

СОЗДАНИЕ СВАРНОКОВАННОГО КОМБИНИРОВАННОГО РОТОРА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ МОЩНОСТЬЮ 325 МВт

А. К. ЦАРИЮК, канд. техн. наук, **С. И. МОРАВЕЦКИЙ**, инж., **В. Ю. СКУЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Н. Н. ГРИШИН, канд. техн. наук, **А. В. ВАВИЛОВ**, **А. Г. КАНТОР**, **Е. Д. ГРИНЧЕНКО**, инженеры (ОАО «Турбоатом», г. Харьков)

Описан сварнокованный комбинированный ротор среднего давления для паровой турбины мощностью 325 МВт, изготавливаемый из стали 20Х3МВФА (высокотемпературные условия эксплуатации) и стали 25Х2НМФА (низкотемпературные условия). Выбраны сварочные материалы, разработана и аттестована технология механизированной сварки под флюсом соединений сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415. Оценены физико-механические свойства металла сварного соединения в состоянии после высокого отпуска в случае применения как отечественных, так и импортных сварочных материалов.

Ключевые слова: дуговая сварка под флюсом, низколегированная сталь, тепловая энергетика, паровая турбина, ротор, комбинированное сварное соединение, сварочные материалы, механические свойства соединений

В последние годы в турбостроении наметилась тенденция проектирования и изготовления мощных паровых турбин со сварным комбинированным ротором, работающим в высоко- и низкотемпературном режиме [1, 2]. Последние изготавливаются из разнородных конструкционных материалов для работы цилиндров при высоком давлении (ЦВД), среднем давлении (ЦСД) и низком давлении (ЦНД). Особенностью выполнения сварки комбинированных соединений ротора является возможность развития процессов диффузии углерода и легирующих элементов в зоне сплавления разнородных сталей, что существенно сказывается на формировании структуры и служебных свойств сварных соединений. Кроме того, существует весьма сложный вопрос послесварочной термической обработки таких комбинированных соединений, так как ее необходимо выполнять для

каждой из свариваемых сталей в различных температурных интервалах.

В ОАО «Турбоатом» был спроектирован сварнокованный комбинированный ротор ЦСД для паровой турбины мощностью 325 МВт (рис. 1). При этом часть ротора, работающего в высокотемпературном режиме (1–11 ступень), должна изготавливаться из стали ЭИ 415 (20Х3МВФА), а для 12–16 ступеней, работающих в низкотемпературном режиме, предусмотрено применение стали 25Х2НМФА. Предложенная конструкция комбинированного ротора ЦСД позволяет также исключить применение насадных дисков на ступенях низкого давления. Для внедрения в производство созданной конструкции необходимо разработать технологический процесс изготовления сварнокованного комбинированного ротора. Поэтому целью настоящей работы являлся выбор сварочных материалов и разработка технологии автоматической сварки под флюсом, обеспечивающей качество и требуемые служебные свойства сварных соединений создаваемого комбинированного ротора.

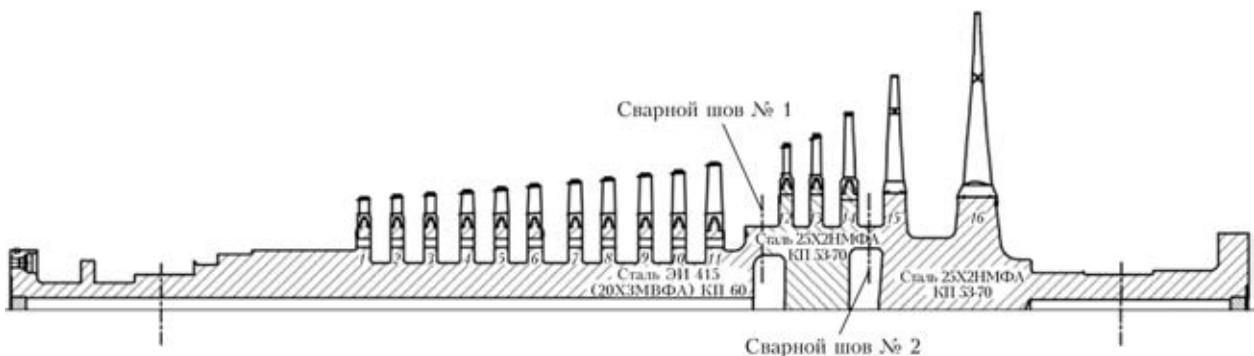


Рис. 1. Эскиз продольного сечения сварного ротора ЦСД турбины мощностью 325 МВт



Таблица 1. Содержание химических элементов в проволоках для сварки роторных сталей и в металле шва контрольного сварного соединения сталей 25X2НМФА + ЭИ 415, мас. %

Объект исследования	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Al	S	P
Проволока Св-08ХН2ГМЮ (ГОСТ 2246–70)	0,06...0,11	0,25...0,55	1,00...1,40	2,00...2,50	0,70...1,10	0,40...0,65	0,06...0,18	≤ 0,03	≤ 0,03
Проволока Св-08ХН2ГМЮ ¹⁾	0,08	0,32	1,09	2,15	0,87	0,47	0,11	0,012	0,015
Проволока Union S 3 NiMoCr (ISO 26304)	≤ 0,15	≤ 0,4	1,20...1,90	1,50...2,25	0,20...0,65	0,30...0,80	—	≤ 0,018	≤ 0,018
Проволока Union S 3 NiMoCr ¹⁾	0,14	0,05	1,84	2,06	0,35	0,35	—	0,011	0,013
Металл шва при использовании проволоки Св-08ХН2ГМЮ	0,032	0,440	0,66	2,14	0,86	0,52	—	0,012	0,033
Металл шва при использовании проволоки Union S 3 NiMoCr	0,088	0,319	1,61	2,31	0,44	0,60	—	0,009	0,022
Union S 3 NiMoCr ²⁾	0,09±0,01	0,3±0,1	1,3±0,1	2,0±0,1	0,6±0,05	0,5±0,1	—	min	min

¹⁾ Фактически использованная в работе проволока.
²⁾ Требование по содержанию химических элементов в импортной проволоке.

Действующая на заводе штатная технология сварки ротора ЦНД турбины мощностью 325 МВт предусматривает сварку стали 25X2НМФА проволокой Св-08ХН2ГМЮ (ГОСТ 2246–70) под плавным флюсом АН-17М (ГОСТ 9087–81). Учитывая острый дефицит в Украине применяемой проволоки (выпускается в РФ по спецзаказу), а также прекращение в ближайшем будущем производства плавных флюсов, ОАО «Турбоатом» принял решение об использовании импортных сварочных материалов. Проведенные маркетинговые исследования показали, что взамен отечественных сварочных материалов наиболее целесообразно выбрать сварочную проволоку Union S 3 NiMoCr (ISO 26304) в сочетании с агломерированным флюсом UV420TT (EN 760), которые производятся фирмой «Белер-Тиссен» (Австрия, Германия). Химический состав выбранной проволоки в сравнении с проволокой Св-08ХН2ГМЮ приведен в табл. 1.

Фторидно-основной флюс UV 420 TT содержит следующие компоненты: (SiO₂ + TiO₂) — 15 мас. %; (CaO + MgO) — 35; (Al₂O₃ + MnO) — 21; CaF₂ — 25, имея при этом основность 2,5 по Бонишевскому [3]. В ходе предварительных экспериментов установлено, что концентрация диффузионно-подвижного водорода Н_{диф} составляет не более 1 см³/100 г наплавленного металла при определении методом спиртовой пробы [4]. Содержание остаточных газов в металле шва определяли методом плавления образца в потоке высококислотного газа-носителя (гелия). Установлено, что применение проволоки Union S 3 NiMoCr в сочетании с флюсом UV 420 TT обеспечивает в

металле шва 0,0076...0,016 % [N], 0,029...0,034 % [O] и 2,0...2,2 см³ [H] на 100 г водорода наплавленного металла. С учетом положительных результатов предварительных исследований выполнены работы по разработке и аттестации технологии сварки комбинированного соединения стали 25X2НМФА + ЭИ 415 с применением как импортных, так и отечественных материалов.

Аттестацию технологического процесса сварки комбинированных соединений сталей 25X2НМФА + ЭИ 415 проводили в соответствии с ДСТУ 3951–2000 (ISO 9956:1995), что предполагало подготовку и сварку контрольного стыкового сварного соединения натуральных размеров (наружный диаметр 940 мм, толщина основного металла 95 мм) в условиях реального производства согласно предварительной технологической инструкции по сварке (pWPS), составленной производителем.

Поскольку стали 25X2НМФА и ЭИ 415 принадлежат к одному структурному классу (табл. 2), то для получения контрольного комбинированного сварного соединения этих сталей выбрали тот же технологический процесс, что и для однородных сварных соединений стали 25X2НМФА. Применяемые в рамках штатной технологии сварки однородных соединений стали 25X2НМФА сочетания отечественных сварочных материалов, режимы сварки и параметры послесварочной термообработки позволяют получить металл шва и сварного соединения с физико-механическими характеристиками, удовлетворяющими техническим требованиям (табл. 3, нижняя строка). Эти значения рассматривали в качестве технических тре-

Таблица 2. Содержание химических элементов в роторных сталях, мас. %

Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Cr
25X2НМФА (ТУ 108-995-81)	0,23...0,27	0,17...0,35	0,40...0,70	≤0,015	≤0,015	1,80...2,20
25X2НМФА ¹⁾	0,27	0,28	0,50	0,010	0,014	2,10
20X3МВФА (ТУ 108-1029-81)	0,17...0,24	≤0,40	0,25...0,60	≤0,022	≤0,025	2,40...3,30
20X3МВФА ¹⁾	0,22	0,27	0,32	0,010	0,012	3,14

Окончание табл. 2

Марка стали	Mo	V	W	Ni	Cu
25X2НМФ (ТУ 108-995-81)	0,40...0,60	≤0,05 по расчету	—	1,30...1,60	≤0,25
25X2НМФА ¹⁾	0,42	0,05	—	1,40	0,14
20X3МВФА (ТУ 108-1029-81)	0,35...0,55	0,45...0,70	0,30...0,50	≤0,50	≤0,25
20X3МВФА ¹⁾	0,40	0,66	0,40	0,30	0,12

¹⁾ Фактически использованная в работе сталь.

бований также к металлу комбинированного сварного соединения сталей 25X2НМФА + ЭИ 415.

В соответствии с принятым технологическим процессом сварку контрольного сварного соединения 25X2НМФА + ЭИ 415 выполняли в U-образную разделку кромок шириной 26 мм с программным управлением раскладкой валиков по два валика в слое на постоянном токе обратной полярности. Для предотвращения холодных трещин при сварке осуществляли предварительный и сопутствующий подогрев контрольного сварного соединения до температуры 350 °С.

С целью снижения материало- и трудоемкости исследований запланировали заполнение разделки контрольного комбинированного соединения на половину ее высоты отечественными материалами, а второй половины — импортными

(рис. 2). Поэтому нижнюю часть шва до половины высоты разделки выполнили с применением сварочной проволоки Св-08ХН2ГМЮ диаметром 2 мм в сочетании с флюсом АН-17М. Заполнение верхней части шва проводили с применением проволоки Union S 3 NiMoCr диаметром 2,5 мм в сочетании с флюсом UV 420 ТТ. Сварку с использованием обоих сочетаний сварочных материалов вели на режиме: сварочный ток 380...400 А; напряжение на дуге 36...40 В; скорость сварки 19...22 м/ч. Готовое сварное соединение подвергали высокому отпуску при температуре 630 °С длительностью 40 ч. После этого сварное соединение разрезали на темплеты для подготовки образцов по программе аттестационных испытаний.

Темплеты, поперечные по отношению к шву, позволяли изготовить образцы для испытания металла сварных соединений, включающие все возможные сочетания основного металла и металла шва, на растяжение, ударный и статический изгиб. В образцах типа II по ГОСТ 6996-66 для испытания на растяжение при комнатной температуре и типа 2к по ГОСТ 9651-73 для испытания на растяжение при температуре 350 °С линия сплавления находилась посередине рабочей части образца (рис. 3). На рис. 3 приняты следующие обозначения: 1 — участки переменного химического состава; 2, 3 — образцы соответственно типа II (ГОСТ 6996-66) и типа 2к (ГОСТ 9651-73) для испытаний при нормальной и повышенной температуре металла сварного соединения шов (проволока S 3 NiMoCr) — сталь 25X2НМФА;

Таблица 3. Результаты испытания металла комбинированного сварного соединения сталей 25X2НМФА + ЭИ 415 на статическое растяжение (по результатам трех испытаний)*

Объект исследования	Механические характеристики при температуре испытания, °С							
	20				350			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
Металл шва (Св-08ХН2ГМЮ)	607,2	507	26,2	67,2	539,9	424	19,3	61,2
Металл шва (S 3 NiMoCr)	741	503,1	22,9	61,2	675,4	472,2	22,2	60,5
Металл сварного соединения:								
шов 1 — сталь ЭИ 415	623,6	—	—	67,4	540,6	—	—	61,3
шов 1 — сталь 25X2НМФА	614,1	—	—	65,3	537,9	—	—	62,5
шов 2 — сталь ЭИ 415	739,1	—	—	61	617,2	—	—	56,3
шов 2 — сталь 25X2НМФА	709,3	—	—	66,6	611,7	—	—	64,0

* Требования к кратковременным механическим свойствам металла сварных соединений роторных сталей после высокого отпуска: для 20 °С: $\sigma_b > 590$ МПа; $\sigma_{0,2} > 470$ МПа; $\delta_5 > 14$ %; $\psi > 40$ %; для 350 °С: $\sigma_b > 530$ МПа; $\sigma_{0,2} > 400$ МПа; $\delta_5 > 14$ %; $\psi > 40$ %.

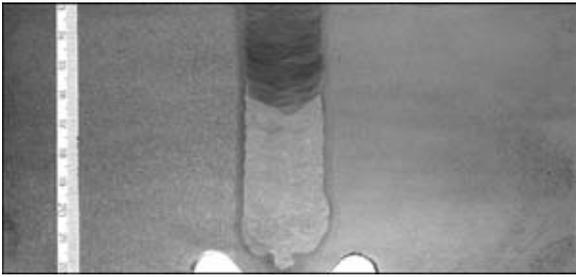


Рис. 2. Макроструктура металла комбинированного сварного соединения сталей ЭИ 415 и 25X2НМФА (справа)

4, 5 — соответственно шов (проволока Св-08ХН2ГМЮ) — сталь 25X2НМФА; 6, 7 — шов (проволока S 3 NiMoCr) — сталь ЭИ-415; 8, 9 — шов (проволока Св-08ХН2ГМЮ) — сталь ЭИ-415. В образцах типа IX по ГОСТ 6996–66 для испытания на ударный изгиб острый надрез выполнялся по металлу шва, по линии сплавления и по металлу ЗТВ на каждой из сталей на расстоянии 1...1,5 мм от линии сплавления (рис. 4). На рис. 4 приняты следующие обозначения: 1, 2 — зоны шва, не подлежащие исследованию (расположение указано на рис. 3); 3, 4 — образцы для определения *KCV* металла шва, полученного с применением импортных и отечественных материалов; 5, 6 — образцы для определения *KCV* металла сварного соединения со швом, полученным с применением импортных материалов; 7, 8 — соответственно с применением отечественных материалов; 9, 10 — образцы для определения *KCV* металла ЗТВ сварного соединения со швом, полученным с применением импортных материалов; 11, 12 — соответственно с применением отечественных материалов. В образцах типа XXVII по ГОСТ 6996–66 для испытания металла сварного соединения на статический изгиб ось шва находилась посередине длины образца. Образцы типа II по ГОСТ 6996–66 и типа 2к по ГОСТ 9651–73

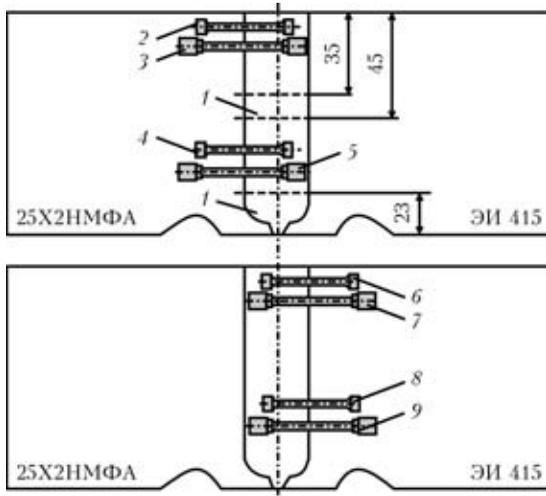


Рис. 3. Расположение зон шва по высоте поперечного сечения комбинированного сварного соединения и схема вырезки образцов для испытания на растяжение (обозначения см. в тексте)

для испытания на растяжение металла шва при температуре соответственно 20 и 350 °С изготавливали из темплетов, продольных по отношению к шву.

Как видно из приведенных в табл. 3 результатов испытания на растяжение, прочностные свойства и характеристики пластичности металла шва и сварного соединения вполне удовлетворяют предъявляемым требованиям при сварке как отечественными, так и импортными сварочными материалами. Металл шва, полученный с применением импортных материалов, более прочный, чем металл шва, полученный с применением отечественных сварочных материалов. При комнатной температуре его временное сопротивление выше на 22 % при одинаковом пределе текучести. При температуре 350 °С значение σ_v шва, полученного с применением импортных сварочных материалов, становится выше на 25,1 %, а предел текучести — выше на 11,4 %.

Установлено, что при любой температуре испытания соединения, сваренные с применением отечественных сварочных материалов, разрушаются по металлу шва. Соединения, сваренные с применением импортных сварочных материалов, разрушились по металлу шва лишь при температуре 20 °С и только в образцах, включающих основную металл — сталь ЭИ 415 (см. рис. 3, образцы поз. 6, 7). Во всех остальных случаях соединения, сваренные с применением импортных

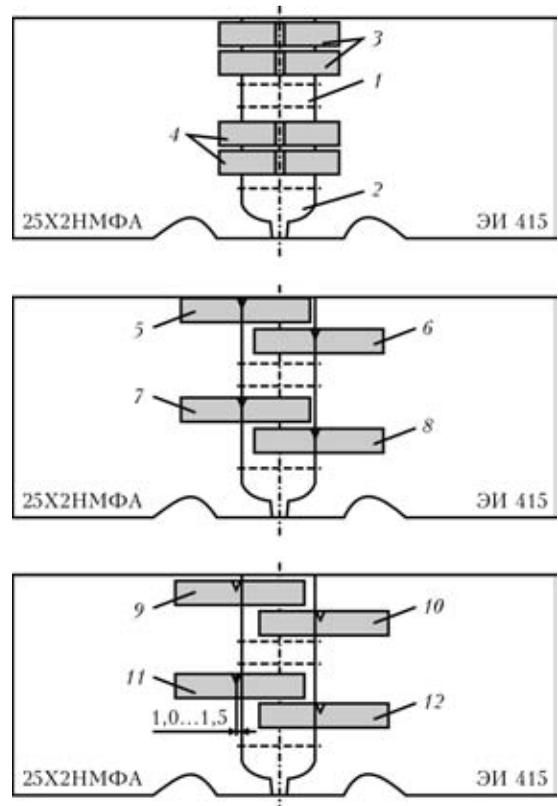


Рис. 4. Схема вырезки образцов типа IX по ГОСТ 6996–66 для испытания на ударный изгиб (обозначения см. в тексте)

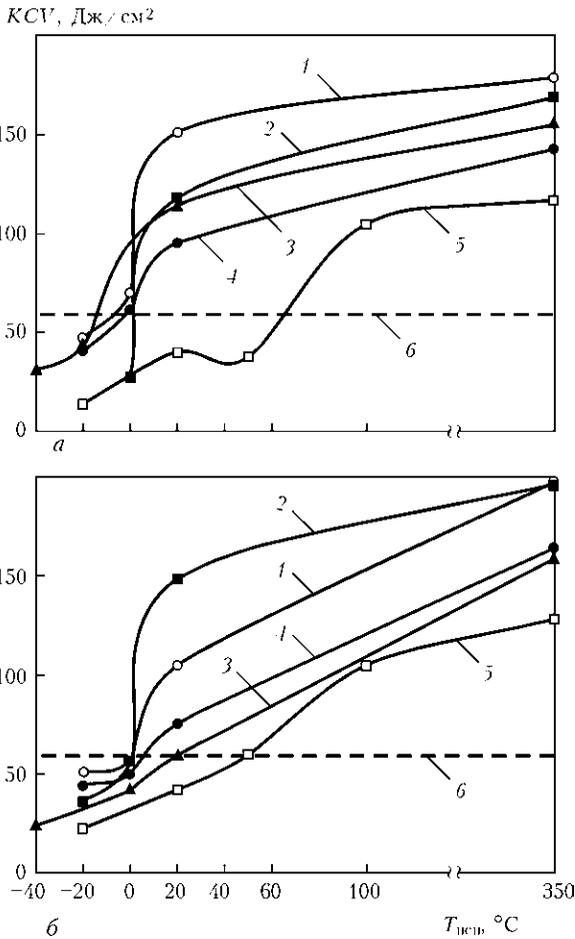


Рис. 5. Температурная зависимость ударной вязкости металла комбинированного сварного соединения сталей 25X2NMFA + ЭИ 415 со швом, полученным с применением отечественных (а) и импортных (б) сварочных материалов: 1, 2 — надрез по ЗТВ соответственно стали 25X2NMFA и ЭИ 415; 3 — надрез по шву Св-08ХН2ГМЮ (а) и S 3 NiMoCr (б); 4, 5 — надрез по линии сплавления соответственно со сталью 25X2NMFA и ЭИ 415; 6 — требование ТЗ

сварочных материалов, разрушаются по основному металлу на расстоянии 4 мм от линии сплавления.

Испытания на статический изгиб показали, что угол загиба комбинированных сварных соединений сталей 25X2NMFA + ЭИ 415 составляет не менее 150° независимо от сочетания сварочных материалов.



Рис. 6. Распределение твердости металла поперек комбинированного сварного соединения сталей 25X2NMFA + ЭИ 415: 1, 2 — сварное соединение со швом, выполненным соответственно проволоками Св-08ХН2ГМЮ и S 3 NiMoCr

По результатам испытаний на ударный изгиб построены графики температурной зависимости ударной вязкости KCV металла (рис. 5). В качестве критерия для сравнительных оценок было принято значение ударной вязкости $KCV = 59 \text{ Дж/см}^2$, являющееся согласно действующим техническим требованиям минимально допустимым значением для любого участка однородных сварных соединений стали 25X2NMFA, сваренных по штатной технологии. Как видно, хладостойкость сварного соединения 25X2NMFA + ЭИ 415 определяется хладостойкостью зоны сплавления шва и стали ЭИ 415 независимо от выбора сварочных материалов. При графическом определении критическая температура хрупкости зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 в случае применения отечественных сварочных материалов (надрез — по линии сплавления) составляет 66 °С. В случае применения импортных сварочных материалов критическая температура $T_{кр}$ зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 равна 50 °С. Для сравнения: критическая температура зоны сплавления шва со сталью 25X2NMFA составляет -2 и 6 °С в случаях применения соответственно отечественных и импортных сварочных материалов.

Распределение твердости металла поперек контрольного комбинированного сварного соединения представлено на рис. 6. Как видно из графика, металл, наплавленный с применением импортных сварочных материалов, имеет твердость в среднем на 30 ед. выше, чем металл шва, выполненный отечественными сварочными материалами. Средняя твердость зоны сплавления швов со сталью ЭИ 415 равна 276, что на 40 ед. выше, чем у зоны сплавления со сталью 25X2NMFA.

Полученные результаты показывают, что температура послесварочного отпуска, оптимальная для соединения шов — сталь 25X2NMFA, является недостаточной для уменьшения твердости на участке перегрева стали ЭИ 415. Повышенная твердость зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 и ЗТВ на этой стали закономерно обуславливает пониженные значения ударной вязкости металла сварного соединения шов — сталь ЭИ 415 независимо от выбранных сварочных материалов.



При испытаниях на ударный изгиб установлено также, что отечественные сварочные материалы обеспечивают несколько выше значения ударной вязкости металла шва при комнатной и отрицательных температурах, чем импортные сварочные материалы. При температуре 350 °С значения ударной вязкости металла шва весьма близки для обоих сочетаний сварочных материалов. Значение $T_{кр}$ металла шва составляет -14 и 20 °С при использовании соответственно отечественных и импортных сварочных материалов.

Результаты испытаний металла шва на растяжение и ударный изгиб при использовании импортных сварочных материалов в сравнении с отечественными можно объяснить слишком высоким уровнем легирования сварочной проволоки Union S 3 NiMoCr углеродом и особенно марганцем (см. табл. 1). В связи с этим для практического применения указанной сварочной проволоки при сварке ротора с фирмой-поставщиком было согласовано требование обеспечить ее химический состав в рамках ISO 26304, но в более узких пределах (см. табл. 1, нижняя строка).

На основании результатов выполненной работы по аттестации технологического процесса сварки комбинированного ротора ЦСД паровой турбины К-325 для механизированной сварки соединений сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415 могут быть выбраны импортные сварочные материалы (проволока Union S 3 NiMoCr в сочетании с флюсом UV 420 TT) взамен отечественных (проволока Св-08ХН2ГМЮ в сочетании с плавленным флюсом АН-17М). Импортные сварочные материалы обеспечивают хорошие сварочно-технологические свойства, требуемый химический состав и минимальное содержание вредных примесей и газов в металле шва. Для обеспечения высоких служебных свойств сварных соединений роторов ЦСД сварочная проволока Union S 3 NiMoCr должна поставляться в соответствии с требованиями ISO 26304-A-S-55-4. При этом импортная проволока должна иметь более жестко заданный химический состав в рамках ISO 26304-A-S-55-4, что позволит его приблизить к составу отечественной проволоки и соответственно обеспечить высокую ударную вязкость металла шва.

A forge-welded combined medium pressure rotor for 325 MW steam turbine is described, which is made from 20Kh3MVFA steel (high-temperature operation conditions) and 25Kh2NMFA steel (low-temperature conditions). Welding consumables were selected, and technology of mechanized submerged-arc welding of joints of 25Kh2NMFA + EI 415 steels was developed and certified. Physico-mechanical properties of welded joint metal in the condition after high-temperature tempering in the case of application of both local and imported welding consumables were assessed.

Техсовет ОАО «Турбоатом» обсудил выполненную работу по созданию сварнокованного ротора ЦСД турбины мощностью 325 МВт и принял решение о пригодности аттестуемой технологии для изготовления комбинированных роторов паровых турбин из сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415. На основании того, что сварной шов комбинированного соединения (см. рис. 1, шов 1) будет работать при температуре около 200 °С, когда значение KCV металла зоны сплавления шва со сталью ЭИ 415 превышает 100 Дж/см² (см. рис. 5), импортные сварочные материалы, обеспечивающие необходимую стойкость металла шва к хрупкому разрушению ($T_{кр} \leq 20$ °С), были признаны приемлемыми для выполнения сварного соединения сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415.

Выводы

1. Спроектирован сварнокованный комбинированный ротор цилиндра среднего давления паровой турбины мощностью 325 МВт. Разработанная конструкция позволяет исключить применение насадных дисков на ступенях низкого давления.
2. Разработана и аттестована технология механизированной сварки под флюсом комбинированного соединения ротора ЦСД из сталей 25Х2НМФА + ЭИ 415.
3. Для механизированной сварки рекомендуется применение импортной сварочной проволоки Union S 3 NiMoCr (ISO 26304-A-S-55-4) в сочетании с агломерированным флюсом UV420TT (EN 760) производства фирмы «Бёлер-Тиссен» (Австрия, Германия).
4. Механизированная сварка под флюсом с использованием выбранных импортных сварочных материалов может применяться для изготовления роторов ЦНД и ЦСД мощных паровых турбин.

1. *Development of large-capacity, highly-efficient welded rotor for steam turbines.* Mitsubishi heavy industries / T. Shige, R. Magoshi, S. Ito et al. // Techn. Rev. — 2001. — 38. — N 1.
2. *Proceedings of PWR 2005 ASME Power*, April 5-7, 2005, Chicago, N 50348.
3. *Welding filler metals. Welding guide of Boehler Thyssen Schweisstechnik Deutschland GmbH.* — Sept., 2005. — 576 p.
4. *Козлов П. А.* Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 160 с.

Поступила в редакцию 21.05.2012