

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА РОТОРНОЙ СТАЛИ И ОЦЕНКА ПРОДЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН МОЩНОСТЬЮ 200 МВт СВЕРХ ПАРКОВОГО РЕСУРСА (часть 1)

О.Ю. Черноусенко,
доктор техн. наук,

Национальный технический
университет Украины «Киевский
политехнический институт»

В.В. Кривенюк, доктор техн. наук,

Институт проблем прочности им.
Г.С. Писаренко НАН Украины

Е.В. Штефан, канд. техн. наук,

Национальный университет
пищевых технологий

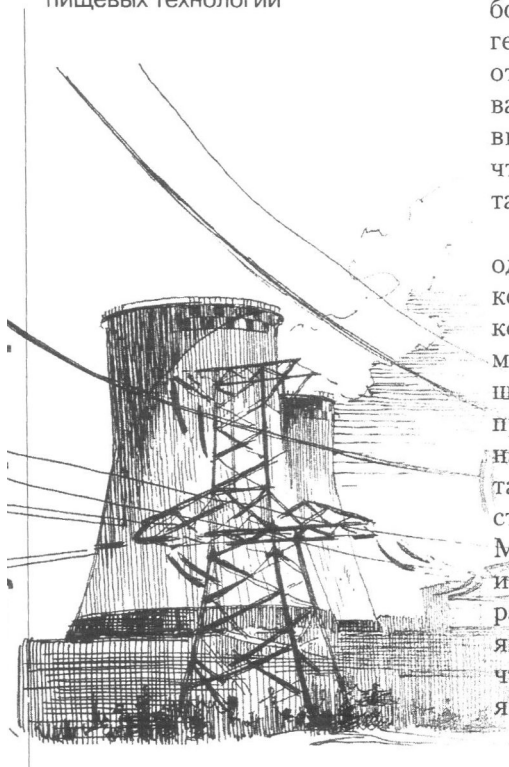
Введение

Для продления эксплуатации энергоблоков 200 МВт определяют индивидуальный ресурс роторов паровых турбины мощностью 200 МВт на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и неразрушающего контроля металла с поверочными расчетами на прочность и долговечность, а также проводят детальное исследование индивидуальной истории эксплуатации каждого блока [1]. На этапе контроля состояние металла проработавшего длительный срок энергетического оборудования отдельно необходимо исследовать возможности оптимального выбора коэффициентов запаса, что возможно при экспериментальном исследовании металла.

Акцентируется внимание на одном из существенных недостатков в оценке остаточного ресурса, который заключается в независимой разработке критериев разрушения элементов конструкций при стационарных и нестационарных условиях нагружения, а также на некоторых возможностях устранения этого недостатка. Металлические материалы и происходящие в них процессы при различных условиях нагружения являются настолько сложными, что их адекватное моделирование является практически невоз-

можным. Вместе с тем, существуют довольно устойчивые закономерности, например, степенные зависимости между напряжениями и временем до разрушения, использование которых приводит к вполне приемлемому решению многих практически важных задач прогнозирования свойств металлов. Это противоречие между сложностью состояния металлов и сплавов, процессов, происходящих в них при различных условиях нагружения, с одной стороны, и сравнительной легкостью решения практически важных задач предсказания их поведения при соответствующих условиях нагружения, с другой стороны, не способствовали развитию решения проблемы прогнозирования.

Продление ресурса по принятым на сегодняшний день нормативным документам в Украине [2] базируется на определении коэффициента запаса длительной прочности по значениям эквивалентного напряжения ползучести, предела длительной прочности при заданной температуре и сроке службы. Основная сложность продления срока эксплуатации роторов заключается в отсутствии экспериментальных данных о длительной прочности для роторной стали 25Х1М1ФА, отработавшей в реальных условиях более 220 тыс. ч. Поэтому,



единственным достоверным критерием уточнения коэффициентов запаса прочности по напряжениям и деформациям для металла, отработавшего парковый ресурс, может быть экспериментальное исследование состояния роторной.

Целью работы было экспериментальное и расчетное исследование длительной прочности металла роторной стали после длительной эксплуатации в целях уточнения коэффициентов запаса прочности и определения остаточного ресурса роторов цилиндров ЦСД паровой турбины К-210-130.

Выводы по состоянию роторов паровой турбины К-200-130 и постановка задачи экспериментального исследования стали 25Х1М1ФА

Роторы высокого (РВД) и среднего (РСД) давления паровых турбин в области паровпусков работают в условиях высокотемпературного нагружения, имеющего смешанный характер. Наряду со стационарными инерционными нагрузками периодически возникают нестационарные напряжения при пусковых и переменных режимах; возможны также динамические воздействия вследствие вибрации. В условиях эксплуатации материал РВД и РСД в области концентраторов напряжений подвергается статическому и циклическому деформированию в широком диапазоне изменения деформаций и напряжений, поэтому надежность роторов и турбины в целом может ограничиваться исчерпанием ресурса вследствие усталости и ползучести.

Расчетное исследование напряженно-деформированного состояния роторов ЦВД и ЦСД, проведенное в трехмерной постановке с учетом разгрузочных

отверстий, показало, что наиболее нагруженными на переменных режимах работы являются придисковая галтель за 13 ступенью ротора ЦСД, обод диска 13-ой ступени и вал в зоне передних концевых уплотнений. Для ротора ЦВД характерно возникновение зон максимальной интенсивности напряжений как в месте расточки РВД, так и в зоне передних концевых уплотнений в момент выхода блока на номинальный режим. Необходимо отметить, что по результатам расчетных исследований роторы ЦСД имеют более высокий уровень пусковых напряжений, чем роторы ЦВД [3–5].

Анализ эксплуатационных повреждений роторов турбин типа К-200-130 показал, что при визуальном контроле и МПД выявлены кольцевые коррозионно-усталостные трещины в тепловых канавках №1–6 и на галтельном переходе диска 13 ступени (со стороны 14-й ступени). Трещины выбраны, глубина выборок в тепловых канавках составила 1,6–5,0 мм, по галтельному переходу – 2,5 мм. Уровень максимальных напряжений как на расточке ротора, так и во всех опасных зонах концентрации при стационарном режиме сравнительно невелик и составляет от 220 МПа до 420 МПа, т.е. запас по отношению к пределам текучести и длительной прочности достаточен.

Расчетная оценка статической поврежденности роторов паровой турбины К-200-130 показала, что отдельные элементы могут приближаться к исчерпанию своего ресурса. При общем уровне эквивалентных местных напряжениях ползучести ($\sigma'_{э}$) для стационарного режима 70–150 МПа время до наступления предельного состояния t'_{pj} , определяемое с помощью диаграммы длительной прочности материала [6], может составить 250–350 тыс. часов. Если принять запас прочности по поврежденности равным 5 (реко-

мендация РД [2]), то ресурс ротора будет исчерпан.

С другой стороны, как указывалось выше, одним из самых ответственных этапов при расчете долговечности деталей проектируемого энергетического оборудования, работающего в условиях многочисленных переходных режимов, является выбор коэффициентов запаса прочности. Также необходимо исследовать влияние длительной эксплуатации на свойства стали ротора. Экспериментальные данные работы [7], например, свидетельствуют, что после 55 тыс. часов эксплуатации металл ротора среднего давления турбины К-200-130 из стали 25Х1М1ФА пластические свойства не изменил, предел усталости остался на исходном уровне. Длительная эксплуатация смещает кривую усталости в сторону меньших долговечностей ($(\sigma'_{-1})_{исх} = 330$ МПа, $(\sigma'_{-1})_{55000} = 320$ МПа), т.е. происходит уменьшение на 3%. Поэтому необходимо провести экспериментальное исследование длительной прочности металла роторной стали после длительной эксплуатации в целях уточнения коэффициентов запаса прочности и определения остаточного ресурса роторов.

Для испытаний гладких цилиндрических образцов из роторной стали 25Х1М1ФА были выбраны зоны ротора среднего давления, в которых расчетные условные упругие напряжения достигали максимальных значений. Образцы были изготовлены из заготовок, вырезанных из двух зон ротора: зона 2 была расположена в районе обоймы №1 ближе к поверхности ротора перед диском 13-й ступени. Зона 3 была расположена в районе придисковой галтели РСД за диском 13-й ступени. Образцы роторной стали 25Х1М1ФА были вырезаны из ротора СД паровой турбины К-210-130, наработка для которого составила 275031 часов при общем числе пусков 1182.

Испытания на ползучесть и длительную прочность стали 25Х1М1ФА при температуре 500°С

Испытания выполнялись в соответствии с [8] на установке АИМА-5-2 [9], которая предназначена для испытаний металлов на ползучесть и длительную прочность при постоянной температуре и нагрузке в соответствии с ГОСТ 10145-81 ГОСТ 3248-81. Установка прошла сертификационный контроль технических возможностей [10].

Испытания образцов выполнялись при нагрузках до 2700 кгс, что ниже допускаемых испытательных – 3000 кгс и температуре 500 °С. Это соответствует диапазону испытательных температур от 300 до 1000 °С. Относительная погрешность приложения нагрузки к образцу $\pm 1\%$, отклонения температуры от заданной составляет ± 3 °С.

Система нагружения включала трехрычажную нагружающую систему с ограничителями хода, контролирующими работу машины. На передней стенке размещались сигнальные лампы и указатель рабочего положения рычагов. Схема управления нагревом обеспечивала нагрев электропечи и непрерывное длительное поддержание заданной температуры по длине образца терморегулятором. Точная подстройка и контроль температуры образца производились с помощью трех термодар типа ТХА, прикрепленных к рабочей части образца, и потенциометра ПП-63 класса 0,5. Измерения удлинения образцов выполняли тензотрами с двумя индикаторами (цена деления 0,001 мм).

Испытывались цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 10 мм и расчетной длиной 100 мм, которые были выполнены с учетом допускаемых отклонений на размеры и параметра шероховатости. Образец уста-

навливали в печь в захваты испытательной машины, нагрев осуществляли в течение 6 ч, выдержка при заданной температуре составляла 2 ч. После разрушения образца определяли его относительное удлинение (δ) и относительное сужение (ψ). В результате испытаний устанавливали зависимость между напряжением и временем до разрушения при заданной постоянной температуре.

Проблема оценки и прогнозирования ползучести и высокотемпературной длительной прочности металлов тепловых электростанций, а также остаточной долговечности на сроки до 300 000 ч остается сложной и в достаточной мере нерешенной. С учетом этого, на примере анализа данных о свойствах стали 25Х1М1ФА ниже обосновываются необходимость и некоторые возможности развития прогнозирования ползучести и длительной прочности.

В мире известно около 100 методов прогнозирования длительной прочности металлических материалов. Однако, к настоящему времени признаны бесспорно лучшими из них методы Ларсона–Миллера [11], Мэнсона–Хэферда [12] и Орра–Шерби–Дорна [13], широко используемые в соответствующих стандартах развитых капиталистических государств. В результате многолетних исследований с помощью разработанного в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины принципиально отличного метода – метода базовых диаграмм (МБД) [14,15] – удалось обосновать существенные недостатки указанных выше параметрических методов. Эти недостатки определяются, прежде всего, тем, что расчетные соотношения параметрических методов получены на основе существенных упрощений, последствия которых практически не проверя-

Таблица 1

Длительная прочность образцов из стали 25Х1М1ФА при температуре 500°С (зона 2)

№ образца	Напряжение, МПа	Время, ч
1	340	1,17
3	280	399,2
7	260	97,48
9	230	915,12
11	250	1645,25
5	240	2058*
13	210	1256*

Таблица 2

Длительная прочность образцов из стали 25Х1М1ФА при температуре 500°С (зона 3)

№ образца	Напряжение, МПа	Время, ч
2	340	8,6
4	310	10,5
8	280	43,05
10	260	270
6	240	2056*
12	230	1696*
14	210	682*

* – образец не разрушился.

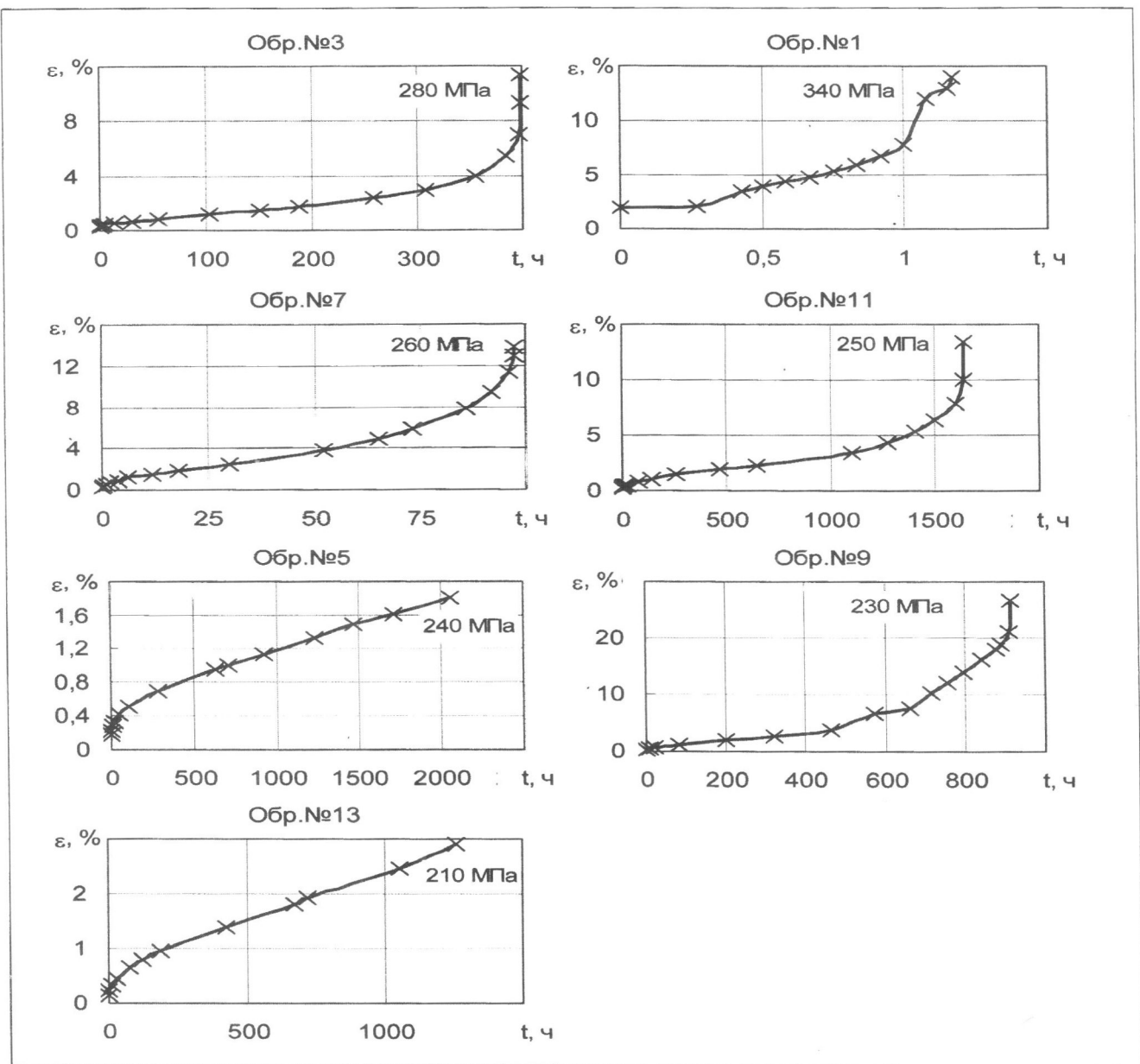


Рис. 1. Кривые ползучести стали 25X1M1ФА при температуре 500 °С (зона 2)

лись. Например, согласно методу Ларсона-Миллера активационный параметр зависит от напряжений, а согласно методу Орра-Шерби-Дорна – не зависит, и т.п. Кроме того, согласно параметрическим методам кривые длительной прочности при разных температурах в системе координат $\lg \sigma - \lg t$ после перехода в систему координат $\lg \sigma - P$, где $P = T(C + \lg t)$, должны быть объединены в единую параметрическую кривую, что практически никогда не выполняется. Наконец, использо-

вание параметрических методов сводится к получению параметрической расчетной кривой, т.е. к своеобразному усреднению исходной и любой другой информации при практически полном отсутствии возможностей четкой констатации отклонений от усредненных кривых, которые практически всегда есть, и которыми в основном определяются трудности прогнозирования.

Приведены данные о длительной прочности стали 25X1M1ФА, полученные в результате экспери-

ментальных исследований. Кроме того, для неразрушенных образцов на основе данных о ползучести, в результате экстраполяции были получены расчетные данные о длительной прочности.

В табл. 1 и на рис. 1, 2 для зоны 2, а также на рис. 3, 4 и в табл. 2 для зоны 3 приведены экспериментальные и расчетные данные о длительной прочности. Эти данные позволили установить следующие значения условных пределов длительной прочности стали 25X1M1ФА на базе 10 тыс. ч

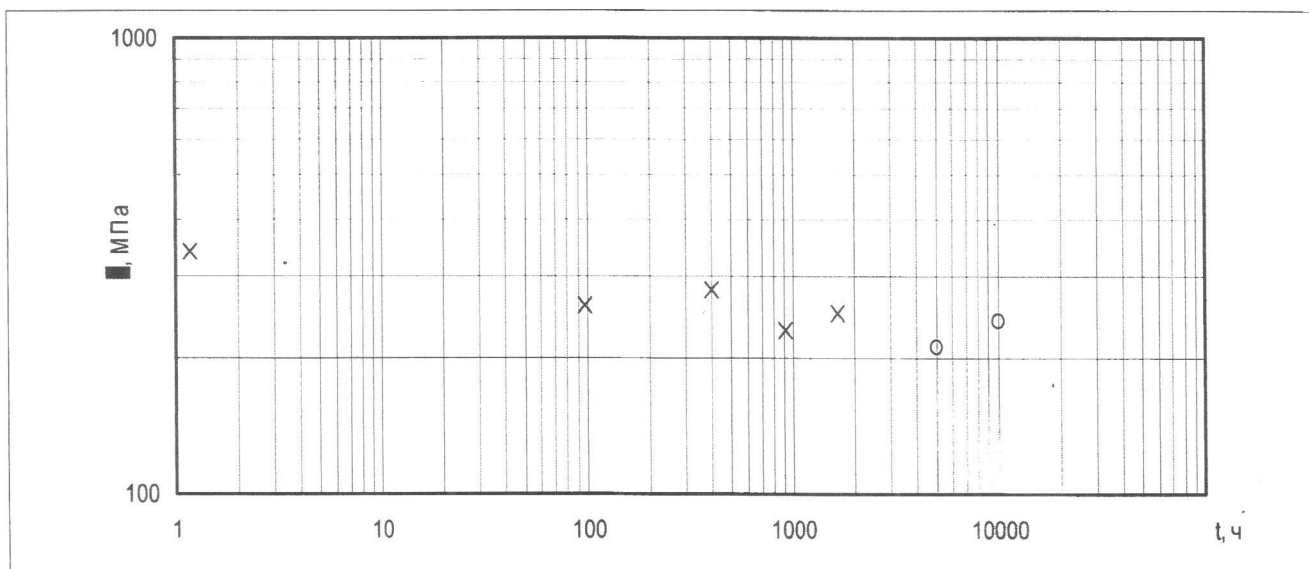


Рис. 2. Длительная прочность стали 25X1M1ΦA при температуре 500 °C (зона 2)

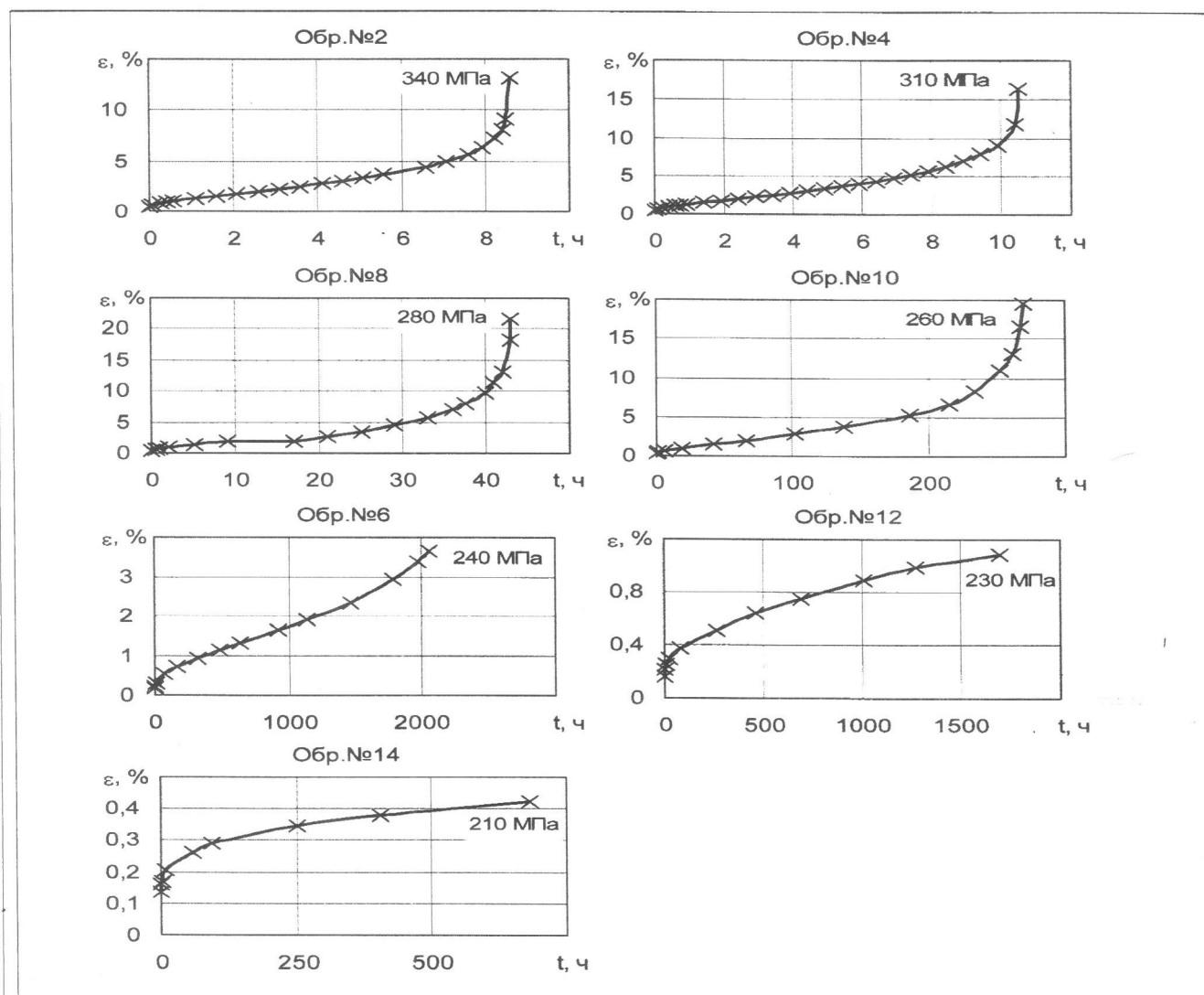


Рис. 3. Кривые ползучести стали 25X1M1ΦA при температуре 500 °C (зона 3)

4. В результате испытаний на ползучесть и длительную прочность стали 25Х1М1ФА при температуре 500 °С прогнозируются следующие условные пределы длительной прочности: $\sigma_{10^5} = 128$ МПа – для зоны 2; $\sigma_{10^5} = 144$ МПа – для зоны 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій*: СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. – Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. – 76с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція).
2. РД 34.17.440–96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – Москва, 1996.
3. Черноусенко О.Ю. Обобщение и анализ результатов расчетного исследования индивидуального ресурса корпусов и роторов ЦВТ и ЦСТ турбины К-200-130 блока 200 МВт // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – №6. – С.107–111.
4. Штефан Е.В., Черноусенко О.Ю., Баишта А.В. Інформаційна технологія визначення індивідуального ресурсу високотемпературних конструкцій енергомашинобудування // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ, 2008. – Вип.49. – Т.2. – С.171–176.
5. Черноусенко О.Ю. Концептуальные основы создания автоматизированной системы технической диагностики энергоблоков ЭС // Доклады XV міжнародної конференції з автоматичного управління, 23–26 вересня 2008р. Доповнення. – Одеса: ОНМА, 2008. – С.22–23.
6. Ланин А.А., Балина В.С. Жаропрочные металлы и сплавы: справочные материалы. – СПб.: Энерготех, 2006. – Серия «Вопросы энергетики», вып.8.
7. Гинзбург Э.С., Резинских В.Ф., Беяков А.А. и др. Влияние длительной эксплуатации на сопротивляемость металла ротора паровой турбины многоциклового нагружению // Теплоэнергетика. – 1983. – №12. – С. 37–39.
8. ГОСТ 10145–81. Металлы. Метод испытания на длительную прочность.
9. Машина для испытаний металлов на ползучесть и длительную прочность АИМА-5-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 1979. – 56 с.
10. Машина для испытаний металлов на ползучесть и длительную прочность АИМА-5-2. Программа и методика аттестации. – 2001. – 10 с.
11. Larson R.R., Miller J. Time-temperature relationship for rupture creep stress // Trans. ASME. – 1952. – 74.N5. – D. 765–775.
12. Manson S.S., Haferd A.M. A liner time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data // NASA TN – 1953. – TN–2890.
13. Orr R.I., Sherby O.D., Dorn J.E. Correlation of rupture data for metals at elevated temperatures // Trans. ASM. 1954. – V. 46. – P. 113–128.
14. Писаренко Г.С., Кривенюк В.В. Новый подход к прогнозированию длительной прочности металлов // Доклады АН СССР. Механика. – 1990. – Т. 312. – № 3. – С. 558–562.
15. Кривенюк В.В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. / В.В. Кривенюк. – Киев: Наукова думка, 1990. – 248 с.
16. Data steels on the elevated temperature properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel // NIRM creep data sheet. Tokyo. – 1979. – N9A. – P. 4–7.
17. НД «Котли, турбіни і трубопроводи теплових електростанцій. Властивості сталей теплоенергетичного устаткування». – 2009.
18. Либерман Л.Я., Пейсихис М.И. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении – Л.: ЦКТИ, вып. 16, ч. 1, – 219 с.; ч. 2, 1966. – 244 с.; ч. 3, 1967. – 180 с.