

Таблица 1. Показатели качества обработки после шлифования и МАО

| Вид обработки | Величина размерного съема, мкм | Прямолинейность образующей, мкм | Допуск круглостности, мкм | Шероховатость поверхности, Ra ₂ , мкм | Прилегание конусных поверхностей, % | Биение рабочих конусов, мкм |
|---------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------------|
| Шлифование | 100-150 | 1,6 | 4 | 0,4 | 90 | 8 |
| МАО | 30-50 | 1,2 | 2 | 0,12 | 95 | 5 |

Заключение.

В результате проведения комплекса работ по прогнозированию возможности применения МАО и его практического использования для финишной обработки наружных конических поверхностей (концы оправок 30 ГОСТ 836-72) получены требуемые согласно данному ГОСТу показатели, что указывает на эффективность процесса МАО для этой обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов М. И. Техническая механика. - М.: Высшая школа, 1990. - 352 с.
2. Горохов В. А. Технология обработки материалов. - Мн.: Беларуская навука, 2000. - 433 с.
3. Скворчевский Н. Я., Федорович Э. Н., Ящерицын П. И. Эффективность магнитно-абразивной обработки. - Мн.: Навука і тэхніка, 1991. -216 с.

УДК 621.923

В.Рудзинкас, О.Чернашеюс

**ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
МЕТАЛЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Вильнюсский технический университет им.Гедиминаса
Вильнюс, Литва*

1. ВВЕДЕНИЕ

Потенциально опасное оборудование – это такое оборудование, которое за счёт накопленной в нём энергии или процессов происходящих в нём, может нанести ущерб хозяйству и природе и стать причиной гибели людей. Отнесение оборудования к категории потенциально опасного и порядок управления в сфе-

ре надзора за данным оборудованием устанавливается Правительством Литовской Республики. Большую часть потенциально опасного оборудования составляют энергетические, паровые и водогрейные котлы.

Надёжная эксплуатация данного оборудования в большей степени определяется безаварийным функционированием трубопроводных систем. Определение свойств жаропрочности металла паропроводных труб из перлитных сталей после различных сроков эксплуатации на тепловых электростанциях приобретает в настоящее время особенно важное значение. Оно обусловлено необходимостью оценки остаточного ресурса паропроводов ТЭС, которые уже выработали свой расчётный срок службы, но продолжают находиться в эксплуатации. Таких объектов в Литве несколько.

Несмотря на то, что многие энергоустановки отработали к настоящему времени 200-250 тыс. ч. и уже исчерпали свой проектный ресурс, они находятся в удовлетворительном состоянии. Это обусловлено их работой на пониженной температуре пара, своевременным проведением инспекции состояния металла, ремонтов и реновации. В настоящее время постоянная инспекция требуется не только для элементов, испытывающих наибольшие напряжения, но и для работающих в пределах допускаемых напряжений.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Трубопроводы современных тепловых электростанций представляют собой сложные пространственные системы, состоящие из прямых труб, гибов, тройников, конических переходов, компенсаторов тепловых расширений, опор, подвесок, запорной, регулирующей и предохранительной арматуры. Они связывают элементы тепловой схемы электростанции - котлы, турбины, вспомогательное оборудование. По ним транспортируются в основном вода и пар.

Как показывают исследования многих образцов металла паропроводов, проработавших длительное время при высоких температурах, паропроводы имеют запас по длительной прочности. Это связано с эксплуатацией паропроводов при пониженных температурах (по сравнению с теми, на которые разрабатывались стали) и с "плюсовыми" запасами по толщине стенки. Вследствие этого числовые значения расчётного ресурса работы, использованные при проектировании, приняты с запасом и продление срока службы металла технически возможно и оправдано. Это особенно важно в силу того, что в настоящее время в Литовской республике планируется закрытие Игналинской АЭ и в скором времени востребуеться максимальное использование всех возможностей оборудования тепловых электростанций, в том числе и возможностей металла паропроводов.

Однако известны многочисленные случаи повреждения элементов паропроводов задолго до исчерпания их расчётного ресурса. Каждое такое повреждение создает аварийную ситуацию и весьма опасно для электростанции в целом. Из этого следует, что в условиях эксплуатации действуют факторы, способные как увеличить скорость потери свойств длительной прочности в зави-

симости от времени, так и удерживать ее на достаточно низком уровне. Таким образом, паропроводы можно продолжать эксплуатировать сверх установленного ресурса лишь при соблюдении определенных условий.

Основным условием, определяющим возможность продления срока службы паропроводов, является отсутствие претензий к металлу элементов паропровода с позиций металловедения и дефектоскопии. Однако проведение сплошного контроля металла и всех сварных стыков весьма трудоемкое и дорогостоящее мероприятие.

Гибы - наиболее уязвимые места трассы трубопровода. Металл гибов эксплуатируется в очень сложных условиях. Из-за неправильной формы поперечного сечениягиба, овальностигиба, возникают значительные, дополнительные напряжения. Которые в свою очередь возникают под действием внутреннего давления пара. Овальность трубы возникает в процессе изготовлениягиба. Фактические напряжения нагибах тем выше, чем больше его овальность, чем меньше радиусгиба, чем больше утоньшение стенки по растянутым при гибке волокнам, утолщение (увеличение радиуса кривизны в поперечном сечении по нейтральному волокну) [2, 4-6].

В статье рассмотрен комплекс вопросов, связанных с определением эксплуатационной надежности гибов паропровода. Представлены результаты исследования микроструктуры сталигиба. Исследовались различные областигиба. Также представлены результаты расчетагиба на малоциклическую термическую усталость.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Исследование изменения механических свойств стали в процессе эксплуатации

В процессе эксплуатации паропровода проводился периодический контроль механических свойств металла. Определялись следующие механические свойства: предел прочности, предел текучести, ударная вязкость, относительное удлинение и относительное сужение. Указанные свойства определялись по стандартным методикам при комнатной и повышенной (рабочей 545°С) температуре.

3.2 Металлографический анализ

В работе проводился металлографический анализ металла гибов находившихся долгое время в процессе высокотемпературной эксплуатации. Исследовался металл различных зонгиба: растягиваемых, сжимаемых, нейтральных слоев и прямого участкагиба с углом поворота на 90°.

3.3 Расчётгиба на длительную циклическую прочность

Желая продлить безопасную эксплуатацию энергетического оборудова-



Рис. 1. Пример разрушения гибов

ния тепловых электростанций была создана методика, в которой учитывается долговременная малоцикловая термическая усталость металла элементов оборудования. Для расчёта напряжений в элементах паропровода применялась программа ANSYS.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Результаты исследования изменения механических свойств стали в процессе эксплуатации

Механические свойства: предел прочности, предел текучести, ударная вязкость, относительное удлинение и относительное сужение определялись в начале эксплуатации паропровода, после 6765, 29572, 36537, 70229, 94942, 110000 часов эксплуатации. Результаты изменения механических свойств представлены на рис.2 и 1 табл. В процессе эксплуатации прослеживается уменьшение предела прочности и предела текучести, особенно ярко эта тенденция выражается в первые 40000 часов. В то же время пластические свойства несколько увеличиваются. (рис.2)

Таблица 1

Изменения твердости (при 20°С) стали 12Х1МФ и остаточной деформации элементов паропроводов в процессе эксплуатации

| Время, часов | 0 | 29572 | 70229 | 94942 |
|---------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Твердость, НВ | 143-168 | 130-175 | 135-146 | 145-160 |
| Деформация, % | 0 | 0.01-0.21 | 0.08-0.33 | 0.18-0.48 |

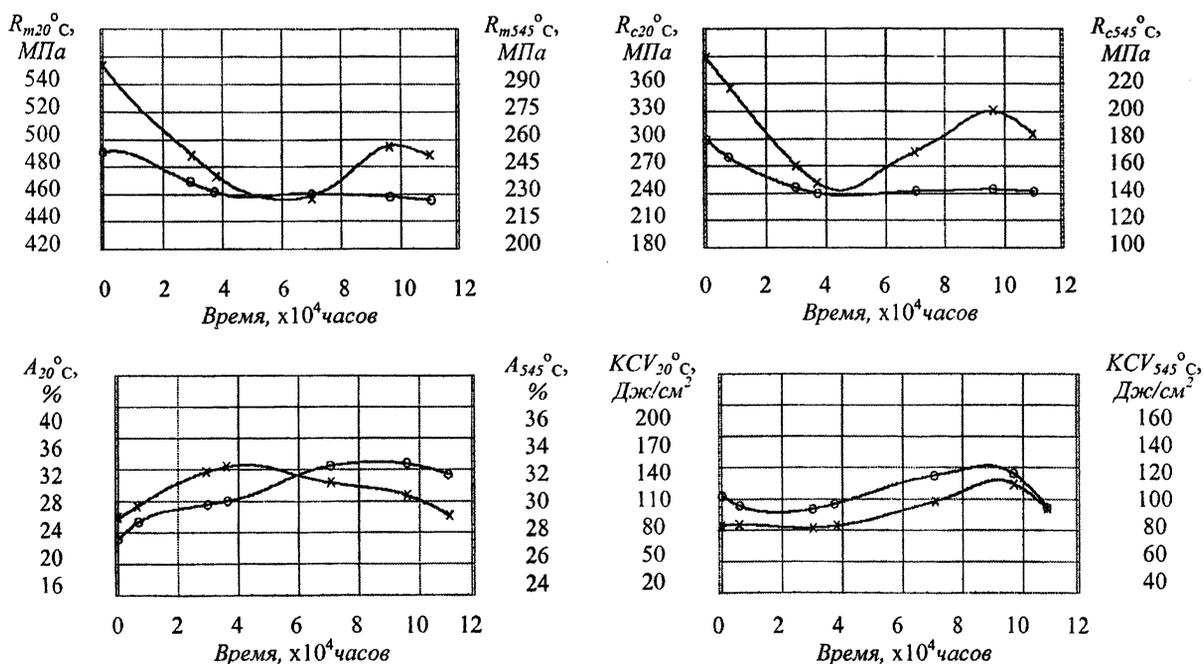
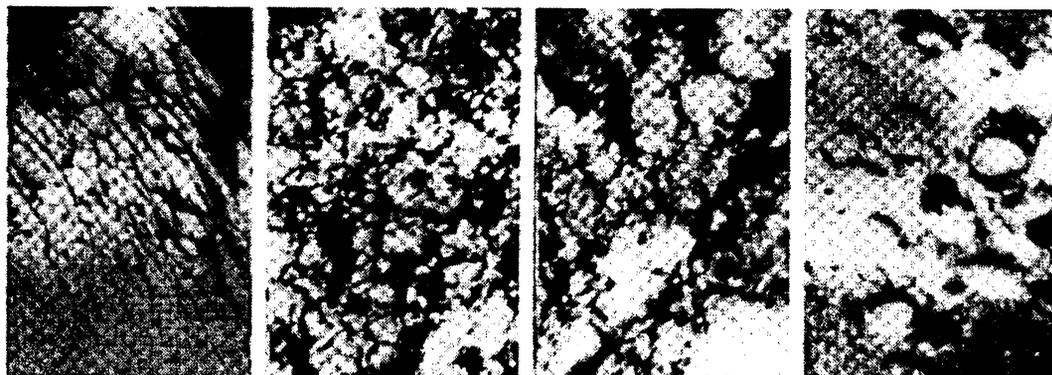


Рис. 2. Изменение механических свойств (при 20°С и при 545°С) стали 12Х1МФ в процессе эксплуатации

4.2 Результаты микроструктурного исследования гибов

В процессе длительной эксплуатации при высоких температурах и высоком давлении (температура пара 545°C, давление 14 МПа) структура стали претерпевает изменения. До эксплуатации структура низколегированной перлитной стали 12Х1МФ состоит из феррита и перлита или феррита, перлита и промежуточной составляющей бейнитного типа.

Дислокационная структура растягиваемых слоев металла представлена на рис. 3 а.



а) б) в) г)
Рис. 3. Дислокационная структура слоев металла ггиба

При анализе микроструктуры отдельные дислокации расположенные возле карбидов. Однородные границы дислокаций в объеме зерна феррита создают субграницы. Дислокационная структура растянутых слоев ггиба, была сформирована в процессе изготовления ггиба. Дислокационная микроструктура прямой части ггиба представлена на рис.3б. Дислокационные скопления обнаружены возле карбидов. Дислокационная микроструктура прямой части ггиба отличается от основной части прямого паропровода. Дислокационная микроструктура прямой части ггиба формируется в процессе изготовления ггиба и характеризуется большой плотностью дислокаций.

Дислокационная микроструктура сжимающих слоев металла (рис. 3 в) состоит из дислокационных скоплений, расположенных возле небольших карбидов. Из - за дислокационных скоплений в микрообъеме начинает формироваться сетчатая субструктура. Дислокационные скопления расположенные возле карбидов, в процессе долговременной эксплуатации могут трансформироваться в поры.

При исследовании дислокационной структуры нейтральных слоев ггиба обнаружено большое количество микропор (рис 3 г) и скоплений дислокаций возле карбидов. Размер пор достигает 0,15 - 0,3 мкм. Средняя плотность микропор достигает 5×10^8 1/см². Такое большое количество микропор в нейтральных слоях ггиба возникает при комбинированном напряжении, которое возникает из-

за овальности ггиба и диффузии вакансий в процессе эксплуатации. Скопления дислокаций в процессе эксплуатации трансформируются в микропоры.

Максимальное количество повреждений (скопление микропор) обнаружено в нейтральных слоях ггиба (рис. 3 г). Установлено, что скопления дислокаций возле карбидов появляются во всех частях ггиба. Но количество пор и их плотность в сравнении с нейтральными слоями ггиба мало.

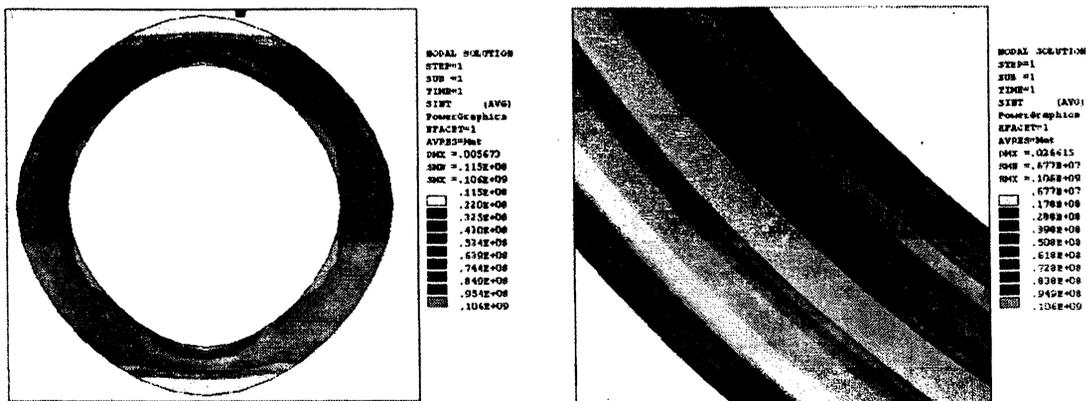
Выполнив микроструктурный анализ различных зон ггиба паропровода, долгое время находившегося в эксплуатации установлено, что при длительных малоцикловых нагрузках возникающих, под действием внутреннего давления и температуры, в металле паропровода происходят структурные изменения, в результате чего, появляются повреждения. Скорость протекания данных процессов очень сильно зависит от уровня действующих напряжений. Поэтому максимальное количество микропор обнаружено в нейтральной зоне ггиба, где, как подтвердили расчеты, уровень напряжений максимальный.

4.3 Результаты расчёта напряжённого состояния ггиба

Эксплуатационную надёжность паропроводов определяет надёжность колен, металл которых из-за особенностей геометрической формы колен работает в сложных условиях. В связи с этим определение напряжённого состояния таких колен особенно актуально.

В паропроводах используются гнутые колена, которые в процессе производства (гибка) получают овальность поперечного сечения. Используются колена с допустимой овальностью до 6%.

Используя математическую модель (МКЭ), установили распределение напряжений и деформаций для колен с овальностью 6 % (рис. 4).



а)

б)

Рис. 4. Изменение интенсивности напряжений (МПа) в колене, когда овальность равна 6 %:

а) – поперечное сечение колена;

б) – продольное сечение колена

При воздействии внутреннего давления колена овальной формы рас-

прямляется, поперечное сечение трубы пытается трансформироваться в форму правильного круга. В поперечном сечении трубы возникают дополнительные напряжения, которые увеличиваются с увеличением овальности. Дополнительные напряжения растяжения возникают на внутренних и наружных поверхностях нейтральной зоны колена. Именно в этих местах наиболее часто возникают повреждения колен.

4.4 Результаты расчёта ггиба на длительную циклическую прочность

Значения σ_{ekv}^* определяют по результатам вычисления размахов (амплитуды) напряжений в полуциклах нагружения, которые составляют принятую последовательность режимов работы при эксплуатации.

Из расчёта следует, что местные напряжения (наибольшие напряжения и амплитуды напряжений) в зоне концентрации не превышают предела текучести. Определение допускаемых амплитуд относительных упругих напряжений $[\sigma_{aF}]$ или допускаемого числа циклов $[N_o]$ осуществляется с учётом критериев надёжности (жёсткое нагружение) (рис. 5).

Созданная модель позволяет делать анализ прочности и ресурса элемента паропровода при местных напряжениях и локальной деформации.

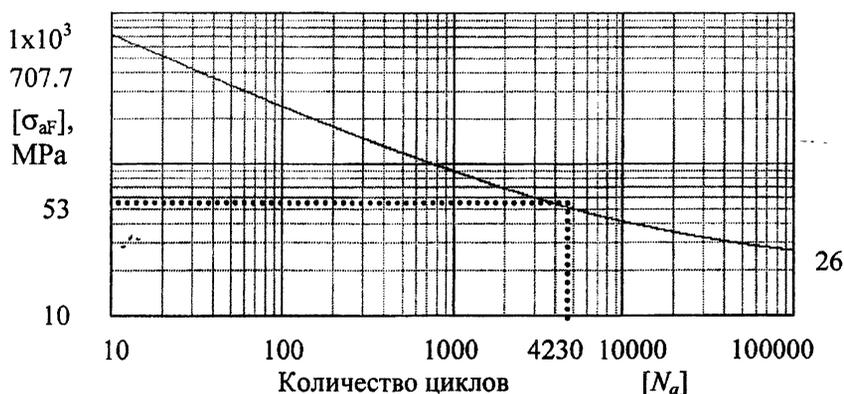


Рис. 5. Кривая усталости исследуемой стали 12X1МФ при малоцикловом нагружении

5. Выводы

1. После 110000 часов эксплуатации механические свойства металла паропровода отвечают требованиям технических условий.

2. При овальности поперечного сечения колена дополнительные напряжения растяжения возникают на внутренних и наружных поверхностях нейтральной зоны колена. Именно в этих местах наиболее часто возникают повреждения колен.

3. Установлено, что при внутреннем давлении пара 14 МПа и его температуре 545 °С в колене с овальностью 0 % - максимальные эквивалентные напряжения равны 52,6 МПа, а с овальностью 6 % - максимальные эквивалентные напряжения равны 106 МПа. При неизменной нагрузке колена напряжения возрастают в два раза.

4. Вычисления гнutoго колена паропровода с овальностью 0 % на длительную прочность показали, что этот элемент паропровода может работать до 100000 циклов, а с овальностью 6 % - 4230 циклов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rudzinskas V., Valiulis A. V., Cernashejus O. Analysis and Calculation of Long-Term Cyclic Strength of Steam Lines Units // *Mechanika*, Nr. 3(29). Kaunas: Technologija, 2001, p. 17-21.
2. Rudzinskas V., Valiulis A. V., Cernashejus O., Vishniakov N. Dynamics of properties and structure changes of pearlite steel during long-lived operation // *Materials Science*, Nr.2(9). Kaunas: Technologija, 2003, p. 164-169.
3. Raymond K., Marvin J. Creep relaxation behavior of high-energy piping // *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, 2000, p. 488-493.
4. Jang G.B., Kim H.K., Kang S.S. The Effects of Root Opening on Mechanical Properties. Deformation and Residual Stress Of Weldments.-*Welding Journal*, 2001, Nr.4, p.80-s to 89-s.
5. Carter P. Stress analysis and design for cyclic loading // *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, 2000, p. 427-430.
6. Hashem M. Mourad. Maher Y.A. Younan. Nonlinear Analysis of Pipe bends Subjected to Out-of-Plane Moment Loading and Internal Pressure // *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 123, 2001, p. 253-258.
7. Takashi Ogata, Masatsugu Yaguchi. Study on Creep-Fatigue Damage Evaluation for Boiler Weldment Parts // *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 123, 2001, p. 105-111.

УДК 621.891

Станкевич А., Рудзинкас В.

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА СТАЛЬ И СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ЕГО КОЛИЧЕСТВА В СТАЛИ И СВАРНЫХ ШВАХ

*Вильнюсский технический университет им.Гедиминаса
Вильнюс, Литва*

1. ВВЕДЕНИЕ

Источники появления и формы существования водорода в стали. В стали, еще несоприкасавшейся с агрессивными по водороду рабочими средами, может содержаться так называемый «металлургический» водород. Он попадает в сталь в процессе выплавки, когда шлак на поверхности расплава насыщается парами воды, откуда происходит дальнейшая диффузия водорода вглубь расплава [1], в результате контакта расплавленного металла с печной атмосферой,