

УДК 620.9

А. А. Любимов

Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
теплотехнический научно-исследовательский институт (ОАО «ВТИ»)
(г. Москва, Российская Федерация, e-mail: artuyom@rambler.ru)

ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ТУРБИН ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Описаны критерии целесообразности проведения восстановительной термической обработки (ВТО), подготовительные мероприятия до, порядок действий во время и контрольно-диагностические операции после проведения термической обработки. Проведены сравнительный анализ и обобщение результатов ВТО корпусных деталей турбин по различным режимам в промышленных условиях.

Описано критерії доцільності проведення відновлювальної термічної обробки (ВТО), підготовчі заходи до, порядок дій під час і контрольно-діагностичні операції після проведення термічної обробки. Здійснено порівняльний аналіз та узагальнення результатів ВТО корпусних деталей турбін за різними режимами в промислових умовах.

Введение

При длительной эксплуатации в металле литых корпусов цилиндров паровых турбин, под действием постоянной нагрузки в условиях ползучести в сочетании с термоциклированием при переменных режимах работы, происходят неблагоприятные структурные изменения – образуются надрывы и трещины, снижающие эксплуатационную надёжность. Регенерировать структуру, включая повышение содержания легирующих элементов в твёрдом растворе и вернуть на исходный уровень служебные характеристики металла, чтобы повысить надёжность при дальнейшей эксплуатации, можно с помощью восстановительной термической обработки.

Учитывая, что в России эксплуатируются около 400 турбин типа Т-100-130 (УТМЗ) и ПТ-60-130 (ЛМЗ), спроектированных на расчётный срок работы 100 тыс. ч при температуре поступающего пара 540–560 °С, а значительная их часть на сегодняшний момент отработала свыше 200 тыс. ч, периодически возникает вопрос их обновления и реконструкции для продолжения дальнейшей безопасной эксплуатации. Решение этих вопросов позволяет обеспечивать непрерывное энергоснабжение промышленности и населения, уменьшать затраты на приобретение дорогостоящего оборудования. Подобная реконструкция предусматривает комплексный подход, заключающийся в возобновлении ресурса основных деталей турбин, в частности литых корпусных деталей и арматуры, повышении экономичности проточной части, модернизации системы регулирования, оснащении турбины сервисными системами.

При этой реконструкции, прежде всего, подвергаются восстановительной термической обработке корпуса цилиндров высокого давления (ЦВД), стопорные и регулирующие клапаны из сталей 15Х1М1ФЛ и 20ХМФЛ. В обновлении также нуждаются литые корпуса крупной паровой арматуры, отработавшие нормативный срок эксплуатации – 250 тыс. ч.

Основная часть

Для того чтобы подвергать восстановительной термообработке не все длительно эксплуатировавшиеся корпуса, а только ту часть из них, которая не может обеспечить требуемую надёжность в течение 1-2 межремонтных сроков, необходимо использовать критерии целесообразности ВТО.

Рекомендации к проведению восстановительной термообработки корпусных деталей определяются нижеследующими основными и дополнительными критериями.

1. Наличие трещин, возникших дважды в зоне ремонтной подварки, глубиной до 70% от толщины стенки.

2. Если свойства металла имеют отклонения от норм РД 10-577-03 [1] (табл. 1).

3. При реновации турбоагрегата после отработки паркового ресурса по числу часов и числу пусков.

После проведения комплексной реконструкции, включающей восстановительную термическую обработку корпусных деталей турбины и арматуры, можно гарантировать ресурс – 200 тыс. часов.

Перед выполнением ВТО корпусных деталей турбины проводятся контрольно-диагностические операции, включающие в себя:

- полную разборку детали;
- контроль твердости;
- визуальный контроль, капиллярный контроль или магнитопорошковую дефектоскопию радиусных переходов корпусных деталей в объеме 100%. Обнаруженные дефекты подлежат выборке и заварке после проведения нормализации перед отпуском;
- металлографию с применением метода реплик, взятия сколов, спилов или вырезки образцов не менее чем в пяти точках на каждой детали;
- анализ химического состава и карбидного осадка;
- защиту резьбовых и других механически обработанных поверхностей.

Таблица 1. Требования РД 10-577-03 по характеристикам металла

Характеристика металла	Температура испытания, °С	Допустимое значение (не менее) для сталей марок	
		15Х1М1ФЛ	20ХМФЛ
Предел текучести, МПа	20	255	245
Доля вязкой составляющей в изломе ударного образца Шарпи (КСV), кДж/м ²	150/80	100/50	100/50
Ударная вязкость (КСV), кДж/м ²	150/80	300	300
Критическое раскрытие при ударном нагружении, мм	температура пара на входе в турбину	0,25	0,25
Горячая твердость, МПа	температура пара на входе в турбину	850	950
Твердость, НВ	20	145	140
Количество пор ползучести диаметром более 2 мкм в одном поле зрения при увеличении ×500	20	3 (не более)	5 (не более)

Подготовительный этап при проведении ВТО корпусных деталей включает в себя комплекс необходимых мероприятий, а именно: очистку от изоляции, отрезку пароперепускных труб и паровых коробок; установку плиты на выкатной под печи для исключения корбления корпуса; установку подкладок для равномерного охлаждения корпуса в процессе ВТО; установку цилиндра разъемом вниз, а корпусов клапанов патрубками на подкладки; установку дополнительных термпаров сверху и внизу корпусов для контроля режимов охлаждения при термической обработке; завод пода печи с корпусными деталями в печь и включении ее на нагрев. Процесс восстановительной термической обработки определяется с учетом режима ВТО, включающего в себя: способ нагрева, указания о температуре нагрева, времени выдержки, температуре порога охлаждения, параметров отпуска. Охлаждение корпусов фиксируется контрольными термпарами или при помощи прибора «Тепловизор».

Любая технология должна быть скорректирована в связи с отсутствием значительных припусков на механическую обработку и необходимостью исправления структуры металла. Правильность проведения ВТО проверяется на образцах-свидетелях или, что предпочтительней, на вырезанных образцах из обрабатываемой детали, для подтверждения правильности выбранной технологии и соответствия уровня полученных свойств рекомендуемым критериям надежности. Одной из завершающих стадий ВТО является выполнение наплавки поверхности горизонтальных разъемов детали для создания припусков на механическую обработку, выборка имеющихся дефектов и их заварка перед проведением высокого отпуска.

После проведения ВТО выполняются контрольно-диагностические операции (неразрушающий контроль твердости, контроль механических свойств, визуальный контроль и магнитопорошковая дефектоскопия или цветная дефектоскопия радиусных переходов, обязательные при изготовлении новых корпусных деталей, визуальный контроль и ультразвуковой контроль ремонтных заварок при их наличии. Исследование структуры и свойств металла корпусов, определяющих надежность детали и позволяющих прогнозировать ее ресурс, проводится преимущественно на вырезанных по эскизам образцах из наиболее высокотемпературных зон корпуса. Для каждого типа деталей целесообразно специально разрабатывать рекомендации по объемам и видам контроля свойств металла до и после термообработки. На основании полученных результатов исследования состояния металла устанавливается ресурс детали, прошедшей ВТО.

Требования к механическим свойствам металла из стали 15Х1М1ФЛ после ВТО оптимизированы по сравнению с нормой для металла в состоянии поставки следующим образом: границы по пределу текучести сужены до 350–500 МПа, уровень пластичности повышен – относительное удлинение не менее 20%, относительное сужение не менее 50%.

Режим восстановительной термообработки деталей турбин зависит от тех недостатков структуры и свойств, устранению которых она предназначена. Сведения о нескольких вариантах режимов ВТО изложены в ряде сообщений [2–4].

В табл. 2 приведены тип турбины, наработка, причина проведения реконструкции и режим восстановительной термообработки, по которым ВТО подвергались корпуса ЦВД, стопорных клапанов и регулирующих клапанов трёх турбин, изготовленных из стали 15Х1М1ФЛ и отработавших 169...206 тыс. ч: двух турбин Т-100-130 и одной турбины ПТ-60-130. Все три турбины после реконструкции находятся в эксплуатации.

Таблица 2. Причина восстановления и режимы ВТО

Тип турбины	Наработка, тыс. ч	Причина проведения реконструкции	Фактический режим ВТО (тип режима)
Т-100-130	206	отработка паркового ресурса	нагрев до 970–1000 °С и выдержка 7 ч, охлаждение на выкаченной подине до потемнения поверхности (ниже 500 °С), отпуск при температуре 730–750 °С в течение 15 ч (Н+ВО)
ПТ-60-130	169	коробление корпуса ЦВД в связи с пониженной прочностью металла	нагрев до (1030±10) °С и выдержка 6 ч, охлаждение на выкаченной подине до 250 °С, нагрев до (960±10) °С и выдержка 2 ч, охлаждение до 300 °С, отпуск при (740±10) °С в течение 10 ч (2Н+ВО)
Т-100-130	204,4	отработка паркового ресурса	четырёхкратный нагрев до 870 °С с охлаждением на воздухе до 600 °С, затем нагрев до 870 °С и охлаждение на воздухе до 250–300 °С, отпуск при 700 °С в течение 6 ч (ЦНЧП+ВО)

Один из первых масштабных опытов проведения восстановительной термической обработки был осуществлен в 1993–1996 гг. на базе центральной лаборатории металлов АО «Турбомоторный завод». Были проведены работы по исследованию свойств металла стопорного клапана турбины Т-100-130, отработавшей на ТЭЦ-11 Мосэнерго 204 тыс. часов и выбору режима восстановительной термической обработки, которые показали, что существует возможность восстановления свойств металла корпусных деталей из стали 15Х1М1ФЛ после длительной эксплуатации при температуре 540–560 °С всей турбины. На завод вместе со стопорным клапаном поступили обе половины цилиндра.

ВТО подвергли верхнюю и нижнюю половины ЦВД порознь из-за размеров печи. Коробление разъемов не превысило 2 мм для каждой половины. После контроля сплошности металла механической обработкой восстановили плоскостность разъема, при съеме металла до 1 мм были очищены расточки под диафрагмы, обоймы направляющего аппарата, обоймы концевых уплотнений и сопловой аппарат. Анализ структуры, свойств металла и расчеты ресурса после проведения циклической ВТО и высокого отпуска по режиму (ЦНЧП+ВО) показали, что корпус ЦВД и стопорного клапана могут быть использованы повторно на срок не менее 170000 ч без снижения начальных параметров пара.

Цилиндр укомплектовали новыми диафрагмами, новым сопловым и направляющим аппаратами и ввели в состав турбины ТЭЦ-22 Мосэнерго для повторной эксплуатации. Технологический цикл изготовления цилиндра сократился более чем в 2 раза. Не потребовались затраты времени и материалов на литье цилиндра.

Комплексный подход был реализован ОАО «Теплоэнергосервис-ЭК» при реновации турбины ПТ-60-130, ст. №6 Ульяновской ТЭЦ-1 совместно с ОАО «ВТИ», ХЦКБ «Энерго-прогресс», УГТУ-УПИ и другими. Основной – была задача разработки технологии и осуществления восстановительной термической обработки корпусов стопорного клапана и ЦВД турбины [2, 4].

Проведенный сравнительный анализ материальных затрат, связанных с заменой ЦВД и проведением ремонта в заводских условиях, показал, что экономия от проведения работ по восстановлению ЦВД с изготовлением нового ротора высокого давления (РВД) на базе ОАО «Теплоэнергосервис-ЭК» составит около 30% по сравнению с покупкой нового ЦВД в сборе.

При выполнении указанных выше работ и была реализована идеология комплексного подхода к реновации турбинного оборудования: после ремонта турбина по своим показателям была морально обновлена настолько, насколько её базовая конструкция позволила выполнить оснащение машины современными системами. Был реализован комплекс мероприятий по повышению её надежности и экономичности.

Для результатов термообработки существенно, проводилась ли термообработка корпуса в сборе или же осуществлялась его полная разборка. Есть мнение, что для уменьшения поводов термообработка корпуса цилиндра должна проводиться в сборе. Однако имеется ряд соображений и против такого варианта в связи с относительным уменьшением скорости охлаждения внутренних слоёв детали. Например, термообработка по схеме двукратная нормализация и высокий отпуск (2Н + ВО) корпусных деталей в сборе была реализована при проведении ВТО корпусных деталей турбины ПТ-60-130 Ульяновской ТЭЦ в газовой печи с выкатным подом (размером 6×13×5 м) на Уральском заводе тяжелого машиностроения (ОАО «УЗТМ»).

В табл. 3 указаны разброс и средние значения механических свойств металла корпусных деталей турбин из стали 15Х1М1ФЛ после эксплуатации и после восстановительной термообработки по различным режимам. Сопоставление усреднённых данных по металлу корпусов, прошедших ВТО, с их уровнем после эксплуатации однозначно показывает существенное увеличение показателей прочности.

Характеристики пластичности у металла после ВТО, как это обычно бывает, находятся в обратной пропорции с величиной предела текучести.

Таблица 3. Механические свойства металла литых корпусных деталей турбин из стали 15X1M1ФЛ, подвергнутых ВТО

Тип т/о, способ нагрева и наименование норматива	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Критическая температура хрупкости, °С
без термообработки (наработка 200...250 тыс. ч)	$\frac{226-249}{236}$	$\frac{481-490}{486}$	$\frac{20,7-30}{25,4}$	$\frac{48,6-75}{67,1}$	100–170
Н+ВО (печной)	$\frac{301-526}{436}$	$\frac{532-701}{620}$	$\frac{10-24}{16,5}$	$\frac{22-54}{38,8}$	130–145
2Н+ВО (печной)	$\frac{280-551}{423}$	$\frac{517-712}{630}$	$\frac{15-32}{23,8}$	$\frac{40-75}{64}$	50–94
ЦНЧП+ВО (печной)	$\frac{294-507}{371}$	$\frac{521-675}{584}$	$\frac{21-31}{23,8}$	$\frac{51-68}{59,4}$	43–46
норма для металла в состоянии поставки, не менее	300–550	500	16,0	35,0	–
разброс свойств металла в состоянии поставки	$\frac{294-539}{445}$	$\frac{490-784}{650}$	$\frac{15-35}{20}$	$\frac{35-65}{60}$	100–170

Надёжность металла корпусных деталей определяется трещиностойкостью в условиях сочетания ползучести и циклических нагрузок от переменных режимов работы при пусках и остановах. Для обеспечения удовлетворительной трещиностойкости корпуса применительно к условиям нагружения, возникающим при останове, уровень критической температуры хрупкости (КТХ) не должен быть выше температуры охлаждения металла (~ 20...250 °С). Анализ показал, что критическая температура хрупкости металла корпусных деталей турбины ПТ-60-130, прошедших ВТО по режиму 2Н + ВО после 169 тыс. ч эксплуатации была на уровне 120–180 °С, а после ВТО составляла – 50–110 °С.

Уровень жаропрочности металла деталей из стали 15X1M1ФЛ до и после восстановительной термообработки приведен в табл. 4.

Свидетельством повышения однородности металла после ВТО с двойной нормализацией является увеличение коэффициента корреляции зависимости параметра жаропрочности P от логарифма напряжений $P = f(\lg\sigma)$. Расчётом установлено, что для ВТО с двойной нормализацией этот коэффициент равен –0,996; в то время как после однократной нормализации его величина меньше –0,890, а разброс P , соответственно, больше. Кривые длительной прочности металла корпусных деталей из стали 15X1M1ФЛ, после длительной эксплуатации подвергнутых ВТО по режимам 2Н + ВО, и однократная нормализация и высокий отпуск (Н + ВО) соответственно показаны на рис. 1.

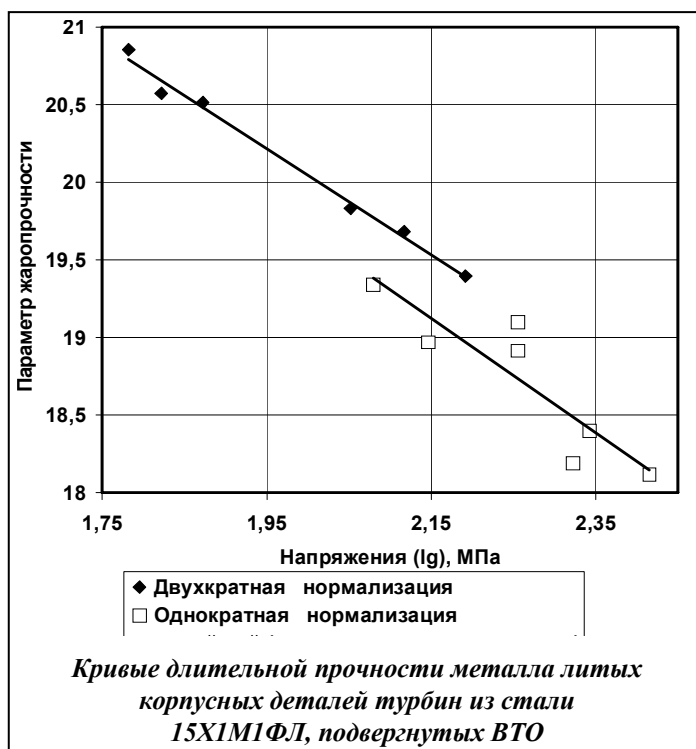
Трещиностойкость в условиях ползучести оценивалась у металла корпуса, прошедшего термообработку с двукратной нормализацией. При обработке результатов исследования трещиностойкости при статическом нагружении было установлено, что сопротивляемость докритическому росту трещины, оцениваемая значением коэффициента интенсивности напряжений (КИН), вызывающим скорость роста трещины 10^{-3} мм/ч при 540 °С – K_{10}^{540-3} равен $24 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, что существенно превышает средний уровень трещиностойкости у металла в состоянии поставки ($14 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$).

Таблица 4. Предел длительной прочности при 540 °С металла литых корпусных деталей из стали 15Х1М1ФЛ, подвергнутых ВТО

Тип термообработки, способ нагрева и наименование норматива	Предел длительной прочности при температуре 540 °С (МПа) на время, ч	
	10 ⁵	2·10 ⁵
без термообработки (наработка 200–250 тыс. ч)	86–94	72
H+BO (печной)	110	97
2H+BO(печной)	120	100
ЦНЧP+BO (печной)	90	78
норма для металла в состоянии поставки	106 (не менее)	–

Это позволяет рекомендовать двукратную нормализацию с высоким отпуском в качестве оптимального режима термообработки литых корпусных деталей турбин, свойства которых существенно понижены в процессе длительной эксплуатации. В то же время при проведении ВТО требуется индивидуальный подход по выбору режима к каждой конкретной корпусной детали.

При разработке критериев оценки надёжности литого металла после ВТО необходимо учитывать требования к металлу в состоянии поставки и изменения свойств в процессе эксплуатации. В частности, работами ВТИ, ЛМЗ, ХТГЗ, ЦНИИТМАШ показано, что у стали 15Х1М1ФЛ в состоянии поставки с пределом текучести на верхнем допустимом уровне 500–550 МПа пластические характеристики недостаточно высоки. Как видно из табл. 3, относительное удлинение составляет 16%, относительное сужение 35%. Требования к жаропрочности металла в состоянии поставки: предел длительной прочности при температуре 540 °С на 10⁵ ч – не менее 106 МПа, а при 565–570 °С составляет 78 МПа.



Выводы

1. В процессе длительной эксплуатации в металле литых корпусных деталей происходят неблагоприятные структурные изменения, снижающие их надежность.
2. Одним из основных этапов при комплексной реновации турбин является восстановительная термическая обработка.
3. Этапы проведения ВТО включают в себя определение целесообразности проведения термообработки, контрольно-диагностические операции до и после проведения ВТО, оценку качества термообработки.
4. Обобщение опыта проведения ВТО по различным режимам показало преимущество режима с двукратной нормализацией и высоким отпуском для металла с существенно пониженными свойствами.

5. Исследования, проводимые в области восстановительной термической обработки литых корпусных деталей, выделили направление дальнейшего развития и однозначность индивидуального подхода при реновации к каждой конкретной детали.

Литература

1. *РД 10-577-03*. Типовая инструкция по контролю и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. – М.: Гос. унитар. предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 127 с.
2. *Гладштейн В. И.* Восстановительная термическая обработка корпусных деталей турбин высокого давления, отработавших парковый ресурс / В. И. Гладштейн, А. А. Любимов // Теплоэнергетика. – 2002. – № 4. – С. 2–6.
3. *Любимов А. А.* Анализ особенности структурных превращений и обобщение результатов восстановительной термообработки литых корпусных деталей и арматуры по различным режимам в промышленных условиях / А. А. Любимов, В. И. Гладштейн // Теплоэнергетика. – 2011. – № 6. – С. 43–46.
4. *Восстановительная термическая обработка в заводских условиях корпусов цилиндров и клапанов турбин мощностью 60 и 100 МВт* // В. И. Гладштейн, В. В. Ермолаев, А. И. Шкляр и др. // Теплоэнергетика. – 2008. – № 2. – С. 21–25.

Поступила в редакцию
09.09.12