

УДК 621.165.62-192

О.Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, канд. техн. наук, А.В. АНТОНОВИЧ, канд. техн. наук,
Н.Г. КРИЩУК, канд. техн. наук, М.В. КОСМИНА, М.О. ДОЛГИХ

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»*

УСТАЛОСТНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ РОТОРОВ ЦВД И ЦСД ПАРОВЫХ ТУРБИН К-200-130-3 НА ТЕС УКРАИНЫ

Наведені дані по пошкоджуваності металу роторів ЦВД і ЦСД парових турбін К-200-130, що експлуатуються на ТЕС України та наближаються до вичерпання паркового ресурсу. Вказані характерні місця ушкоджень в кінцевих ущільненнях та галтельних переходах дисків. Приведені результати розрахункових досліджень напружено-деформованого стану роторів турбіни К-200-130 на пускових режимах після проведення конструктивно-ремонтних заходів з урахуванням експлуатаційно-технологічних факторів. Приведена оцінка впливу цих факторів на малоциклову утомлюваність роторів та рекомендації про підвищення надійності їх роботи.

It is date of damage of metal rotors CHP and CMP of steam turbines K-200-130. The steam turbines exploited on heat power station and go to end of park resource. It is snow the individual parts of spoils in ending condensations and disks. It is results of calculation investigations stressed-deformed state of rotors of turbines K-200-130 on start modes for which have been performed the projects on updating are presents. It is the estimation of influence all this factors for little cycle lassitude rotors and the recommendations about high reliability of this work.

Визуальный контроль и магнитно-порошковая диагностика роторов ЦВД и ЦСД турбины К-200-130-3 в энергосистемах Украины показали, что в ряде случаев после значительного числа пусков в процессе эксплуатации в тепловых канавках передних концевых уплотнений РВД и РСД имеются коррозионно-усталостные повреждения в виде трещин различной глубины (порядка 1-2,5 мм). Также обнаружены кольцевые трещины в галтелях дисков 13-й ступени со стороны 14-й ступени РСД, глубина которых составляла около 4-х мм. При этом наработка такой турбины составляла порядка 186 тыс. часов и более 1680 пусков.

Согласно рекомендациям ЦКБ „Энергопрогресс” (г. Харьков), обнаруженные дефекты устранялись при проведении ремонтных мероприятий по тепловым канавкам путем их проточки, снятия поверхностного слоя и увеличения ширины канавок с 3,5 до 5,5 мм и радиуса закругления с 1,5 до 2,5 мм. По галтели диска 13-й ступени РСД было рекомендовано сделать кольцевую выборку на глубину 4-4,3 мм до полного устранения возникшей трещины.

НТУУ „КПИ” выполнена работа по определению влияния на напряженно-деформированное состояние металла роторов ЦВД и ЦСД указанных ремонтно-конструктивных мероприятий и некоторых эксплуатационно-режимных факторов. Расчеты проводились для двух типичных пусковых режимов турбины – после ночного простоя (НС-2) и из холодного состояния (ХС). Граничные условия определялись в соответствии с реальными графиками пуска согласно рекомендациям РТМ [1,2]. Расчеты выполнялись с помощью программно-вычислительного комплекса ANSYS v5.7 (лицензия ГКБ „Южное”, Украина). Были построены уточненные дискретные модели роторов (порядка 90 тыс. конечных элементов), которые позволили достаточно точно учитывать конфигурацию роторов в районе тепловых канавок и дисков первой и тринадцатой ступеней.

По ротору ЦВД для пуска НС-2 характерны два момента времени, при которых эквивалентные напряжения максимальны и минимальны ($\tau_1 = 2100$ с – начало разворота ротора при пуске ($n = 1200$ об/мин) и $\tau_2 = 6780$ с – конец этапа нагружения). Кинетика градиентов температур в различных точках поверхности ротора и температуры в радиальном сечении вблизи одной из канавок переднего уплотнения при пуске турбины из холодного состояния показывает, что максимальный градиент и разность температур имеют место только при развороте турбины.

Результаты обследования ротора турбины К-200-130 с учетом ремонтного изменения геометрических характеристик тепловых канавок показывают, что критическими являются тепловые канавки №№ 3-8 РВД в зоне первой обоймы, а также №№ 11, 12 в зоне второй обоймы переднего концевое уплотнения (ПКУ). По галтели диска регулирующей ступени минимальные напряжения равны $\sigma_{\text{экр}} = -283$ МПа в конце этапа нагружения при пуске по типу НС-2. На начальном этапе пуска НС-2 значительные напряжения $\sigma_{\text{экр}} = 197$ МПа обусловлены интенсивным захлаживанием металла ротора из-за низкой температуры свежего пара, которая перед толчком ротора составляла $t_{\text{сп}} = 325$ °С, что примерно на 85 °С ниже температуры металла (табл. 1). При температуре порядка 510 °С предел прочности и пластичности стали Р2МА с учетом деградации ее свойств при длительной эксплуатации соответственно составляют $\sigma_{\text{в}} \approx 465$ МПа и $\sigma_{\text{т}} \approx 390$ МПа.

Таблица 1. Амплитуда эквивалентных напряжений в роторе ЦВД турбины на пусковых режимах

Наименования элемента ротора от диска регулирующей ступени	Амплитуда эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{а}}$, МПа	
	Пуск НС-2	Пуск ХС
Первая обойма ПКУ		
Канавка № 1	275	163
Канавка № 2	356	249
Канавка № 3	365,5	295
Канавка № 4	354,5	309,5
Канавка № 5	347,5	318
Канавка № 6	345,7	330
Канавка № 7	338	326
Канавка № 8	323,5	314
Вторая обойма ПКУ		
Канавка № 9	260,5	266,5
Канавка № 10	260	254,5
Канавка № 11	279,5	274
Канавка № 12	251,5	265,5
Канавка № 13	237,5	217,5
Канавка № 14	198	100
Галтель диска РС	240	90,5

После проточки коэффициент концентрации напряжений K_z в тепловых канавках РВД уменьшился с 5,2 в исходном состоянии до 4,66 (на 10 %). Изменение конфигурации канавок также привело к уменьшению напряжений на 10 %. Поле эквивалентных напряжений в 6-й канавке уплотнений ротора ЦВД и развертка напряжений по профилю канавки № 6 при развороте ротора (выдержка при 500 об/мин) показаны на рис. 1.

Для ротора ЦСД по уточненной модели проведены исследования влияния изменения конфигурации тепловых канавок концевых уплотнений и галтели диска 13-й ступени на напряженно-деформированное состояние указанных участков ротора. Исследовались также два варианта пусковых режимов – НС-2 и ХС. Кроме того, были

выполнены расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния ротора ЦСД при пуске по типу НС-2, отличающиеся графиками подъема температуры пара промперегрева: в первом случае $t_{пп}$ к моменту толчка ротора превышала температуру металла РСД на 50-60 °С, а во втором она была ниже на 15-20 °С.

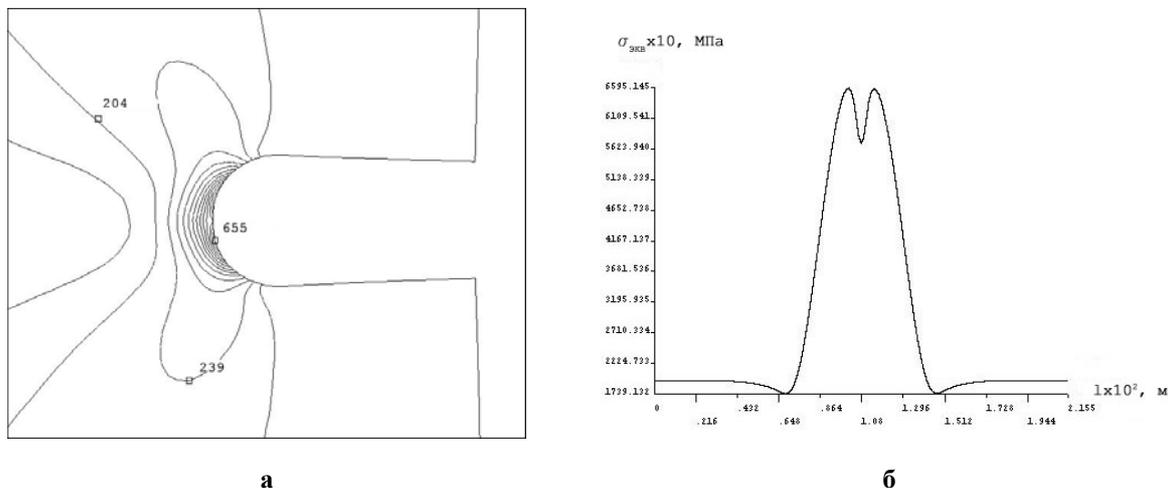


Рис. 1. Поле эквивалентных напряжений в 6-й канавке уплотнений ротора ЦВД, Па (а) и график изменения напряжений вдоль образующей канавки (б) при пуске из ХС (момент выдержки при 500 об/мин)

Для первого варианта пуска по типу НС-2, как и в РВД, выделены два момента времени, для которых определяли уровень напряжений в рассматриваемых точках ротора: $\tau_1 = 2460$ с (выход на режим холостого хода $n = 3000$ об/мин) и $\tau_2 = 6780$ с (конец этапа нагружения). Для второго варианта пуска из НС-2 характерным является только один максимум радиальной разности температур в РСД при $\tau = 2460$ с. Аналогичная картина имеет место и при пуске из холодного состояния. На рис. 2 показаны эквивалентные напряжения в канавке галтели диска 13-й ступени и график изменений напряжений вдоль образующей канавки. Максимальный уровень напряжений наблюдается в зоне проточки второй канавки ПКУ при пусках из ХС и составляет 257 МПа.

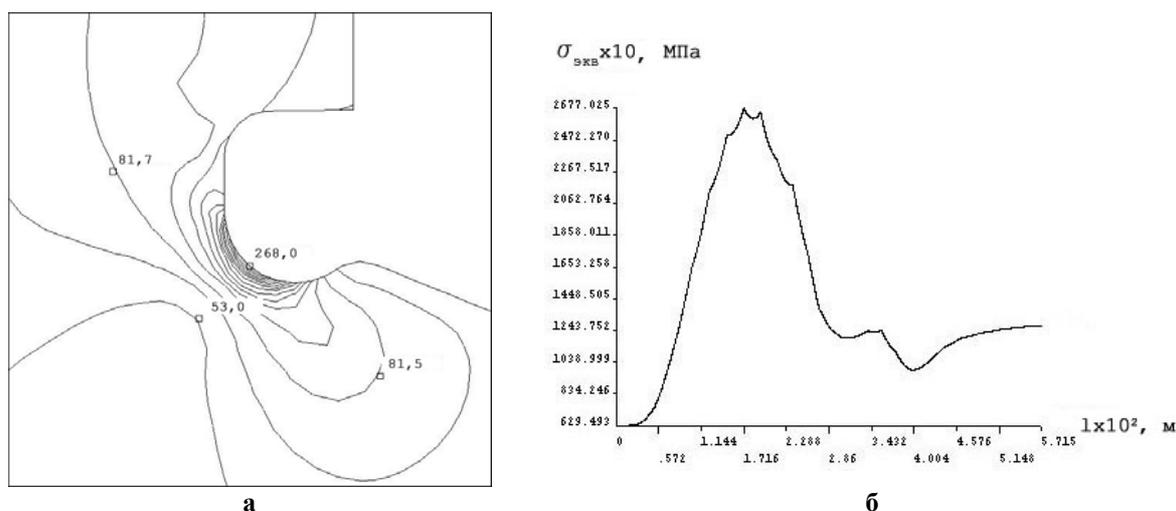


Рис. 2. Поле эквивалентных напряжений, МПа (а) и график изменения эквивалентных напряжений вдоль образующей канавки галтели ротора ЦСД (б) при пуске НС-2 и выходе на режим холостого хода

В таблице 2 даны результаты контроля дефектов в роторе ЦСД (глубина проточки тепловых канавок и галтели диска 13-й ступени) и расчетов НДС (эквивалентных напряжений) указанных элементов ротора при рассмотренных режимах пуска. Как видно из таблицы, по сравнению с РВД, трещины в тепловых канавках имеют большую глубину, что обусловило соответственно более глубокую их расточку (до 2,6 мм). Это также свидетельствует и о том, что в РСД имеют место более высокие напряжения, по сравнению с РВД. Оценивая влияние изменения графика температуры $t_{\text{пп}}$ на НДС элементов ротора ЦСД можно констатировать, что снижение предтолчковой температуры пара перед ЦСД до величины, близкой к температуре металла (НС-2, вариант 2) повышает амплитуду эквивалентных напряжений в тепловых канавках №№ 1-6 ПКУ в 1,5-1,9 раза по сравнению с вариантом, когда температура $t_{\text{пп}}$ превышает температуру металла перед толчком на 60-70 °С.

Таблица 2. Амплитуда эквивалентных напряжений в роторе ЦСД турбины на пусковых режимах

Наименования элементов ротора от диска 13-й ступени	Амплитуда эквивалентных напряжений σ_a , МПа		
	Пуск НС-2		Пуск ХС
	1-й вариант	2-й вариант	
Первая обойма ПКУ			
Канавка № 1	96	142	198
Канавка № 2	119	189,5	257
Канавка № 3	113	188	244
Канавка № 4	101,5	177,5	220,5
Канавка № 5	93,5	175,5	210,5
Канавка № 6	75,5	146	169
Вторая обойма ПКУ			
Канавка № 7	64	69,5	81
Канавка № 8	48,5	26,5	64,5
Галтель диска 13-й ступени	182	209	213
Расточка ротора	110	59	119,5

Проведенный в рамках данной работы анализ качества пусков турбоустановки показал, что в 5-ти пусках по типу НС-2 предтолчковая разность температур пар-металл по РВД находилась в пределах от +110 до -85 °С, по РСД от +70 до -25 °С. Это свидетельствует о том, что ручное управление параметрами пара при пусках турбоагрегата является одним из основных факторов, ухудшающих тепловое состояние роторов, повышающих уровень напряжений в металле и уменьшающих вследствие этого их надежность и долговечность.

Поэтому для повышения качества ведения пусковых и остановочных режимов, уменьшения вероятности ошибочных действий оперативного персонала ТЭС необходимо внедрить в минимальном объеме автоматическое управление основными технологическими параметрами турбины с использованием компьютерной техники [4].

При пусках из холодного состояния величины напряжений в РСД достаточно большие и достигают максимальных значений при начальной нагрузке $N_s = 5-7$ МВт (см. табл. 2). Проточка и изменение геометрической конфигурации тепловых канавок уменьшают коэффициент концентрации напряжений на 7,8 %, т.е. с 5,2 до 4,82 при глубине проточки до 2,6 мм, а выборка дефекта в галтели диска 13-й ступени уменьшает коэффициент концентрации напряжений в галтели с 4,17 до 3,48, т.е. в 1,2 раза, что в дальнейшем делает этот узел несколько менее уязвимым.

В работе также исследовано влияние предварительного прогрева ротора ЦВД на его тепловое и напряженно-деформированное состояние при пуске из холодного

состояния (табл. 3). Как видно, напряжения в элементах ротора при прогреве в течение 30, 120 и 180 мин отличаются не более чем на 2-4 %, из чего следует вывод, что предварительный прогрев ротора при указанном режиме пуска можно сократить примерно до одного часа.

Таблица 3. Влияние продолжительности предпускового прогрева на напряжения в элементах ротора ЦСД при пуске турбины из холодного состояния

Наименование элемента ротора от диска 13-й ступени	Эквивалентные напряжения при пуске из ХС, $\sigma_{экв}$, МПа		
	$\tau_{пр} = 30$ мин	$\tau_{пр} = 120$ мин	$\tau_{пр} = 180$ мин
Первая обойма ПКУ			
Канавка № 1	396	388	378
Канавка № 2	514	510	508
Канавка № 3	488	484	482
Канавка № 4	441	436	434
Канавка № 5	421	417	414
Канавка № 6	338	333	331
Вторая обойма ПКУ			
Канавка № 7	162	160	159
Канавка № 8	129	128	127
Галтель диска 13-й ступени	426	425	424
Расточка ротора	239	238	240

Среди других недостатков эксплуатации, которые приводят к неоднозначным результатам или усугубляют НДС роторов турбины следует отметить отсутствие четких и обоснованных данных о влиянии температуры пара, подаваемого при пусках на ПКУ. В одних схемах пар подается из паропровода холодного промперегрева 250 °С, в других – из горячего 540 °С [4], что не равнозначно. Например, при подаче пара из холодного промперегрева при пуске турбины после ночного простоя происходит постепенное расхолаживание горячих роторов, возможности быстрого пуска не реализуются и, кроме того, происходит пережог топлива.

Отсутствие запорной арматуры или обратного клапана на отсосе пара из первой камеры ПКУ ротора ЦВД также приводит к существенному дополнительному охлаждению ротора при открытии РОУ и пуске по типу НС-2 [4].

Оценка малоциклового усталостной прочности роторов. На основе полученных расчетных данных для НДС РВД и РСД после выполнения реконструктивно-ремонтных мероприятий выполнена оценка их малоциклового усталостной прочности.

Расчет проводился по условно-упругим напряжениям в тепловых канавках и галтелях дисков регулирующей ступени РВД и 13-й ступени РСД согласно РТМ [5]. Исходя из расчетных данных амплитуд напряжений допустимое число циклов до появления трещин ротора для зоны тепловых канавок ПКУ РВД при пусковых режимах по типу НС-2 и ХС равно $N_{доп} = 800-900$, для галтели – около 4000. При этом пуски НС-2 и ХС оказались приблизительно равноценным из-за низкой предтолчковой температуры свежего пара. В зоне тепловых канавок ротора ЦСД допустимое число циклов до появления микротрещины при пусках из холодного состояния равно 1100-1200, в канавке галтели диска 13-й ступени $N_{доп} = 4000$.

Необходимо отметить, что существенный вклад в поврежденность роторов ЦВД и ЦСД могут вносить режимы останова с забросом конденсата в межкорпусное пространство из дренажных трубопроводов и импульсных трубок, при которых условно-упругие напряжения (растягивающие) в роторах достигают 700-800 МПа, а соответствующее допустимое число циклов при этом снижается до 500-600.

Осмотры и контроль роторов турбоагрегатов перед ремонтами показал, что после 300 пусков в зонах тепловых канавок уплотнений и галтельных переходов дисков 13-й ступени РСД дефектов не обнаружено; на РВД этой же турбины после 909 пусков обнаружены две кольцевые трещины в тепловых канавках ПКУ. Ревизия и контроль роторов ЦВД и ЦСД турбоагрегатов показали, что после 1683 пусков зафиксировано большое количество дефектов, в том числе в канавке галтели диска 13-й ступени РСД.

ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты теплового, напряженно-деформированного состояния и малоциклового усталости роторов ЦВД и ЦСД турбин К-200-130-3, работающих на ТЭС Украины в полупиковых режимах и металла, позволяют сделать вывод, что после выполнения конструктивно-ремонтных мероприятий остаточный ресурс роторов может быть увеличен.

Для дальнейшего повышения надежности и долговечности роторов должны быть выполнены дополнительные мероприятия посредством внедрения упрощенной системы автоматизированного управления и диагностики; усовершенствования схемных решений подачи пара на уплотнения, оптимизации его температуры, отсоса; продолжительности предварительного прогрева.

Для более обоснованного выбора коэффициентов запаса в расчетах на малоцикловую усталость необходимо провести лабораторные исследования образцов металла Р2МА, а именно: определения механических и прочностных характеристик с учетом повреждаемости, коррозионной стойкости и трещиностойкости, скорости ползучести и предела длительной прочности Р2МА в объеме, определяемом специализированной организацией.

Литература

1. РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчет температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. – М.: Минтяжмаш, 1973. – 104 с.
2. Типовая инструкция по пуску из различных тепловых состояний и останову моноблока мощностью 200 МВт с котлом ТП-100 (для работы в режиме регулирования нагрузки энергосистем). – М: СПО ОРГРЭС, 1977. – 46 с.
3. *Лейзерович А. Ш.* Комплексный диагностический контроль температурного и термонапряженного состояния турбины в составе функций АСТД блока 300 МВт / А. Ш. Лейзерович, А. В. Антонович, В. И. Берлянд, А. В. Пожидаев, В. Г. Мовенко и др. // *Электрические станции.* – 1992. – № 10. – с. 32-38.
4. Повышение эффективности использования турбоустановок / Под ред. д-ра техн. наук А. А. Мадоаяна. – Киев: Техніка, 1984. – 119 с.
5. РТМ 108.021.103-85. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. – М.: Минэнерго маш, 1985. – 49 с.

© Черноусенко О.Ю., Антонович А.В., Кришук Н.Г., Космина М.В., Долгих М.О., 2007