

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ МЕТАЛЛА КОТЛОВ-УТИЛИЗАТОРОВ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК И СЛУЖЕБНЫЕ СВОЙСТВА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ В ИХ КОНСТРУКЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РЕСУРСОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СТАЛЕЙ¹

© 2025 г. Е. А. Гринь^а, А. В. Зеленский^{а, *}, В. А. Саркисян^а

^аАО «Всероссийский теплотехнический институт» (ВТИ),
3-й Автозаводский проезд, д. 4, корп. 1, Москва, 115280 Россия

*e-mail: AVZelensky@vti.ru

Поступила в редакцию 04.09.2024 г.

После доработки 23.12.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

Выполнен выборочный анализ результатов контроля металла 25 котлов-утилизаторов (КУ), входящих в состав парогазовых установок (ПГУ) на 12 электростанциях России. Эксплуатационный контроль металла КУ проводится, как правило, при капитальном ремонте оборудования. Дефекты металла, обнаруженные при диагностике котлов, чаще всего представляют собой повреждения в сварных соединениях, некоторые из которых были заложены на стадии изготовления котлов или их монтажа, другие имеют эксплуатационное происхождение. К эксплуатационным дефектам в числе прочих относится утонение стенок элементов. Представлен краткий анализ причин образования дефектов металла различного вида. На некоторых котлах-утилизаторах в качестве конструкционного материала для изготовления ответственных элементов использованы перспективные стали зарубежной разработки. Приоритетной задачей при анализе состояния металла КУ является оценка качества этих сталей и стабильности их служебных свойств. В ходе проведенных в ВТИ исследований натуральных сварных заготовок из стали WB36, используемой для изготовления барабанов, подтверждены соблюдение нормативных требований по основным служебным характеристикам и удовлетворительный уровень свойств по сопротивлению малоцикловому и хрупкому разрушению. Это позволило увеличить парковый ресурс барабанов высокого давления (БВД), выполненных из этой стали. Для высокохромистых сталей Р91 и Ди82 обобщены и обработаны результаты представительных испытаний на длительную прочность, что дает принципиальную возможность оценивать текущее состояние металла и прогнозировать ресурсные характеристики ответственных элементов котлов-утилизаторов.

Ключевые слова: парогазовая установка, котел-утилизатор, металл, сварное соединение, контроль, повреждение, эрозионный износ, кавитационный износ, зарубежная сталь, служебные свойства, ресурс

DOI: 10.56304/S0040363625700821

На многих тепловых электростанциях эксплуатируются парогазовые установки, производящие электрическую энергию по комбинированному циклу [1]. В состав ПГУ входят КУ, генерирующие пар высоких параметров (при больших давлении и температуре) для подачи его в паровую турбину. Котлы-утилизаторы ПГУ отличаются от обычных энергетических котлов конструктивными особенностями и специфическими условиями эксплуатации [2, 3]. Кроме того, отдельные группы их элементов выполнены из перспективных ста-

лей, разработанных за рубежом и не имеющих прямых российских аналогов. Поэтому порядок контроля элементов КУ не в полной мере регламентируется отраслевой нормативной документацией в данной области. Иными словами, отсутствует системная унификация объемов и периодичности контроля, критериев оценки состояния и подходов к прогнозу дальнейшей эксплуатации КУ. С учетом того что наработка многих КУ на электростанциях превысила 100 тыс. ч, проблема применения для них технически обоснованного и сбалансированного регламента контроля, оценки состояния металла и продления срока службы КУ является своевременной и актуальной. К этому следует добавить, что согласно информации,

¹ Испытания выполнены на оборудовании ЦКА ОАО ВТИ «Центр исследования материалов тепловой энергетики нового поколения».

представленной в литературных источниках по научно-технической тематике, отдельные элементы котлов-утилизаторов характеризуются повышенной склонностью к повреждаемости в процессе работы [3].

В настоящей статье приводятся сведения о характерных повреждениях металла для довольно обширной группы КУ, а также результаты выполненных исследований тех служебных свойств материалов, используемых в конструкции КУ, которые недостаточно глубоко изучены на сегодняшний день. Итоги проведенного анализа призваны способствовать повышению уровня эксплуатационной диагностики металла котлов-утилизаторов ПГУ и оценки его качественных показателей.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Информация, изложенная в текущем исследовании, получена путем обобщения и анализа данных по 25 котлам-утилизаторам, эксплуатируемым в составе ПГУ на 12 электростанциях России. Все рассмотренные КУ относятся к типу барабанных котлов. В их числе десять двухконтурных КУ вертикальной компоновки с принудительной циркуляцией и пятнадцать КУ горизонтального профиля с естественной циркуляцией, из которых шесть КУ трехконтурные с промежуточным перегревом, остальные – двухконтурные.

Параметры пара на выходе из котлов рассматриваемой группы существенно различаются по контуру высокого давления (ВД): для двухконтурных КУ давление пара варьируется от 5.4 до 9.5 МПа, а его температура – от 490 до 560°C, а для трехконтурных давление находится в интервале 13.5–14.5 МПа, а температура варьируется в очень узком диапазоне около 570°C. По контуру низкого давления параметры пара для двух- и трехконтурных КУ различаются в меньшей степени: расхождение составляет примерно 0.6–1.0 МПа и 200–260°C.

В заводской технической документации на КУ приводятся показатели их ресурсных характеристик. Для большинства котлов расчетный ресурс основных элементов равен 200 или 150 тыс. ч, причем последнее значение относится, как правило, к пароперегревателям высокого давления и их выходным коллекторам. Ожидаемый срок службы практически всех КУ составляет 40 лет. Согласно документации, для подавляющего большинства КУ (в рассматриваемой группе) расчетное количество пусков из холодного состояния соответствует 100 (для некоторых КУ производства Таганрогского котлостроительного завода “Красный котельщик” этот показатель равен 200), из неостывшего состояния – 1400 и выше, а из горячего состояния – не менее 6000.

Для оценки возможности актуализации этих ресурсных показателей и оптимизации порядка контроля качества металла котлов-утилизаторов необходимо располагать объективными данными о повреждениях элементов и вероятных причинах появления дефектов. Кроме того, для анализа состояния и прогноза ресурса требуется обоснованная информационная база по служебным свойствам металлов (в том числе сталей зарубежной разработки) с учетом их стабильности при эксплуатации. Предварительные результаты в рамках решения этих вопросов изложены далее.

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ МЕТАЛЛА И ЕЕ ВЕРОЯТНЫЕ ПРИЧИНЫ

Как уже отмечалось, эксплуатационный контроль котлов-утилизаторов ПГУ специально не регламентируется отраслевой нормативной документацией, а задается эксплуатирующей организацией (или владельцем КУ) исходя из соображений обеспечения необходимого уровня надежности и безопасности в рамках требований Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности [4]. Обычно контроль металла элементов КУ проводится в ходе капитальных ремонтов преимущественно после 50 тыс. ч эксплуатации. Чаще других используется визуально-измерительный метод контроля, и нередко дефекты и повреждения выявляются уже на этой стадии диагностирования. В некоторых случаях эти дефекты и отклонения не связаны с повреждениями металла, определяющими его эксплуатационную надежность. В частности, к ним относятся нарушения тепловой изоляции, повреждения внутренней поверхности пароотбойных щитов на барабанах или листов жалюзи в местах ввода в них пароводяной смеси, нарушения геометрических характеристик трубной доски в системе испарителей низкого (ИНД) или высокого (ИВД) давления и др. Что касается локальных нарушений тепловой изоляции и фрагментов трубной доски, то эти отклонения, скорее всего, были допущены при монтаже оборудования. Износ поверхностей пароотбойных щитов и листов жалюзи в барабанах причисляется к эксплуатационным повреждениям, вызванным, вероятно, не вполне удачной конструкцией этих узлов. Подобные отклонения выявляются и устраняются в ходе плановых ремонтов и освидетельствований КУ.

При визуальном и инструментальном контроле обнаруживались недопустимые дефекты металла. По большей части они возникали в зонах сварных соединений. В частности, повреждения были выявлены в стыковых сварных соединениях линий отводов паропровода высокого давления Сочинской ТЭС, питательного трубопровода Уренгойской ГРЭС, трубопровода продувки барабана высокого давления ТЭС “Ивановские

ПГУ” и в угловых сварных соединениях труб и змеевиков с коллекторами, в том числе в тройниковых узлах дренажных (продувочных) трубопроводов с коллекторами пароперегревателя и экономайзера высокого давления. Отдельные из этих дефектов, такие, к примеру, как повреждения в переходных швах соединения труб различного диаметра на отводящих линиях паропровода ВД, свищ в сварном соединении питательного трубопровода и некоторые другие, обусловлены неудовлетворительным качеством сварочных работ при монтаже. Характер иных дефектов указывает на их эксплуатационное происхождение. К таковым следует отнести, прежде всего, угловые сварные соединения гибов продувочных трубопроводов с коллекторами, дренажей – с участками линий паропроводов ВД и тройниковые соединения коллекторов пароперегревателя с экономайзером ВД.

В [3] выполнен анализ условий нагружения этих узлов. Показано, что для них характерен высокий уровень термических напряжений при переменных режимах работы установки, чем обусловлено зарождение и развитие трещин по механизму термоусталости. Дефекты в основном металле отмечались в виде свищей в растянутой зоне гибов вблизи выходных коллекторов испарителей низкого давления. Эти повреждения были вызваны чрезмерным утонением стенки, и причины их возникновения рассмотрены далее. Трещиноподобных дефектов коррозионно-механического происхождения в металле трубопроводов и барабанов отмечено не было, по крайней мере в массовом порядке. В барабанах высокого давления, изготовленных из стали WB36 (15NiCuMoNb5), котлов-утилизаторов Северо-Западной ТЭЦ были обнаружены трещины в угловых сварных соединениях узла крепления трубопровода парового разогрева с обечайкой. Эти дефекты протяженностью до нескольких сантиметров были выявлены на всех БВД, имеющих идентичную конструкцию, причем после их устранения они возникали вновь. Анализ конструкции барабана с внутрикорпусными устройствами показал, что соединения узла крепления “трубопровод парового разогрева – косынка – обечайка барабана” выполнены с конструктивными погрешностями. В конструкции данного соединения не учтены условия его нагружения при пуске котла из холодного состояния. Этот вопрос решается путем модернизации проблемного узла. И хотя он не относится к типовым вопросам для всего парка барабанов КУ, важен результат рассмотрения описанного инцидента, показавший, что образование повреждений в барабане из стали зарубежной разработки в данном случае не вызвано ее неудовлетворительным качеством.

Другой эпизод, связанный с повреждением барабана из стали WB36, произошел на Хуадянь-Те-

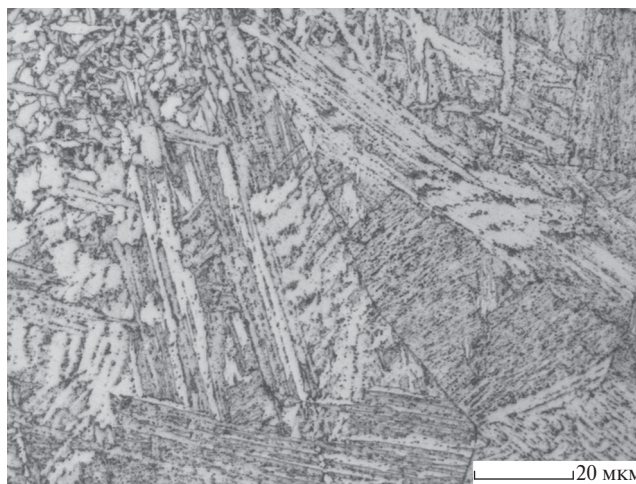


Рис. 1. Микроструктура околошовной зоны поврежденного сварного соединения БВД Хуадянь-Тенинской ТЭЦ

нинской ТЭЦ (Ярославская обл.). При проведении ремонтных работ (2021 г.) в металле БВД (сталь WB36) были обнаружены трещины с внутренней стороны барабана в зоне приварки патрубка лазерного люка к днищу. Они имели кольцевую ориентацию, распространялись вдоль периметра соединения более чем на половину его протяженности в околошовной зоне со стороны патрубка. Такие дефекты были выявлены на обоих КУ установки, срок эксплуатации котлов на тот момент был приблизительно равен четырем годам. Нарботка КУ на время обследования составляла немногим более 36 тыс. ч, количество пусков-остановов соответствовало примерно 100. Как показали исследования, проведенные в ВТИ, основным фактором, способствовавшим образованию трещин, явилось наличие закалочной структуры металла в околошовной зоне корня шва в виде отпущенного крупноигльчатого мартенсита (рис. 1) с твердостью в этой зоне около 400 HV. Формирование указанной нерекомендованной структуры обусловлено, вероятнее всего, отклонениями от штатной технологии сварки из-за условий предварительного подогрева и режимов послесварочной термообработки. Следовательно, в отличие от предыдущего инцидента, в данном случае образование трещин в БВД котла напрямую имеет отношение к фактическому состоянию металла, точнее – к качеству сварных соединений. Это указывает на то, что высокие служебные свойства стали WB36 не снижают технологические требования к процессу производства из нее изделий и, в первую очередь, к технологии сварки.

Значительную долю общего объема неразрушающего контроля металла КУ составляют измерения толщины стенки элементов ультразву-

ковым методом (ультразвуковая толщинометрия – УЗТ). Для барабанов такой контроль выполнялся на относительно небольшом количестве котлов-утилизаторов ПГУ, скорее всего, по причине не слишком продолжительной эксплуатации многих КУ из рассмотренной группы (менее 100 тыс. ч) и отсутствия прецедентов существенного утонения стенок барабанов. По имеющимся данным, утонение стенок барабанов высокого и низкого давления КУ не превышает 3–5% относительно соответствующей исполнительной (номинальной) толщины. Выполненный УЗТ-контроль коллекторов и трубопроводов на необогреваемых участках трактов КУ показал в основном умеренное утонение стенок элементов по контуру как высокого, так и низкого давления. На отдельных КУ (в частности, на одном из энергоблоков Калининградской ТЭЦ-2) было обнаружено довольно значительное утонение стенки гибов перепускных труб контура высокого давления. В растянутой зоне гибов относительное утонение стенки достигало 25% по сравнению с номинальной (паспортной) толщиной, что превышает допустимые отклонения согласно Федеральным нормам и правилам [4].

Наиболее значительная часть работ по УЗТ приходилась на поверхности нагрева КУ. Контролировали трубы и гибы пароперегревателей высокого и низкого давления, газового подогревателя конденсата, ИВД и ИНД. В большинстве случаев результаты УЗТ демонстрировали незначительное или существенное, но в пределах допускаемых отклонений, утонение стенки труб и гибов. При этом, по имеющимся данным, в элементах системы пароперегревателей высокого давления существенного утонения стенок не было обнаружено и, как показали результаты нескольких инспекций, динамика их износа со временем отсутствовала. В элементах трубных систем других поверхностей нагрева КУ, в том числе экономайзера ВД, пароперегревателя низкого давления, газового подогревателя конденсата, ИВД и ИНД некоторых котлов выявлено существенное (до 20% номинального значения и более) утонение стенок.

Отдельного внимания заслуживают результаты УЗТ труб и гибов испарителей низкого давления КУ. На котлах некоторых ПГУ отмечается весьма интенсивный износ металла элементов этих систем. В частности, на котлах ПГУ энергоблока № 1 Северо-Западной ТЭЦ и первой очереди Сочинской ТЭС гибы ИНД имели чрезвычайно высокую степень износа: по данным УЗТ, в некоторых случаях фиксировалось трехкратное и более утонение стенок элементов относительно их номинальной толщины. При этом на КУ других установок (энергоблоков) этих электростанций утонение стенок труб ИНД хотя и было весьма значительным (до 25–30% номинального показателя), оно укладывалось с некоторыми допущениями в рамки приемлемых значений.

Характерно, что для указанных электростанций котлы с меньшей повреждаемостью труб ИНД выполнены по той же конструктивной схеме, что и котлы, отличающиеся чрезмерно активным износом этих поверхностей нагрева. На котлах ПГУ энергоблока № 1 Северо-Западной ТЭЦ и первой очереди Сочинской ТЭС замена гибов труб ИНД проводилась в массовом порядке дважды, при этом вместо забракованных гибов из углеродистой стали устанавливали элементы из легированной стали 12Х1МФ. Повышенный износ стенок труб ИНД наблюдался также на КУ энергоблоков ПГУ-800 Киришской ГРЭС и ПГУ-420 Череповецкой ГРЭС. Актуальность проблемы повышенного износа гибов труб ИНД в связи с эрозионно-коррозионными процессами в контуре котлов-утилизаторов отмечается в [3].

Эрозионно-коррозионный износ металла элементов [5], выражающийся в утонении их стенок в процессе работы оборудования, относится к эксплуатационным дефектам, однако значение толщины стенки элементов (по результатам УЗТ) ниже паспортных данных не всегда свидетельствует о повышенном износе металла. Следует учитывать минусовый допуск на толщину стенки при изготовлении труб и утонение стенки в растянутой зоне гибов в результате технологической операции гибки. При неблагоприятном сочетании указанных факторов утонение стенки в растянутой зоне гибов на уровне 20% для труб диаметром более 100 мм и около 30% для труб меньшего диаметра не является чрезвычайным обстоятельством [6]. Нельзя также исключать, что типоразмер элемента, указанный в документации, не во всех случаях вполне соответствует фактической номинальной толщине. По этой причине критерием работоспособности элемента с пониженной толщиной стенки служит соблюдение нормативных условий прочности. Поэтому утонение стенок трубных элементов в пределах 20–25% для необогреваемых участков трактов КУ и 25–35% для поверхностей нагрева в большинстве случаев не препятствует их дальнейшей эксплуатации.

Однако в эти рамки не укладывается изложенная ранее ситуация с трубными системами ИНД отдельных котлов. В связи с интенсивным износом металла гибов этих систем на некоторых КУ изучению данного вопроса было посвящено немало публикаций [3, 7–11]. При этом в разных источниках неодинаково анализируются причины интенсивного износа металла труб ИНД. Так, в [7] на основе результатов проведенного исследования повреждаемость металла ИНД объясняется кавитационными разрушениями, в то время как в [8] утверждается, что доминирующие механизмы износа металла – локальная эрозия-коррозия,

возникающая при работе котла, и стояночная коррозия. Отчасти этой позиции придерживаются и авторы [3]. Также были предложены мероприятия по снижению стояночной коррозии [8]. Однако по крайней мере частичное их выполнение не привело к ощутимому положительному результату для трубных систем ИНД. Возможно, данная концепция применима к решению проблемы эрозионно-коррозионного износа металла КУ в целом, но в случае ИНД ситуация усугубляется дополнительными факторами.

В [9] указано, что износ гибов ИНД имеет слабо эрозионный характер. Аналогичное мнение выдвигается и в [10], где путем расчетного моделирования показано, что в отдельных рядах труб ИНД скорости потока среды довольно большие (более 15 м/с), в том числе по причине повышенного тепловосприятия, и могут быть достаточными для реализации процесса износа металла по эрозионному механизму. Подобные сведения приведены и в [3].

Важное значение имеют также вопросы выбора и поддержания заданных показателей водно-химического режима КУ [11]. При выборе такого режима обычно учитываются конструктивные особенности котлов-утилизаторов и условия их эксплуатации. Отклонение от норм водного режима способствует активизации процессов эрозионно-коррозионного износа металла [3].

Проанализировав различные литературные источники, можно предположить, что основной механизм, ответственный за интенсивный износ металла ИНД, — эрозионно-коррозионное разрушение поверхностных слоев металла. В пользу этого механизма свидетельствуют данные исследований [3, 9, 10]. Косвенным подтверждением такой концепции является то, что замена материала труб ИНД (стали 20) на сталь 12Х1МФ дала ощутимый положительный результат. Однако ошудилось, что при чисто эрозионном процессе эффект снижения темпа износа металла будет более значительным, поскольку некоторые исследователи утверждают, что замена углеродистой стали на сталь с содержанием хрома около 1% должна сопровождаться уменьшением скорости эрозии не менее чем на порядок [5]. В то же время при кавитационном механизме существенное падение скорости износа может возникать только при использовании материала, обладающего твердостью, в 2 раза превышающей твердость углеродистой стали [7], что, очевидно, не достигается указанной заменой стали 20 на сталь 12Х1МФ. В связи с этим не стоит исключать того, что процесс эрозионно-коррозионного износа металла трубных элементов ИНД может усугубляться наложением кавитационного механизма дефектообразования. Большинство исследователей сходятся во мнении, что реальное умень-

шение степени износа труб проблемных ИНД достигается путем снижения скорости пароводяной смеси.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА

Состояние металла энергооборудования определяется соответствием его ключевых характеристик, включая макро- и микроструктурные параметры, физико-механические свойства и пр., установленным требованиям.

В этом отношении для элементов КУ, изготовленных из сталей, которые традиционно используются в отечественном котлостроении, процедура оценки состояния металла, в том числе соответствующие критерии, укладывается в рамки системы диагностики, действующей в теплоэнергетике [4]. Что касается новых и в первую очередь зарубежных сталей, требуется оценить их рабочие характеристики на соответствие показателям, обеспечивающим необходимый уровень служебных свойств. Это даст возможность сформировать базу для последующего сравнительного анализа и прогноза ресурсных характеристик. К таковым материалам для рассмотренных КУ относятся стали 15NiCuMoNb5 (WB36), 10CrMo910, 13CrMo44 и X10CrMoVNb9-1 (P91 или T91), а также для последней ее российский аналог — сталь 10Х9МБФБ-Ш (Ди82). Из перечисленных марок сталей к перспективным следует отнести сталь WB36, используемую при изготовлении БВД, и высокохромистые стали P91 и Ди82. Основными преимуществами стали WB36 являются ее высокие прочностные свойства и удовлетворительные пластические характеристики, что позволяет снижать металлоемкость изделия посредством уменьшения толщины стенки. К примеру, у барабана высокого давления котла-утилизатора Северо-Западной ТЭЦ, сделанного из стали WB36, значительно больший диаметр (2288 мм), нежели у БВД из стали 16ГНМА Прегольской ТЭС (1600 мм), но при этом толщина его стенок меньше — 54 мм против 58 мм. Параметры среды для обоих котлов примерно одинаковые.

С начала нынешнего века производство толстолистового проката из стали WB36 и изготовление из него барабанов освоено российскими заводами в полной мере. Хотя эта сталь и имеет высокие прочностные показатели, но из-за особенностей ее легирующей основы трудно гарантировать эксплуатационную стабильность некоторых служебных характеристик, в частности сопротивляемости хрупким разрушениям и малоцикловой прочности. Анализ зарубежной научно-технической литературы свидетельствует о том, что, несмотря на достаточно широкое и продолжительное применение этой стали, она менее изучена, чем другие конструкционные стали [12–15]. В то

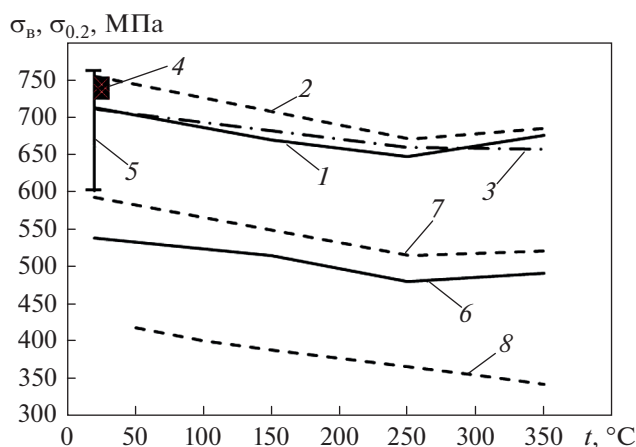


Рис. 2. Температурные зависимости прочностных характеристик стали WB36 и ее сварного соединения с учетом старения металла.

Прочностные свойства: 1–5 – временное сопротивление σ_B ; 6–8 – условный предел текучести $\sigma_{0,2}$.

Участки опытной заготовки: 1, 2, 5–8 – основной металл; 3, 4 – сварное соединение.

Экспозиция: 1, 3, 6 – исходное состояние; 2, 4, 7 – старение в течение 2000 ч; 5, 8 – требование стандарта EN 10028-2 (основной металл, исходное состояние)

же время, как уже отмечалось ранее, хорошие служебные характеристики этой стали еще не являются гарантией высокой надежности изготовленных из нее элементов, особенно сварных изделий. Примером тому может служить инцидент с повреждением штуцерных сварных соединений на БВД котлов ПГУ Хуадянь-Тенинской ТЭЦ.

В России до недавнего времени полностью отсутствовали сведения о работах, посвященных изучению стали WB36 и ее сварных соединений в отечественном варианте их исполнения. В последние два года в ВТИ был выполнен комплекс исследований стали WB36 на опытных сварных заготовках, имитирующих фрагменты БВД [15, 16]. Испытания по определению механических свойств металла проводили в рабочем диапазоне температур для исходного состояния и, учитывая возможность термического старения, после вы-

держки при температуре 400°C в течение 2000 ч [16]. Результаты этих испытаний представлены на рис. 2, где для сравнения приведены также значения прочностных характеристик стали, указанные в Европейских нормах EN 10028-2 [17]. Видно, что прочностные свойства исследованного материала удовлетворяют требованиям международного стандарта, при этом условный предел текучести стали (расчетная характеристика) заметно превосходит регламентированный EN 10028-2 уровень во всем диапазоне рабочих температур. Прочность сварного соединения находится на уровне данной характеристики для основного металла, что позволяет считать коэффициент прочности на сварку равным 1 при условии проведения полного неразрушающего контроля соединения. Старение металла способствует повышению прочностных характеристик и, как показано в [16], некоему снижению пластических свойств. Однако пластические характеристики стали даже с учетом ее старения остаются довольно высокими: относительное удлинение металла после старения составляет при 20°C около 20% при регламентированном EN 10028-2 значении не менее 16% [16].

Испытания на ударный изгиб по Шарпи продемонстрировали высокую ударную вязкость стали: значения KCV при комнатной температуре находились в диапазоне 200–210 Дж/см² для основного металла и металла шва и на уровне 180–200 Дж/см² для зоны сплавления. Значения критической температуры хрупкости исследованного металла, определенной по методике [18], представлены в таблице.

Видно, что для опытных сварных заготовок из стали WB36 температура вязкохрупкого перехода металла находится довольно глубоко в области отрицательных значений, что указывает на хороший запас по условиям наступления хрупкого состояния.

Всероссийский теплотехнический институт и Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения (ЦНИИТмаш) провели совместные испытания стали WB36 (основного металла и металла шва) на малоцикловую

Критическая температура хрупкости металла заготовки

Металл	Критическая температура хрупкости металла, °C	
	в исходном состоянии	после старения в течение 2000 ч
Основной	–60	–30
Шва	–60	–
Зоны сплавления	–40	–40*

* В связи с большим разбросом экспериментальных данных полученное значение критической температуры хрупкости является ориентировочным.

усталость, которые показали, что экспериментальные данные по характеристикам сопротивления малоциклового разрушению основного металла и металла шва практически совпадают как для комнатной (около 20°C), так и для рабочей (350°C) температуры. Это позволило объединить указанные экспериментальные данные и рассматривать их в виде обобщенных кривых малоциклового усталости сварных заготовок из стали WB36 для конкретной температуры. Аппроксимационные зависимости, соответствующие этим экспериментальным кривым, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \text{для } 20^\circ\text{C} \quad \sigma_a &= \frac{4.83 \times 10^4}{N^{0.5}} + 294; \\ \text{для } 350^\circ\text{C} \quad \sigma_a &= \frac{2.76 \times 10^4}{N^{0.5}} + 209, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где σ_a – амплитуда условно-упругих напряжений, МПа; N – число циклов до разрушения.

С использованием этих соотношений и принятых для усталости нормативных коэффициентов запаса прочности n [19] по напряжениям ($n_\sigma = 2$) и долговечности ($n_N = 10$) были построены расчетные кривые малоциклового усталости, показанные на рис. 3. Для нескольких котлов-утилизаторов расчеты циклической прочности БВД из стали WB36, выполненные на базе этих кривых, показали, что по условиям малоциклового усталости (и с учетом коррозионного фактора) для этих барабанов допустимы не менее 400 пусков из холодного состояния за расчетный срок службы 40 лет. Результаты этой оценки явились основанием для увеличения нормативного паркового ресурса барабанов высокого давления КУ из стали WB36 с 200 до 250 тыс. ч.

Для изготовления высокотемпературных элементов некоторых КУ с высокой температурой перегретого пара на выходе (обычно более 560°C) использовались жаропрочные стали с 9–10%-ным содержанием хрома, относящиеся к сталям мартенситного класса. Чаще всего это зарубежная сталь X10CrVoVNb9-1 (P91 или T91), реже – ее отечественный аналог – сталь 10X9MФБ-Ш (Ди82). На некоторых КУ, например котлах в составе ПГУ Нижневартковской и Пермской ГРЭС, поверхности нагрева из стали T91 эксплуатируются при температурах 590–600°C и вплоть до 610°C. Анализ, выполненный в [20] на основе зарубежных литературных источников, показал, что высокие потребительские качества стали P91 обеспечиваются при строгом соблюдении технологических норм (включая процесс ее изготовления, сварку, эксплуатацию), нарушение которых может привести к утрате этих преимуществ и снижению эксплуатационной надежности изделий, изготовленных из этой стали.

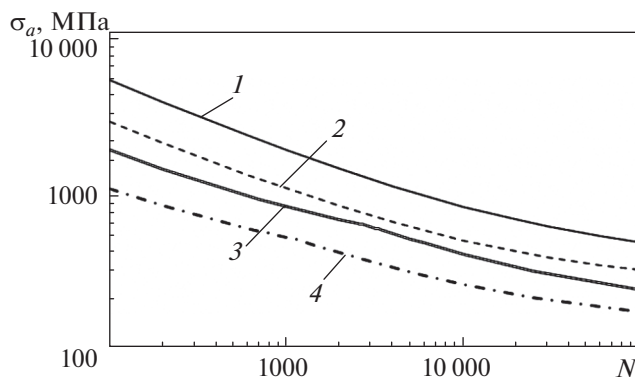


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные кривые малоциклового усталости стали 15NiCuMoNb5. 1, 2 – аппроксимация результатов испытаний [формула (1)]; 3, 4 – расчетные кривые усталости. Температура, °C: 1, 3 – 20 (комнатная); 2, 4 – 350 (рабочая)

Изначально заявленные для стали P91 характеристики длительной прочности впоследствии уточнялись с учетом результатов исследований и опыта эксплуатации. Под эгидой Европейского комитета по сотрудничеству в области ползучести (European Creep Collaborative Committee) были собраны в большом объеме и обработаны экспериментальные данные по длительной прочности стали P91. Результатом этого явилась модифицированная система (в терминах параметра Мэнсона – Хэферда) характеристик длительной прочности, вошедшая в актуализированной форме в обновленную редакцию Европейских норм EN 10216-2.

Аналогичная работа выполнялась ведущими научно-исследовательскими организациями России (Центральным котлотурбинным институтом, ЦНИИТмаш, ВТИ), и в результате был составлен обобщенный реестр допускаемых напряжений для сталей Ди82 и P91, оформленный в виде совместного Технического решения трех указанных организаций.

В ВТИ были систематизированы совокупные данные (собственный банк данных) по длительной прочности сталей P91 и Ди82. Путем их статистической обработки была построена обобщенная кривая длительной прочности и для нее получена аппроксимирующая зависимость [21]

$$\lg \tau = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^5 \left[A_i \left(\frac{\sigma}{10} \right)^i \right] + 2 \lg T - a, \quad (2)$$

где τ – время до разрушения, ч; T – расчетная температура, К; A_i – эмпирические коэффициенты; σ – приведенное напряжение, МПа; $a = 36$ – константа.

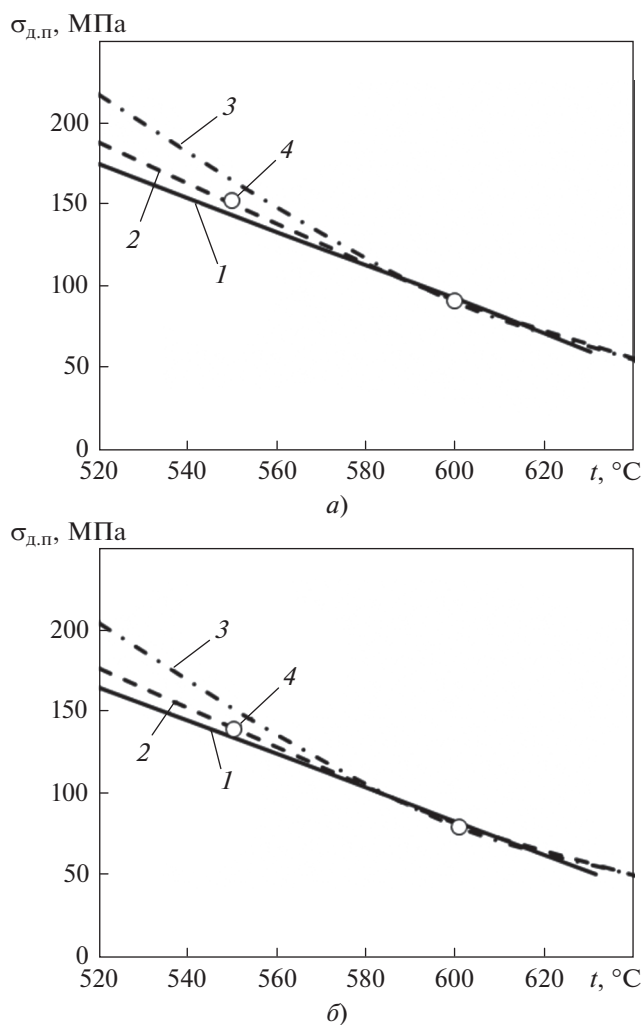


Рис. 4. Зависимости длительной прочности $\sigma_{д.п.}$ от температуры t сталей P91 и Ди82 для ресурсных баз 100 тыс. ч (а) и 200 тыс. ч (б). 1 – результаты обработки экспериментальных данных; 2 – данные технического решения; 3 – данные EN 10216-2; 4 – нормы EPRI-2010

Коэффициенты в уравнении (2) были определены по результатам регрессионной обработки экспериментальных данных [21], по мере накопления этих данных численные значения коэффициентов в соотношении (2) могут уточняться.

Сопоставительный анализ показал, что полученная зависимость (2) в целом удовлетворительно согласуется с кривыми длительной прочности, соответствующими российским (техническое решение) и европейским (EN 10216-2) нормам, за исключением области высоких напряжений, что связано с относительно невысокими температурами [21]. Это наглядно иллюстрирует рис. 4, на котором показаны зависимости разрушающих напряжений от температуры для ресурсных баз 100 и 200 тыс. ч. Видно, что в области умеренно

высоких температур ($t < 560^{\circ}\text{C}$) три рассматриваемые зависимости несколько расходятся, причем кривая 1 (см. рис. 4), соответствующая формуле (2), является наиболее консервативной.

Что характерно, приведенные в нормах EPRI данные по длительной прочности стали P91 (кривая 4 на рис. 4) хорошо согласуются с кривой, соответствующей (2).

Для расчетных оценок ресурсных характеристик элементов, изготовленных из хромистых сталей, котлов-утилизаторов, в том числе при продлении срока их службы, рекомендуется использовать формулу (2), при этом вместо приведенного напряжения σ в него следует подставлять произведение σt . Результаты расчетного анализа ресурсных показателей элементов, изготовленных из сталей P91 и Ди82, целесообразно координировать с данными металлографических исследований микроповрежденности металла. При этом, наряду с принятой официально предварительной шкалой микроповрежденности хромистых сталей [4], для оценочного анализа нужно пользоваться критериальной схемой, приведенной в [21] и увязывающей стадию выработки ресурса с уровнем микроповрежденности металла и накопленной деформацией ползучести.

ВЫВОДЫ

1. Характерными дефектами металла элементов КУ чаще всего являются повреждения сварных соединений. Часть этих дефектов вызвана погрешностями изготовления или монтажа оборудования. Обнаруженные повреждения в угловых сварных соединениях продувочных трубопроводов и в тройниковых соединениях коллекторов пароперегревателя и экономайзера ВД относятся к эксплуатационным дефектам, а их образование происходит по механизму термоусталости.

2. К эксплуатационному виду повреждений относится утонение стенок элементов, возникающее в процессе работы котлов-утилизаторов. Утонению подвержены преимущественно поверхности нагрева и особенно система испарителя низкого давления. Основной механизм, ответственный за интенсивное утонение стенок гибов труб этой системы, – эрозионно-коррозионный износ металла. В качестве сопутствующего ему фактора следует рассматривать возможность разрушения поверхностных слоев металла по кавитационному механизму.

3. На основании проведенных исследований для сварных изделий, изготовленных из стали WB36 отечественного производства, подтверждены нормативные требования по главным служебным характеристикам и удовлетворительный уровень свойств по сопротивлению малоциковому и хрупкому разрушению. Результаты расчет-

но-экспериментальной оценки малоциклового прочностного барабанов ВД, отлитых из стали WB36, дают возможность увеличить их нормативный ресурс с 200 до 250 тыс. ч.

4. Обобщены и обработаны результаты представительных испытаний на длительную прочность для высокохромистых сталей P91 и ДИ82. Получена аппроксимационная зависимость, связывающая время до разрушения с расчетной температурой и действующим приведенным напряжением, которая рекомендуется к применению для оценки ресурсных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций: учеб. пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
2. Березинец П.А., Терёшина Г.Е. Котлы-утилизаторы бинарных парогазовых установок // Теплоэнергетика. 2021. № 6. С. 45–54. <https://doi.org/10.1134/S0040363621060023>
3. Богачев А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б. Особенности эксплуатации и повреждаемость котлов-утилизаторов бинарных парогазовых установок. М.: Энергоатомиздат, 2008.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила осуществления эксплуатационного контроля металла и продления срока службы основных элементов котлов и трубопроводов тепловых электростанций”. Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2020 № 535.
5. Томаров Г.В., Шипков А.А. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследование, прогнозирование и предупреждение. Ч. 1: Процессы и закономерности эрозии-коррозии // Теплоэнергетика. 2018. № 8. С. 5–16. <https://doi.org/10.1134/S0040363618080064>
6. Гринь Е.А., Саркисян В.А., Бочкарев В.И. Контроль металла и надежность стареющего оборудования ТЭС // Электрические станции. 2021. № 6. С. 4–8. <https://doi.org/10.34831/EP.2021.1079.6.001>
7. Никитин В.И., Беляков И.И., Бреус В.И. Повреждения парообразующих труб контура низкого давления барабанного котла-утилизатора ПГУ-450 Северо-Западной ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2009. № 2. С. 27–34.
8. Продление эрозионно-коррозионного эксплуатационного ресурса трубной системы котлов-утилизаторов ПГУ / Г.В. Томаров, А.В. Михайлов, Е.В. Величко, В.А. Буданов // Теплоэнергетика. 2010. № 1. С. 20–24.
9. Галецкий Н.С., Шварц А.Л. Особенности эрозионно-коррозионного износа в испарителях низкого давления котлов-утилизаторов ПГУ при высоких паросодержаниях // Теплоэнергетика. 2013. № 12. С. 69–72.
10. Плешанов К.А., Маслов Р.С. Причины повреждений труб испарителя низкого давления в котлах-утилизаторах // Сб. докл. III Всерос. науч.-практ. конф. “Современные технологии в энергетике”. М.: ОАО ВТИ, 26–27 сент. 2019 г. С. 185–193.
11. Ларин Б.М. Состояние водно-химического режима и систем его обеспечения на энергоблоках ПГУ (обзор) // Теплоэнергетика. 2018. № 1. С. 47–53. <https://doi.org/10.1134/S0040363617120050>
12. Fohl J., Willer D., Katerbau K.H. Effect of copper precipitates on the toughness of low alloy steels for pressure boundary components // Proc. of the 30th MPA-Seminar in Conjunction with the 9th German-Japanese Seminar. Stuttgart, Germany, 6–7 Oct. 2004. P. 11.1–11.15.
13. Kumar S., Ramesh T., Asokkumar K. Welding studies on WB36 for feed water piping // Int. J. Comput. Eng. Res. (IJCER). 2016. V. 6. No. 5. P. 36–52.
14. Analysis of mechanical properties of 15NiCuMoNb at different temperatures / D. Yannan, R. Bin, L. Longxian, T. Xiaoying, X. Xiaolong, Z. Weiping, O. Weiping // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 330. Is. 4. P. 042046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/330/4/042046>
15. Комплекс служебных свойств металла и сварного соединения барабанной стали 15NiCuMoNb₅ (WB36) / Е.А. Гринь, А.В. Пчелинцев, А.В. Зеленский, В.А. Саркисян // Электрические станции. 2023. № 4. С. 2–9. <https://doi.org/10.34831/EP.2023.1101.4.001>
16. Исследование влияния температурного старения на комплекс служебных характеристик стали 15NiCuMoNb₅ (WB36). Ч. III: Влияние термического старения на механические свойства и критическую температуру хрупкости / Е.А. Гринь, В.А. Саркисян, А.В. Зеленский, А.В. Пчелинцев // Электрические станции. 2024. № 2. С. 2–10. <https://doi.org/10.34831/EP.2024.1111.2.001>
17. EN 10028-2. Flat products made of steels for pressure purposes. European standart, 2017.
18. ПНАЭ-Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
19. РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. М.: ГУП “Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России”, 2002.
20. Попов А.Б. Некоторые практические аспекты применения стали класса 91 в российской энергетике // Энергетик. 2016. № 1. С. 49–55.
21. Безопасность и эксплуатационная надежность тепломеханического оборудования / Е.А. Гринь, А.В. Пчелинцев, К.К. Крейцер, В.И. Бочкарев, Р.Н. Калугин // Теплоэнергетика. 2021. № 6. С. 103–109. <https://doi.org/10.1134/S0040363621060047>

Damageability of the Metal of Combined Cycle Plant Heat Recovery Steam Generators and the Service Properties of Advanced Lifetime-Governing Metals Used in Them

E. A. Grin^a, A. V. Zelenskii^a, *, and V. A. Sarkisyan^a

^aJSC All-Russia Thermal Engineering Institute (VTI), Moscow, 115280 Russia

*e-mail: AVZelensky@vti.ru

Abstract—A sampling analysis of the results from examining the metal of 25 heat recovery steam generators (HRSGs) used as part of combined cycle plants (CCPs) installed at 12 power plants in Russia is carried out. In-service examination of the HRSG metal is as a rule carried out during the equipment overhaul. The metal defects revealed during the steam generator diagnostic activities are in most frequent cases damages in weld joints, some of which were left in the steam generator manufacturing or installation stage, while the other ones emerged during the operation. Operational defects include, among others, the thinning of component walls. Factors causing various kinds of metal defects are briefly analyzed. Advanced steels developed outside of Russia are used in some heat recovery steam generators as the structural material for manufacturing the critical components. Assessing the quality of these steels and the stability of their service properties is a top-priority objective pursued in analyzing the HRSG metal state. In the course of activities carried out at the VTI on studying full-scale welded billets made of grade WB36 steel used to manufacture the drums, it has been confirmed that the main service characteristics of this steel comply with the applicable regulatory requirements, and that the steel has satisfactory properties in terms of resistance to low-cycle and brittle fracture. This made it possible to increase the fleet service life of high-pressure drums (HPDs) made of this steel. For high-chromium steels of grades P91 and Di82, the results of representative tests for long-term strength have been generalized and processed, which opens the possibility in principle to estimate the current state of metal and predict the lifetime characteristics of the critical components of heat recovery steam generators.

Keywords: combined cycle plant, heat recovery steam generator, metal, weld joint, examination, damage, erosion wear, cavitation wear, foreign steel, service properties, service life

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-79408 от 27 ноября 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Подписано к печати 11.01.2025 г.

Формат 60 × 88¹/₈

Тираж 301 экз.

Усл. печ. л. 9.53

Зак. 7243

Дата выхода в свет 18.01.2025 г.

Уч.-изд. л. 9.75

Цена свободная

Учредители: Российская академия наук,
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

Издатель: ООО «ТЕМАТИЧЕСКАЯ РЕДАКЦИЯ»,
125252, г. Москва, ул. Зорге, д. 19, этаж 1, помещ. III, комн. 17

Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Коняхин А.В.),
390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151