

ISSN 0206-3131

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ ім. Г. С. ПИСАРЕНКА

*Міжнародний
науково-технічний збірник*

НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МАШИН І СПОРУД

*Международный
научно-технический сборник*

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МАШИН И СООРУЖЕНИЙ

*International
scientific & technical journal*

RELIABILITY AND LIFE OF MACHINES AND STRUCTURES

35' 2012

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ ім. Г. С. ПИСАРЕНКА

Міжнародний науково-технічний збірник

НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МАШИН І СПОРУД

Заснований в 1982 р. Видання відновлене в 2004 р.

Випуск 35

Київ – 2012

Засновники: Національна академія наук України
Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України
Асоціація “Надійність машин і споруд”

Видає: Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України

Редакційна колегія:

В. Т. Трошенко (головний редактор), **В. А. Баженов**, **М. І. Бобир**,
Л. В. Кравчук, **В. В. Матвєєв**, **В. І. Махненко**, **М. В. Новіков**,
Л. С. Новогрудський, **І. В. Ориняк**, **С. В. Романов**, **М. П. Рудницький**
(відповідальний секретар), **В. П. Стрельников**, **В. В. Харченко** (заст.
головного редактора), **М. Г. Чаусов**, **П. В. Ясній**

*Адреса редакції: 01014, Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2
Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка
Національної академії наук України*

Телефон: (044) 281 63 34

Факс: (044) 286 16 84

E-mail: <nadiynist@ipp.kiev.ua>

Реєстраційне свідоцтво серія КВ № 8773 від 24.05.2004 р.

Затверджено до друку вченою радою

Інституту проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України

Підп. до друку 20.03.12 р. Формат 70×108/16. Папір офс. Різогр. друк.

Ум. друк. арк. 17,59. Обл.-вид. арк. 10,42. Тираж 100 прим. Зам. № 6. Ціна договірна

Дільниця оперативного друку ІПМіцн. ім. Г. С. Писаренка НАН України

© Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, 2012

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

На основании результатов высокотемпературных испытаний на малоцикловую усталость образцов из роторной стали Р2МА, изготовленных из ротора паровой турбины, находившейся в эксплуатации 277 тыс. часов, выполнен анализ деградации механических свойств стали.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, деградация свойств металла, ротор паровой турбины.

Введение. К основным элементам турбин, определяющим их ресурс, относятся роторы цилиндров высокого и среднего давления, работающие в условиях, при которых в металле протекают необратимые изменения структуры и свойств и происходит накопление повреждений от ползучести и малоциклового усталости. При решении вопроса о продлении срока эксплуатации турбины сверх паркового ресурса выполняется комплекс исследований, в том числе неразрушающий контроль металла основных элементов для выявления дефектов и экспериментальной оценки накопленной поврежденности, а также исследование изменения структуры и деградации механических свойств металла основных элементов турбины [1].

Для оценки степени структурных превращений, прошедших в металле ротора в процессе его эксплуатации, а также для выбора необходимых для определения расчетного ресурса ротора комплекса служебных свойств стали проводятся исследования структуры и измерение твердости металла наиболее высокотемпературной зоны ротора - обода или полотна диска первой по ходу пара ступени. Главным преимуществом этих методов является то, что они являются неразрушающими. В то же время, они являются локальными и не позволяют оценить состояние материала в приповерхностной зоне ротора и в зоне, близкой к осевому каналу, который относят к высоконагруженным зонами цельнокованых роторов, в которых образование эксплуатационных трещин наиболее вероятно [1].

Целью данной работы было оценить степень деградации механических свойств металла ротора цилиндра среднего давления паровой турбины К-200-130, находившейся в эксплуатации 277 тыс. часов, на основании сравнительного анализа кривых малоциклового усталости материала.

Методика проведения испытаний на малоцикловую усталость. Испытания гладких цилиндрических образцов из роторной стали Р2МА на малоцикловую усталость проводили на универсальной электрогидравлической машине 3201 УЭ-20 при осевом растяжении-сжатии с треугольным симметричным циклом деформирования с контролем амплитуды полной деформации рабочей части образца ("жесткий" режим

нагружения) при температуре 500°C и частоте циклического нагружения 0,3 Гц [2]. В процессе нагружения производилась запись диаграмм циклического деформирования в координатах усилие – размах полной деформации.

Образцы были изготовлены из заготовок, вырезанных из двух зон ротора: первая – в районе обоймы №2 возле осевого канала, вторая – в районе обоймы №1 ближе к поверхности ротора перед диском 13-й ступени. При выборе формы и размеров образцов исходили из рекомендаций ГОСТ 25.502-79 [3] и ГОСТ 25.505-85 [4], регламентирующих основные соотношения размеров рабочей части образца, мощности испытательной машины и получения минимального градиента температуры по рабочей длине образца при проведении высокотемпературных испытаний. Нагрев образцов осуществляли с помощью малогабаритной печи электросопротивления. Неравномерность распределения температуры по длине рабочей части образца не превышала 22°C (т.е. до 4,4%). В процессе испытаний отклонения температуры не превышали ±3°C.

Критерием циклической долговечности образца в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-002-86 [5] принято появление и развитие на поверхности образца трещины усталости длиной от 0,5 до 2 мм. При достижении трещины усталости указанных размеров или разрушении образец снимали с испытаний.

Испытания стали на малоцикловую усталость проводили в диапазоне изменения амплитуд полных упругопластических деформаций рабочей части образца (ϵ_a) от 0,12% до 1,5 % в диапазоне долговечностей от 80 до 10000 циклов. Для исследуемых материалов и данного диапазона изменений деформаций рабочей части образца максимальные значения усилий достигали 22 кН. При этом напряжения в образце составляли до 440 МПа.

Результаты испытаний образцов из роторной стали P2MA. Кривая малоциклового усталости роторной стали P2MA в исходном состоянии [6], полученная по результатам испытаний образцов при изотермическом жестком режиме нагружения (температура 500°C) при симметричном цикле осевого растяжения-сжатия, показана на рисунке (где N – число циклов нагружения до разрушения, ϵ_a – амплитуда деформации образцов). На этом же рисунке представлены данные испытаний этой же стали после эксплуатации в течение 277 тыс. ч. при температуре 500°C.

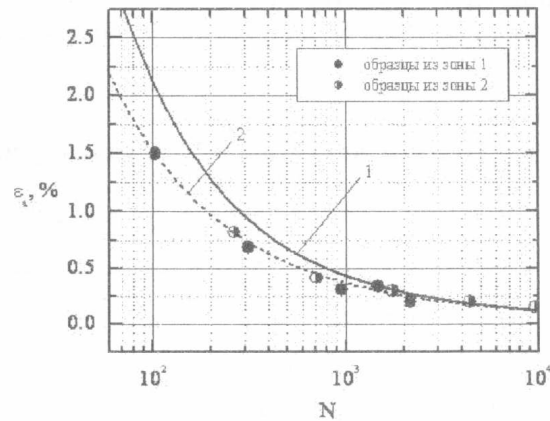
Кривые малоциклового усталости стали в исходном состоянии и после наработки были аппроксимированы уравнением типа Баскина-Коффина-Мэнсона [7]:

$$\epsilon = \epsilon_p(N)^c + \epsilon_u(N)^b, \quad (1)$$

где ϵ_p и ϵ_u – коэффициенты степенных функций, N – число циклов до разрушения образца, c и b – показатели степени. Коэффициенты и показатели степени уравнения (1) приведены в табл. 1.

Относительная погрешность аппроксимации экспериментальных данных с помощью обобщенной кривой усталости не превышала 22%, а с помощью уравнений для зон 1 и 2 – 19%. Как показал анализ

экспериментальных данных, различие усталостных свойств образцов из стали Р2МА, изготовленных из заготовок зоны 1 и 2, незначительно. Поэтому они были описаны единой (обобщенной) кривой малоциклового усталости.



Кривая малоциклового усталости стали Р2МА в исходном состоянии (1) и после наработки (2) при температуре 500°C.

Последнее обстоятельство позволяет использовать для анализа деградации механических свойств исследуемой стали, возникающей в результате длительной предыстории нагружения при высокой температуре, обобщенную кривую малоциклового усталости с коэффициентами уравнения типа Баскина-Коффина-Мэнсона, приведенными в табл. 1 (кривая показана на рисунке).

Таблица 1

Параметры уравнения кривых усталости стали Р2МА

Состояние материала	ε_p	C	ε_u	b
Исходное состояние	1,43517	-0,3114	84,01856	-0,8348
После наработки (обобщенная кривая)	1,26899	-0,2972	43,3922	-0,776
После наработки (зона 1)	1,08505	-0,2802	125,22967	-0,9999
После наработки (зона 2)	0,87112	-0,5501	16,36824	-0,5447

Для удобства сравнительного анализа деградации механических свойств исследуемой стали в процессе длительной эксплуатации, результаты испытаний представлены в табличном виде. Анализ деградации свойств металла проводился как по числу циклов до разрушения (N) при одинаковых амплитудах деформации (ε_a), так и по амплитуде деформации при одинаковых значениях количества циклов до разрушения.

В табл. 2 приведены результаты сравнения числа циклов до разрушения стали в исходном состоянии ($N_{исх}$) и после наработки ($N_{нараб}$) при определенных значениях амплитуды деформации в диапазоне изменения

последней от 0,12 до 2,14% (здесь и далее индекс *исх* означает, что материал в исходном состоянии; индекс *нараб* – после длительной эксплуатации). Как видно, долговечность стали Р2МА после наработки по результатам испытания образцов снизилась на 7...38% в рассматриваемом диапазоне амплитуд деформации. При этом относительно более интенсивное снижение долговечности наблюдается с ростом амплитуды деформации.

Таблица 2

Оценка деградации свойств стали Р2МА по числу циклов

$\epsilon_a, \%$	$N_{исх}$	$N_{нараб}$	$((N_{исх}-N_{нараб})/N_{исх}) \times 100, \%$
2,140	100	62	38,0
1,284	200	132	34,0
0,787	400	280	30,0
0,599	600	434	27,7
0,496	800	507	36,6
0,430	1000	757	24,3
0,282	2000	1614	19,3
0,191	4000	3440	14,0
0,155	6000	5309	11,5
0,134	8000	7278	9,0
0,120	10000	9315	6,9

В табл. 3 приведены результаты сравнения амплитуд деформации образцов в исходном состоянии ($\epsilon_{исх}$) и после наработки ($\epsilon_{нараб}$) при одинаковых значениях числа циклов до разрушения образцов в диапазоне изменения последнего от 10^2 до 10^4 циклов. Как видно, снижение амплитуды деформации, при которой сталь способна выдержать заданное число циклов нагружения, находится в пределах от 3 до 28%.

Таблица 3

Оценка деградации свойств стали Р2МА по деформации

N	$\epsilon_{исх}, \%$	$\epsilon_{нараб}, \%$	$((\epsilon_{исх}-\epsilon_{нараб})/\epsilon_{исх}) \times 100, \%$
100	2,140	1,540	28,0
200	1,284	0,974	24,1
400	0,787	0,629	20,1
600	0,599	0,493	17,7
800	0,496	0,416	16,1
1000	0,430	0,367	14,7
2000	0,282	0,252	10,6
4000	0,191	0,177	7,3
6000	0,155	0,146	5,8
8000	0,134	0,128	4,5
10000	0,120	0,116	3,3

Результаты, приведенные в табл. 2 и 3, были получены на основании вычислений с помощью аппроксимационных кривых малоциклового усталости для данной стали.

Анализ результатов испытаний. Важным для анализа характера и скорости деградации механических свойств роторных сталей при эксплуатации является ответ на вопрос: какой из эксплуатационных факторов (статические и динамические нагрузки, длительное температурное воздействие, скорость охлаждения при остановке турбины) и в какой степени влияет на состояние сталей. Экспериментальные данные, полученные в рамках настоящего исследования, не позволяют в полной мере ответить на этот вопрос. Поэтому при дальнейшем анализе были использованы литературные данные.

В работе [8] приведены результаты испытаний материала ротора ЦСД турбины К-200-130 (сталь Р2МА), бывшей в эксплуатации 54740 ч. (240 пусков, 120 – из холодного состояния). Из сопоставления механических свойств образцов, изготовленных из верхней зоны диска 14-й ступени (рабочая температура 518°C) и 18-й ступени (рабочая температура 388°C) можно заключить, что основным внешним фактором, влияющим на изменение свойств металла ротора, является температура. Чем выше рабочая температура, тем скорее происходит снижение предела прочности, предела текучести и пластичности роторной стали. Даже относительно небольшая разница температур (130°C) на 14-й и 18-й ступенях ротора на длительном периоде эксплуатации отражается на свойствах стали.

В табл. 4 приведены механические характеристики образцов, изготовленных из дисков 14-й и 18-й ступеней ротора после наработки и из этого же ротора в исходном состоянии, при температурах 20 и 550°C (здесь σ_b – предел прочности; $\sigma_{0.2}$ – предел текучести; δ – относительное удлинение). Как видно, изменение пределов прочности и текучести бывшей в эксплуатации стали по отношению к ее исходному состоянию в большей мере проявляется при температуре 550°C. При этом наибольшее снижение рассматриваемых механических характеристик (до 19 и 22%, соответственно) наблюдается на образцах, изготовленных из 14-й ступени. Несколько меньше это снижение для стали 18-й ступени (до 15 и 14%, соответственно), что подтверждает предположение об определяющем влиянии температуры эксплуатации ротора на скорость деградации механических свойств роторной стали.

Данное предположение подтверждает и прямой эксперимент с роторной сталью в исходном состоянии, подверженной старению при температурах 20 и 550°C в течение 5000 и 10000 ч. (табл. 5). Увеличение времени старения роторной стали, а также температуры, при которой это старение происходит, приводит к монотонному снижению механических характеристик: предела прочности – до 10% при температуре 20°C и до 16% при температуре 550°C, а предела текучести – 9% при температуре 20°C и до 15% при температуре 550°C.

Влияние температуры эксплуатации на механические характеристики роторной стали связывается с изменением бейнитной структуры стали Р2МА [8]. При длительном действии высокой температуры ориентация бейнита

нарушается, по границам зерен образуется слой толщиной около 5 мкм, обедненный карбидами, что приводит к снижению механических характеристик стали Р2МА.

Таблица 4

Механические свойства стали Р2МА по результатам испытаний образцов из разных зон ротора [8]

Зона ротора	t, °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Хвостовик (исх. матер.)	20	736-747	598	18,7
18-я ступень		696-702	528-540	17,3-20,7
14-я ступень		658-667	488-495	15,3-16,0
Хвостовик (исх. матер.)	550	481-486	456-468	16,7-17,3
18-я ступень		411-472	393-453	16,0-16,7
14-я ступень		391-441	356-390	17,2-20,3

Таблица 5

Влияние старения на механические свойства стали Р2МА в исходном состоянии [8]

Время старения, ч	t, °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
0	20	736-747	598	18,7
5000		698-706	583-585	12,7-14,0
10000		667-676	540-548	16,7-17,3
0	550	481-486	456-468	16,7-17,3
5000		-	-	-
10000		403-424	388-414	14,0-15,0

Несмотря на заметное снижение характеристик статической прочности роторной стали Р2МА при длительном воздействии высокой температуры, исследования малоциклового усталости образцов из различных зон ротора показали незначительное влияние длительной эксплуатации ротора при высоких температурах на циклическую прочность. Разброс результатов экспериментов, приведенных на образцах из различных зон ротора и подвергавшихся действию разных температур оказался в пределах погрешности экспериментов [8].

Как отмечается в [9], особенностью стали 25Х1М1Ф (низкотемпературная часть РСД турбины К-200-130, отработавшей 54000 ч.) является увеличение наклона кривой малоциклового усталости в области высоких деформаций, что согласуется с результатами экспериментов, полученных в рамках настоящей работы.

Таким образом, анализ литературы подтвердил, что полученные в работе результаты не противоречат ранее проведенным исследованиям деградации механических свойств роторных сталей.

Выводы. Длительная эксплуатация роторной стали бейнитного класса Р2МА в условиях силового и температурного воздействия приводит к снижению предела текучести и прочности, равно как и усталостных свойств данной стали. Особенность снижения их циклической прочности заключается в зависимости степени деградации от амплитуды деформации: чем выше амплитуда деформации, тем больше снижение циклической прочности по отношению к исходному состоянию стали. При относительно малых деформациях циклическая прочность исходной и бывшей в длительной эксплуатации стали практически не отличаются. Для исследованной роторной стали при температуре 500°C в диапазоне амплитуд деформаций до 0,5% деградация циклической прочности за 277 тыс. ч. эксплуатации не превысила установленных нормативными документами пределов.

Основным эксплуатационным фактором, снижающим характеристики статической и циклической прочности роторной стали, является длительное воздействие высокой температуры.

Сравнительная экспериментально-аналитическая оценка деградации механических свойств металла ротора среднего давления паровой турбины К-200-130 показала, что снижение долговечности стали Р2МА в диапазоне амплитуд деформации от 0,12 до 2,14% составило соответственно от 7 до 38%. При этом деградация данной стали по деформации при сопоставимых долговечностях составила от 3 до 28%. Таким образом, снижение циклической долговечности образцов из стали Р2МА в результате длительной эксплуатации в условиях интенсивного термомеханического нагружения не превышает 40% во всем исследованном диапазоне амплитуд деформаций, а снижение циклической прочности по деформации не превышает 17% в диапазоне амплитуд деформации до 0,5%.

Summary

Based on the results of high-temperature tests on the low-cyclic fatigue of the rotor steel R2MA specimens, produced from the shaft of steam turbine after being in service 277 thousand hours, the analysis of degradation of mechanical properties of this steel as regard for its initial state is performed.

Keywords: low-cycle fatigue, degradation of metal properties, steam turbine rotor.

Резюме

На основі результатів високотемпературних випробувань на малоциклову втому зразків із роторної сталі Р2МА, виготовлених із ротора парової турбіни з терміном експлуатації 277 тис. годин, проведено аналіз деградації її механічних властивостей.

Ключові слова: малоциклова втома, деградація властивостей металу, ротор парової турбіни.

1. СО 153-34.17.440-2003. Инструкция по продлению срока эксплуатации паровых турбин сверх паркового ресурса. – Москва: ЦПТИ ОРГРЕС, 2003. – 79 с.
2. Гопкало А. П., Чернявский А. А. Методика экспериментальных исследований циклической трещиностойкости материалов в неизотермических условиях // Пробл. прочности. – 2005. – № 2. – С. 151 – 158.
3. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – Введен 01.01.81.
4. ГОСТ 25.505-85. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении. – Введен 01.01.86.
5. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989, – 525 с.
6. РД 10-577- 03. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 13 с.
7. Циклические деформации и усталость металлов. В 2-х т. Том 1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 258 с.
8. Трухний А. Д., Мартынов Ю. Д., Гинзбург Э. С., Резинских В. Ф. Исследование сопротивления малоцикловой усталости металла ротора длительно работавшей турбины // Теплоэнергетика. – 1982. – № 6. – С. 57 – 60.
9. Балина В. С., Митрофанов Е. А., Хейн Е. А., Житкявичене В. П., Медекша Г. Г. Исследование малоцикловой усталости роторной и корпусной сталей // Теплоэнергетика. – 1981. – № 12. – С. 50 – 52.

Поступила 03.06.2011