                      | 29,140   | 109,17                                     | 66,11   | 4,16                                    | 59,26              |
| $\langle H_{\mu} \rangle = \langle 242, 18 \rangle$ |   | $S_n = 7,99$  | <b>(2,18)</b>                              | $\langle H_{\mu}^{*} \rangle = \langle 1$ | 17,30>   | $S_n = 2,27$                               | $\langle 4,02\rangle$                                   | (51,56)                                 |                    |

ISSN 2078-774Х. Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 14(988)



Рис. 2 – Гистограмма размеров отпечатков индентора на контрольном и обработанном паром образце при нагрузке 10 грамм: 1 – контрольный образец; 2 – образец, обработанный парокапельным потоком



1 – контрольный образец; 2 – образец, обработанный парокапельным потоком



Рис. 4 – Гистограмма размеров отпечатков индентора на контрольном и обработанном паром образце при нагрузке 50 грамм: *I* – контрольный образец; *2* – образец, обработанный парокапельным потоком

Таблица 4

| Вид измерения            |    | Значения |         |         |          |       |  |  |  |
|--------------------------|----|----------|---------|---------|----------|-------|--|--|--|
|                          |    | Кол.     | Специее | MHHHMMM | Marcumum | Стд.  |  |  |  |
|                          | 1. | измер.   | Среднее |         | максимум | ОТКЛ. |  |  |  |
| Поверхность исходная     | 10 | 20       | 10,06   | 7,75    | 11,78    | 1,018 |  |  |  |
| Поверхность обработанная | 10 | 20       | 15,34   | 11,01   | 31,16    | 4,284 |  |  |  |
| Поверхность исходная     | 20 | 10       | 15,28   | 14,26   | 16,12    | 0,654 |  |  |  |
| Поверхность обработанная | 30 | 10       | 23,11   | 20,31   | 25,73    | 1,864 |  |  |  |
| Поверхность исходная     | 50 | 10       | 19,20   | 17,36   | 21,7     | 1,163 |  |  |  |
| Поверхность обработанная | 50 | 10       | 28,15   | 27,13   | 29,61    | 0,883 |  |  |  |

Описательная статистика для пара

В соответствии с рабочей гипотезой, основное влияние на механические свойства металлов должно оказывать наводороживание, которое сопутствует катодной поляризации поверхности образца в парокапельном потоке. Что и подтверждается полученными результатами. Однако, при анализе полученных результатов было выдвинуто предположение о том, что причиной уменьшения микротвердости поверхности, подвергаемой катодной поляризации, могут быть не только протоны, а и другие положительно заряженные ионы, возникающие, например, при ионизации воздуха. Поэтому было принято решение проверить характер влияния катодной поляризации поверхности образца с помощью воздушного потока. Для этого выходная часть паровой трубки была подключена к миниатюрному компрессору, дающему струю воздуха с близкими скоростными свойствами к струе использованного ранее генератора пара. Экспозиция в струе воздуха также была 1,5 часа. Результаты измерений представлены в таблицах 4-6, а на рис. 5-7 представлены гистограммы отпечатков индентора на контрольной и обработанной заряженным воздухом поверхностях.

Таблица 5

|  | Исх                                       | одное сос  | тояние поверхи                                      | ности                                   | После к                                   | атодной г                                  | юляризации пове   | ерхности                                 |                     |
|--|---|--|---|---|---|--|---|--|---------------------|
| №<br>п/п   | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> , мкм | ( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i>,<br/>кг/мм<sup>2</sup></sub> | $\left[\langle H_{\mu} angle - (H_{\mu})_i ight]^2$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> , мкм | $(H_{\mu})_{i}^{*},$<br>kg/mm <sup>2</sup> | $[\langle H_{\mu}^{*} \rangle - (H_{\mu}^{*})_{i}]^{2}$ | Глубина,<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм | $\epsilon(H_{\mu})$ |
| 1  | 15,50                                     | 77,17  | 36,60   | 2,21                                    | 13,18                                     | 106,73                                     | 1267,94   | 1,88                                     | -38,30              |
| 2  | 14,88                                     | 83,73  | 159,12  | 2,12                                    | 16,12                                     | 71,35                                      | 0,05  | 2,30                                     | 14,79               |
| 3  | 15,65                                     | 75,70  | 20,95   | 2,23                                    | 14,57                                     | 87,34                                      | 262,94  | 2,08                                     | -15,37              |
| 4  | 15,96                                     | 72,79  | 2,77  | 2,28                                    | 13,49                                     | 101,88                                     | 946,13  | 1,93                                     | -39,97              |
| 5  | 16,58                                     | 67,44  | 13,52   | 2,37                                    | 17,05                                     | 63,78                                      | 53,93   | 2,43                                     | 5,44                |
| 6  | 19,22                                     | 50,19  | 438,13  | 2,74                                    | 16,9                                      | 64,91                                      | 38,52   | 2,41                                     | -29,34              |
| 7  | 18,14                                     | 56,34  | 218,38  | 2,59                                    | 17,98                                     | 57,35                                      | 189,62  | 2,57                                     | -1,79               |
| 8  | 15,81                                     | 74,17  | 9,32  | 2,26                                    | 15,35                                     | 78,69                                      | 57,23   | 2,19                                     | -6,08               |
| 9  | 14,88                                     | 83,73  | 159,12  | 2,12                                    | 14,11                                     | 93,12                                      | 484,12  | 2,01                                     | -11,21              |
| 10   | 16,28                                     | 69,95  | 1,36  | 2,32                                    | 15,04                                     | 81,96                                      | 117,56  | 2,15                                     | -17,17              |
| $\langle H_{\mu} \rangle = \langle 71, 12 \rangle$ |   | $S_n = 3,43$   | <b>(2,33)</b>                                       | $\langle H_{\mu}^{*} \rangle = \langle$ | 80,71>                                    | $S_n = 6,16$                               | <b>(2,20)</b>   | <b>⟨-13,48⟩</b>                          |                     |

Значение  $H_{\mu}$  обработанной и необработанной воздухом поверхности при P = 10 грамм

Таблица 6

Значение  $H_{\mu}$  обработанной и необработанной воздухом поверхности при P = 30 грамм

|  | Исхо                              | одное сос  | тояние поверхн                                      | юсти   | После н  | сатодной   | поляризации пов   | ерхности                                |                    |
|--|-----------------------------------|--|---|--|--|--|---|---|--------------------|
| №<br>п/п   | Диагональ<br>отпечатка,<br>d, мкм | ( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i>,<br/>кг/мм<sup>2</sup></sub> | $\left[\langle H_{\mu} angle - (H_{\mu})_i ight]^2$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм            | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> <sup>*</sup> , мкм | ( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i></sub> <sup>*</sup> ,<br>кг/мм <sup>2</sup> | $[\langle H_{\mu}^{*} \rangle - (H_{\mu}^{*})_{i}]^{2}$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм | ε(Η <sub>μ</sub> ) |
| 1  | 24,03                             | 96,32  | 0,002   | 3,43   | 21,08  | 125,17   | 58,26   | 3,01                                    | -29,95             |
| 2  | 22,17                             | 113,16   | 281,962   | 3,17   | 23,25  | 102,89   | 894,44  | 3,32                                    | 9,07               |
| 3  | 24,03                             | 96,32  | 0,002   | 3,43   | 22,01  | 114,81   | 323,53  | 3,14                                    | -19,20             |
| 4  | 22,79                             | 107,09   | 114,884   | 3,25   | 22,94  | 105,69   | 734,82  | 3,28                                    | 1,30               |
| 5  | 26,04                             | 82,03  | 205,764   | 3,72   | 22,63  | 108,61   | 585,25  | 3,23                                    | -32,41             |
| 6  | 24,96                             | 89,28  | 50,304  | 3,56   | 13,95  | 285,81   | 23413,10  | 1,99                                    | -220,14            |
| 7  | 22,79                             | 107,09   | 114,884   | 3,25   | 20,77  | 128,93   | 14,97   | 2,97                                    | -20,40             |
| 8  | 24,80                             | 90,43  | 35,246  | 3,54   | 20,31  | 134,84   | 4,15  | 2,90                                    | -49,10             |
| 9  | 24,80                             | 90,43  | 35,246  | 3,54   | 21,55  | 119,77   | 169,86  | 3,08                                    | -32,44             |
| 10   | 24,65                             | 91,54  | 23,357  | 3,52   | 23,41  | 101,49   | 980,24  | 3,34                                    | -10,87             |
| $\langle H_{\mu} \rangle = \langle 96, 37 \rangle$ |                                   | $S_n = 3,094$  | <b>(3,44)</b>                                       | $\langle \overline{H_{\mu}}^* \rangle = \langle 1$ | 32,80>   | $S_n = 17,38$  | <b>(3,03)</b>   | <-37,81>                                |                    |

Таблица 7

|  | Исхо                                      | дное сос   | тояние поверх   | ности                                     | После ка   | атодной п                                  | оляризации пов  | ерхности                               |                     |
|--|---|--|---|---|--|--|---|--|---------------------|
| №<br>п/п   | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> , мкм | ( <i>H</i> <sub>µ</sub> ) <sub><i>i</i>,<br/>кг/мм<sup>2</sup></sub> | $\left[\langle H_{\mu}\rangle - (H_{\mu})_i\right]^2$ | Глубина<br>внедрения,<br><i>h</i> , мкм   | Диагональ<br>отпечатка,<br><i>d</i> <sup>*</sup> , мкм | $(H_{\mu})_{i}^{*},$<br>kg/mm <sup>2</sup> | $[\langle H_{\mu}^{*} \rangle - (H_{\mu}^{*})_{i}]^{2}$ | Глубина<br>внедрения<br><i>h</i> , мкм | $\epsilon(H_{\mu})$ |
| 1  | 29,92                                     | 62,13  | 39,427  | 4,27                                      | 26,35  | 80,11                                      | 7,146   | 3,76                                   | -28,93              |
| 2  | 31,78                                     | 55,07  | 177,928   | 4,54                                      | 25,58  | 85,00                                      | 4,938   | 3,65                                   | -54,35              |
| 3  | 29,14                                     | 65,50  | 8,459   | 4,16                                      | 26,04  | 82,03                                      | 0,569   | 3,72                                   | -25,23              |
| 4  | 29,30                                     | 64,79  | 13,118  | 4,18                                      | 25,58  | 85,00                                      | 4,938   | 3,65                                   | -31,20              |
| 5  | 29,45                                     | 64,13  | 18,319  | 4,21                                      | 25,11  | 88,21                                      | 29,528  | 3,59                                   | -37,56              |
| 6  | 26,82                                     | 77,32  | 79,457  | 3,83                                      | 25,73  | 84,01                                      | 1,523   | 3,67                                   | -8,65               |
| 7  | 27,59                                     | 73,07  | 21,698  | 3,94                                      | 26,35  | 80,11                                      | 7,146   | 3,76                                   | -9,63               |
| 8  | 26,66                                     | 78,25  | 96,919  | 3,81                                      | 26,66  | 78,25                                      | 20,478  | 3,81                                   | 0,00                |
| 9  | 26,20                                     | 81,03  | 159,182   | 3,74                                      | 26,35  | 80,11                                      | 7,146   | 3,76                                   | 1,14                |
| 10   | 29,76                                     | 62,80  | 31,463  | 4,25                                      | 25,58  | 85,00                                      | 4,938   | 3,65                                   | -35,35              |
| $\langle H_{\mu} \rangle = \langle 68, 41 \rangle$ |   | $S_n = 4,09$   | <b>(3,44)</b>   | $\langle H_{\mu}^{*} \rangle = \langle 1$ | 32,80>   | $S_n = 17,38$                              | <b>(3,03)</b>   | < <b>-37,81</b> >                      |                     |

Значение  $H_{\mu}$  обработанной и необработанной воздухом поверхности при P = 50 грамм



Рис. 5 – Гистограмма размеров отпечатков индентора на контрольном и обработанном воздухом образце при нагрузке 10 грамм: *I* – контрольный образец; *2* – образец, обработанный воздушным потоком









|                          | D  | Значения |         |         |          |        |  |  |  |
|--------------------------|----|----------|---------|---------|----------|--------|--|--|--|
| Вид измерения            |    | Кол.     | Специее | MITHIMM | Marcum   | Стд.   |  |  |  |
|                          | 1. | измер.   | Среднее | минимум | максимум | ОТКЛ.  |  |  |  |
| Поверхность исходная     | 10 | 10       | 16,29   | 14,88   | 19,22    | 1,3920 |  |  |  |
| Поверхность обработанная | 10 | 10       | 15,38   | 13,18   | 17,98    | 1,6057 |  |  |  |
| Поверхность исходная     | 20 | 10       | 24,11   | 22,17   | 26,04    | 1,1996 |  |  |  |
| Поверхность обработанная | 30 | 10       | 21,19   | 13,95   | 23,41    | 2,7586 |  |  |  |
| Поверхность исходная     | 50 | 10       | 28,66   | 26,20   | 31,78    | 1,7757 |  |  |  |
| Поверхность обработанная | 30 | 10       | 25,93   | 25,11   | 26,66    | 0,4892 |  |  |  |

Описательные статистики

Из анализа приведенных результатов видно, что характер изменения значения микротвердости поверхности исследуемого образца, подверженного катодной поляризации в воздухе и в парокапельном потоке отличается, причем принципиально. Если катодная поляризация в парокапельном потоке приводит к *уменьшению* микротвердости поверхности, определяемой на всех трех исследованных нагрузках, более чем на 50 %, то катодная поляризация в воздухе приводит к *увеличению* микротведости в зависимости от нагрузки на пирамиду от 13 % при P = 10 г до 37 % при P = 30-50 г. При этом если в первом случае обработка приводит к *уменьшению* в 1,2–3,5 раза среднеквадратической погрешности  $S_n$  измерения, то во втором случае наоборот, обработка приводит к *увеличению* среднеквадратической погрешности  $S_n$  в 2–5 раз. По видимости это может быть связано с тем, что воздействие положительно заряженных ионов при катодной поляризации металлической поверхности в виде моноатомных пленок (например, азотистых, окисных или других), способствующих гетерогенному повышению микротвердости металла.

# Выводы

1 Воздействие положительно заряженных капель влаги на поверхность металлов сопровождается изменением их прочностных свойств, которое проявляется в уменьшении микротвердости поверхности на 50 %. При этом разброс значений микротвердости значительно уменьшается, что свидетельствует о проявлении адсорбционно-пластифицирующего эффекта, вызванного наводороживанием [4, 5].

2 Воздействие положительно заряженных ионов воздуха на поверхность металлов сопровождается изменением их прочностных свойств, которое проявляется в локальном увеличении микротвердости поверхности на (13–37) %, при этом разброс прочностных свойств значительно увеличивается.

3 Вопрос изучения механизма влияния полярности электрофизических явлений, возникающих на поверхности металлов, на механические свойства металлов требует своего дальнейшего разрешения, поскольку полученные результаты позволят уточнить методы защиты от эрозионно-коррозионного разрушения металлических материалов в условиях, прежде всего электрофизических явлений проточной части ЦНД паровых турбин.

Список литературы: 1. *Тарелин, А.А.* Влияние электрофизических явлений в проточной части паровых турбин на физико-механические свойства элементов [Текст] / А.А. Тарелин, Н.В. Сурду // Проблемы машиностроения. – 1999. – № 3-4. – С. 100-108. 2. *Тарелин, А.А.* Электрофизические аспекты каплеударного разрушения элементов проточной части паровых турбин [Текст] / А.А. Тарелин,

Таблица 8

Н.В. Сурду, А.В. Нечаев // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 7. – С. 88-96. – ISSN 2078-774Х. **3.** *Сурду, Н.В.* Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 1. О наличии полости вдоль оси дислокации [Текст] / Н.В. Сурду // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов: Сб. науч. трудов. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2000. – Вып. 23(6). – С.116-123. **4.** *Сурду, Н.В.* Микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 2. Модель микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 2. Модель микромеханизм влияния сред на пластическое деформирование и разрушение металлов. Часть 2. Модель 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. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2001. – Вып. 24(1). – С. 139-147. **5.** *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.

#### УДК 621.165

#### Поступила в редколлегию 13.01.13

Влияние катодной поляризации стальной поверхности в парокапельном потоке на изменение ее микротвердости [Текст] / А.А. Тарелин, Н.В. Сурду, А.В. Нечаев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 14(988). – С. 24-34. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774Х.

Експериментально досліджено вплив полярності електричне зарядженого парокрапельного потоку на зміну мікротвердості поверхневого шару сталевого зразка, що обдувається. Встановлено, що за катодної поляризації поверхні досліджених зразків металу парокрапельним потоком мікротвердість поверхні знижується більше ніж на 50% в діапазоні навантажень на пірамідку від 10 до 50 грам. У разі обдування поверхні повітрям катодна поляризація навпаки приводить до незначного підвищення мікротвердості.

Ключові слова: мікротвердість, наводнення, катодна поляризація, турбінні лопатки.

The experimental research of effect of polarity electric charge of wet steam on change of microhardness blanket of the steel was spent. It is revealed that in case cathodic polarisation of a surface steel by wet steam, microhardness of a surface decreases more than on 50 % over the range loadings on the indenter from 10 to 50 gramme. Air cathodic polarisation leads to microhardness increase.

Keywords: microhardness, hydrogenation, cathodic polarisation, turbine blade.