

УДК 621.165

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛОПАТОЧНОЙ СТАЛИ

А. В. Нечаев

nechaev.an98@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6586-4713

Институт проблем
машиностроения
им. А. Н. Подгорного
НАН Украины,
61046, Украина, г. Харьков,
ул. Пожарского, 2/10

Известно, что во влажно-паровых турбинах поток влажного пара электризуется, проходя через проточную часть турбины. При этом происходит взаимная электризация потока капельной влаги и поверхностей проточной части. До настоящего времени специалистам в области эксплуатации паровых турбин проблема электрических явлений в проточной части была в большей степени известна в аспекте электроэрозионных явлений, связанных с накоплением электрического заряда на роторе. Явления, связанные с накоплением электрического заряда в потоке рабочего тела, были менее известны. Однако, как было показано в исследованиях ИПМаш НАН Украины, электризация потока влажного пара приводит к образованию объемного заряда в проточной части, который может иметь значительную величину (до 10^{-3} Кл/м³) и оказывать существенное влияние на рабочие процессы в турбине и конденсаторе. Объемный заряд в потоке пара в проточной части порождает и электрические поля, имеющие постоянную и переменную составляющие. В результате детали и узлы проточной части могут находиться под действием электрического поля. В частности, в электрическом поле объемного заряда рабочего тела могут быть рабочие лопатки турбины. Как известно, воздействие электрического поля может снижать прочность поверхностного слоя металла. Поэтому экспериментальное исследование влияния электрических полей, подобных возникающим в проточной части турбины, на прочностные свойства лопаточной стали является актуальной задачей. В статье представлены результаты экспериментального определения микротвердости поверхностного слоя лопаточной стали 15X11МФ при воздействии постоянного и переменного электрического поля. Показано, что влияние постоянного и переменного электрического поля существенно уменьшает микротвердость поверхностного слоя лопаточной стали. Поскольку прочность поверхностного слоя рабочих лопаток является одной из важнейших характеристик их эрозионной устойчивости, воздействие электрического поля объемного заряда парового потока может быть одним из негативных факторов, снижающих эрозионную стойкость поверхности лопаток турбины. На основании полученных результатов можно сделать вывод о необходимости дальнейшего совершенствования системы нейтрализации накопления электрических зарядов в проточной части, которая в настоящее время в основном выполняет функцию заземления ротора турбины.

Ключевые слова: микротвердость, электрическое поле, лопаточная сталь.

Введение

Течение влажного пара в проточной части влажно-паровых турбин сопровождается взаимной электризацией потока капельной влаги и поверхностей проточной части [1–3]. В результате в потоке влажного пара образуется объемный электрический заряд одного знака, а в материале проточной части накапливается противоположный по знаку заряд. Соответственно, в проточной части появляется электрическое поле, под воздействием которого находятся детали проточной части, причем в наибольшей степени ему подвергаются поверхности, имеющие высокую степень кривизны [4]. Электрическое поле в проточной части может быть и переменным, что обусловлено ускоренным движением заряженных частиц, изменениями во времени заряженности парового потока. Кроме того, ускоренное движение заряженных частиц и электрические разряды в заряженном потоке могут быть причиной электромагнитных излучений [5–6]. Известно, что воздействие электрического поля на поверхность металла способно изменять прочностные свойства поверхностного слоя [7–11]. Экспериментальные исследования, проведенные на монокристаллах цинка, алюминия, циркония, меди, железа, показали, что наличие небольшого, до 5 В электрического потенциала на образце, способно изменить поверхностную микротвердость на 10% и более.

© А. В. Нечаев, 2019

Во влажно-паровой турбине при электризации парового потока детали и узлы проточной части могут находиться под действием электрических потенциалов величиной порядка нескольких вольт. В частности, такие потенциалы могут иметь поверхности рабочих лопаток ротора турбины в зависимости от интенсивности электризации парового потока, качества работы системы заземления ротора, электрического сопротивления цепи поверхность лопатки – «земля». В этой связи актуальной является задача экспериментальной проверки влияния электрических полей, подобных тем, которые возникают в проточной части турбины, на прочностные свойства лопаточной стали.

Постановка задачи

Для выбора величины напряженности поля на поверхности образца лопаточной стали была дана приближенная оценка напряженности поля в цилиндре низкого давления турбины между рабочими и направляющими лопатками. Как было показано в экспериментальных исследованиях [1], диапазон изменения объемной плотности заряда в потоке пара в проточной части турбины составляет от $\sim 10^{-10}$ Кл/м³ в зоне фазового перехода до $\sim 10^{-3}$ Кл/м³ в выхлопе турбины, а напряженность поля за последней ступенью – до $2 \cdot 10^5$ В/м. Для оценочного расчета была выбрана величина $\sim 10^{-6}$ Кл/м³, близкая к среднему значению диапазона изменения

объемного заряда. Распределение плотности заряда в потоке преимущественно связано с распределением крупнодисперсной влаги в проточной части. В качестве примера (см. рис. 1) может служить диаграмма плотности объемного заряда [4].

Оценочный расчет распределения объемного заряда проводился на основании условной диаграммы распределения капельной влаги в межлопаточном пространстве одной ступени. Для моделирования использовалась программа ELCUT (бесплатная версия). Программа позволяет моделировать физические поля методом конечных элементов.

Оценочный расчет напряженности поля был выполнен для двухмерной электрической модели межлопаточного пространства в зоне влажного пара в виде заряженной области, ограниченной заземленными поверхностями. Межлопаточное пространство выбрано со средним расстоянием между лопатками 170 мм и высотой лопаток 960 мм (см. рис.2).

Как видно из рисунка, в модели максимальная напряженность поля на поверхности лопатки составляет порядка 7000 В/м.

Экспериментальный стенд

Для проведения эксперимента по исследованию влияния электрического поля на механические свойства поверхности лопаточной стали была собрана испытательная установка на базе прибора ПМТ-3. Схема подключения электрического потенциала к образцу подобна схемам, приведенным в [9–10].

Конструкция установки: на диэлектрическое основание была закреплена пластина фольгированного стеклотекстолита, фольгой диэлектрику. На пластину стеклотекстолита сверху был закреплен исследуемый образец. К фольге и образцу припаяны проводники для подачи разности потенциалов. Источником разности потенциалов был стабилизированный лабораторный источник питания.

Схема системы индентирования в электрическом поле с образцом приведена на рис. 3.

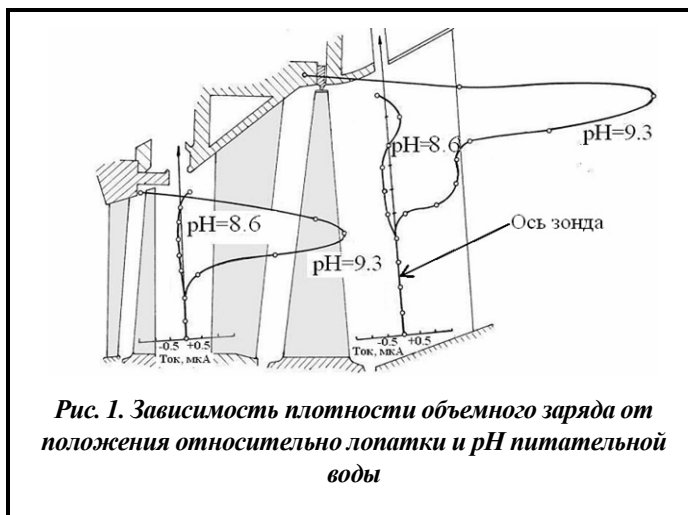


Рис. 1. Зависимость плотности объемного заряда от положения относительно лопатки и pH питательной воды

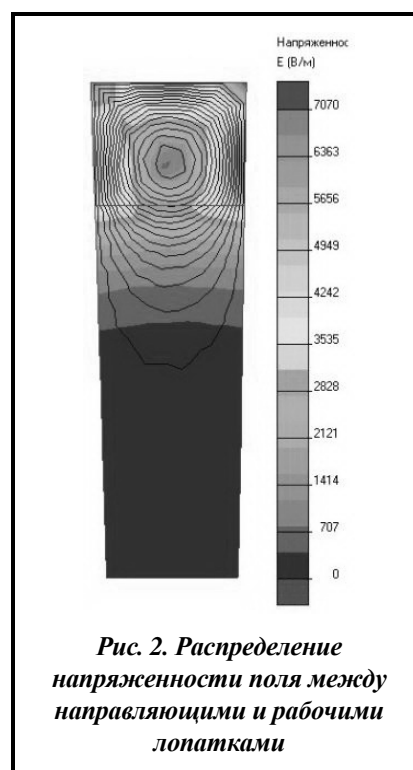


Рис. 2. Распределение напряженности поля между направляющими и рабочими лопатками

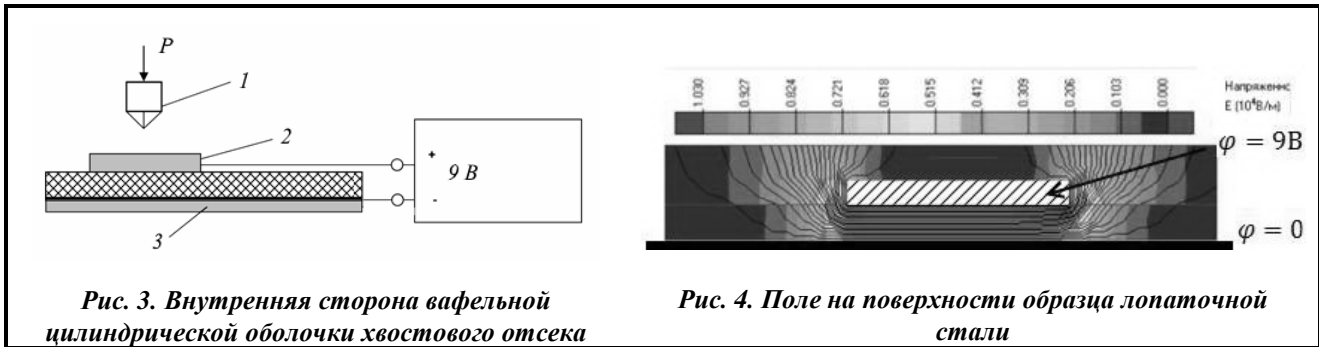


Рис. 3. Внутренняя сторона вафельной цилиндрической оболочки хвостового отсека

Рис. 4. Поле на поверхности образца лопаточной стали

На рисунке давление P прикладывается к индентору 1, который внедряется в поверхность образца 2, закрепленного на диэлектрическом основании 3.

При потенциале образца 9 В распределение напряженности поля между образцом и отрицательным электродом показано на рис. 4.

Численное значение напряженности на поверхности порядка 8000 В/м, что сравнимо с полученной выше величиной оценки напряженности в проточной части.

Методика эксперимента

Для проведения эксперимента использовались образцы стали 15Х11МФ размером 10×5×1 мм. Электрическое поле на поверхности образца создавалось при помощи вспомогательного электрода. Вспомогательный электрод представлял собой пластину из одностороннего фольгированного стеклотекстолита 85×20 мм, толщиной 1,5 мм, на нефольгированную сторону которой крепился исследуемый образец с помощью пластилина. Полоса фольгированного стеклотекстолита стороной с фольгой приклеивалась к винипластовой пластине – основанию 110×25 мм толщиной 2 мм. Подготовленная система из вспомогательного электрода с образцом устанавливалась на прибор ПМТ-3.

При воздействии постоянным полем на образец подавали положительный потенциал, а на вспомогательный электрод – отрицательный, при разности потенциалов 9 В. При воздействии переменным полем использовалась разность потенциалов 6 В.

Индентирование проводилось при непосредственном воздействии электрического поля, однако электрическое поле было приложено с противоположной индентированию стороне. Данный вариант приложения потенциала отличается от использованного в [9] и [10], поскольку исследуемый образец в этих экспериментах помещался сверху на один из электродов и электрическое поле не было сосредоточено между ним и другим электродом.

Результаты измерения микротвердости до воздействия электрического поля и в поле представлены в таблице.

Средние значения микротвердости 10 измерений при воздействии постоянным полем для нагрузки 10 г: исходное значение 158 кг/мм²; при воздействии полем 141 кг/мм². Для нагрузки 20 г: исходное значение 172 кг/мм²; при воздействии полем 151 кг/мм².

Относительное изменение микротвердости определялось для средних значений по формуле

$$\delta = \frac{H_{\mu}^f - H_{\mu}}{H_{\mu}} \cdot 100\%,$$

Результаты микроиндентирования поверхностного слоя стали при воздействии постоянным и переменным электрическим полем

Постоянное поле 9 В		Переменное поле 6 В 1000 Гц			
До воздействия	В поле	До воздействия	В поле		
Нагрузка на индентор, г					
10 г	20 г	10 г	20 г	10 г	10 г
Микротвердость H_{μ} , кг/мм ²					
163	181	163	148	153	122
144	156	139	159	142	105
153	156	147	144	131	95
153	176	170	150	134	108
142	181	144	146	142	97
198	173	131	163	139	112
150	159	124	166	156	134
163	184	129	131	134	124
153	176	118	147	156	110
160	179	139	153	150	110

где H_{μ}^f – величина микротвердости в поле; H_{μ} – микротвердость до воздействия. При воздействии постоянного поля при нагрузке 10 г $\delta = -11\%$; при нагрузке 20 г $\delta = -12\%$.

Средние значения микротвердости 10 измерений при воздействии переменным полем для нагрузки 10 г: исходное значение 144 кг/мм²; при воздействии полем 112 кг/мм². Соответственно, относительное изменение микротвердости $\delta = -22\%$.

Наблюдаемые изменения микротвердости значительно больше погрешности измерения микротвердомера (по паспорту прибора 5%).

Выводы

Постоянное и переменное электрическое поле существенно влияет на микротвердость поверхностного слоя лопаточной стали. Индентирование можно рассматривать как одну из разновидностей механических испытаний. Это связано с тем, что при увеличении нагрузки на индентор материал, как и при любом другом виде механических испытаний, последовательно претерпевает 3 стадии: упругую, упруго-пластическую и разрушение. Вследствие этого значение микротвердости можно рассматривать как интегральную характеристику прочности локального элемента поверхностного слоя материала. Таким образом, уменьшение микротвердости при воздействии электрического поля на поверхность образца стали означает ухудшение прочностных свойств поверхностного слоя стали.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что возникновение в проточной части турбины электрического поля при электризации рабочего тела способно неблагоприятно влиять на поверхностную прочность лопаток турбин. При этом может снижаться эрозионная стойкость поверхности лопаток. Поскольку электрическое поле объемного заряда связано с электризацией капельной влаги, перспективные методы эрозионной защиты должны быть направлены не только на уменьшение количества эрозионно-опасной капельной влаги, но и на снижение степени ее электризации во влажно-паровой турбине.

Литература

1. Тарелин А. А., Скляр В. П., Верес О., Сурду Н. В. Электрофизические явления в паровых турбинах. *Пром. теплотехника*. 1999. № 4–5. С. 98–102.
2. Тарелин А. А., Скляр В. П., Крыженко В. П. Особенности измерения объемной плотности зарядов во влажном паровом потоке турбины. *Проблемы машиностроения*. 2000. Т. 3. № 1. С. 11–16.
3. Electrostatic Charge Measurements in the Turbine - Condenser Connection of Salt River Project's Navajo Generating Station Unit 3, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1998. EPRI WO3849-01.
4. Тарелин А. А., Скляр В. П. Паровые турбины: электрофизические явления и неравновесные процессы. СПб: Энерготех, 2012. 292 с.
5. Тарелин А. А., Нечаев А. В., Хиневич А. Е. Электромагнитные излучения в выхлопной части паровой турбины. *Пробл. машиностроения*. 2017. Т. 20. № 2. С. 18–21.
6. Зима И. И., Нечаев А. В., Богданов Г. Ф. Роторная спектроскопия потоков больших энергий. *Вестн. Харьк. политехн. ун-та*. 1999. № 75. С. 93–97.
7. Орлова Д. В., Филиппев Р. А., Данилов В. И. О возможных причинах влияния электрического потенциала на сопротивление металлов микроиндентированию. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2012. № 10. С. 66–67.
8. Орлова Д. В., Данилов В. И., Зуев Л. Б., Колесник А. С., Дульбеева О. Н. О влиянии электростатического поля на микротвердость монокристаллов цинка. *Обработка металлов*. 2012. № 4 (57). С. 98–102.
9. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Орлова Д. В. Характер изменения микротвердости плоскости (0001) монокристаллов Zn под действием электростатического поля и возможная причина этого эффекта. *Физика твердого тела*. 2013. Т. 55. № 2. С. 313–317.
10. Зуев Л. Б., Данилов В. И., Коновалов С. В. и др. О влиянии контактной разности потенциалов и электрического потенциала на микротвердость металлов. *Физика твердого тела*. 2009. Т. 51. Вып. 6. С. 1077–1080.
11. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. М: Машиностроение, 1979. 191 с.

Поступила в редакцию 29.11.2018