

# Металловедение и термическая обработка

УДК 669.14.018.44:620.19

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА ТРУБ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРОПРОВОДОВ ИЗ Cr-Mo-V СТАЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С.А. Лоскутов<sup>1</sup>, Ю.А. Букин<sup>2</sup>, Ю.Д. Корягин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск;

<sup>2</sup> ООО «ЗАПСИБОРГРЭС», г. Тюмень

Дан обзор структурных изменений и развития поврежденности металла теплоэнергетического оборудования, эксплуатирующегося в условиях деформации ползучести при высокой рабочей температуре. В качестве альтернативы замене исчерпавшего ресурс работоспособности металла рассмотрено применение восстановительной термической обработки (ВТО). Описана технология проведения ВТО непосредственно в условиях электростанции без демонтажа паропровода с использованием индукционного нагрева электротермической установкой повышенной частоты. Впервые проведен промышленный эксперимент по применению данного метода для продления срока эксплуатации металла гибов из стали 12Х1МФ двух паропроводов энергоблоков мощностью 200 МВт, превысивших нормативный срок службы (210 тыс. ч), с поврежденностью выше предельно допускаемого НТД уровня. Полученные результаты исследования микроповрежденности металла до и после ВТО свидетельствуют о реанимации структуры и залечивании пор ползучести в виде цепочек, образовавшихся в процессе длительной высокотемпературной эксплуатации. Комплексное исследование структуры, микроповрежденности, кратковременных механических свойств и длительной прочности, выполненное в лабораторных условиях на макетных гибках, показало обеспечение нормативных запасов прочности и возможность продления срока эксплуатации восстановленного металла на последующие 100 тыс. ч при номинальных рабочих параметрах пара.

*Ключевые слова:* Cr-Mo-V стали, микроповрежденность, восстановительная термическая обработка.

В современных теплоэнергетических установках с рабочими параметрами пара 545–560 °С и 14–25 МПа основным материалом для элементов паропроводов являются низколегированные стали перлитного класса 12Х1МФ и 15Х1М1Ф.

В длительно работающем металле паропроводов из этих сталей под постоянным воздействием напряжений (от внутреннего давления, компенсации тепловых перемещений и др.) и рабочей температуры развивается пластическая деформация ползучести. Вызванные этим процессом скольжение и переползание дислокаций, а также межзеренное проскальзывание приводят к накоплению в металле поврежденности в виде порообразования, преимущественно по границам зерен, и дальнейшего его развития на микро-, а затем и макроуровне.

Изучению взаимосвязи поврежденности с деформацией ползучести посвящено множество работ зарубежных и отечественных исследователей, в результате которых прослежена кинетика развития порообразования и микротрещин и разработаны шкалы для оценки степени их развития.

На рис. 1 показана шкала Б. Нойбауэра [1], используемая в качестве основы для ряда других классификаций, применяемых на электростанциях Германии.

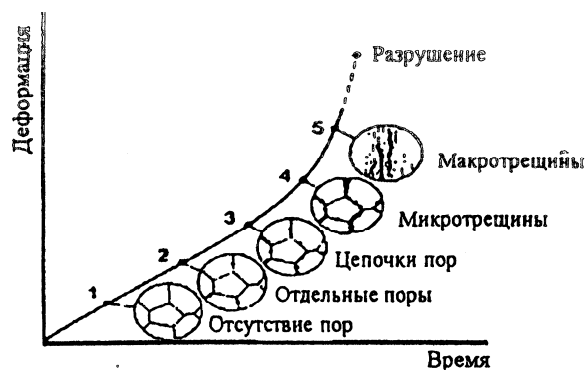


Рис. 1. Схематическое изображение шкалы повреждаемости Б. Нойбауэра

Из рис. 1 видно, что на стадии установившейся скорости ползучести в металле отсутствуют или имеются единичные поры. При изменении скорости деформирования, с увеличением ее, происходит образование цепочек пор, развивающихся в дальнейшем в микро-, а на стадии предразрушения – в макротрещины.

Развитие микроповрежденности на различных стадиях классической кривой деформации ползучести [2] представлено на рис. 2.

Описание указанной шкалы дано в табл. 1.

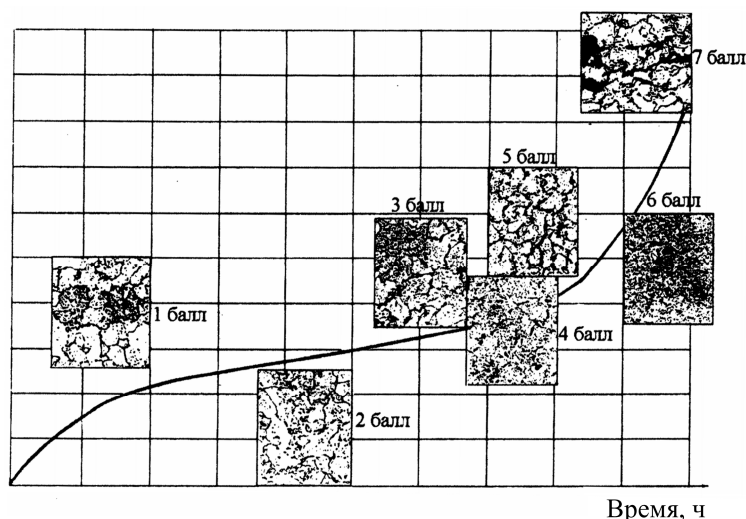


Рис. 2. Характер накопления поврежденности по мере истощения ресурса эксплуатации

Таблица 1

Шкала микроповрежденности сталей перлитного класса

№ балла	Характер поврежденности
1	Поры отсутствуют
2	Единичные поры
3	Множество пор без определенной ориентации
4	Множество пор, ориентированных по границам зерен
5	Цепочки пор по границам зерен
6	Слившиеся цепочки, микротрещины, не выявляемые при УЗК
7	Макротрещины, выявляемые при УЗК

Основываясь на результатах исследований связи долговечности металла с уровнем микроповрежденности, был выбран новый подход к проблеме прогнозирования ресурса длительно работающего оборудования для тепловой энергетики, а в типовую инструкцию [3] в качестве обязательно-го введен контроль методом реплик.

В связи с тем, что на работоспособность металла труб и других деталей и развитие в них повреждаемости оказывают влияние многочисленные факторы (температура, напряженное состояние, срок службы, геометрия – толщина стенки, овальность, искажение формы сечения при гнущем, структура и свойства материала и пр.), большую актуальность и важное практическое значение приобретает накопление опыта исследования состояния металла в реальных условиях эксплуатации.

В настоящей статье приводятся результаты исследования микроповрежденности металла более 1000 гибов и прямых труб, выполненного непосредственно на паропроводах электростанций неразрушающим методом контроля с использованием пластиковых реплик, и более 20 гибов, вырезанных из паропроводов при замене, – в лабораторных условиях.

Исследование проводилось в основном на гихбах труб главных паропроводов блоков 800 МВт

(параметры пара 545 °С, 25 МПа) из стали 15Х1М1Ф типоразмера  $\varnothing 465 \times 75$  мм и блоков 200 МВт (параметры пара 545 °С, 14 МПа) из стали 12Х1МФ типоразмерами  $\varnothing 325 \times 38$  мм и  $\varnothing 219 \times 25$  мм.

Анализ полученных данных показал, что установить прямую зависимость микроповрежденности от какого-либо отдельного фактора не представлялось возможным из-за отсутствия в большинстве случаев в полном объеме данных по состоянию металла гибов и условиям их эксплуатации.

Так, на гихбах блоков 800 МВт с нормативным (парковым) ресурсом 110 тыс. ч, при близких значениях наработки (118–128 тыс. ч) обнаружена поврежденность в виде единичных (рис. 3, а), множественных пор (рис. 3, б) или цепочек (рис. 3, в).

Следует сказать, что цепочки пор (поврежденность 5 балла) на рис. 3, в были выявлены на переходе от прямого участка к гнущему, на вершине этого же гихба поврежденность не превышала 3 балла (рис. 3, г). Последнее свидетельствует о влиянии искажения формы сечения гихба на развитие в нем микроповрежденности и необходимости ее контроля во всех указанных точках.

После 124 тыс. ч на таких же гихбах с толщиной стенки в растянутой зоне 68,5 мм зафиксирована поврежденность 2 балла, а с толщиной 72 мм – 4 балла.

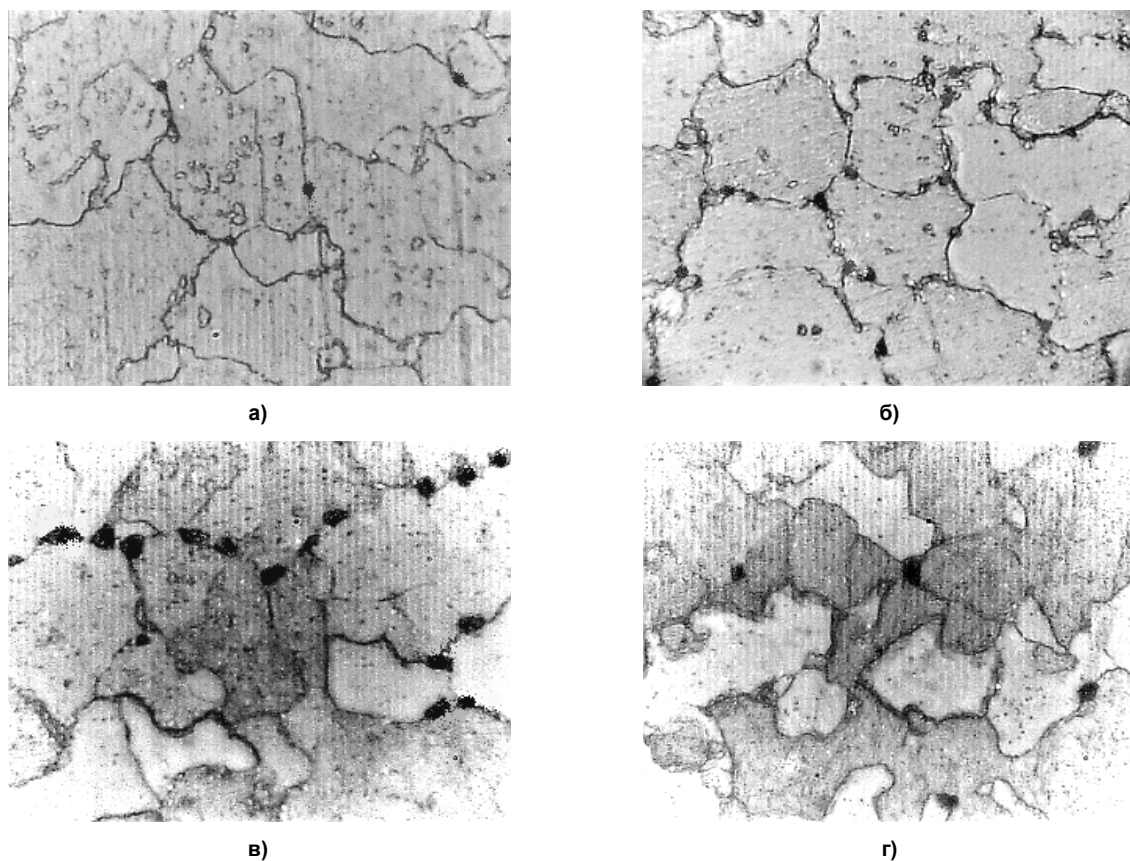


Рис. 3. Микроструктурагиба трубы главного паропровода блока 800 МВт после эксплуатации в течении 128 тыс. ч ( $\times 800$ )

Выявляемое различие в поврежденности гибов может быть объяснено разным уровнем действующих в них напряжений.

При контроле одного из гибов  $\varnothing 325 \times 38$  мм (парковый ресурс 210 тыс. ч) паропровода блока 200 МВт после 241 тыс. ч эксплуатации обнаружена микроповрежденность 5–6 балла, что превышало допустимый НТД уровень (4 балл). Исследованием этогогиба после его вырезки была подтверждена данная микроповрежденность.

На рис. 4, а показано наличие микротрещин и множество цепочек пор у поверхности в растянутой зонегиба, (6 балл поврежденности), а на рис. 4, б – множество цепочек пор (5 балл), распространившихся на глубину до 4 мм. Единичные микропоры наблюдались на глубине стенки до 8 мм.

В металле прямого участка данногогиба выявлена поврежденность в виде единичных пор ползучести на глубине до 4 мм, оцениваемая 2 баллом.

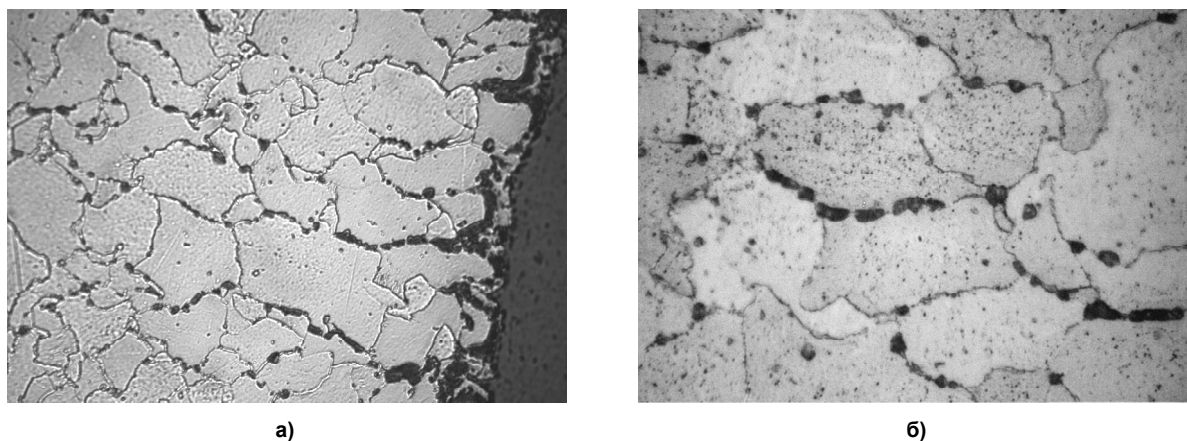


Рис. 4. Микроструктура растянутой зоныгиба трубы паропровода из стали 15X1M1Ф после 241 тыс. ч эксплуатации: а)  $\times 500$ ; б)  $\times 1000$

Таблица 2

Результаты определения механических свойств исследованного гиба

Наименование	Температура испытания, °С	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	НВ
	20	520	385	21,5	60	28	162
	550	315	280	22,5	66	115	
	20	500	310	27,5	68	79	146
	550	285	220	33,0	73	124	
Требования к стали 12Х1МФ							
ТУ 14-3-460-75	20	450–650	≥280	≥19	≥50	≥50	–

Таблица 3

Механические характеристики металла исследуемых гибов

№ гиба	Место вырезки	Температура испытания, °С	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	НВ
1	Растянутая зона	20	460	300	29,0	71,0	140	137
		545	250	210	28,0	66,0	114	–
	Прямой участок	20	465	26,0	31,0	69,0	170	126
		545	250	175	33,0	70,0	205	–
2	Растянутая зона	20	540	340	29,0	76,0	89	151
		545	290	250	32,0	77,0	105	–
Требования ТУ 14-3-460-75 на сталь 12Х1МФ		20	450– 650	≥280	≥19	≥50	≥50	–

Исследованием шлифов, вырезанных по толщине стенки указанного гиба, подтверждена достоверность контроля микроповрежденности неразрушающим методом.

В табл. 2 приведены результаты определения механических свойств при комнатной и рабочей температурах растянутой и прямой зон исследованного гиба.

Согласно [3], к эксплуатации сверх паркового ресурса допускаются элементы оборудования, металл которых удовлетворяет принятым критериям при положительных результатах на прочность.

При проведении УЗТ гибов фиксируется минимальная толщина стенки. Использование в расчете полученных данных может привести к получению коэффициента запаса прочности ниже нормативного значения, вследствие чего возможна перебраковка гибов, сохраняющих по состоянию металла свою дальнейшую работоспособность при существующих условиях эксплуатации.

Следует отметить, что утонение стенки в локальной зоне незначительно влияет в целом на конструктивную прочность гиба.

В связи с вышесказанным было проведено исследование фактического состояния металла двух гибов  $\varnothing 219 \times 25$  мм, отработавших на блоках 200 МВт 189 536 и 232 393 ч и замененных из-за пониженной толщины стенки. Парковый ресурс данных гибов из стали марки 12Х1МФ при расчетных параметрах 545 °С и 14 МПа составляет 165 тыс. ч.

Механическим испытаниям подвергался металл растянутых частей гибов, а также прямого участка гиба № 1. Средние значения механических характеристик приведены в табл. 3.

Прочностные, пластические свойства и ударная вязкость всех зон исследуемых гибов удовлетворяют требованиям технических условий для стали 12Х1МФ в состоянии поставки. Отметим, что у гиба № 1 предел текучести в растянутой зоне отличается более высокими значениями по сравнению с прямым участком, а ударная вязкость при рабочей температуре в растянутой зоне ниже соответствующих значений образцов из прямого участка.

Микроповрежденность металла, выявленная в растянутой зоне гибов в виде единичных пор, соответствует 2 баллу шкалы Приложения Ж ОСТ 34-70-690-96 при допустимой, согласно требованиям [3], не выше 4 балла.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при удовлетворительных результатах обследования гибы с пониженным коэффициентом запаса прочности могут обеспечивать надежность дальнейшей эксплуатации при обязательном контроле микроповрежденности металла.

### Вывод

На основании проведенного исследования следует, что контроль микроповрежденности металла высокотемпературных элементов энергетического оборудования является наиболее объективным, информативным и надежным средством диагностики его фактического состояния в процессе длительной эксплуатации.

### Литература

1. Петреня, Ю.К. Физико-механические основы континуальной механики повреждаемости / Ю.К. Петреня. – СПб.: АООТ «НПО ЦКТИ», 1997. – 147 с.

## Металловедение и термическая обработка

2. Гладштейн, В. И. *Микрповреждаемость металла высокотемпературных деталей энергооборудования* / В.И. Гладштейн. – М.: Машиностроение, 2014. – 363 с.

3. РД 10-577-2003. *Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций*. – М.: СПО ОБТ, 2003. – 93 с.

Лоскутов Сергей Алексеевич, аспирант кафедры металловедения и термической обработки металлов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sergantik@74.ru.

Букин Юрий Александрович, начальник лаборатории металлов, ООО «ЗАПСИБОРГРЭС», г. Тюмень; bukin.37@mail.ru.

Корягин Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой металловедения и термической обработки металлов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; koriaginyd@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 10 ноября 2014 г.

## PROCESSES OF FORMATION AND PREVENTING BURNS ON STEEL CASTINGS

S.A. Loskutov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, sergantik@74.ru,

Yu.A. Bukin, LLC "ZAPSIBORGRES", Tyumen, Russian Federation, bukin.37@mail.ru,

Yu.D. Koryagin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, koriaginyd@susu.ac.ru

The paper gives an overview of structural changes and the development of metal damage of power equipment operating in creep conditions at a high operating temperature. Alternatively, the use of regenerative heat treatment (RHT) is considered replacing the depleted metal resource efficiency. The RHT technology is described to be used in industrial conditions without removing the steam line and using induction heating by the electrothermal high frequency installation. For the first time the industrial experiment was made on the application of this method to extend the service life of metal bends of steel steam pipelines of two steam generating units of 200 MW, which exceeded the standard service life (210 thousand hours) with the damage of more than the maximum permissible level specified by technical norms. The results of the study of the microscopic metal damage before and after the RHT indicate resuscitation patterns and healing creep pores in the form of chains formed during the prolonged high-temperature operation. A comprehensive study of the structure, microdamage, short-term mechanical properties and durability, made in the laboratory on model bends showed regulatory strength reserves and the possibility of extending the service life of the restored metal for the next 100 thousand hours with nominal steam operating parameters.

*Keywords: Cr-Mo-V steels, microdamage, regenerative heat treatment.*

### References

1. Petrenya Yu. K. *Fiziko-mekhanicheskie osnovy kontinual'noy mekhaniki povrezhdaemosti* [Physical and Mechanical Basics of Continuum Mechanics of Damage]. St. Petersburg, AOOT "NPO TsKTI" Publ., 1997. 147 p.

2. Gladshyteyn V. I. *Mikropovrezhdaemost' metalla vysokotemperaturnykh detaley energooborudovaniya* [Microdamage of the Metal of High-Temperature Parts of Power Equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 363 p.

3. РД 10-577-2003. *Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций* [RD 10-577-2003. Typical Manual for the Control of Metal and Prolongation of Service Life of Basic Elements of Boilers, Turbines and Pipelines of Heat Power Plants]. Moscow, SPO ОБТ Publ., 2003. 93 p.

Received 10 November 2014

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Лоскутов, С.А. Исследование микрповрежденности металла труб высокотемпературных паропроводов из Cr-Mo-V сталей тепловых электростанций при длительной эксплуатации / С.А. Лоскутов, Ю.А. Букин, Ю.Д. Корягин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 24–28.

### REFERENCE TO ARTICLE

Loskutov S.A., Bukin Yu.A., Koryagin Yu.D. Study of Metal Microdamaging of High-Temperature Steam Pipelines Made of Cr-Mo-V Steels. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 24–28. (in Russ.)