

УДК 621.039.791:620.168:539.561

## СВАРИВАЕМОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ 12%-НЫХ ХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ ЭК-181 И ЧС-139

*М.В. Леонтьева-Смирнова, А.Н. Агафонов, Е.М. Можанов, В.М. Чернов (ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (ОАО «ВНИИНМ»), Москва, Россия)*

Исследована свариваемость жаропрочных 12%-ных ферритно-мартенситных сталей ЭК-181 (Fe—12Cr—2W—V—Ta—B—C, малоактивируемая) и ЧС-139 (Fe—12Cr—Ni—Mo—W—Nb—V—B—N—C) и образцов из особотонкостенных труб из них методами аргоно-дуговой сварки. Разработаны и опробованы технологические режимы сварки этих сталей и показано качественное формирование сварных соединений. Установлен высокий показатель устойчивости стали ЭК-181 против образования горячих трещин (не менее 15,90 мм/мин) с температурным интервалом хрупкости примерно 80 °С и температурой восстановления пластичности и прочности в конце температурного интервала около 1380 °С. Показана возможность уменьшения вероятности образования кратерных трещин за счёт плавного гашения дуги в конце сварки. Показана необходимость проведения послесварочных термообработок для оптимизации структурного состояния сварных соединений. Рекомендован режим термообработки сварных соединений сталей при температуре 720 °С с временем от 20 мин.

**Ключевые слова:** жаропрочные ферритно-мартенситные 12%-ные хромистые стали, стали ЭК-181 и ЧС-139, аргоно-дуговые методы сварки, режимы сварки, термическая обработка сварных соединений.

WELDABILITY OF HEAT-RESISTANT CHROMIUM (12%) STEELS EK-181 AND CHS-139. M.V. LEONTIEVA-SMIRNOVA, A.N. AGAFONOV, E.M. MOZHANOV, V.M. CHERNOV. The weldability of heat-resistant chromium (12%) ferritic-martensitic steels EK-181 (Fe—12Cr—2W—V—Ta—B—C, reduced-activation steel), ChS-139 (Fe—12Cr—Ni—Mo—W—Nb—V—B—N—C) and specimens of especially thin-walled tubes from them by argon-arc weld methods is investigated. Technology regimes of welding of the steels are developed and tested. High quality formation of weldments are received. The high index of EK-181 steel stability against formation of hot cracks (not less than 15.90 mm/min) with temperature interval of a brittleness about 80 °C and temperature of plasticity and strength recovery in the end of the temperature interval about 1380 °C is fixed. The possibility of decreasing of crater cracks formation probability by slow extinguishing of the arc in the weld end is demonstrated. It is necessary to carry out the post weld thermal treatment to optimize the structure state of the weld joints. The thermal treatment regime of steel weldments at the temperature of 720 °C and in the course of time from 20 minutes is recommended.

**Key words:** heat resistance ferritic-martensitic chromium (12%) steels, EK-181 and ChS-139 steels, weldability, argon-arc weld methods, weld regimes, thermal treatment of weldments.

### ВВЕДЕНИЕ

Жаропрочные 12%-ные хромистые стали являются перспективными конструкционными материалами для ядерных и термоядерных реакторов [1—4]. Опыт использования таких сталей в ядерных реакторах достаточно большой. В России основной сталью такого класса является сталь ЭП-450 (Fe—12Cr—2Mo—Nb—V—B—C), используемая как штатный конструкционный материал шестигранных чехлов тепловыделяющих сборок (ТВС) быстрого энергетического реактора БН-600. Сталь ЭП-450 характеризуется высокой радиационной стойкостью и структурной стабильностью при удовлетворительном уровне механических свойств. Сталь ЭП-823 (Fe—12Cr—Mo—Nb—Si—V—W—B—C) хорошо показала свои функциональные возможности при использовании в качестве конструкционного материала для шестигранных чехлов и оболочек твэлов. Однако анализ свойств этих сталей при условиях эксплуатации ядерных реакторов показал их недостаточную жаропрочность для обеспечения проектных параметров инновационных ядерных и термоядерных энергетических реакторов.

Для повышения жаропрочности сталей этого класса в ОАО «ВНИИНМ» разрабатываются новые 12%-ные хромистые жаропрочные стали типа ЭК-181 (Fe—12Cr—2W—V—Ta—B—C, малоактивируемая) и ЧС-139 (Fe—12Cr—Ni—Mo—W—Nb—V—B—N—C) [2—4]. Малоактивируемая (с быстрым спадом активности) сталь ЭК-181 (RUSFER-EK-181) показывает повышенный уровень физико-механических свойств из-за её комплексного легирования Ta, V, W и элементами внедрения [2]. Сталь ЧС-139 является аналогом сталей ЭП-823 и ЭП-900 (Fe—12Cr—Mo—W—Si—V—Nb—B—0,18C) и отличается от них улучшенным химическим и фазовым составом (повышенное содержание углерода и азота и микродобавки Zr, Ti и Ta). Имеющиеся результаты испытаний на длительную прочность сталей ЭК-181 и ЧС-139 свидетельствуют об их существенном преимуществе перед сталями ЭП-450, ЭП-823 и ЭП-900 [2—4].

Многолетняя практика использования 12%-ных хромистых сталей выявила ряд технологических проблем при освоении сварных изделий из них. Свариваемость этих сталей имеет свои особенности, в

первую очередь связанные с тем, что для них характерна низкая критическая скорость закалки при охлаждении на воздухе [5]. В результате в зонах сварного шва и термического влияния формируется структура высокопрочного мартенсита. Такие сварные соединения в конструкции требуют проведения дополнительной термической обработки для снижения уровня упрочнения и повышения работоспособности сварных соединений [6].

В данной работе исследована свариваемость сталей ЭК-181 (RUSFER-EK-181) и ЧС-139, разработаны соответствующие сварочные режимы, обеспечивающие предъявляемые требования к сварным изделиям из этих сталей для ядерной техники. Химический состав сталей ЭК-181 и ЧС-139 представлен в табл. 1 [2—4].

Т а б л и ц а 1. Химический состав (вес. %) сталей ЭК-181 и ЧС-139 [2—4]

Сталь	C	Cr	Ni	Mo	Nb	W	V	Ta	B	Si	N	Mn
ЭК-181, плавка 536	0,14	11,2	0,03	0,04	0,01	1,17	0,29	0,17	0,004	0,37	0,044	0,94
ЧС-139, плавка 4588	0,19	11,4	0,73	0,50	0,25	1,18	0,23	0,06	0,006	0,23	0,071	0,67
ЧС-139, плавка 868	0,21	11,8	0,73	0,51	0,30	1,26	0,31	0,07	0,006	0,29	0,085	0,57

### ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛИ ЭК-181

Исследования свариваемости стали ЭК-181 производились с применением методов:

- испытаний на технологическую прочность;
- испытаний на горячую пластичность;
- точечной пробы, или пробы на месте.

Из полученных результатов определяли:

- устойчивость к образованию горячих трещин в сварном шве;
- склонность металла к образованию трещин в зоне термического влияния (ЗТВ);
- температурный интервал хрупкости (ТИХ);
- температуру восстановления пластичности и прочности в конце ТИХ;
- склонность к образованию кратерных трещин.

Одним из методов определения склонности металла к образованию горячих трещин в металле шва является испытание на технологическую прочность. Метод заключается в определении устойчивости против образования горячих трещин путём деформации образца с различной скоростью во время процесса сварки. Испытания проводили на машине ЛТП 1-6 [7]. Заготовки для образцов размером 120×20×1 мм изготавливали из металлопроката, затем в полученных пластинах вырезали с краёв отверстия диаметром 8 мм для фиксации в испытательной машине, также к краям приваривали усилители для увеличения прочности (рис. 1).

Заготовку фиксировали в держателе ЛТП 1-6, после чего проплавляли вольфрамовым электродом в потоке аргона на длину 80 мм при режиме: сварочный ток  $I_{св} = 60—75$  А, напряжение дуги  $U_d = 10$  В, скорость сварки  $V_{св} = 1$  см/с. Во время сварочного процесса к образцу в продольном направлении прикладывали растягивающее усилие, которое создавало деформацию. Деформацию образцов производили с различной скоростью  $V$ . Определялась наименьшая скорость деформации, при которой возникают трещины в образце (критическая скорость), являющаяся основным показателем устойчивости материала шва против образования горячих трещин. Чем выше критическая скорость, тем выше устойчивость металла шва к образованию в нём трещин.

Результаты экспериментов для стали ЭК-181 представлены в табл. 2. При сварочном токе 65 А и скорости деформации 10,93 мм/мин трещины отсутствуют, однако шов получается узкий со слабым проплавлением. Для создания шва с нормальным проплавлением величина сварочного тока была увеличена до 70 и 75 А. При силе тока 70 А и скорости деформации 15,90 мм/мин горячие трещины не об-

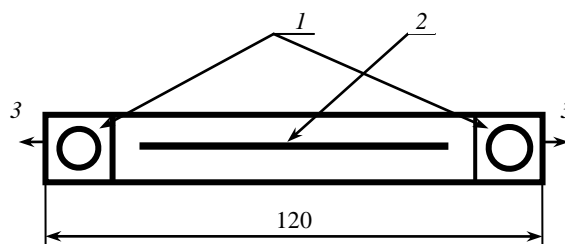


Рис. 1. Образец для испытания на технологическую прочность: 1 — усилители с отверстием для фиксации образца в испытательной машине; 2 — сварной шов; 3 — направление скорости деформирования образца

Т а б л и ц а 2. Результаты экспериментов по выявлению критической скорости деформации стали ЭК-181 в зависимости от величины сварочного тока  $I_{св}$  и скорости деформации  $V$ 

$I_{св}$ , А	$V$ , мм/мин	Наличие трещин
65	10,93	Отсутствуют
70	15,90	Отсутствуют
75	23,00	Присутствуют
75	19,80	Присутствуют
75	18,50	Присутствуют
75	15,90	Отсутствуют

наруживаются. При сварочном токе 75 А и скорости деформации 23,00 мм/мин трещина обнаруживается со стороны сварки и корня шва. С уменьшением скорости деформации до 19,80 мм/мин при том же токе также наблюдается образование трещины со стороны сварки. При скорости деформации 18,50 мм/мин трещины обнаруживаются с обеих сторон. При уменьшении скорости деформации до 15,90 мм/мин горячие трещины не образуются.

Таким образом, для стали ЭК-181 показатель устойчивости против образования горячих трещин имеет высокое значение (не менее 15,90 мм/мин). Для других сталей данного класса в зависимости от их легирования этот показатель имеет значение 10—14 мм/мин.

Как пример качественного формирования сварного шва на рис. 2 показана микроструктура образца стали ЭК-181 в зоне сварного соединения, сформированного при токе сварки  $I_{св} = 75$  А и испытанного при скорости деформации  $V = 15,90$  мм/мин.

Рис. 2. Микроструктура сварного шва образца стали ЭК-181 ( $\times 100$ )

тур (1400—1450 °С), затем нагрев образцов прекращался, и образцы охлаждались до определённой температуры  $T_{разрыва}$ , при которой они разрушались. Циклы нагрева и разрыва производили в камере с разрежением воздуха до  $10^4$  Па.

В испытаниях измеряли удлинение (разница длины образца после разрыва и до разрыва) и усилие разрыва образцов. Усилие разрыва образца определяли при помощи стрелочного индикатора, закреплённого на динамометрической пружине, которая удерживала образец во время разрыва. После снятия показаний стрелочного индикатора из градуировочной таблицы находили соответствующие значения напряжения разрыва  $\sigma$ . Хрупкий разрыв идентифицировали по характерному излому. Вязкий разрыв определяли по утонению образца и возникновению шейки. По удлинению образца судили о пластичности металла, по усилию разрыва образца оценивали прочность (сопротивление разрушению) при конкретной температуре. Схема испытываемого образца представлена на рис. 3.

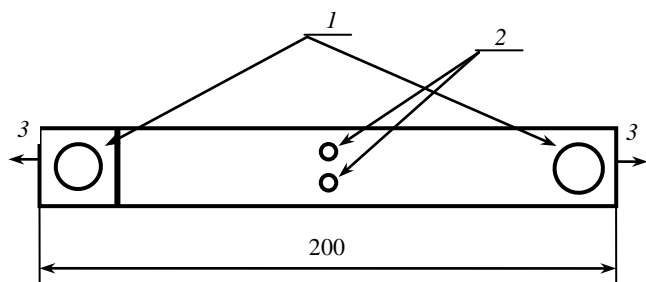


Рис. 3. Схема образца, испытываемого по методу исследования горячей пластичности: 1 — усилители; 2 — концентраторы напряжения; 3 — направление усилия разрыва

Метод испытаний на горячую пластичность применяется для определения склонности металла к образованию трещин в зоне термического влияния (ЗТВ) [8]. Этот метод заключается в определении характеристик пластичности, прочности металла при околосolidусных температурах, а также температурного интервала хрупкости, характеризующего потенциальную склонность металла к образованию околосolidусных трещин.

Испытания проводили на образцах размером  $200 \times 20 \times 1$  мм с приваренными на торцах усилителями для уменьшения погрешности при удлинении образца во время разрыва. Образцы закрепляли в разрывной машине и нагревали при помощи токов высокой частоты со скоростью, близкой к сварочному циклу, до околосolidусных температур (1400—1450 °С), затем нагрев образцов прекращался, и образцы охлаждались до определённой температуры  $T_{разрыва}$ , при которой они разрушались. Циклы нагрева и разрыва производили в камере с разрежением воздуха до  $10^4$  Па.

Результаты экспериментов для образцов стали ЭК-181 представлены в табл. 3 и на рис. 4. Примеры разрушения образцов стали ЭК-181 при испытании на «горячую пластичность» показаны на рис. 5. На рис. 6 показан характер вязкого разрыва образцов стали ЭК-181 при температуре 1380 °С (поперечное сечение вдоль оси симметрии).

Т а б л и ц а 3. Результаты испытаний образцов стали ЭК-181 на горячую пластичность

T, °C (нагрев)	T, °C (разрыв)	Показания индикатора	$\sigma$ , МПа	База, мм		$\Delta L$ , мм
				до	после	
1400	1280	3,00	50,0	81,25	93,20	11,95
1400	1200	4,00	65,7	79,20	88,30	9,1
1410	1260	4,10	68,6	80,45	87,15	6,7
1410	1100	5,50	98,0	80,95	87,60	6,65
1420	1325	3,00	50,0	80,20	91,65	11,45
1430	1280	3,20	53,9	80,15	88,70	8,55
1430	1150	4,60	79,4	80,75	89,90	9,15
1440	1440	0	0	—	—	—
1440	1410	1,90	19,6	80,50	84,00	3,50
1440	1358	2,40	37,2	80,40	90,00	9,60
1440	1330	2,85	34,3	80,55	89,75	9,20
1450	1380	2,45	32,3	80,90	91,50	10,60
1450	1250	3,50	55,9	80,70	88,90	8,2

Из полученных результатов определяли:

— температурный интервал хрупкости — основной показатель;

— температуру восстановления пластичности и прочности в конце температурного интервала хрупкости.

Анализируя результаты испытаний образцов стали ЭК-181 (см. рис. 4—6), можно сделать вывод о её высокой устойчивости против образования горячих трещин в металле околошовной зоны. Температурный интервал хрупкости этой стали узкий и составляет примерно 80 °С. Температуру восстановления пластичности и прочности в конце температурного интервала хрупкости можно оценить уровнем ~1380 °С.

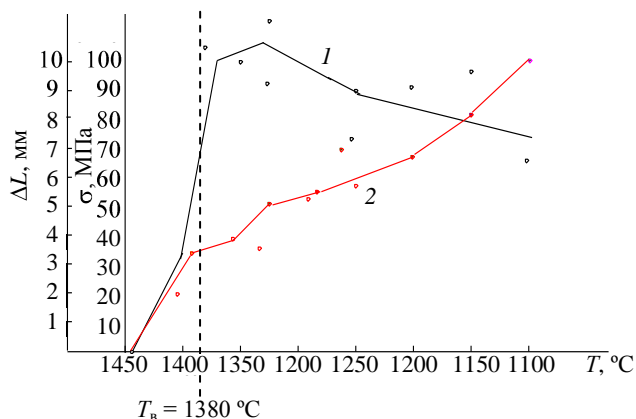


Рис. 4. Зависимость прочности  $\sigma$  (1) и удлинения  $\Delta L$  (2) образцов стали ЭК-181 от температуры разрыва

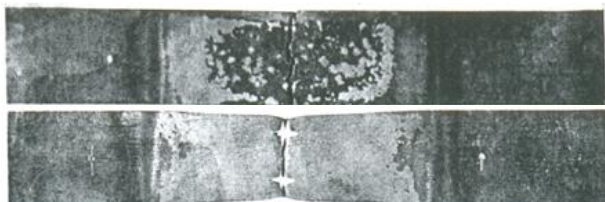


Рис. 5. Примеры разрушения образцов стали ЭК-181: а — хрупкое разрушение,  $T_{\text{разрыва}} = 1440$  °С; б — вязкое разрушение,  $T_{\text{разрыва}} = 1380$  °С

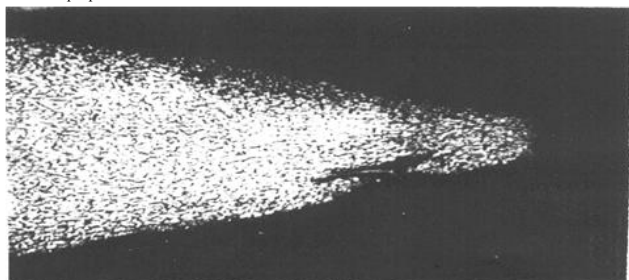


Рис. 6. Характер вязкого разрыва образца стали ЭК-181 при температуре 1380 °С

Метод оценки свариваемости сталей, называемый точечная проба, или проба на месте [5], заключается в оценке склонности металла к образованию кратерных трещин путём проплавления листового металла толщиной 1 мм стоячей дугой с различным тепловложением. Величина сварочного тока была неизменна ( $I = 30$  А), изменялось время проплавления (3, 6, 9 и 12 с). Для сталей ферритно-мартенситного и аустенитного классов при таком методе испытаний характерно возникновение кратерных трещин, что подтверждает исследование полученного образца стали ЭК-181 (рис. 7).

Метод оценки свариваемости сталей, называемый точечная проба, или проба на месте [5], заключается в оценке склонности металла к образованию кратерных трещин путём проплавления листового металла толщиной 1 мм стоячей дугой с различным тепловложением. Величина сварочного тока была неизменна ( $I = 30$  А), изменялось время проплавления (3, 6, 9 и 12 с). Для сталей ферритно-мартенситного и аустенитного классов при таком методе испытаний характерно возникновение кратерных трещин, что подтверждает исследование полученного образца стали ЭК-181 (рис. 7).

а

б

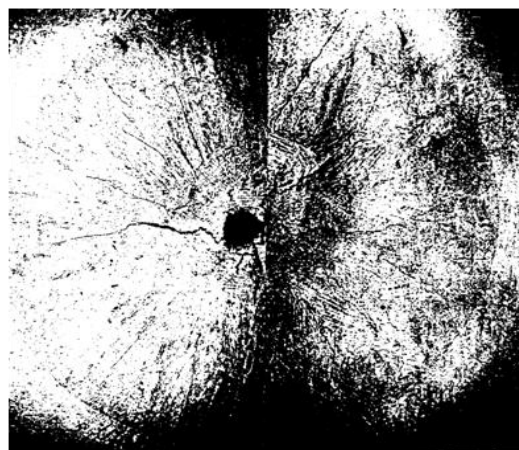


Рис. 7. Характерный вид трещин в сварных точечных швах стали ЭК-181

При оценке свариваемости стали ЭК-181 по методу «точечная проба» была показана склонность стали к образованию кратерных трещин. Уменьшить вероятность образования кратерных трещин возможно за счёт плавного гашения дуги в конце сварки.

Проведены исследования микроструктуры сварных соединений образцов стали ЭК-181, которые показали, что в процессе сварки в шве и околошовной зоне возникают закалочные структуры, что вызывает необходимость проведения «смягчающей» термической обработки сварных соединений этой стали. Рекомендован режим термообработки сварных швов стали ЭК-181: 720 °С, от 20 мин.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛИ ЧС-139

Оценка свариваемости стали ЧС-139 производилась по пробе Каутца, являющейся одной из качественных проб для определения склонности к образованию горячих трещин [6]. Для пробы Каутца используют два цилиндрических прутка  $\varnothing 50$  мм. Их сваривают между собой вдоль образующей цилиндра в три прохода, постепенно увеличивая таким образом жёсткость конструкции. Ток сварки максимальный. После сварки третьего шва образец переворачивают и выполняют контрольный шов, который обследуется на предмет наличия трещин. Склонность металла к образованию трещин считается умеренной, если общая длина трещин в контрольном шве составляет не более 25 мм [6].

Для оценки свариваемости использовали прутки  $\varnothing 12$  мм и длиной 100 мм из двух плавок стали ЧС-139 (плавки 868 и 4588, см. табл. 1). Поскольку в данном случае материалом для исследований служили прутки  $\varnothing 12$  мм, то для увеличения жёсткости конструкции производили сварку нескольких прутков между собой. Образцы сваривали аргоно-дуговым способом неплавящимся вольфрамовым электродом на автоматической сварочной установке.

Визуальный контроль швов показал отсутствие трещин во всех сварных соединениях. Сварной шов двух прутков представлен на рис. 8.

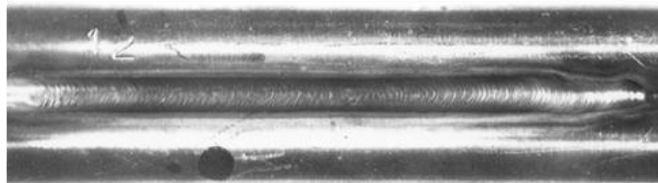


Рис. 8. Сварной шов двух прутков стали ЧС-139 (плавка 4588)

Также из полученных образцов стали ЧС-139 были изготовлены шлифы поперёк сварных соединений. При исследовании шлифов в сварных соединениях этой стали разных плавок трещин не обнаружено (рис. 9).

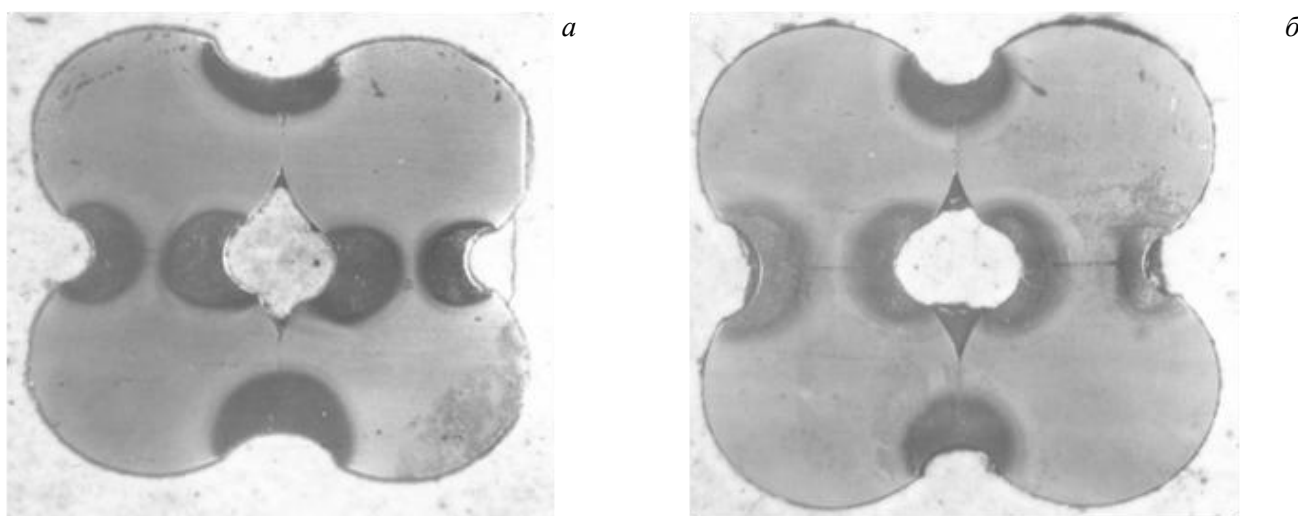


Рис. 9. Макрошлифы сварных образцов стали ЧС-139: а — сварной образец из металла плавки 868; б — сварной образец из металла плавки 4588

Отсутствие трещин в образцах позволяет сделать вывод об удовлетворительной свариваемости стали ЧС-139. В каждой зоне сварного соединения были произведены замеры микротвёрдости. Микро-

структура сварного соединения стали ЧС-139 (плавка 868), включая шов, ЗТВ и основной металл (ОМ), показана на рис. 10.

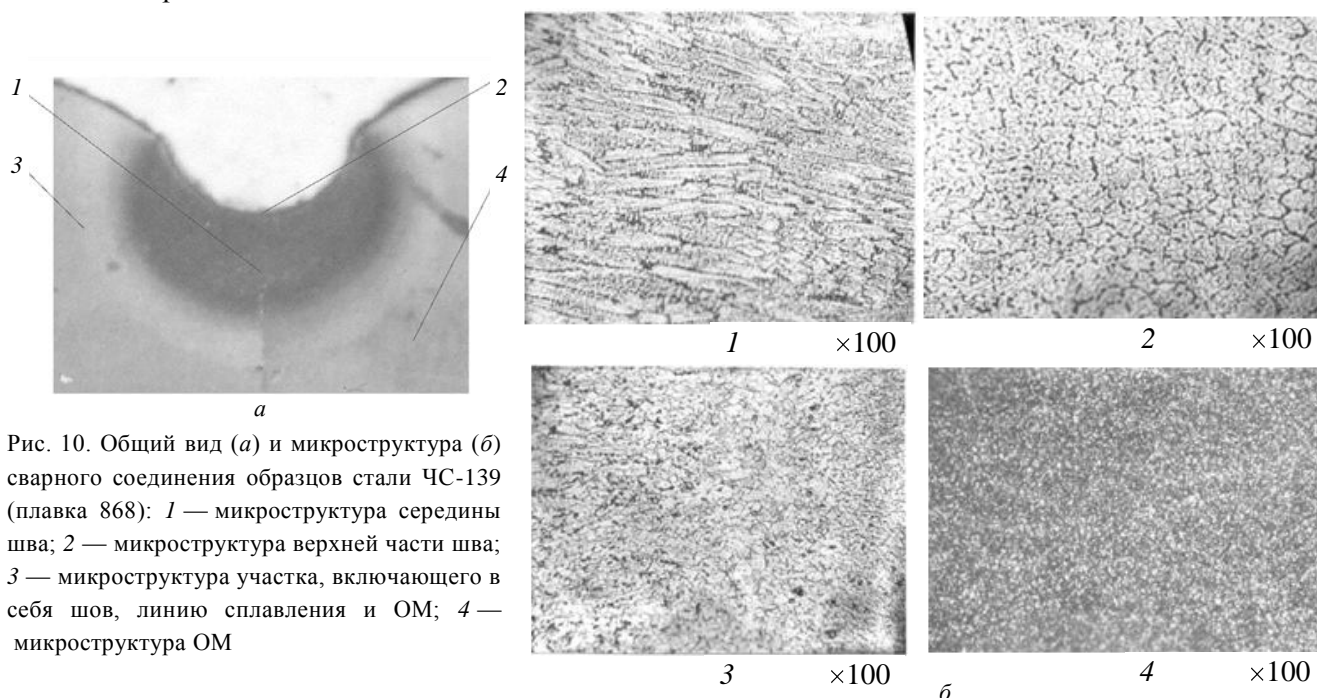


Рис. 10. Общий вид (а) и микроструктура (б) сварного соединения образцов стали ЧС-139 (плавка 868): 1 — микроструктура середины шва; 2 — микроструктура верхней части шва; 3 — микроструктура участка, включающего в себя шов, линию сплавления и ОМ; 4 — микроструктура ОМ

Измерения микротвёрдости при нагрузке 50 г показали:

- середина шва имеет микротвёрдость  $HV(0,05) = 412—341$ ;
- верхняя зона шва имеет микротвёрдость  $HV(0,05) = 354—318$ ;
- зона термического влияния имеет микротвёрдость  $HV(0,05) = 354—341$ ;
- основной металл имеет микротвёрдость  $HV(0,05) = 245—210$ .

Анализ приведённых данных показывает, что в металле шва и околошовной зоне образуются закалочные структуры и поэтому сварные соединения реальных изделий необходимо подвергать «смягчающей» термообработке. Рекомендован режим термообработки сварных швов стали ЧС-139: 720 °С, от 20 мин.

### СВАРКА ОСОБОТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛЕЙ ЭК-181 И ЧС-139

Разработаны и опробованы технологические режимы аргодуговой сварки особотонкостенных оболочечных труб  $\varnothing 6,9 \times 0,4$  мм из сталей ЭК-181 и ЧС-139 с герметизирующими заглушками применительно к изготовлению макетных образцов твэлов реакторов БН. Конструкции сварных соединений имеют особенности, обеспечивающие формирование качественных высокопрочных швов, не склонных к хрупкому разрушению. Верхнее сварное соединение выполнено торцевым швом дугой, управляемой магнитным полем (ДУМП). Нижнее сварное соединение выполнено периметрическим швом.

При исследовании изготовленных образцов установлено, что разработанные режимы сварки обеспечивают формирование качественных сварных соединений [2]. На рис. 11 представлен общий вид макетного образца твэла. На рис. 12—13 представлены фотографии верхнего и нижнего сварного соединения этого образца.



Рис. 11. Общий вид сварного образца из стали ЭК-181



Рис. 12. Сварное соединение стали ЭК-181, выполненное дугой, управляемой магнитным полем (ДУМП)



Рис. 13. Периметрическое сварное соединение стали ЭК-181, выполненное аргодуговой сваркой (АДС)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различными методами проведены исследования свариваемости ферритно-мартенситных сталей ЭК-181 (Fe—12Cr—2W—V—Ta—B—C, малоактивируемая) и ЧС-139 (Fe—12Cr—Ni—Mo—W—Nb—V—N—C).

Испытаниями на технологическую прочность установлено, что показатель устойчивости стали ЭК-181 против образования горячих трещин имеет высокое значение (не менее 15,90 мм/мин), тогда как для других сталей данного класса (например, ЭП-450) в зависимости от легирования, эта характеристика находится в диапазоне 10—14 мм/мин.

Испытаниями по методу горячей пластичности определено, что сталь ЭК-181 обладает высокой устойчивостью против образования горячих трещин в металле околосварной зоны, температурный интервал хрупкости узкий и составляет примерно 80 °С. Температура восстановления пластичности и прочности в конце температурного интервала оценена величиной ~1380 °С.

Оценка свариваемости по методу «точечная проба» показала характерную для ферритно-мартенситных сталей склонность ЭК-181 к образованию кратерных трещин. Показана возможность уменьшения вероятности образования кратерных трещин за счёт плавного гашения дуги в конце сварки.

Произведена предварительная оценка свариваемости ферритно-мартенситной стали ЧС-139 с использованием пробы Каутца. В контрольных швах трещин не обнаружено, что свидетельствует об удовлетворительной свариваемости стали ЧС-139.

Микроструктурными исследованиями сварных соединений сталей ЭК-181 и ЧС-139 показана необходимость проведения послесварочной термообработки для оптимизации структурного состояния сварного соединения и околосварной зоны. Рекомендован режим термообработки сварных соединений: 720 °С, от 20 мин.

Разработаны и опробованы технологические режимы сварки осеботонкостенных оболочечных труб  $\varnothing 6,9 \times 0,4$  мм из сталей ЭК-181 и ЧС-139 с герметизирующими заглушками применительно к изготовлению макетных образцов твэлов реакторов БН. Исследования образцов показали качественное формирование сварных соединений.

Авторы выражают глубокую благодарность и посвящают данную работу светлой памяти Юрия Ивановича Казеннова и Леонида Ивановича Ревизникова, чьи основополагающие технологические разработки в ОАО «ВНИИНМ» по сварке конструкционных материалов для ядерной техники [7] во многом определили создание технологии сварки ферритно-мартенситных сталей.

Авторы признательны В.М. Захаркину за помощь в проведении данной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

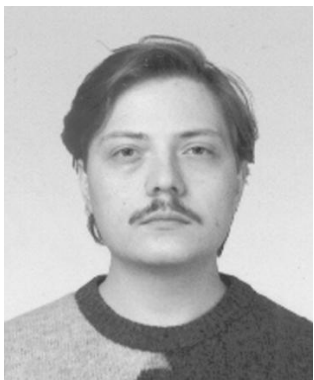
1. Klueh R.L., Harris D.R. High-Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Application. ASTM MONO3, 2001. 221 p.
2. Леонтьева-Смирнова М.В., Агафонов А.Н., Ермолаев Г.Н. и др. Микроструктура и механические свойства малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (RUSFER-EK-181). — Перспективные материалы, 2006, № 6, с. 40—52.
3. Chernov V.M., Leonteva-Smirnova M.V., Potapenko M.M., Budykin N.I. et al. Structural materials for fusion power reactors — the RF R&D activities. — Nuclear Fusion, 2007, vol. 47, p. 839—848.
4. Солонин М.И., Иолтуховский А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В. и др. Проблемы создания и модификации нержавеющей сталей для деталей активных зон ядерных реакторов на быстрых нейтронах и термоядерного реактора синтеза. — Физика и химия обработки материалов, 2001, № 5, с. 5—13.
5. Ланская К.А. Высокохромистые жаропрочные стали. — М.: Металлургия, 1976. 216 с.
6. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 2. — М.: Энергоатомиздат, 1995. 336 с.
7. Казеннов Ю.И., Ревизников Л.И. О методах испытания тонколистового металла на устойчивость против образования горячих трещин при сварке плавлением. — В сб.: Некоторые вопросы сварки изделий атомной техники. М.: ФГУП ВНИИНМ, 2004.
8. Шоршов М.Х., Чернышева Т.А., Красовский А.И. Испытания металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972.



Мария Владимировна, Леонтьева-Смирнова, нач. отдела, к.техн.н., доцент; ОАО «ВНИИНМ» им. академика А.А. Бочвара, 123060, Москва, ул. Рогова, 5а, Россия



Вячеслав Михайлович Чернов, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор; ОАО «ВНИИНМ» им. академика А.А. Бочвара, 123060, Москва, ул. Рогова, 5а, Россия  
chernov@bochvar.ru



Евгений Михайлович Можанов, с.н.с.; ОАО «ВНИИНМ» им. академика А.А. Бочвара, 123060, Москва, ул. Рогова, 5а, Россия



Александр Николаевич Агафонов, ведущий инженер; ОАО «ВНИИНМ» им. академика А.А. Бочвара, 123060, Москва, ул. Рогова, 5а, Россия

Статья поступила в редакцию 1 августа 2011 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 4, с. 14—21.