

Исследование структуры и свойств

Физические методы исследования и контроля

УДК 621.774.21,621.78.019.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР НАГРЕВА ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ НОРМАЛИЗАЦИИ СВАРНОГО ШВА ТРУБ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ МАРОК СТАЛЕЙ

© М. А. Ткачук, О. А. Багмет, П. П. Степанов¹

Статья поступила 29 мая 2015 г.

Смоделированы процессы, происходящие при нагреве и охлаждении металла в зоне сварного соединения при локальной термической обработке (ЛТО) по режиму нормализации. Для скоростей нагрева, применяемых в цеховых условиях, определены критические точки для сталей различного химического состава. Предложены новые режимы ЛТО труб для разных марок стали, способствующие повышению ударной вязкости сварного соединения за счет формирования в нем мелкого аустенитного зерна после нагрева и, соответственно, однородной мелкозернистой феррито-перлитной структуры после охлаждения. Полученные результаты опробованы и внедрены при производстве электросварных труб диаметром 114 – 530 мм классов прочности К50 – К60.

Ключевые слова: электросварные трубы; сварка токами высокой частоты; локальная термическая обработка; сварной шов; околошовная зона; микроструктура.

На сегодняшний день существует значительная потребность в качественных трубах для магистральных газопроводов и промысловых трубопроводов при обустройстве газовых месторождений для транспортировки некоррозионно-активных продуктов, рассчитанных на рабочее давление до 9,8 МПа (100 кгс/см²) и температуру эксплуатации до –40 °С. В связи с этим

налажено производство труб диаметром 114 – 530 мм классов прочности К50 – К60 из малоуглеродистых низколегированных сталей, сваренных токами высокой частоты (ТВЧ). ТВЧ-сварка характеризуется большой производительностью, высокой степенью локализации энергии и возможностью в широких пределах изменять параметры технологии. Кроме того, ее энергоемкость существенно ниже, чем у большинства дру-

¹ АО «ВМЗ», г. Выкса, Россия; e-mail: tkachuk_ma@vsw.ru

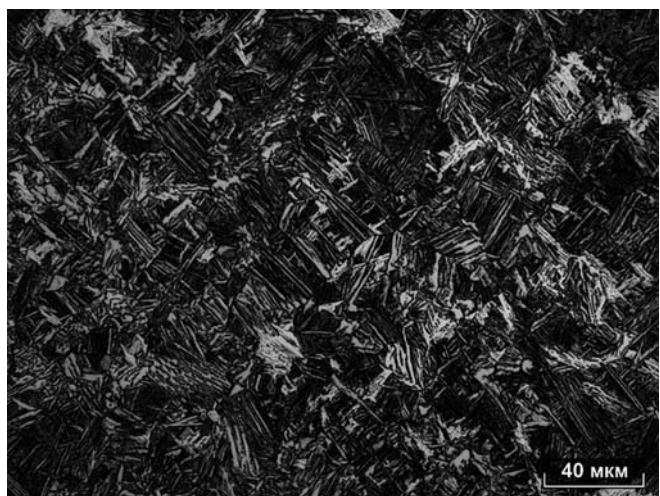
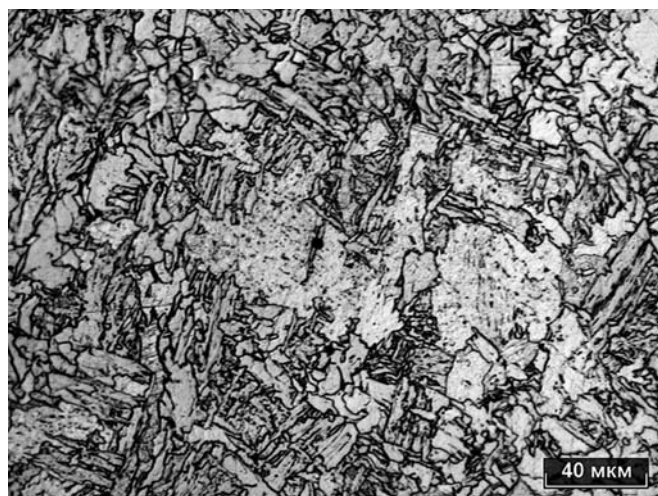


Рис. 1. Микроструктура ОШЗ сварного соединения труб из сталей с содержанием углерода 0,06 (а) и 0,17 (б) %

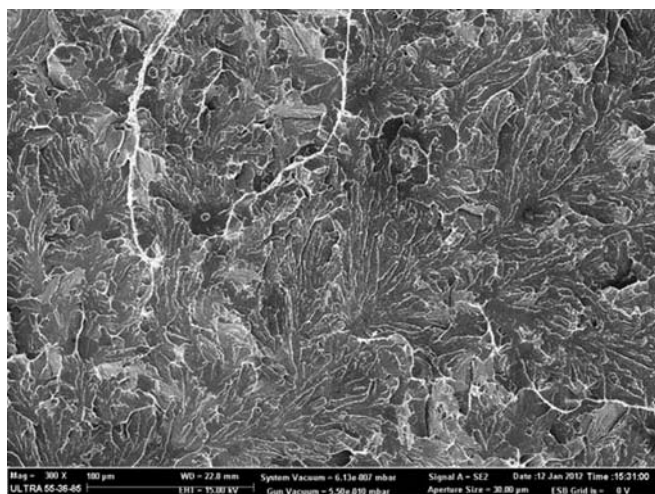


Рис. 2. Поверхность разрушения образца (температура испытания — -60°C , содержание углерода в стали — $0,06\%$)

гих способов сварки, и отсутствуют принципиальные ограничения по скорости [1, 2].

Как известно, в околошовной зоне (ОШЗ) сварного соединения после сварки ТВЧ формируется структура, состоящая, в зависимости от химического состава стали, из видманштеттового и игольчатого феррита, бейнита и даже мартенсита, и негативно влияющая на показатели ударной вязкости и пластичности (рис. 1) [3].

Грубоигольчатая структура ТВЧ-соединения обладает низкой энергоемкостью разрушения, поэтому после динамических испытаний на ударный изгиб образцов с круглым и острым надрезами при отрицательных температурах разрушение происходит по механизму транскристаллитного скола с образованием полностью хрупкого излома. На поверхности таких изломов наблюдаются крупные фасетки скола (рис. 2).

Один из способов повышения пластичности и ударной вязкости металла сварного шва и ОШЗ — локальная термическая обработка (ЛТО), позволяющая изменить неблагоприятную структуру, полученную в результате высокочастотной сварки. Благодаря ЛТО

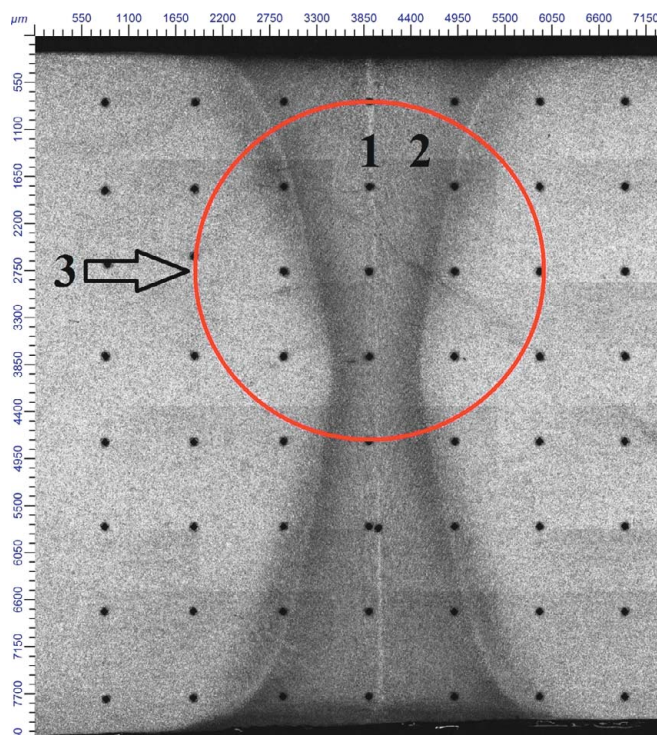


Рис. 3. Схема вырезки dilatометрического образца (поперечное сечение) из сварного соединения трубы, сваренной ТВЧ: 1 — линия сплавления; 2 — зона термического влияния; 3 — dilatометрический образец

можно снизить порог хладноломкости и достичь равнопрочности сварного соединения и основного металла трубы [3].

ЛТО сварного шва по режиму нормализации осуществляют непрерывно-последовательным способом при помощи четырех-пяти индукторов. При этом зона сварного соединения нагревается до температуры аустенитизации, затем она охлаждается на воздухе.

Основная сложность при назначении режимов ЛТО — отсутствие справочных данных по критическим точкам для сталей различного химического состава и скоростей нагрева, применяемых в цеховых условиях. Известно, что с увеличением скорости на-

Критические точки и оптимальные температуры нагрева при ЛТО нормализации сварного соединения труб, изготовленных из сталей различного химического состава

Условное обозначение стали	Массовые доли химических элементов, %						Критические точки, $^{\circ}\text{C}$		Оптимальная температура ЛТО, $^{\circ}\text{C}$
	C	Mn	Si	S	P	Другие	A_{c1} ($\sim 210^{\circ}\text{C/c}$)	A_{c3} ($\sim 70^{\circ}\text{C/c}$)	
C ₁	0,17	1,26	0,48	0,002	0,010	—	785	875	900
C ₂	0,05	1,23	0,48	0,002	0,008	Nb	795	915	940
C ₃	0,06	0,58	0,35	0,001	0,010	V, Nb	800	925	950
C ₄	0,05	1,60	0,22	0,003	0,006	V, Nb	770	880	900
C ₅	0,06	0,68	0,22	0,001	0,006	Nb, Ti	795	915	940
C ₆	0,05	0,71	0,22	0,001	0,005	Cr, Nb	785	910	930
C ₇	0,07	1,49	0,36	0,001	0,008	N, V	800	895	920
C ₈	0,07	0,75	0,47	0,001	0,007	Cr, Mo, V	780	910	930
C ₉	0,07	0,72	0,47	0,001	0,006	Cr, Mo, V, B	780	910	930
C ₁₀	0,06	0,58	0,23	0,001	0,006	Cr, V, Nb, Ti	795	925	950

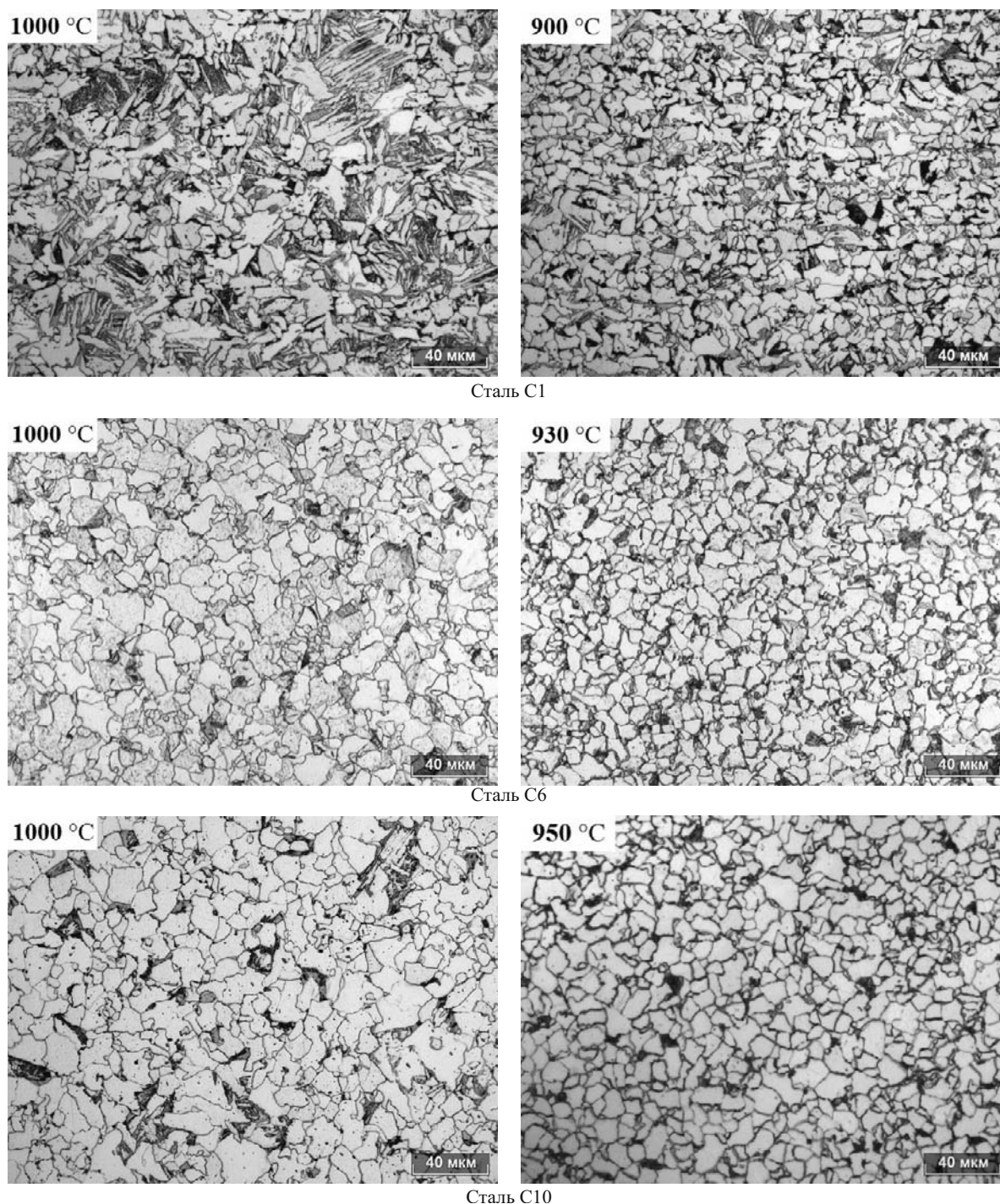


Рис. 4. Микроструктура ОШЗ вблизи линии сплавления сварного соединения трубы после имитации различных температур нагрева ЛТО нормализации для различных марок стали

грева происходит существенное повышение температур начала (A_{c1}) и завершения (A_{c3}) фазового превращения в аустенит, а также заметное расширение температурного интервала $A_{c1} - A_{c3}$. Кроме того, исходная структура наряду с химическим составом стали оказывает сильное влияние на изменение критических точек [4]. Для определения оптимальных температур нагрева при ЛТО по различным режимам, а также исследования процессов структурообразования в ОШЗ сварного соединения при нагреве и охлаждении

разработана методика изучения фазовых превращений дилатометрическим методом [5].

Протяженность зоны термического влияния сварного соединения труб с толщиной стенки 7,0 – 10,0 мм, сваренных ТВЧ, составляет порядка 3,5 – 4,5 мм. Для моделирования режимов нагрева и охлаждения ЛТО на автоматическом дилатометре DIL 805 использовали цельные цилиндрические образцы $\varnothing 4 \times 10$ мм, вырезанные из сварного шва трубы после высокочастотной сварки таким образом, чтобы линия

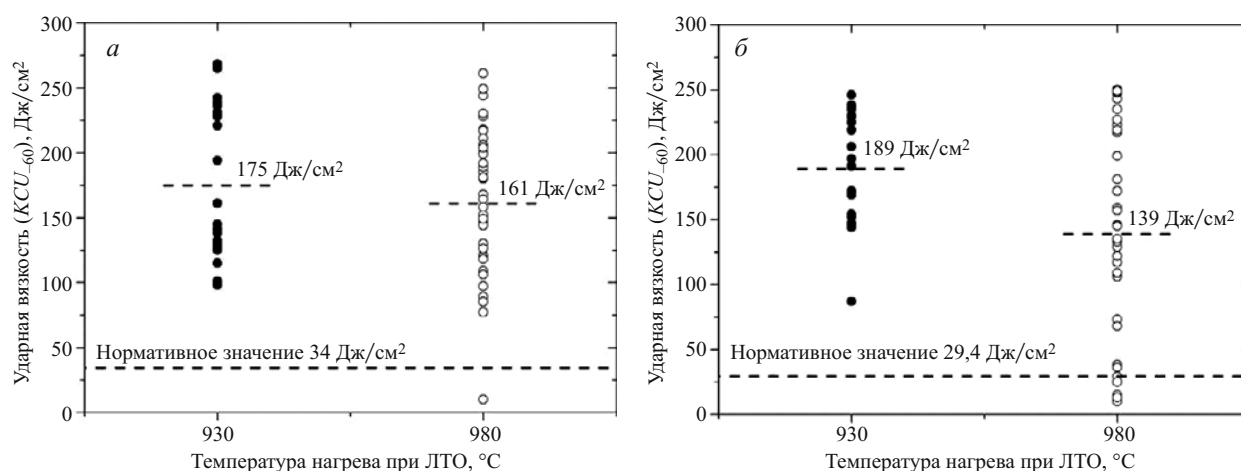


Рис. 5. Влияние температуры аустенитизации при ЛТО нормализации на ударную вязкость сварного соединения труб $\varnothing 325 \times 8,0$ мм из стали класса прочности К52

сплавления сварного соединения находилась посередине образца и была параллельна его оси (рис. 3).

При помощи дилатометра на образцах воспроизводили режимы ступенчатого нагрева и последующего охлаждения со скоростями, применяемыми на производстве, и определяли критические точки A_{c1} , A_{c3} . Скорость нагрева для A_{c1} соответствовала ~ 210 °C/с, для A_{c3} — ~ 70 °C/с. Далее исследовали зеренную структуру аустенита, формирующуюся при температурах нагрева выше A_{c3} , и конечную микроструктуру ОШЗ после охлаждения. Оптимальную температуру ЛТО выбирали по образованию мелкозернистой феррито-перлитной структуры с отсутствием дефектных участков видманштеттового феррита в ОШЗ при охлаждении соединения [5]. Проведенные металлографические исследования сварных соединений труб, изготовленных из различных марок стали, после имитации режимов ЛТО показали, что оптимальному режиму локальной нормализации соответствует нагрев до 20 – 25 °C (рис. 4).

На основании экспериментальных данных, полученных при проведении дилатометрических исследований, в таблице приведены критические точки A_{c1} и A_{c3} и оптимальные температуры нагрева при ЛТО нормализации сварного соединения труб классов прочности К50 – К60, изготовленных из сталей различного химического состава.

Для опробирования предложенных режимов ЛТО и оценки влияния температуры аустенитизации на комплекс механических свойств сварное соединение труб $\varnothing 325 \times 8,0$ мм класса прочности К52 из стали С6 обрабатывали по двум режимам ЛТО: нормализация при 980 и 930 °C (химический состав стали указан в таблице).

Анализ результатов испытаний образцов Шарпи (KCV) при температуре –20 °C (рис. 5, а) и Менаже (KCU) при температуре –60 °C (рис. 5, б) показал положительное влияние снижения температуры аустенитизации (с 980 до 930 °C) на ударную вязкость. Сред-

ние значения ударной вязкости при уменьшении температуры ЛТО выросли на 14 и 50 Дж/см² при испытании образцов KCU и KCV соответственно. Для образцов KCV при температуре –20 °C получены неудовлетворительные результаты испытаний сварного соединения для труб, прошедших ЛТО при температуре 980 °C (шесть образцов, или 17 % от общего количества). При этом на образцах соединения труб, прошедших ЛТО при температуре 930 °C, результаты соответствовали техническим требованиям (рис. 5, б).

Таким образом, исследования ряда малоуглеродистых низколегированных сталей позволили определить критические точки для скоростей нагрева, применяемых в цеховых условиях, и выбрать оптимальные режимы ЛТО (нормализации) сварного соединения труб, обеспечивающие повышение стабильности показателей по ударной вязкости и сопротивлению хрупкому разрушению при отрицательных температурах. Полученные результаты апробированы и используются при производстве электросварных труб диаметром 114 – 530 мм классов прочности К50 – К60.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шамов А. Н., Лунин И. В., Иванов В. Н. Высокочастотная сварка металлов. — Л.: Машиностроение, 1977. С. 126 – 148.
2. Матвеев Ю. М., Ружинский М. Б., Ромашов А. А., Халамез Е. М. Технология производства электросварных труб. — М.: Металлургия, 1967. С. 84 – 96.
3. Головин Г. Ф., Зимин Н. В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. — Л.: Машиностроение, 1990. — 87 с.
4. Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. — М.: Наука, 1965. С. 80 – 91.
5. Ткачук М. А., Багмет О. А. Методика определения оптимальной температуры нагрева при проведении локальной термической обработки сварного шва труб, сваренных токами высокой частоты / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 5. С. 39 – 43.

REFERENCES

1. Shamov A. N., Lunin I. V., Ivanov V. N. Vysokochastotnaya svarka metallov [High-frequency welding of metals]. — Leningrad: Mashinostroyeniye, 1977. P. 126 – 148 [in Russian].