

Влияние периодического удаления поверхностного слоя металла на ресурс образцов низколегированных сталей в условиях коррозионного растрескивания под напряжением

*Д. М. Суворов, В. А. Лихачев

*Вятский государственный университет,
г. Киров, 610000, Россия, *e-mail: dmilar@mail.ru*

Приведены результаты исследований влияния периодического удаления (путем шлифования) тонкого поверхностного слоя металла низколегированных сталей, используемых для изготовления насадных дисков роторов среднего и низкого давления паровых турбин, на ресурс стандартных образцов таких сталей в условиях коррозионного растрескивания под напряжением (КРН). Определено, что оптимальная величина удаления слоя металла составляет 0,1 мм, а оптимальная периодичность – от 50 до 65% от времени инкубационного периода развития повреждений данного вида. Доказано, что удаление слоя металла, накапливающего микроповреждения в условиях КРН, практически полностью восстанавливает ресурс дисковых сталей при данном виде повреждений. Установлено, что характер и механизм КРН образцов в условиях проведенных испытаний и КРН натуральных дисков аналогичны. Выяснено также, что как однократное, так и многократное удаление поверхностного слоя металла путем периодического шлифования практически полностью восстанавливает исходный ресурс образцов дисковых сталей, определяемый их длительной коррозионной стойкостью в условиях КРН. Это говорит о целесообразности применения периодического удаления поверхностного слоя металла локальных коррозионно-повреждаемых зон дисков паровых турбин, реально эксплуатирующихся на электростанциях.

Ключевые слова: коррозионное растрескивание под напряжением, низколегированные стали, насадной диск ротора, паровая турбина, ресурс образцов, поверхностный слой металла, периодическое удаление, зона фазового перехода.

УДК 621.165.73:620.19

DOI: 10.5281/zenodo.1228855

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия актуальной проблемой мировой энергетики остается коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) насадных дисков ступеней паровых турбин, работающих в области фазового перехода рабочего тела от сухого к влажному водяному пару, то есть в зоне начала образования жидкой фазы, где последняя обогащена коррозионно-активными примесями вследствие постоянного их концентрирования за счет испарения [1–8]. Исследования показывают, что в зоне фазового перехода конденсат имеет щелочное рН [1, 2, 7]; следовательно, на дисках наблюдается щелочное коррозионное растрескивание под напряжением.

Кардинальное решение проблемы КРН дисков, то есть гарантированное исключение повреждений в этой зоне, может быть достигнуто либо при переходе на новую технологию изготовления роторов ЦСД и ЦНД (сварные роторы), обеспечивающую значительное снижение растягивающих напряжений, либо при переходе на качественно иной тип или уровень водно-химического режима, который обеспечивал бы

для всех режимов работы практически полное отсутствие агрессивных примесей в паре [2, 5, 9–11]. И то и другое требуют колоссальных затрат, а для уже работающего оборудования практически не может быть реализовано, за исключением применения ингибиторов коррозии [9, 12, 13] и некоторых видов поверхностной обработки [14].

В данной работе представлены результаты исследования влияния периодического удаления поверхностного слоя металла, накапливающего микро- и макроповреждения в условиях КРН, на коррозионное растрескивание образцов дисковых сталей. Эти результаты представлены также в монографии одного из авторов [15].

КРН на поверхности металлов возникает всегда, когда в целом металл пассивен, но за счет растягивающих напряжений и активных компонентов коррозионной среды возникают условия для разрыва пассивной пленки и локальной коррозии металла в месте разрыва. КРН включает в себя два этапа [16]. Первый этап – зарождения на поверхности металла микродефектов, микротрещин, который часто называют этапом иницирования магистральной трещины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сами микротрещины возникают под влиянием локализации коррозионного процесса и растягивающих напряжений в зоне контакта «поверхность–среда» [17, 18]. Этот период наиболее длительный и составляет около 80% времени до разрыва металла. Второй этап – рост магистральной трещины – занимает примерно 20% времени до разрыва, так как трещина растет достаточно быстро за счет возникающего в ней щелевого эффекта и постоянного нарушения целостности пассивной пленки на металле на острие трещины из-за дополнительной деформации металла в условиях меняющейся нагрузки в сечении трещины [19].

Трещины при КРН дисков имеют межкристаллитный характер [1, 20], так как пассивная пленка нарушается прежде всего в местах, где она менее плотная, то есть на границах зерен.

Поскольку зарождение микротрещин наиболее длительный процесс при КРН, то закономерно предположить, что периодическое удаление поврежденного поверхностного слоя продлит время иницирования магистральной трещины и, следовательно, ресурс жизни диска.

Интересно отметить, что способ частичного удаления повреждаемого поверхностного слоя в локальной зоне предложен и опробован при восстановлении живучести (продлении ресурса) ответственных деталей, работающих при переменных нагрузках. На таких деталях в зоне максимальных нестационарных нагрузок возникают трещины малоциклового усталости, которые инициируются на поверхности металла при одновременном действии коррозионной среды (пар, воздух). Поэтому периодическое удаление усталостных трещин в наиболее нагруженных зонах (локальная повреждаемая зона [21]) продлевает ресурс работы деталей. Способ распространен на широкий класс деталей (различные локальные зоны роторов, корпусов, шпилек), работающих в условиях усталости и ползучести металла [21–23].

Таким образом, применимость способа периодического удаления слоя металла, накопившего микроповреждения, для увеличения ресурса детали при КРН в общем виде достаточно очевидна, так как поверхностный характер трещин и длительное время их зарождения установлены достоверно [1, 2, 5, 7, 16–18]. Для практической реализации этого способа в условиях КРН следует решить по крайней мере следующие задачи: определить степень восстановления исходного ресурса при периодическом удалении слоя металла детали путем шлифования; обосновать величину удаляемого слоя; определить оптимальную периодичность удаления слоя.

Для проведения испытаний образцов дисковой стали на КРН применялись две коррозионные камеры. Каждая из них рассчитана на нагружение одного гладкого стандартного цилиндрического образца стали, изображенного на рис. 1.

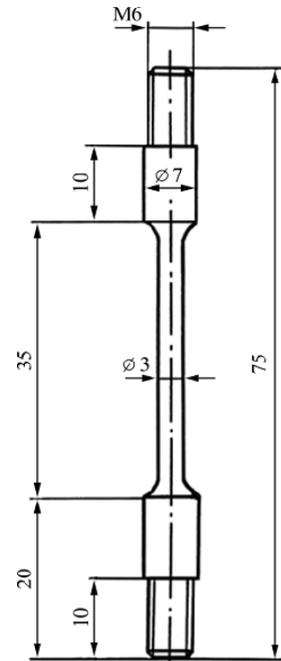


Рис. 1. Образец для коррозионных испытаний по ГОСТ 1497-73.

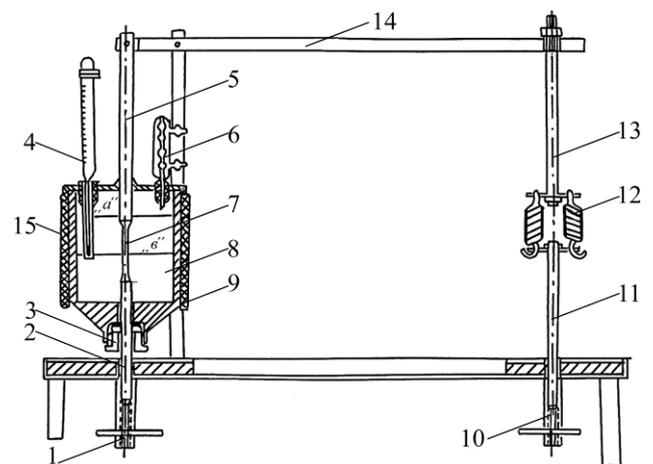


Рис. 2. Установка для коррозионных испытаний: 1 – натяжная гайка; 2 – нижний захват; 3 – гайка; 4 – контактный термометр; 5 – верхний захват; 6 – холодильник; 7 – образец; 8 – ячейка; 9 – прокладка; 10 – натяжная гайка; 11 – нижний регулировочный болт; 12 – пружины; 13 – верхний регулировочный болт; 14 – рычаг; 15 – нагреватель и внешняя тепловая изоляция.

Коррозионная камера (рис. 2) цилиндрической формы изготовлена из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н9Т. Температура в камере поддерживалась на заданном уровне автоматически. Для поддержания стабильности состава раствора, так как испытания проводились при температуре, близкой к температуре

его кипения, на крышке камеры был размещен обратный холодильник, охлаждаемый проточной водой. С целью обеспечения герметичности датчик температуры (контактный термометр) и трубка холодильника вставлялись во фторопластовые пробки, размещенные в отверстиях крышки. Таким образом, конструкция камеры предусматривала возможность поддержания стабильных состава раствора и температуры в процессе испытаний.

Устройство для создания расчетных растягивающих напряжений (см. рис. 2) состоит из рычага и натяжного болта, обеспечивающего связь пружин с рычагом. Растягивание обеих пружин осуществляется с помощью регулируемого болта и гайки.

Пружины градуировались с использованием динамометра класса 1,0 на максимальную нагрузку 1000 Н. Рабочая нагрузка составляла 400–600 Н. Измерение растяжения пружин производилось штангенциркулем с погрешностью $\pm 0,1$ мм. Градуировка пружин выполнялась три раза для каждой пары пружин перед началом опытов, а затем в ходе опытов еще дважды проводилась калибровка пружин, показавшая неизменность градуировочных характеристик. Точность поддержания нагрузки в серии испытаний осуществлялась с относительной погрешностью, не превышающей 2%.

Состав среды для испытаний образцов на КРН был определен в ходе предварительных опытов, растворы для которых были отобраны на основании данных [24]. В испытаниях оценивалось также наличие общей и питтинговой коррозии дисковой стали. Нагрузка на образцах составляла 0,9–1,0 от условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$). Критерием пригодности среды для последующих испытаний при периодическом удалении поверхностного слоя являлось относительно небольшое (до 200 часов) время до разрыва образца вследствие КРН. В качестве среды для последующих исследований был по результатам предварительных испытаний выбран водный раствор NaOH, 40%+NaCl, 2%, который при температуре 126°C обеспечивал КРН дисковых сталей в течение 22–132 часов испытаний. Испытания в среде состава 40% NaOH + 2% NaCl моделировали среду, создаваемую при коррозии реальных дисков и обеспечивали также сопоставимость результатов настоящего и ранее выполненных как в России, так и в других странах исследований КРН дисковых сталей [19, 25, 26].

Образцы для лабораторных исследований из стали 34ХН1М изготавливались из металла двух дисков, отработавших каждый около 125 тыс. часов на турбине Т-100-12,8 и имевших исходные коррозионные повреждения в виде поверхностных трещин. Согласно данным, полу-

ченным на разрывных образцах из этих сталей, условный предел текучести всех этих образцов составлял $\sigma_{0,2} = 720\text{--}730$ МПа. При проведении коррозионных исследований нагрузка на эти образцы рассчитывалась, исходя из значения $\sigma_{0,2} = 720$ МПа, с учетом температуры испытаний. Образцы из стали 30ХНМФ были изготовлены из новой поковки, металл которой ранее не подвергался воздействию коррозионно-механических нагрузок. Предел текучести этой стали, по данным испытаний на разрывных образцах, проведенных на АО «Уральский турбинный завод», составлял $\sigma_{0,2} = 640$ МПа.

Испытания проводились в двух упомянутых выше камерах в растворе 40% NaOH + 2% NaCl при температуре $126 \pm 1^\circ\text{C}$, регулируемой с помощью реле и контактного термометра. Периодический контроль температуры испытаний, проводившийся посредством поверочного термометра в течение 30–40 минут, показал надежность ее поддержания в указанном диапазоне.

Всего было проведено пять серий лабораторных испытаний образцов, в каждой из которых проводились опыты с периодическим удалением слоя металла путем шлифования и без удаления слоя, отличавшиеся условиями коррозии и материалом образцов.

В качестве базового времени $\tau_{\text{баз}}$ принималось среднее время, характеризующее длительность испытаний образцов до разрыва без шлифования. Время $\tau_{\text{баз}}$ аналогично времени τ_i появления макротрещин при КРН для натуральных дисков. Периодичность шлифования в опытах с удалением слоя металла выбиралась, исходя из величины $\tau_{\text{баз}}$, и составляла $\Delta\tau = (0,38\text{--}0,91) \cdot \tau_{\text{баз}}$. В каждой серии проводилось 2–3 представительных опыта по определению $\tau_{\text{баз}}$ и 2–3 опыта с периодическим удалением (четырёх- или трёхкратным) слоя металла, накопившего микроповреждения.

Перед испытаниями посредством микрометра с диапазоном измерений 0–25 мм проводился замер диаметра образца по всей его длине и во взаимно перпендикулярных направлениях с точностью до 0,01 мм. Все измеренные диаметры отличались от среднего значения не более чем на 0,01 мм, что гарантировало постоянный уровень напряжения во всех сечениях образца с точностью до 0,3%. Затем образец вкручивался в захват, помещался в камеру, проводилась ее сборка и с помощью рычажного механизма (см. рис. 2) образец нагружался. Расчет нагрузки производился по средней величине измеренного диаметра образца.

Опыты в серии проводились либо при полном погружении образца в раствор, когда электролит

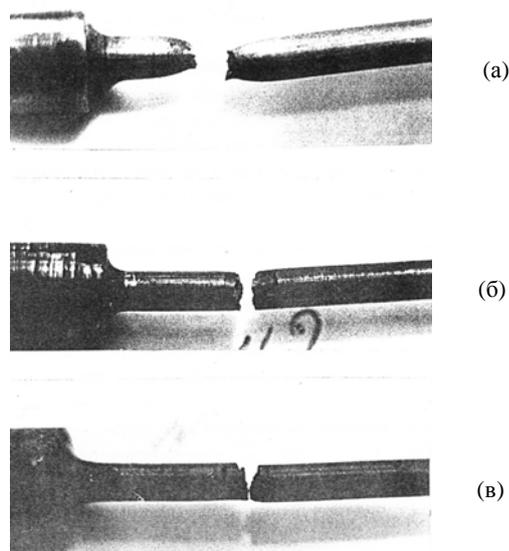


Рис. 3. Образцы из стали 34XN1M, подвергнутые: хрупкому разрушению (а); разрушению вследствие КРН в растворе, содержащем 40% NaOH + 2% NaCl, без снятия слоя металла в процессе испытаний (б) и в условиях периодического шлифования (в).

заливался в ячейку до отметки «а» (см. рис. 2), либо при погружении образца в раствор наполовину, когда ячейка заливалась электролитом до отметки «в» (см. рис. 2). Неполное погружение образцов в раствор электролита применялось для ускорения испытаний (на границе раздела сред процесс КРН происходит интенсивнее) и приближения условий опытов к условиям КРН натуральных дисков (по фазовому составу среды). В процессе испытаний контролировался и поддерживался необходимый уровень электролита в ячейке, который за время проведения опыта не менялся.

После разрыва образцы осматривались с помощью микроскопа МБС-9, при 42-кратном увеличении фотографировались. На рис. 3а представлена фотография образца, подвергнутого простому механическому разрушению, а на рис. 3б, в – образцов, разрушившихся без удаления слоя и в условиях периодического шлифования в процессе КРН соответственно. Сопоставление показывает, что образец в зоне механического разрыва имеет ярко выраженную шейку, а трещин на его поверхности не наблюдается. При разрыве образцов вследствие КРН шейка отсутствует или выражена слабо, а на поверхности металла, особенно вблизи разрыва, хорошо видны многочисленные трещины, располагающиеся перпендикулярно прикладываемой нагрузке.

Перед очередным шлифованием, проводимым по завершении опыта длительностью Δt , испытываемый образец подвергался осмотру поверхности с помощью микроскопа и измерению диаметра по всей длине посредством микрометра. Шлифование проводилось на токарном станке с

помощью надфилей, причем чистовая обработка – бархатным или алмазным надфилем. Толщина удаляемого поверхностного слоя составляла 0,06–0,10 мм.

Если при осмотре обнаруживали зарождающиеся трещины или другие коррозионные повреждения, то шлифование проводили до полного их удаления. После шлифования вновь производилось измерение диаметра образца по всей его длине микрометром. При этом отклонение от среднего значения диаметра не должно было превышать 0,01 мм. Отшлифованный образец снова изолировался и устанавливался в коррозионную камеру со свежим раствором. Расчет нагрузки проводился заново с учетом изменения диаметра образца.

После четырех- или трехкратного удаления слоя при постоянном периоде Δt образец доводился до разрушения вследствие КРН путем выдержки в течение необходимого времени в указанной коррозионной среде.

Эффективность периодического удаления поверхностного слоя можно оценить путем сравнения времени до разрушения образцов без шлифования со временем разрушения образцов из того же куска стали, подвергавшихся периодическому снятию поверхностного слоя металла.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего проведено пять серий опытов по исследованию влияния периодического шлифования на ресурс образцов дисковых сталей в условиях коррозионного растрескивания.

В первой серии испытывались образцы из стали 34XN1M, полностью погруженные в

Таблица 1. Результаты испытаний по определению величины $\tau_{\text{баз}}$ в первой серии опытов

№ опыта	Температура испытаний, °С	Время до разрыва, ч	Состояние поверхности	
			питтинг	трещины при КРН
1	127,5 ± 2,5	67	+	+
2	126 ± 1,0	127	+	+
3	126 ± 1,0	136	+	+

Таблица 2. Результаты испытаний образцов с периодическим удалением слоя в первой серии опытов

№ опыта	Время испытаний, ч	Относительная периодичность шлифования, $\Delta t/\tau_{\text{баз}}$	Состояние поверхности		Величина снятого слоя, мм
			питтинг	трещины при КРН	
1	50	0,38	+	–	0,10
	100	0,38	+	–	0,07
	150	0,38	+	–	0,06
	200	0,38	+	–	0,10
	322	0,92	+	+	разрыв
2	60	0,46	+	–	0,07
	120	0,46	+	–	0,07
	180	0,46	+	+	0,06
	220	0,31	+	+	разрыв

Таблица 3. Результаты испытаний по определению величины $\tau_{\text{баз}}$ во второй серии опытов

№ опыта	Температура испытаний, °С	Время до разрыва, ч	Состояние поверхности	
			питтинг	трещины при КРН
1	126 ± 1,0	42	+	+
2	126 ± 1,0	53	+	+
3	126 ± 1,0	46	+	+

коррозионную среду с нагрузкой на образцы, равной $\sigma = (1,00 \pm 0,05) \cdot \sigma_{0,2}$.

В табл. 1 показаны результаты опытов по определению величины $\tau_{\text{баз}}$ (без шлифования).

Эти опыты показали, что через 67–136 часов образцы разрывались, и при этом на их поверхности отмечались трещины в условиях КРН (см. рис. 3б) и питтинг глубиной 0,01–0,02 мм. Общей коррозии практически не было. Образцы в ходе испытаний покрывались тонким слоем темного окисла, а их размер по толщине не менялся. Существенно отметить, что повышение температуры до 128–130°C (см. табл. 1, опыт № 1) уменьшает время до разрыва образца почти вдвое по сравнению с испытаниями при температуре 126°C. Однако в этом случае раствор интенсивно кипит, и даже наличие обратного холодильника не исключает выбросов пара и изменения вследствие этого состава среды. Поэтому оптимальной температурой коррозионных испытаний в данной среде следует считать 126°C. Величина $\tau_{\text{баз}}$, согласно данным табл. 1 для этой серии опытов при температуре испытаний 126°C, составила 132 часа.

В опытах с удалением накапливающегося микроповреждения слоя периодичность шлифования составляла 50–60 часов, что соответствует интервалу $\Delta t = (0,38–0,46) \cdot \tau_{\text{баз}}$. Результаты опытов первой серии с периодическим шлифованием представлены в табл. 2.

На основании анализа этих опытов можно сделать вывод о существенном увеличении времени до разрыва образца за счет профилактического шлифования. Следует отметить, что после четырехкратного снятия слоя металла ресурс образца № 1 остался тем же, что и до начала испытаний ($\Delta t \approx \tau_{\text{баз}}$), то есть шлифование практически полностью возвращало металл к исходному состоянию. Что касается образца № 2, то он разорвался через 40 часов после третьего снятия слоя, но разрушение произошло в зоне локальной концентрации напряжений на поверхности образца, вызванной тем, что при сборке камеры после последнего шлифования образец был погнут. Эти предположения подтверждаются выводами, полученными при последующем металлографическом обследовании образца.

Во второй серии опытов образцы из стали 34ХН1М погружались в коррозионную среду не полностью, а наполовину. Уровень раствора в коррозионной камере поддерживался постоянным. Величина нагрузки составляла $\sigma = (0,95 \pm 0,05) \sigma_{0,2}$. Результаты опытов по определению $\tau_{\text{баз}}$ приведены в табл. 3.

При неполном погружении образцов время до их разрушения вследствие КРН оказалось равным 47 часам, что почти втрое меньше, чем по результатам первой серии опытов при полном их погружении в раствор. После разрыва на

Таблица 4. Результаты испытаний образцов с периодическим удалением слоя во второй серии опытов

№ опыта	Время испытаний, ч	Относительная периодичность шлифования, $\Delta t/\tau_{\text{баз}}$	Состояние поверхности		Толщина снятого слоя, мм
			питтинг	трещины при КРН	
1	20	0,43	+	–	0,06
	40	0,43	+	–	0,07
	60	0,43	+	–	0,08
	80	0,43	+	–	0,06
	125	0,96	+	+	разрыв
2	20	0,43	+	–	0,05
	40	0,43	+	+	0,07
	60	0,43	+	–	0,06
	80	0,43	+	–	0,07
	131	1,08	+	+	разрыв

поверхности образцов отмечались трещины в условиях КРН и неглубокий питтинг.

Опыты второй серии с периодическим шлифованием при $\Delta t = 0,43 \cdot \tau_{\text{баз}}$ на образцах, выполненных из металла того же диска, при тех же условиях испытаний представлены в табл. 4.

Результаты опытов второй серии показывают, что профилактическое шлифование с периодичностью $\Delta t = (0,38-0,46) \cdot \tau_{\text{баз}}$ обеспечивает полное возвращение образцов стали 34ХН1М к исходному состоянию по их ресурсу в условиях КРН при снятии слоя металла толщиной 0,06–0,10 мм.

Образцы, испытанные в третьей серии опытов, были выполнены из стали 34ХН1М другого диска турбины Т-100-12,8, имевшего тот же предел текучести $\sigma_{0,2} = (720-730)$ МПа, что и у первого, по данным испытаний разрывных образцов. Условия испытаний были аналогичны второй серии опытов: неполное погружение образцов в коррозионную среду; нагрузка на образце $\sigma = (0,95 \pm 0,05)\sigma_{0,2}$. Профилактическое удаление слоя проводилось через 15–20 часов, то есть периодичность шлифования составляла $\Delta t = (0,68-0,91) \cdot \tau_{\text{баз}}$. На поверхности образцов перед шлифованием в опытах третьей серии часто отмечались трещины в условиях КРН. Толщина удаляемого слоя выбиралась такой, чтобы трещины были удалены (при 28-кратном увеличении дефектов на поверхности образцов визуально не отмечалось). Однако, как показали опыты, исходное состояние поверхности в этом случае не достигалось, то есть поврежденный слой металла оказывался толще удаленного, то есть более 0,15–0,20 мм. Вследствие этого на заключительном этапе испытаний ни один из трех образцов не достиг $\Delta t = \tau_{\text{баз}}$. Вместе с тем периодическое удаление слоя даже при уровне $\Delta t = (0,68-0,91) \cdot \tau_{\text{баз}}$ позволило увеличить ресурс образцов более чем вдвое по сравнению с их исходным ресурсом $\tau_{\text{баз}}$.

Образцы для четвертой серии опытов были изготовлены из стали 30ХНМФ, имевшей, по данным заводских испытаний (на АО «Уральский турбинный завод»), величину $\sigma_{0,2} = 640$ МПа. Испытания проводились при неполном погружении образцов в коррозионную среду при нагрузке на образцы $\sigma = (0,95 \pm 0,05) \cdot \sigma_{0,2}$. В этих опытах была определена величина $\tau_{\text{баз}} = 42$ часа.

Результаты четвертой серии опытов с периодическим шлифованием, проведенных в условиях, аналогичных предыдущей серии, показывают, что для образцов из стали 30ХНМФ периодическое удаление слоя металла также позволяет увеличить время испытаний до разрыва по меньшей мере вдвое при трехкратном снятии слоя.

Проведенные на образцах из стали 34ХН1М в пятой серии опытов при величине нагружения $\sigma = (0,75 \pm 0,05) \cdot \sigma_{0,2}$ испытания подтверждают результат, полученный для сталей 34ХНМФ и 30ХНМФ при $\sigma = (0,95 \pm 0,05) \cdot \sigma_{0,2}$: шлифование с периодичностью $\Delta t \approx 0,5 \cdot \tau_{\text{баз}}$ позволяет при минимальной толщине снимаемого слоя (не более 0,1 мм) полностью возвращать поверхность к исходному состоянию. При трех- или четырехкратном снятии слоя ресурс образцов до их разрушения увеличивается в этом случае в 2,5–3 раза.

Из результатов испытаний полупогруженных образцов обоих исследованных видов сталей следует, что процесс КРН происходил и при нагрузке $\sigma \approx 0,75 \cdot \sigma_{0,2}$, чего не наблюдалось при испытаниях в условиях однофазной жидкой среды, где предел длительной коррозионной прочности этой стали при данной категории прочности составляет $\sim 0,85 \cdot \sigma_{0,2}$ [18].

Цель металлографических и фрактографических исследований образцов – выявление механизма коррозионного растрескивания при разрыве образцов, определение особенностей разрушения образцов, испытанных с периоди-

ческим шлифованием, по сравнению с образцами, испытанными без снятия слоя, а также подтверждение соответствия характера КРН металла образцов и натуральных дисков. Этому обследованию были подвергнуты образцы, разрушившиеся в испытаниях первой и второй серии.

Металлографическое исследование проведено на микроскопе Неофот-21 при 100–500-кратном увеличении. Шлифы изготавливались из части разрывного образца длиной 15–20 мм, включая поверхность разрушения, что обеспечивало изучение характера коррозионных повреждений поверхности и механизмов разрушения и в сечениях, удаленных от излома.

Исследование показало, что разрушение во всех напряженных образцах, как подвергавшихся, так и не подвергавшихся периодическому шлифованию, протекало по механизму коррозионного растрескивания, причем развивающиеся трещины имели межкристаллитный характер, что наглядно подтверждает рис. 4. Зарождению трещин способствовали поверхностные дефекты образцов, также имевшие коррозионный характер.

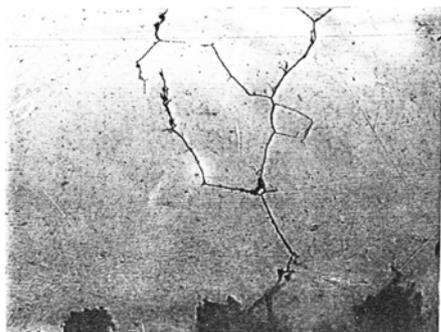


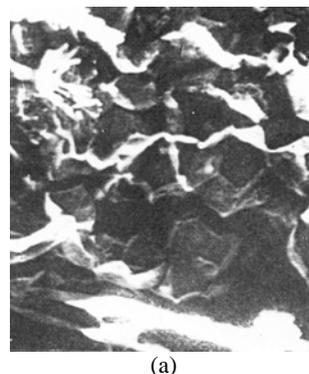
Рис. 4. Межкристаллитные трещины в образце № 1, испытанном под напряжением (первая серия испытаний) без периодического шлифования с увеличением $\times 400$.

Образцы, подвергавшиеся периодическому шлифованию, имели некоторые особенности развития коррозионных повреждений. Шлифование устраняло коррозионные микроповреждения, возникающие на поверхности образца, и тем самым увеличивало время его работы под нагрузкой. Вблизи боковой поверхности образца отмечалась сложная деформационная картина, связанная с тем, что при шлифовании происходит наклеп поверхности и в дальнейшем развиваются трещины.

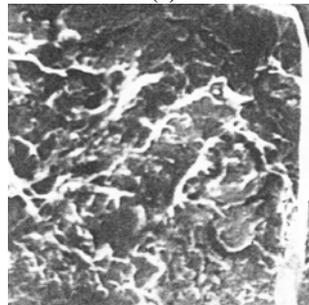
Металлографическое обследование образцов второй серии, испытанных в полупогруженном состоянии, показало, что зарождение и развитие трещин, как и при испытаниях первой серии с полным погружением образцов, происходило по механизму межкристаллитного КРН.

Фрактографическое исследование изломов образцов проведено с использованием растро-

вого электронного микроскопа РЭМ-200. Изучение фрактограмм позволило сделать вывод, что возникающие трещины в условиях КРН вначале, при зарождении, распространялись по межзеренным поверхностям (рис. 5). По мере удаления от края образца, то есть при развитии возникших на поверхности трещин, окрестность зерен становилась менее выраженной, и происходил постепенный переход от межкристаллитного к смешанному, а затем и к транскристаллитному квазихрупкому разрушению (рис. 6). Отсутствие четких границ зерен на фрактограммах объясняется вторичной коррозией под действием агрессивной среды, в результате чего происходило определенное сглаживание поверхности разрушения (см. рис. 5б). На некоторых фрактограммах отмечены микротрещины типичного межкристаллитного характера, ответвившиеся от магистральной трещины незадолго до разрушения образца и не испытывавшие длительного воздействия.



(а)



(б)

Рис. 5. Поверхность разрушения образца № 1, испытанного под напряжением без удаления поверхностного слоя (первая серия испытаний) с увеличением $\times 250$. Край излома.

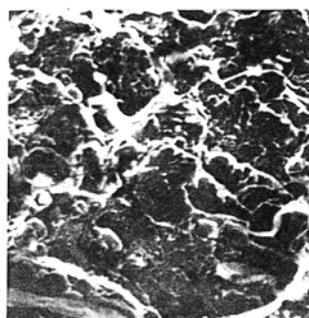


Рис. 6. Поверхность разрушения образца № 1, испытанного под напряжением без удаления поверхностного слоя (первая серия испытаний). Середина излома с увеличением $\times 250$.

Таблица 5. Обобщенные результаты опытов с периодическим удалением слоя металла с микроповреждениями

№ опыта	№ серии	№ опыта в серии	Марка стали	$\sigma/\sigma_{0,2}$	$\Delta\tau/\tau_{\text{баз}}$	$\tau/\tau_{\text{баз}}$	$\tau_{\text{баз}}, \text{ч}$	Кол-во снятых слоев
1	1	1	34ХН1М	1,00	0,38	2,44	132	4
2	2	1	34ХН1М	0,95	0,43	2,66	47	4
3	2	2	34ХН1М	0,95	0,43	2,79	47	4
4	3	1	34ХН1М	0,95	0,70	2,32	22	2
5	3	2	34ХН1М	0,95	0,91	3,23	22	3
6	3	3	34ХН1М	0,95	0,68	3,09	22	3
7	4	1	30ХНМФ	0,95	0,48	2,98	42	4
8	4	2	30ХНМФ	0,95	0,48	1,88	42	3
9	4	3	30ХНМФ	0,95	0,43	2,14	42	3
10	5	1	34ХН1М	0,75	0,49	2,56	73	3

Условные обозначения:

$\sigma/\sigma_{0,2}$ – относительная нагрузка образца;

$\Delta\tau/\tau_{\text{баз}}$ – относительная периодичность удаления поверхностного слоя;

$\tau/\tau_{\text{баз}}$ – степень увеличения ресурса образца при периодическом удалении слоя металла;

$\tau_{\text{баз}}$ – средняя продолжительность испытаний образца до разрушения.

Таким образом, методами металлографического и фрактографического исследования установлено, что в условиях проведенных экспериментов трещины во всех образцах зарождались по механизму межкристаллитного коррозионного растрескивания, аналогичному КРН натуральных дисков. Места, от которых развивались трещины, могли совпадать с дефектами поверхности образца, крупными неметаллическими включениями, наиболее легко повреждаемыми в результате развития коррозионных процессов. Периодическое шлифование на глубину до 0,10 мм устраняло поверхностные коррозионные дефекты и способствовало увеличению времени, выдерживаемому образцами под нагрузкой. Влияние шлифования проявлялось и в усложнении деформационной картины поверхностного слоя металла, что, вероятно, связано с упрочнением поверхностного слоя при механической обработке образцов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ни в одной серии опытов не удалось, ввиду ограниченности количества идентичного по свойствам металла для изготовления образцов, провести более двух-трех опытов по определению $\tau_{\text{баз}}$ (что дает погрешность в определении этой величины 20–40%) и более трех представительных опытов с периодическим шлифованием. Количество удалений слоя также было неодинаковым (3 или 4), что зависело от достижения образцом минимального размера, то есть от величины снимаемого слоя с микро-, а иногда и макротрещинами. Разброс индивидуальных свойств металла отдельных образцов ведет к тому, что даже в пределах одной серии опытов фактическая величина $\tau_{\text{баз}}$ у того или иного образца могла существенно (на десятки

процентов) отличаться от определенной в результате испытаний. Эти обстоятельства требуют применения методов математической статистики для определения степени увеличения ресурса образцов. Поскольку результаты испытаний во всех сериях опытов по степени относительного увеличения ресурса образцов с периодическим шлифованием близки друг к другу, оказалось возможным построить и проанализировать общий по этому показателю статистический ряд. Основные результаты рассматриваемых опытов со шлифованием отражены в табл. 5, причем под τ понимается общее время испытаний до разрушения образца. Результаты десяти наиболее представительных опытов включены в статистический ряд по анализируемому показателю $\tau/\tau_{\text{баз}}$.

По результатам данных табл. 5 определено, что с доверительной вероятностью 95% случайная величина $\tau/\tau_{\text{баз}}$ в условиях проведенных опытов находится в интервале $2,0 < \tau/\tau_{\text{баз}} < 3,5$.

Таким образом, представляется статистически обоснованным вывод, что при не менее чем трехкратном проведении профилактического удаления слоя металла, накопившего микроповреждения, ресурс образцов дисковых сталей 34ХН1М и 30ХНМФ возрастает не менее чем в 2–3 раза по сравнению с ресурсом образцов в условиях КРН без такой обработки. Величина нагрузки, при которой проводились испытания, составляла $\sigma = (0,75–1,00) \cdot \sigma_{0,2}$, а периодичность удаления слоя – от $\Delta\tau = 0,38 \cdot \tau_{\text{баз}}$ до $\Delta\tau = 0,91 \cdot \tau_{\text{баз}}$. При этом оптимальной следует признать величину $\Delta\tau = (0,5–0,65) \cdot \tau_{\text{баз}}$, которая обеспечивает максимальное продление ресурса образцов без вероятного появления на их поверхности коррозионных макротрещин. Ликвидация последних потребовала бы удаления слоя металла величиной более 0,10 мм.

Для переноса результатов модельных исследований, представленных в данной работе, на реальные турбины возможен либо консервативный подход, связанный со сбором и анализом статистики повреждений для всего парка аналогичного оборудования, либо подход, основанный на учете реальных эксплуатационных нагрузок дисков и реальных условий эксплуатации каждой конкретной турбины.

В рамках реализации первого подхода предлагается, например, для теплофикационных турбин производства Уральского турбинного завода (Россия), работающих без промежуточного перегрева пара, проводить обработку повреждаемых (по наличию статистики таких повреждений) поверхностей дисков каждые 80–100 тыс. часов наработки (то есть примерно 1 раз в 15 лет) [15, 21]; для реализации второго подхода целесообразно использовать датчики коррозионной ситуации на роторе, например напряженные образцы-свидетели, по наличию и характеру повреждения которых можно будет судить о степени исчерпания инкубационного периода развития повреждений в локальных зонах дисков [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований доказано, что оптимальное по величине и периодичности удаление металла, накапливающего микроповреждения в условиях КРН, практически полностью восстанавливает ресурс низколегированных сталей для изготовления насадных дисков при данном виде повреждений. Еще одним существенным выводом является заключение об аналогичности характера и механизма КРН образцов в условиях проведенных испытаний и КРН натуральных дисков. Третий важный вывод: удаление поверхностного слоя металла путем периодического шлифования каждый раз практически полностью восстанавливало исходный ресурс образцов дисковых сталей, определяемый их длительной коррозионной стойкостью в условиях КРН. Это говорит о целесообразности применения периодического удаления поверхностного слоя металла локальных коррозионно-повреждаемых зон дисков, реально эксплуатирующихся на паротурбинных электростанциях. Периодичность такой обработки следует определять с помощью анализа статистики повреждений для турбин данного типоразмера, а также путем использования датчиков коррозионной ситуации, устанавливаемых на конкретной турбине.

ЛИТЕРАТУРА

- McMinn A., Burghard H.C. et al. *Proc Int Symp Environ Degradat Mater Nucl Power Syst. Water React.*, Myrtle Beach, Aug. 22–25, 1983. Houst., 1984. 243–272.
- Rosario D.A., Viswanathan R., Wells C.H. and Licina G.J. *Corrosion*. 1998, **54**(7), 531–545. doi: 10.5006/1.3284881.
- Sinha J.K., Hahn W., Elbbah K., Tasker G. et al. *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2012. 363–371.
- Nurbanasari M. *Case Stud Eng Fail Anal*. 2014, **2**(2), 54–60.
- Rao M.A., Kumar M.P., Narayanan T.S., Rao S.S. et al. *J Fail Anal Prev*. 2015, **15**(5), 750–757.
- De Seranno T., De Meyer E., Verliefde A., & Verbecken K. Degradation of the mechanical integrity of steam turbine steels due to stress-corrosion cracking in acidic water. *EUROCORR 2017, 20th International Corrosion Congress*, 2017, 1–14.
- Yan L., Nakajima K., Inagaki S., Arimura M. et al. *ASME 2011 Power Conference collocated with JSME ICOPE 2011*, 2011. 615–621.
- Banaszkiewicz M., & Rehmus-Forc A. *Eng Fail Anal*. 2015, **51**, 55–68. doi:10.1016/j.engfailanal.2015.02.015
- Macdonald D., Engelhardt G. 2.39 Predictive Modeling of Corrosion. *Shreir's Corros, Elsevier BV*, 2010, **2**, 1630–1679.
- Gorman A. *Corrosion*. 2015, **71**(12), 1414–1433. <https://doi.org/10.5006/1898>.
- Chen G., Jiang P., Ye X., Zhang J. et al. *ASME Turbo Expo 2014*. Dusseldorf, Germany. Paper NoGT 2014–25583.
- Bavarian B., Zhang J., Reiner L. *Proceedings of the 13th international conference on aluminum alloys (ICAA13)*. Carnegie Mellon Univ, Pittsburgh, 2012, PA, 405–415.
- Bavarian B., Zhang J., Reiner L. *Key Eng Mater*. 2012, **488**, 61–64.
- Schulze V., Bleicher F., Groche P., Guo Y.B. et al. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. **65**(2), 809–832. doi:10.1016/j.cirp.2016.05.005.
- Суворов Д.М. *Исследование коррозионного растрескивания модельных образцов сталей с целью обоснования новых методов диагностики коррозионного состояния и противокоррозионной защиты насадных дисков паровых турбин*. Киров: ВятГУ, 2015, 100 с.
- Шлугер М.А., Ажогин Ф.Ф., Ефимов Е.А. *Коррозия и защита металлов*. М.: Металлургия, 1981. 216 с.
- Трухний А.Д., Мартынов Ю.Д., Гинзбург Э.С., Резинских В.Ф. *Теплоэнергетика*. 1982, (6), 57–60.
- Шкляр А.И., Жученко Л.А., Ермолаев В.В., Беляков А.В. *Теплоэнергетика*. 2007, (4), 4–7.
- Ramamurthy S., & Atrens A. *Corros Rev*. 2013, **31**(1), 1–31.
- Поваров О.А., Семенов В.Н., Богомолов Б.В. *Теплоэнергетика*. 1986, (10), 33–38.
- Израилев Ю.Л. *Долговечность и живучесть парка турбин ТЭС*. М.: Союзтехэнерго, 1990. 265 с.

22. Трухний А.Д., Корж Д.Д., Кочетов А.А. *Электрические станции*. 1984, (3), 21–22.
23. Резинских В.Ф., Меламед М.М., Кочетов А.А. *Теплоэнергетика*. 1987, (7), 9–13.
24. Туфанов Д.Г. *Коррозионная стойкость нержавеющей сталей и чистых металлов: справочник*. М.: Металлургия, 1973. 300 с.
25. Van Boven G., Chen W., & Rogge R. *Acta Materialia*. 2007, **55**(1), 29–42.
26. Ramamurthy S., & Atrens A. *Corros Sci*. 2010, **52**(3), 1042–1051.

Поступила 02.01.18

После доработки 08.02.18

Summary

The article describes results of studies of the influence of periodic removal (by grinding) of a thin surface metal layer of low-alloy steels used for the fabrication of shrunk-on discs of middle-pressure and low-pressure steam turbine rotors on the life of standard samples in

conditions of stress corrosion cracking (SCC). It is established that the optimum magnitude of the removal of the metal layer is 0.1 mm and the optimum intervals are from 50% to 65% of the incubation period. It is proved that the removal of the metal layer, which accumulates micro-damages under SCC, almost completely restores the steel disk resource in this type of damage. It is found that the nature and mechanism of the SCC samples under test conditions and the SCC of full-scale discs are similar. It is also stated that both single and repeated removal of the surface metal layer by periodic grinding almost completely restores the original disk resource of steel samples defined by their long-term corrosion resistance under SCC. It proves the purposefulness of the periodic removal of the surface metal layer of localized corrosion-damaged disc areas of steam turbines currently used at power plants.

Keywords: stress corrosion cracking, low-alloy steels, rotor shrunk-on disc, steam turbine, life of samples, surface layer of metal, periodic removal, phase transition zone.