

РЕМОНТНАЯ СВАРКА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТУРБИН ИЗ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ БЕЗ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКИ*

А. К. ЦАРЮК, канд. техн. наук, **В. Д. ИВАНЕНКО**, инж., **В. В. ВОЛКОВ**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины),
С. И. МАЗУР, **А. А. ТРОЙНЯК**, инженеры (Трипольская ТЭС, г. Украинка),
А. В. ВАВИЛОВ, **А. Г. КАНТОР**, **Н. П. ВОЛИЧЕНКО**, инженеры (ОАО «Турбоатом», г. Харьков)

Рассмотрены вопросы ремонтной сварки поврежденных корпусных деталей турбин после длительной эксплуатации при рабочих параметрах пара. Предложена технология сварки с использованием перлитных электродов без последующей термообработки (высокого отпуска). Для ремонта поврежденных компонентов корпусного оборудования турбоагрегатов из литых теплоустойчивых сталей рекомендуется технология ручной дуговой сварки перлитными электродами типа Э-06Х1М, предусматривающая применение предварительного и сопутствующего подогрева с последующим термическим отпуском. Сварные соединения, выполненные по разработанной технологии, имеют высокую трещиностойкость и требуемые механические свойства. Предложенная технология прошла успешное испытание при ремонтной сварке цилиндров высокого давления турбины К-300-240.

***Ключевые слова:** ремонтная сварка, повреждения, теплоустойчивые литые стали, корпусные детали турбин, электроды, предварительный подогрев, термический отпуск, ресурс*

Продление ресурса работы энергетического оборудования тепловых электростанций (ТЭС) возможно после исследования состояния его отдельных узлов и технической диагностики с целью выявления повреждений, при обнаружении которых необходимо провести ремонтные работы для обеспечения дальнейшей работы агрегатов. Повреждения элементов оборудования, длительно эксплуатируемого на ТЭС, обусловлены технологическими, конструкционными и эксплуатационными факторами. Одними из наиболее повреждаемых элементов турбоагрегатов являются корпусные детали турбин — цилиндры высокого (ЦВД) и среднего давления, корпуса регулирующих клапанов парораспределения, пароводяная арматура высокого давления и др. [1]. Ряд таких деталей имеют сложную конфигурацию и изготавливаются из литых теплоустойчивых сложнoleгированных сталей (15Х1М1ФЛ, 20ХМФЛ и 20ХМЛ). В корпусных деталях турбин, работающих в условиях высокого давления и температуры, имеют место повреждения в виде трещин, вызванных ползучестью металла, термической усталостью и хрупким разрушением. Эти повреждения в большинстве случаев находятся на участках деталей с резким переходом толщин или в

зонах дефектов литья. Повышенная повреждаемость возникает также в местах сварки, которые выполнены с нарушениями технологии [2]. Ремонт поврежденных деталей составляет определенные трудности, связанные с обеспечением проведения работ в производственных условиях. Поэтому разработка прогрессивных технологий сварки как основного способа ремонта энергетического оборудования является важной и актуальной задачей для продления ресурса и надежной работы энергоагрегатов ТЭС [3].

Сварка литых хромомолибденовых сталей представляет определенные трудности и выполняется, как правило, с применением предварительного и сопутствующего подогрева мест сварки, а также их последующей термической обработки. Учитывая, что в условиях действующих ТЭС проведение термообработки отремонтированных сварных соединений проблематично, весьма перспективно применение методов сварки без послесварочной термообработки. Работы в этом направлении выполняются в специализированных организациях РФ (ОАО «ВТИ», НПО «ЦКТИ», НПО «ЦНИИТМаш» и др.), что нашло свое отражение в нормативном документе РД 108.021.112–88 [4] и других источниках [1–3, 5]. Ремонтную сварку без термообработки рекомендовано выполнять аустенитными электродами без подогрева или перлитными электродами с предварительным и сопутствующим подогревом и фальшподогревом определенных зон отремонтированного участка [1, 4].

Опыт использования электродов аустенитного класса свидетельствует о значительной неоднородности химического состава наплавленного ме-

* Статья подготовлена по результатам выполнения комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2006–2009 гг.).



Химический состав стали 15X1M1ФЛ, мас. %

Сталь 15X1M1ФЛ	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
							не более	
По ТУ 108.671–77	0,14...0,20	0,2...0,4	0,6...0,9	1,2...1,7	0,9...1,2	0,25...0,40	0,025	0,025
Исследуемая плавка	0,16	0,28	0,55	1,3	1,0	0,30	0,003	0,003

талла и механических свойств соединения, что способствует преждевременному разрушению в зоне перемешивания основного и электродного материала и по линии сплавления. Повторные ремонты этих мест в корпусных деталях аустенитными электродами сопровождаются новыми разрушениями и увеличивают объемы ремонтных работ.

Применение перлитных электродов по рекомендованным технологиям [1, 4, 5] в сочетании с предварительным и послесварочным подогревом мест ремонтной сварки обеспечивает требуемый химический состав и необходимый уровень механических свойств наплавленного металла, близкий к свойствам основного металла, что способствует получению более высокого качества ремонта и увеличению ресурса отремонтированных деталей турбин.

В Институте электросварки им. Е.О. Патона проведен комплекс работ по изучению возможности применения ремонтной сварки корпусных деталей турбин из литых хромомолибденованадиевых сталей без последующей термической обработки. В качестве базового принят вариант ремонтной сварки широко применяемой литой теплоустойчивой стали 15X1M1ФЛ перлитными электродами. Химический состав этой стали приведен в таблице.

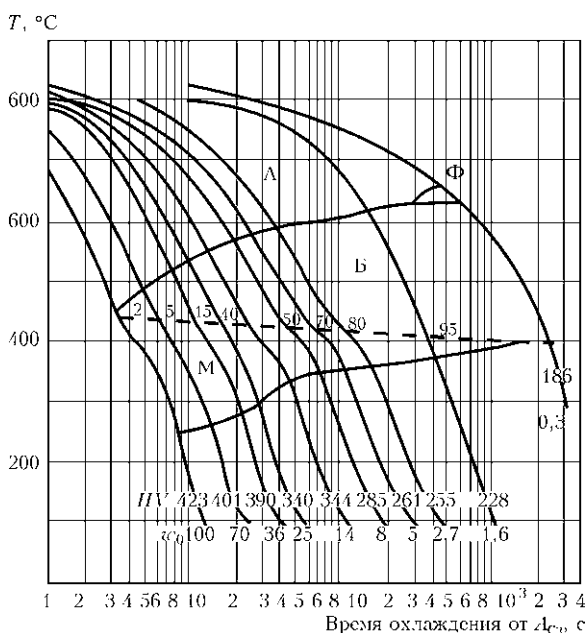


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита в теплоустойчивой стали 15X1M1ФЛ

Требования к механическим свойствам отливок из стали 15X1M1ФЛ (по ТУ 108.671–77) следующие: $\sigma_m = 350$ МПа; $\sigma_B = 550...600$ МПа; $\delta = 22$ %; $\psi = 69$ %; $KCU = 40$ Дж/см².

Технология ремонтной сварки должна предусматривать меры, предупреждающие образование холодных трещин в сварных соединениях. Трещиностойкость сварных соединений можно обеспечить выбором тепловых режимов и условий сварки, при которых скорость охлаждения будет способствовать формированию структуры металла ЗТВ, не склонной к образованию трещин. Поэтому в первую очередь было исследовано влияние термического цикла сварки на структуру и свойства литой корпусной стали 15X1M1ФЛ. В соответствии с построенной термокинетической диаграммой превращения аустенита в этой стали (рис. 1) при различных условиях нагрева и охлаждения, характерных для различных условий сварки, в интервале скоростей охлаждения 0,33...25 °C/c при 500 °C температура окончания мартенситного превращения находится выше 290 °C, а твердость структурных составляющих находится на уровне HV 180...340. При увеличении скорости охлаждения выше 25 °C/c структура стали мартенситная (рис. 2). При этом твердость возрастает и при 100 °C/c достигает HV 390–420. Известно [6–8], что после окончания мартенситного превращения ниже 290 °C и содержании мартенсита более 50 % возникает опасность образования холодных трещин. Поэтому при сварке такой стали возникает необходимость применения дополнительных мер по регулированию процесса охлаждения зоны сварки в виде предварительного и сопутствующего подогрева или применения способов сварки, обеспечивающих автоподогрев соединения.

В соответствии с работами [1, 3, 4] для ремонтной сварки без последующей термообработки сталей типа 15X1M1ФЛ, 20XMФЛ и 20XMЛ рекомендованы электроды типа Э-06X1М (ГОСТ 9467–75).

Химический состав металла, наплавленного электродами марки ТМЛ-5 (тип Э-06X1М) в исходном после сварки состоянии следующий: мас. %: 0,044 C; 0,25 Si; 0,56 Mn; 0,69 Cr; 0,51 Mo; 0,021 P; 0,017 S. Механические свойства наплавленного металла при 20 °C: $\sigma_B = 600$ МПа; $\delta = 26$ %; $KCU = 173$ Дж/см².

Для оценки стойкости стали 15X1M1ФЛ против образования холодных трещин и определения

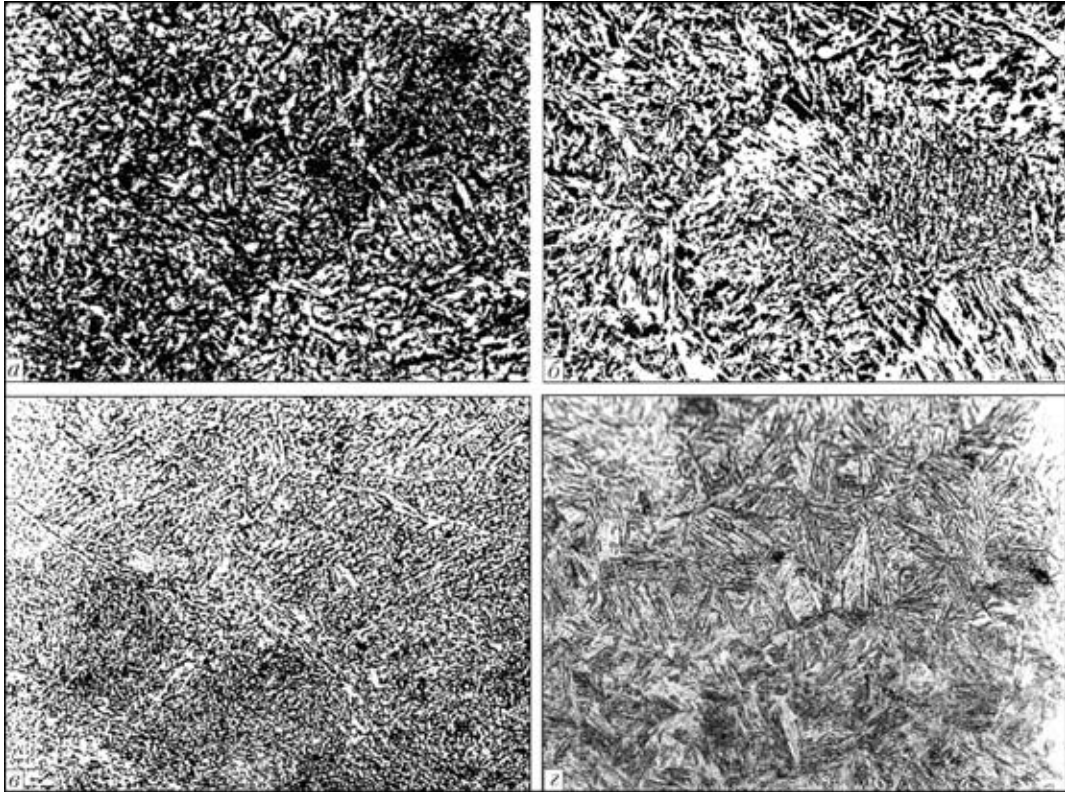


Рис. 2. Микроструктура ($\times 300$) стали 15X1M1ФЛ в исходном состоянии (а) и при $w_0 = 0,3$ (б), 1,6 (в), 100 (г) °C/c

необходимой температуры предварительного подогрева при ремонтной сварке проведены исследования по методу Implant (метод вставок) [9], а также на технологических пробах Теккен и Лихайского университета [10].

В качестве критерия трещиностойкости сварного соединения в испытаниях по методу Implant принимали максимальные (критические) напряжения в образцах до начала разрушения. Под нагрузкой образцы выдерживали до 24 ч. Наплавку при испытаниях выполняли ручной дуговой сваркой электродами диаметром 4 мм марки ТМЛ-5 при $I_{св} = 175$ А. Длина валика 70 мм, время выполнения наплавки 30 ± 2 с. Наплавку выполняли непосредственно на установке в условиях как отсутствия подогрева, так и с подогревом до 250 °C.

Экспериментальные данные показали, что при сварке сталей типа 15X1M1ФЛ имеет место образование холодных трещин по механизму замедленного разрушения (инкубационный период, период стойкого возрастания микропластических деформаций и период ускоренного разрушения при критических напряжениях) и, вероятно, формирование неблагоприятной структуры в зоне наплавки (рис. 3, а). Применение подогрева до 200 °C позволило поднять уровень критических напряжений до 0,7...0,75 предела текучести основного металла (рис. 3, б). Предварительный подогрев способствует снижению скорости охлаждения при структурных превращениях, благоприятно влияет на характер протекания микропласти-

ческих деформаций и удаление диффузионного водорода.

Технологические пробы для оценки трещиностойкости изготавливали из литой стали 15X1M1ФЛ толщиной 20 мм. Ручную дуговую сварку выполняли электродами ТМЛ-5 и УОНИ-13/45А на режиме $I_{св} = 170...180$ А, током обратной полярности. Применение электродов УОНИ-13/45 необходимо для создания «мягких прослоек» при многослойном заваривании дефектов или для облицовки кромок выборок.

Как показали результаты проведенных испытаний технологических проб, для обеспечения

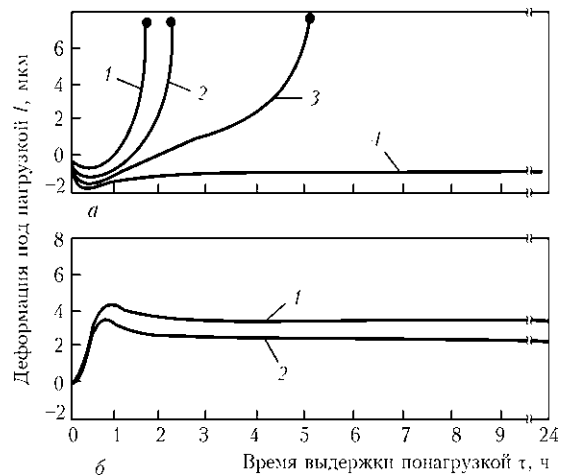


Рис. 3. Кинетика деформаций при испытаниях стали 15X1M1ФЛ по методу Implant: а — без подогрева; 1 — критическое напряжение 300; 2 — 280; 3 — 240; 4 — 220 МПа; б — подогрев до 200°С; 1 — 350; 2 — 300 МПа

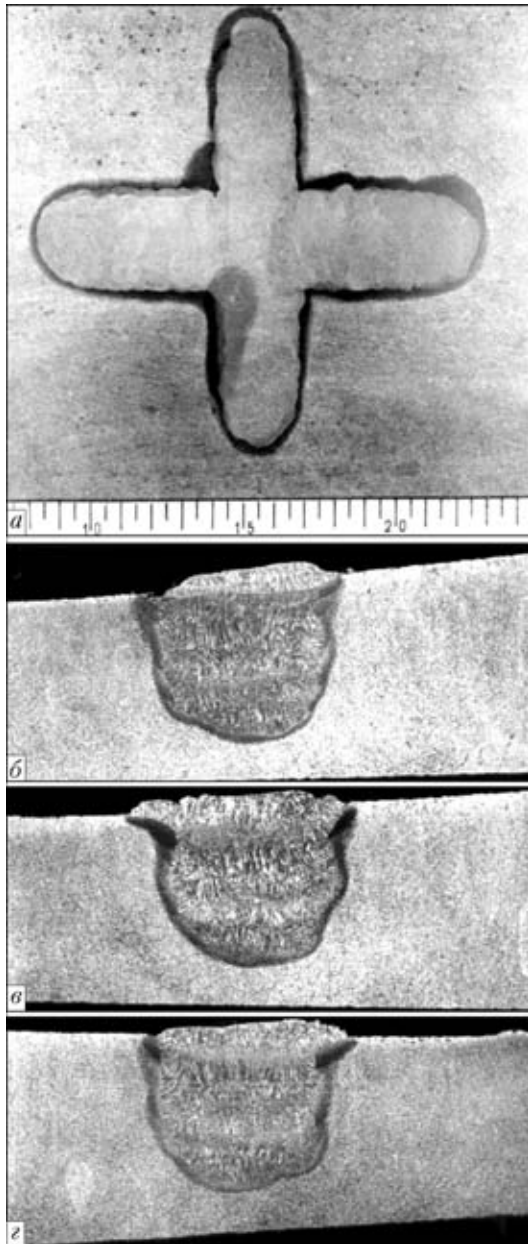


Рис. 4. Макрошлифы заваренных крестообразных выборок на стали 15X1M1FL: *a* — продольное сечение; *б-г* — поперечные сечения соответственно в начале, середине и конце выборок

трещиностойкости при сварке литой стали 15X1M1FL электродами типа Э-06X1M необходимо применение предварительного подогрева до 200...250 °С.

Известно [11], что свойства металла шва и ЗТВ сварных соединений теплоустойчивых сталей в значительной степени зависят от температурных условий их пребывания непосредственно после завершения процесса сварки. На повышение пластических свойств и трещиностойкость сварных соединений особенно эффективно воздействует послесварочный отдых [12, 13]. При этом фазовых превращений не наблюдается, но создаются благоприятные условия для удаления диффузионного водорода в зоне сварки.

Следует отметить, что послесварочный отдых в сравнении с высоким отпуском не снижает уровень остаточных сварочных напряжений. Релаксация же остаточных напряжений при температуре эксплуатации незначительна. Поэтому отремонтированные детали турбоагрегатов могут работать с ограниченным ресурсом (до очередного ППР). После проведения очередного обследования и технической диагностики принимается решение о дальнейшей их промышленной эксплуатации.

На основании имеющегося опыта показано [13], что для повышения трещиностойкости сварных соединений наиболее эффективно применение отдыха при температуре, превышающей температурный интервал хладноломкости металла конкретной марки стали. Исходя из этого положения, температуру отдыха сварных соединений стали типа 15X1M1FL можно установить на уровне 250...280 °С.

Проведенные исследования основных технологических характеристик свариваемости теплоустойчивых сталей для корпусных деталей турбин на базе литой стали 15X1M1FL с применением электродов типа Э-06X1M позволяют подтвердить рекомендации [4] о возможности исправления дефектов в литых корпусных деталях с использованием перлитных электродов. Для стабилизации структуры металла в зоне ремонтной сварки, ускорения выделения диффузионного водорода и предотвращения образования трещин после сварки необходим также послесварочный подогрев в виде термического отдыха [11, 13].

С целью оценки автоподогрева при ремонтной сварке корпусных деталей без подогрева и послесварочной термообработки был опробован способ сварки «поперечной горкой» [14], который, благодаря непрерывному нанесению сварочных валиков по всему сечению выборок дефектов, обеспечивает автоподогрев и позволяет выполнять ремонтную сварку без предварительного подогрева. Заваривание выборок можно выполнять в нижнем, горизонтальном и вертикальном положениях.

Для определения стойкости соединений против образования холодных трещин при заваривании поврежденных корпусных деталей способом «поперечной горки» выполняли сварку крестообразных выборок. На пластине из литой стали 15X1M1FL толщиной 60 мм делали две выборки перпендикулярно одна к другой длиной по 50 мм, шириной 30 мм и глубиной 40 мм. Сварку выполняли без применения предварительного и послесварочного нагрева как с облицовкой кромок перед сваркой электродами УОНИ-13/45, так и без облицовки (рис. 4, *a*). Заполнение выборок выполняли электродами ТМЛ-5 диаметром 4 мм, в обоих случаях при $I_{CB} = 180$ А. Сварку начинали от торцов выборок.

После сварки пробы разрезали на темплеты с целью выявления трещин и других дефектов, а также изучения макроструктуры. Как видно из макрошлифов, представленных на рис. 4, б-з, металл шва и ЗТВ имеет вид, характерный для соединений, выполненных обычной многослойной сваркой. Наплавленный металл плотный, без пор, трещин, шлаковых включений и других дефектов. Полученные результаты позволяют рассматривать способ сварки «поперечной горкой» как один из возможных вариантов при устранении повреждений в литых корпусных деталях из теплоустойчивых сталей без применения предварительного и послесварочного подогрева.

Результаты проведенных исследований позволили рассмотреть вопрос о возможности выполнения ремонтной сварки без последующей термообработки при заварке повреждений на корпусных деталях турбинного оборудования в стационарных условиях. Объектом применения предложенной ремонтной технологии сварки была выбрана крышка корпуса ЦВД паровой турбины К-300-240 из теплоустойчивой литой стали 20ХМФЛ. Во время проведения капитального ремонта блока № 3 Трипольской ТЭС было проведено обследование ЦВД. При визуальном оптическом контроле (ВИК) на внутренней поверхности наружной крышки корпуса ЦВД (рис. 5) в районе прилива под шпоночный разъем были выявлены несквозные трещины с минимальным раскрытием. Турбина находилась в эксплуатации в течение 248667 ч. Рабочие параметры пара: температура 545 °С, давление 245 атм. Для принятия технического решения о возможности проведения ремонтной сварки без последующей термообработки предварительно была выполнена аттестация предложенной технологии в условиях ТЭС. Аттестационные испытания проводили на образце из литой стали 20ХМФЛ размером 500×300×60 мм. Выборка на образце имитировала несквозную трещину длиной 200 мм и глубиной 30 мм. Химический состав металла образца стали 20ХМФЛ следующий, мас. %: 0,20 С; 0,30 Si; 0,70 Mn; 1,10 Cr; 0,60 Mo; 0,25 V; 0,25 Ni; 0,28 Cu; 0,020 S; 0,020 P.

При проведении аттестационных испытаний обрабатывали режимы и технологию ремонтной сварки; проводили неразрушающий и разрушающий контроль качества сварного соединения по предложенной технологии; исследовали физико-механические свойства и структуру выполненного сварного соединения и их соответствия требованиям нормативной документации.

Аттестационные испытания проводили по разработанной в ИЭС им. Е.О. Патона программе, учитывающей все требования к проведению ремонтной сварки в корпусных литых деталях паровых турбин [4].

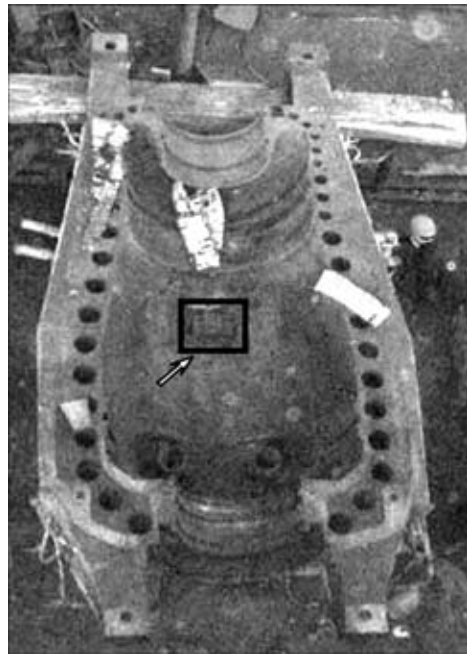


Рис. 5. Общий вид внутренней поверхности крышки корпуса ЦВД турбины К-300-240 (стрелкой указан шпоночный разъем, возле которого обнаружены участки с трещинами)

Заварку выборки выполняли электродами ТМЛ-5 диаметром 4 мм. Electrodes перед сваркой прокачивали при температуре 400 °С в течение 2 ч.

Подогрев пластины проводили до 250 °С на режимах: облицовка выборки при $I_{св} = 140...170$ А; заполнение выборки (кроме середины) при $I_{св} = 160...180$ А; середина выборки $I_{св} = 140...170$ А.

После полного заполнения выборки проводили нагрев по режиму термического отдыха при температуре 250 °С с выдержкой 15 ч. После окончания времени отдыха соединение охлаждали со скоростью около 50 °С/мин до снижения температуры пластины до 80 °С.

Качество сварного соединения оценивали визуальным контролем (раздел 16.3 РТМ-1с-89), магнитно-порошковым методом (ГОСТ 21105-87), а также ультразвуковым контролем (раздел 16.5 РТМ-1с-89). Проведенный контроль качества сварного соединения не обнаружил отклонений от нормативных требований.

Исследования механических свойств показали, что предел прочности сварного соединения при испытаниях образцов на растяжение находится в пределах 530...560 МПа, а ударная вязкость наплавленного металла составляет 148...170 Дж/см², что отвечает требованиям к этой стали ($\sigma_B = 500$ МПа и $a_n = 50$ Дж/см² соответственно).

Проведены металлографические исследования макро- и микроструктуры. Исследования показали отсутствие дефектов в металле шва и ЗТВ. Твердость металла шва составляет HV 184, металла ЗТВ — HV 172 при допустимых для стали 20ХМФЛ HV 104...223, а для металла шва — HV 150...240.

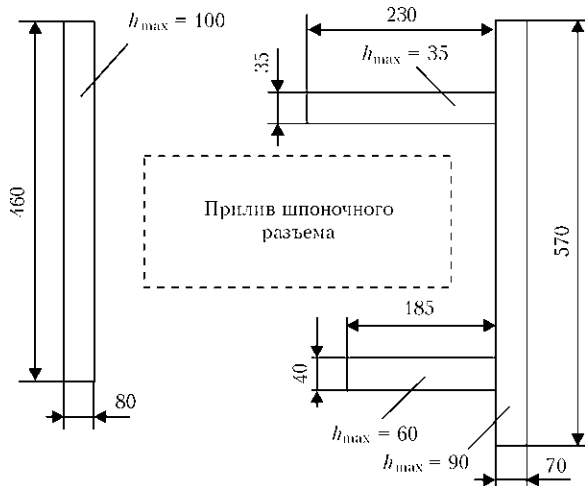


Рис. 6. Схема расположения выборок трещин на внутренней поверхности крышки корпуса ЦВД турбины К-300-240 (h — глубина выборки)

Таким образом, проведенные испытания ремонтной заварки условного дефекта на пластине из стали 20ХМФЛ по разработанной технологии в соответствии с программой аттестационных испытаний, показали положительные результаты. Это позволило принять техническое решение и рекомендовать технологию для ремонтной сварки крышки ЦВД турбины К-300-240 из литой стали типа 20ХМФЛ. Разработан технологический процесс сварки и составлена технологическая инструкция по ремонтной сварке крышки корпуса ЦВД. Выборку трещин проводили с помощью пневмозубила и абразивных инструментов с периодическим контролем поверхности. Характер расположения выборок и их окончательные размеры приведены на рис. 6. После выборки трещин поверхность зачищали механическим способом и контролировали ВИК и цветной дефектоскопией. Результаты контроля удовлетворительные.

Заварку и последующий термический отдых места заварки проводили согласно разработанному технологическому процессу ремонтной сварки. Неразрушающий контроль отремонтированных участков показал высокое качество выполненных сварных соединений. Блок № 3 с турбиной К-300-240 был принят для дальнейшей эксплуатации.

Выводы

1. Исследована свариваемость типичной литой теплоустойчивой стали 15Х1М1ФЛ, широко при-

меняемой для изготовления корпусного оборудования турбоагрегатов и пароводяной арматуры высокого давления.

2. Показано, что при ремонтной сварке корпусных деталей турбин для сварных соединений, выполненных перлитными электродами с предварительным и сопутствующим подогревом, взамен послесварочной термообработки может быть применен термический отдых.

3. Для ремонта поврежденных компонентов корпусного оборудования турбоагрегатов из литых теплоустойчивых сталей предложена технология сварки, предусматривающая применение предварительного и сопутствующего подогревов с последующим термическим отдыхом. При этом ресурс отремонтированных турбоагрегатов может быть продлен на ограниченный срок.

1. Хромченко Ф.А. Сварочные технологии при ремонтных работах. — М.: Интермет Инжиниринг, 2005. — 368 с.
2. Анохов А.Е., Корольков П.М. Сварка и термическая обработка в энергетике. — Киев: ЕкоТехнологія, 2006. — 319 с.
3. Анохов А.Е., Хромченко Ф.А., Федина И.В. Новая технология ремонтной сварки литых деталей из хромомолибденованадиевых сталей без термической обработки // Свароч. пр-во. — 1986. — № 10. — С. 15–17.
4. РД 108.021.112–88. Исправление дефектов в литых корпусных деталях турбин и арматуры методами заварки без термической обработки. — М., 1988. — 15 с.
5. Анохов А.Е., Ганиев Ф.Б., Корольков П.М. Совершенствование технологии ремонтной сварки и термообработки — основа продления ресурса паровых турбин // Монтаж и спец. работы в стр-ве. — 2003. — № 7. — С. 7–11.
6. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
7. Гривняк И. Свариваемость сталей. — М.: Машиностроение, 1984. — 215 с.
8. Шориоров М.Х., Чернышева Т.А., Красовский А.И. Испытание металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
9. Касаткин Б.С., Бреднев В.И., Волков В.В. Методика исследования кинетики деформаций при замедленном разрушении // Автомат. сварка. — 1981. — № 11. — С. 1–3.
10. Касаткин Б.С., Мусияченко В.Ф. Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций. — Киев: Техніка, 1970. — 188 с.
11. Козлов Р.А. Водород при сварке корпусных сталей. — Л.: Судостроение, 1969. — 175 с.
12. Шориоров М.Х., Белов В.В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке. — М.: Наука, 1972. — 220 с.
13. Козлов Р.А. Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 160 с.
14. А. с. 202383 МПК В 23 К 9/00. Способ многопроходной сварки / С. Е. Синадский // БИ № 19 от 4.09.1967.

The paper deals with the issues of repair welding of damaged basic parts of turbines after long-term operation at steam working parameters. A technology of welding with pearlite electrodes without subsequent heat treatment (high tempering) is proposed. A technology of manual arc welding with pearlite electrodes of E-09Kh1M type is recommended for repair of damaged components of basic equipment of turbo units from cast heat-resistant steels. This technology involves application of preheating and concurrent heating with subsequent thermal pause. Welded joints made by the developed technology have high crack resistance and required mechanical properties. The proposed technology has been successfully tested in repair welding of HPC of K-300-240 turbines.

Поступила в редакцию 05.06.2009