

УДК 669.15-194:539.25

Л.А. Ефименко¹, e-mail: lefimen@yandex.ru; О.Е. Капустин¹, e-mail: svarka@gubkin.ru;
А.О. Меркулова¹, e-mail: arina_merkulova@list.ru; Д.Е. Вышемирский¹, e-mail: svarka@gubkin.ru

¹ РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, Россия).

Особенности процессов распада аустенита высокопрочных сталей при многопроходной сварке

Дуговая многопроходная сварка является наиболее распространенным способом изготовления конструкций нефтегазового комплекса, в т.ч. труб, соединительных деталей и монтажных стыков трубопроводов из высокопрочных сталей. В ходе многопроходной сварки превращение аустенита, формирование структуры и свойств различных зон сварного соединения происходит в условиях многоциклического нагрева и охлаждения. Известно, что многопроходная сварка имеет большой потенциал по регулированию сварочных термических циклов для получения благоприятного структурного состояния зоны термического влияния (ЗТВ) сварного соединения. Однако большинство исследований особенностей распада аустенита выполнено применительно к условиям однопроходной сварки.

В данной статье представлены результаты изучения особенностей кинетики распада аустенита при многопроходной сварке и их влияние на изменение свойств ЗТВ сварных соединений из малоуглеродистой стали категории прочности К70(Х90).

Исследования проводились на специализированном оборудовании в лабораториях кафедры «Сварка и мониторинг нефтегазовых сооружений» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина.

По результатам проведенных исследований кинетики распада аустенита показано, что в условиях многопроходной сварки устойчивость аустенита к распаду будет снижаться при воздействии каждого последующего прохода, что будет способствовать уменьшению количества закалочных структур и изменению морфологии бейнита в околосшовном участке (ОШУ) ЗТВ. Это целесообразно учитывать при определении рациональных параметров термических циклов, обеспечивающих заданный комплекс механических свойств сварных соединений.

Ключевые слова: кинетика распада аустенита, многопроходная сварка, зона термического влияния, сварные соединения, высокопрочные трубные стали.

L.A. Efimenko¹, e-mail: lefimen@yandex.ru; О.Е. Kapustin¹, e-mail: svarka@gubkin.ru;
А.О. Merkulova¹, e-mail: arina_merkulova@list.ru; D.E. Vyshemirsky¹, e-mail: svarka@gubkin.ru

¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia).

Features of processes decomposition of austenite high-strength steels at multipass welding

Arc multi-pass welding is a most common method of the oil and gas industry structures manufacturing, including pipes, fittings and field joints of pipelines made of high-strength steels. Austenite transformation, formation of structure and different areas properties of welded joints during multi-pass welding take place in a multicycle heating and cooling conditions. It is known that the multi-pass welding has a great potential for welding thermal cycles' regulation in order to obtain a favorable structural condition of the heat affected zone (HAZ) of welded joint. However, the majority of studies for austenite decomposition peculiarities are made with respect to the conditions of the single-pass welding. This article presents the results of the austenite decomposition kinetics characteristics study during multi-pass welding, and their impact on the properties of welded joints HAZ made of K70 (X90) strength grade mild steel.

The studies were conducted on the specialized equipment in the laboratories of the Oil & Gas Facilities Welding and Monitoring Department of Gubkin Russian State University of Oil and Gas.

The results of austenite decomposition kinetics studies show that in conditions of multi-pass welding the austenite decomposition stability will decrease under the influence of each subsequent pass that will promote the reduction of the amount of hardening structures and change in the bainite morphology in HAZ weld area (WA). It is advisable to take into account when determining the thermal cycles' rational parameters that maintain a specified set of welded joints mechanical properties.

Keywords: kinetics of austenite decomposition, multipass weld, HAZ, welded joints, high-strength pipeline steel.

Таблица 1. Химический состав и твердость стали категории прочности К70

Table 1. Chemical composition and hardness of K70 strength grade steel

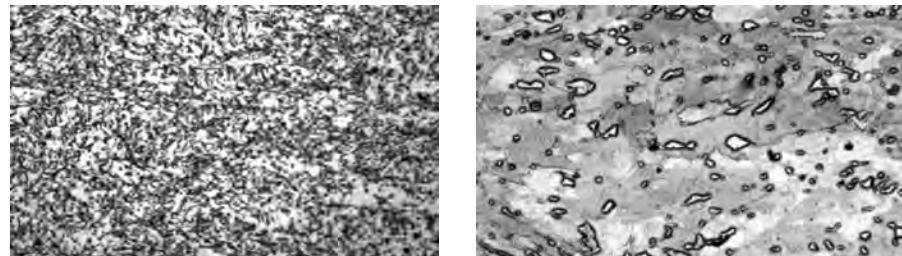
Категория прочности Strength grade	Содержание химических элементов, % Chemical elements content, %														
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V	W	Zr	CEP _{cm}	C _{экв.} C _{equiv.}
K70(X90)	0,066	0,25	1,81	0,008	0,25	0,24	0,02	0,23	0,053	0,0178	0,046	0,0075	0,0038	0,20	0,46

В данной работе представлены результаты изучения особенностей кинетики распада аустенита при многопроходной сварке и их влияние на изменение свойств ЗТВ сварных соединений. Исследования выполнены на малоуглеродистой стали категории прочности K70(X90), химический состав и исходный структурно-фазовый состав которой представлен в таблице 1 и на рисунке 1.

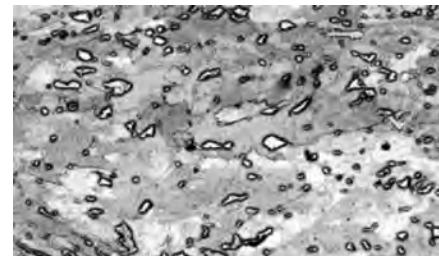
Сталь характеризуются преимущественно бейнитной структурой повышенной дисперсности (рис. 1а и 1в). Содержание феррита не превышает 10–15%. Средний диаметр ферритного зерна составляет 3,5 мкм (рис. 1 г). По границам и внутри бейнитного феррита выделяется мартенситно-аустенитная фаза в наличии около 5% (рис. 1 б, г). Твердость стали составляет 255НВ.

Кинетика распада аустенита при многопроходной сварке изучалась с применением дилатометрического метода исследования [1]. Использовался за-калочный дилатометр Linseis L78 RITA, в котором испытывались образцы длиной 10 мм, диаметром 3 мм и толщиной стенки 1 мм.

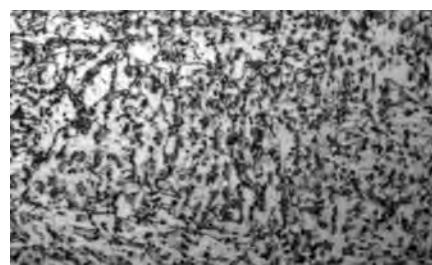
На рисунке 2 сопоставлены термокинетические диаграммы ОШУ ЗТВ исследованной стали при имитации ТЦС. Сплошными линиями показана диаграмма однопроходной сварки. Скорость нагрева ОШУ ЗТВ до максимальной температуры $T_{\max} = 1350^{\circ}\text{C}$ составила $W_h = 100^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Скорость охлаждения изменялась от 1 до $60^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Влияние повторного нагрева и охлаждения одного и того же участка ОШУ ЗТВ прослеживается по диаграмме, изображенной пунктирными линиями. Для ее построения на



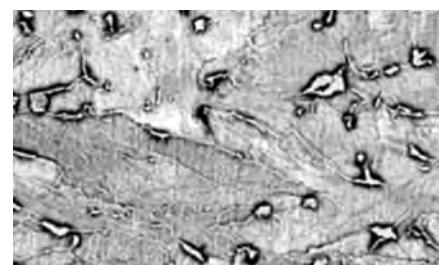
X200 a) a)



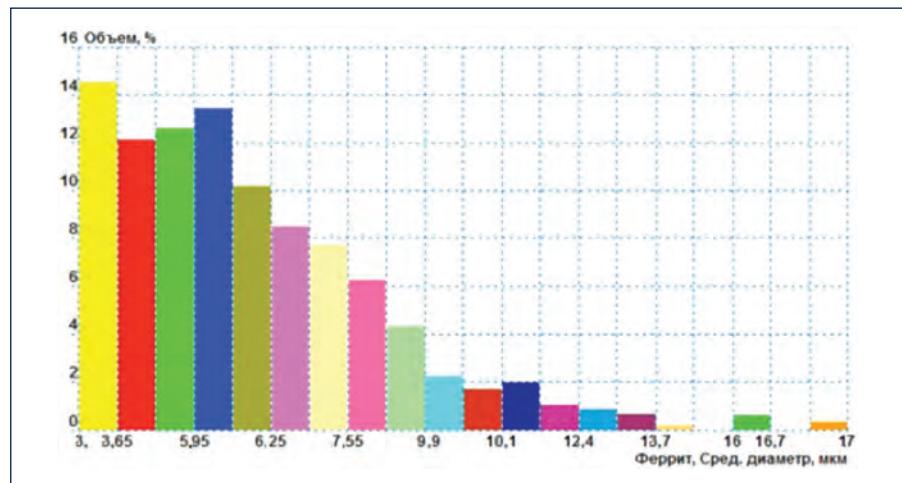
X6200 b) b)



X500 b) c)



X13500 c) d)



d) e)

Рис. 1. Фотографии микроструктуры стали категории прочности X70 и гистограмма распределения зерен феррита по размеру в структуре металла:

а, в – оптическая металлография; б, г – электронная микроскопия; д – гистограмма

Fig. 1. Photos of X70 strength grade steel microstructure and ferrite grain size distribution histogram in the metal structure:

а, с – optical metallography; б, д – electronic microscopy; е – histogram

Ссылка для цитирования (for references):

Ефименко Л.А., Капустин О.Е., Меркулова А.О., Вышемирский Д.Е. Особенности процессов распада аустенита высокопрочных сталей при многопроходной сварке // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 10. С. 104–109.

Efimenko L.A., Kapustin O.E., Merkulova A.O., Vyshemirsky D.E. Features of processes decomposition of austenite high-strength steels at multipass welding (In Russ.). *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 10. P. 104–109.

Таблица 2. Характеристические параметры диаграммы анизотермического превращения аустенита в ОШУ ЗТВ стали

Table 2. Characteristic parameters of austenite anisothermal transformation in HAZ weld area of steel

Способ сварки Welding method	Наименьшие возможные температуры появления, °C Lowest possible appearance temperature, °C			Скорость охлаждения, °C/с, при которой появляется Cooling rate, °C/s, for		
	Феррит Ferrite	Бейнит Bainite	Мартенсит Martensite	Феррит Ferrite	Бейнит Bainite	Мартенсит Martensite
Один проход Single pass	530	440	390	12	20	60
Два прохода Two passes	540	450	—	29	20	—

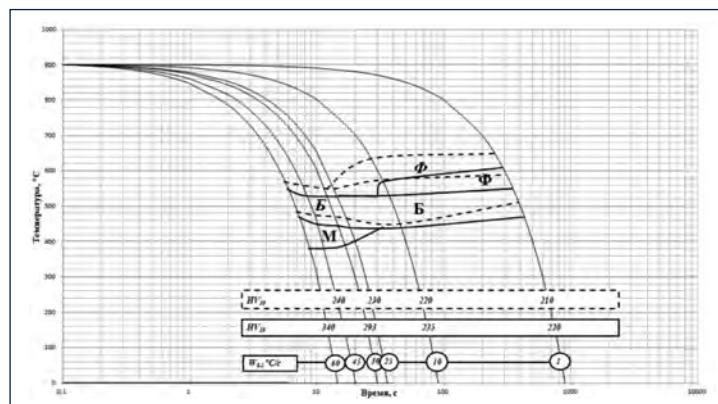


Рис. 2. Совмещенная термокинетическая диаграмма стали K70 при однопроходной (—) и многопроходной (- - -) сварке
Fig. 2. Combined CCT diagram for K70 steel at single-pass (—) and multi-pass (- - -) welding

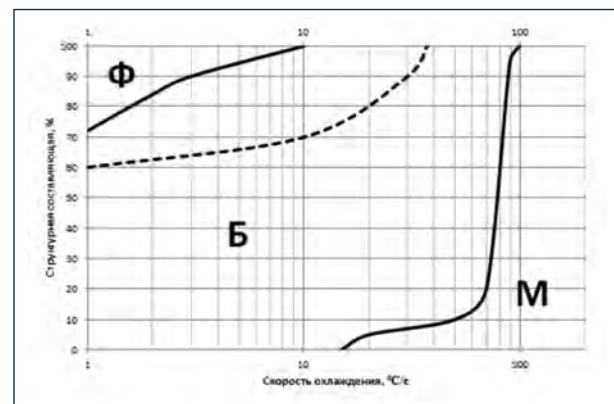


Рис. 3. Совмещенная структурная диаграмма стали K70 при однопроходной (—) и многопроходной (- - -) сварке
Fig. 3. Combined structural diagram of K70 steel at single-pass (—) and multi-pass (- - -) welding

дилатометрических образцах из основного металла имитировались два термических цикла. Параметры первого соответствовали вышеуказанным значениям, характерным для первого прохода. Затем на этих же образцах воспроизводились следующие термические циклы: $W_h = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, $T_{\max} = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $W_{8-5} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с} \div 60 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, отличающиеся от предыдущих только максимальной температурой нагрева.

Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе марки Meiji IM-7200 и на сканирующем электронном микроскопе марки Phenom ProX (увеличение до $\times 45000$). Для анализа структурно-фазового состава применялся анализатор изображения Thixomet Pro. Количественный фазовый и структурный анализ, а также подсчет среднего диаметра зерна проводился по ГОСТ 5639. Измерение твердости металла исследуемых образцов выполнялось в соответствии с ГОСТ 2999 на автоматическом твердомере Durascan-50 методом Виккерса при нагрузке 98,07 Н (10 кгс).

Анализ сопоставленных анизотермических и структурных диаграмм ОШУ ЗТВ (рис. 2 и 3) показал, что повторный нагрев металла ОШУ ЗТВ до температур $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ способствует снижению устойчивости к распаду, расширению области ферритного превращения и увеличению количества ферритной фазы в структуре.

В таблице 2 представлены характеристические параметры диаграммы анизотермического распада для одно- и двухпроходной сварки. В частности, при однопроходной сварке аустенит ОШУ начинает распадаться в ферритной, бейнитной и мартенситной областях соответственно при температурах 610, 550 и $440 \text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как в результате теплового воздействия второго прохода температура начала выделения феррита и бейнита будет выше и составит 650 и $590 \text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно.

Объем ферритного превращения при реализации двух сварочных циклов значительно больше, чем при однопроходной, что объясняется меньшей гомогенностью аустенита перед распа-

дом. Воздействие первого сварочного прохода ($T_{\max} = 1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$) обеспечивает прекращение распада аустенита в ферритной области при скорости охлаждения порядка $12 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Повторный нагрев металла ОШУ ЗТВ до $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ способствует расширению области образования феррита вплоть до скорости охлаждения $30 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. При этом при сопоставимых скоростях охлаждения содержание феррита в структуре больше на 25–30%.

Бейнитное превращение наблюдается во всем диапазоне выбранных скоростей охлаждения для обоих вариантов сварки.

При этом ферритно-карбидная смесь имеет разное морфологическое строение. При реализации первого термического цикла в ОШУ ЗТВ формируется бейнит, характеризующийся пакетной структурой, состоящий из параллельно расположенных реек (рис. 4 – 1в, 1г). В результате повторного нагрева и охлаждения структура ОШУ ЗТВ представлена гранулярным бейнитом (рис. 4 – 2в, 2г, рис. 5).

Формирование мартенситной фазы фиксируется при скоростях охлаждения от 15 до 60 °C/с только при однопроходной сварке и практически отсутствует при повторном нагреве.

Отмеченные изменения структурно-фазового состава сказываются на механических характеристиках стали.

На рисунке 6 представлены зависимости изменения твердости металла ОШУ ЗТВ от скорости охлаждения при воздействии первого и последующего проходов. Как видно, при низких скоростях охлаждения значения твердостей в обоих рассматриваемых случаях сопоставимы и составляют 210 HV₁₀ и 220–230 HV₁₀ для скорости охлаждения 1 и 10 °C/с соответственно. При более высоких скоростях охлаждения влияние повторного нагрева на показатели твердости более существенно. Значения твердости отличаются на 60 HV и 100 HV при $W_{8-5} = 30$ °C/с и $W_{8-5} = 60$ °C/с соответственно.

Повторный нагрев снижает способность металла ОШУ ЗТВ к образованию закалочных структур, и твердость этого участка приближается к твердости основного металла даже при скоростях охлаждения порядка 30–60 °C/с.

На графике была выделена область нормативных значений твердости, соответствующей 350 HV10 [2]. Анализ полученных данных показывает, что при выполнении первого сварочного прохода значения твердости, не превышающие нормативные показатели, могут быть обеспечены при скорости охлаждения порядка 40–50 °C/с. При двухпроходной сварке твердость ОШУ ЗТВ не превышает твердости основного металла в исследуемом диапазоне скоростей охлаждения.

Далее была проведена оценка влияния рекомендуемых скоростей охлаждения ($W_{8-5} \geq 40$ –50 °C/с), гарантирующих нормативный уровень твердости металла ОШУ ЗТВ исследуемой стали на сопротивление хрупкому разрушению.

Склонность к хрупкому разрушению металла оценивалась по результатам испытания на ударный изгиб серии образцов типа Шарпи (KCV⁴⁰). Образцы размером 10 x 10 x 15 мм предварительно подвергались трехкратному нагреву и охлаждению на установке токов вы-

$$W_{8-5} = 1 \text{ } ^\circ\text{C/c} \quad W_{8-5} = 1 \text{ } ^\circ\text{C/s}$$

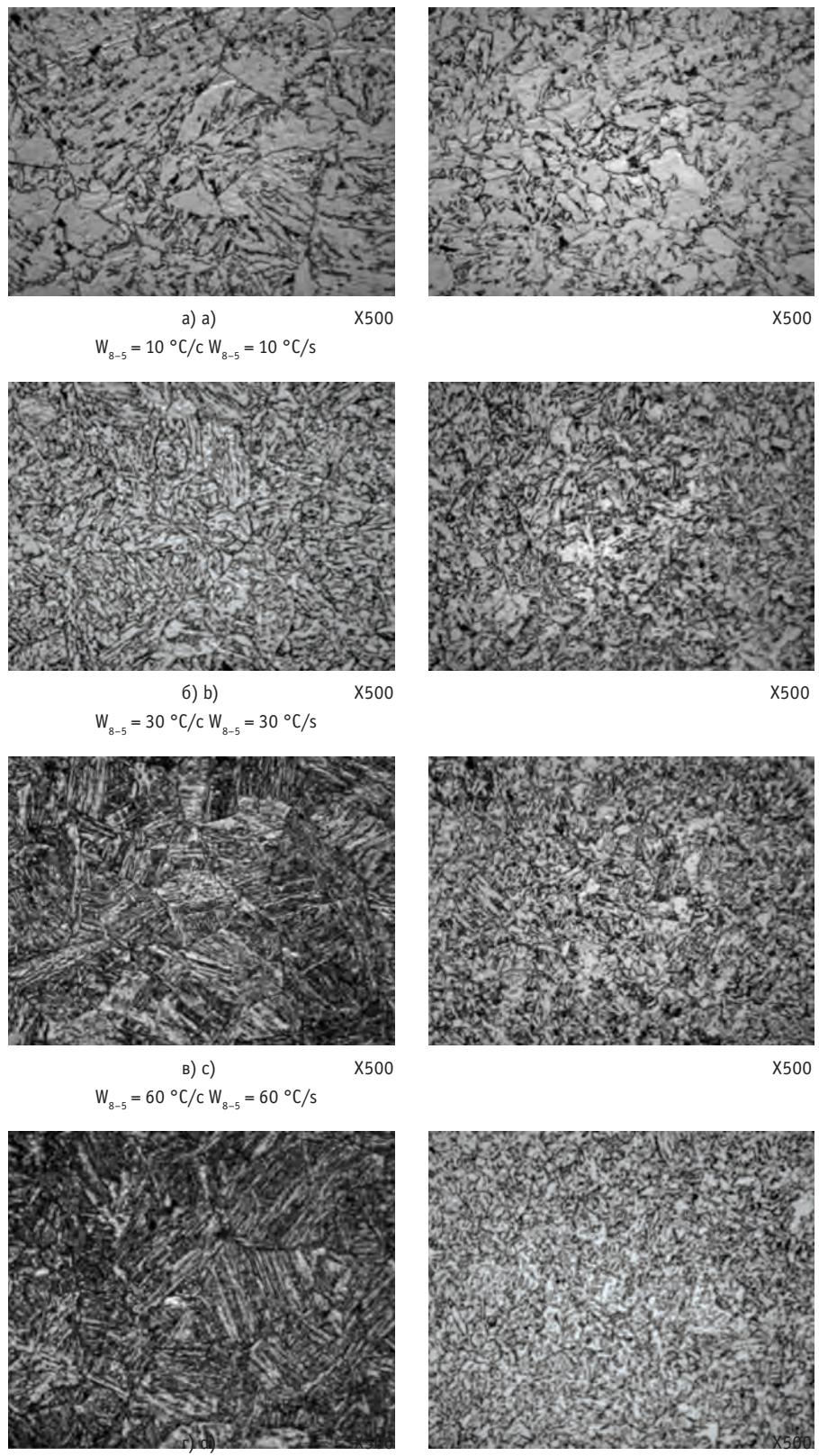
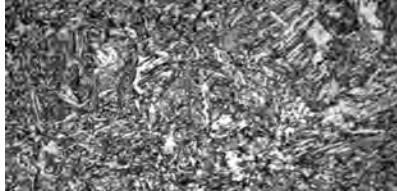
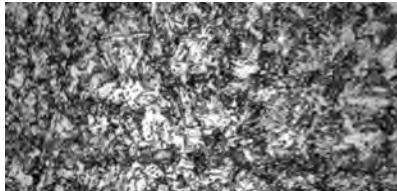


Рис. 4. Микроструктура ОШУ ЗТВ стали К70 после воздействия одного прохода (1) и двух проходов (2)

Fig. 4. K70 steel HAZ weld area microstructure after a single pass (1) and two passes (2)

Таблица 3. Значения ударной вязкости металла ОШУ ЗТВ сварных соединений стали категории прочности К70 и его микроструктура

Table 3. Values of HAZ weld area metal impact strength for welded joints of K70 strength grade steel and its microstructure

№ п/п No.	Сварочные проходы Welding passes	KCV ⁻⁴⁰ при $W_{8-5} = 45$ °C/c; KCV _{min} –KCV _{max} , KCV _{ср} , Дж/см ² KCV ⁻⁴⁰ at $W_{8-5} = 45$ °C/s; KCV _{min} –KCV _{max} , KCV _{aver} , J/cm ²	Микроструктура, x500 Microstructure, x500
1	Первый проход $T_{\max} = 1350$ °C First pass $T_{\max} = 1350$ °C	220–240; 230	
2	Второй проход $T_{\max} = 1100$ °C Second pass $T_{\max} = 1100$ °C	270–300; 285	
3	Третий проход $T_{\max} = 850$ °C Third pass $T_{\max} = 850$ °C	290–300; 295	

сокой частоты типа Power Cube 90/180 по следующим режимам: максимальная температура нагрева составляла около 1350 °C (1-й цикл нагрева); 1100 °C (2-й цикл нагрева); 850 °C (3-й цикл нагрева). Скорость охлаждения (W_{8-5}) составляла порядка 45 °C/c для всех термических циклов.

Зависимость изменения ударной вязкости металла ОШУ ЗТВ исследованной стали при однопроходной сварке представлена на структурной диаграмме (рис. 7).

Анализ представленных данных показал, что для стали категории прочности К70 диапазон скоростей охлаждения металла ОШУ ЗТВ, при котором значения KCV⁻⁴⁰ удовлетворяют требованиям нормативных документов ПАО «Газпром» [2–4] ($KCV^{-40} \geq 50$ Дж/см²), составляют 10–60 °C/c (рис. 7). При этом максимальные значения ударной вязкости 280 Дж/см² обеспечиваются при скоростях охлаждения ≈ 30 °C/c.

В таблице 3 представлены средние значения ударной вязкости (KCV^{-40}) металла ОШУ ЗТВ сварных соединений стали категории прочности К70 и

его микроструктура после реализации каждого цикла нагрева и охлаждения. Из представленных данных видно, что при выполнении первого цикла нагрева ($T_{\max} = 1350$ °C, $W_{8-5} = 45$ °C/c) металл ОШУ ЗТВ характеризуется значениями ударной вязкости (KCV^{-40}) около 230

Дж/см² за счет формирования преимущественно бейнитной структуры реечной морфологии выделения (реечный бейнитный феррит) (табл. 3, первый проход). Содержание мартенситной фазы не превышает 5–7% (табл. 3, первый проход). Повторный нагрев (2-й

Второй проход Second pass

$$W_{8-5} = 30 \text{ °C/c } W_{8-5} = 30 \text{ °C/s}$$

$$W_{8-5} = 60 \text{ °C/c } W_{8-5} = 60 \text{ °C/s}$$



X6000

X6000

Рис. 5. Морфология выделения бейнитной составляющей в структуре металла ОШУ ЗТВ стали К70 после воздействия двух проходов

Fig. 5. Morphology of bainite component allocation in the structure of K70 steel metal HAZ weld area after exposure to two passes

цикла) этого участка до температуры 1100 °С и охлаждение с аналогичной скоростью ($W_{8-5} \approx 45^{\circ}\text{C}/\text{с}$) позволяет сформировать более однородную структуру с повышенной дисперсностью структурных составляющих, размер пакета бейнита уменьшается (табл. 3, второй проход), мартенситной фазы в структуре не наблюдается. Это способствует повышению сопротивления металла данного участка хрупкому разрушению, значения KCV^{40} составляют около 285 Дж/см². Последующий нагрев (3-й цикл) этого же участка в интервале межкритических температур, в частности до температуры 820 °С, вызывает протекание процесса неполной перекристаллизации, формируется бейнитная структура преимущественно глобулярной формы выделения (глобулярный бейнитный феррит) (табл. 3, третий проход), значение KCV^{40} составило 295 Дж/см².

Таким образом, показано, что в условиях многопроходной сварки устойчивость аустенита к распаду будет снижаться при воздействии каждого последующего прохода, что будет способствовать уменьшению количества закалочных структур и изменению морфологии бейнита в ОШУ ЗТВ. Это целесообразно учитывать при определении рациональных параметров термических циклов, обеспечивающих заданный комплекс механических свойств сварных соединений.

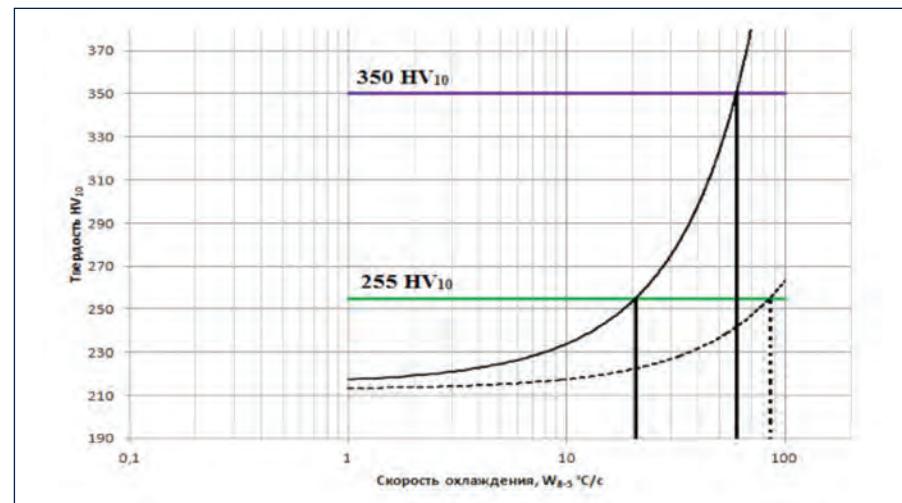


Рис. 6. Значения твердости ОШУ ЗТВ после: первого прохода (—) и последующего прохода (---)
Fig. 6. Hardness value of HAZ weld area after: first pass (—) and subsequent pass (---)

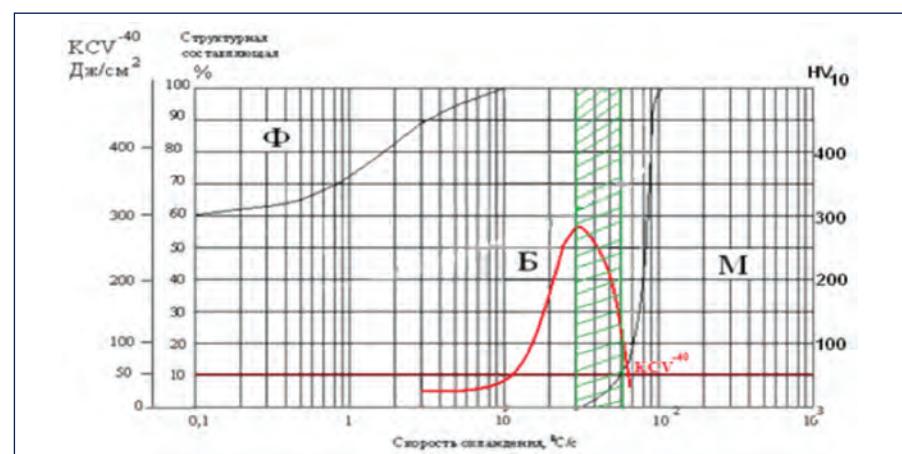


Рис. 7. Структурная диаграмма ОШУ ЗТВ стали категории прочности К70 с кривой изменения ударной вязкости (KCV^{40})
Fig. 7. Structural diagram of K70 grade steel HAZ weld area with impact strength curve (KCV^{40})

Литература:

1. Ефименко Л.А., Прыгаев А.К., Елагина О.Ю. Металловедение и термическая обработка сварных соединений. М.: Логос, 2007. 445 с.
2. СТО Газпром 2-4.1-713-2013 Технические требования к трубам и соединительным деталям: стандарт организации. Изд. взамен СТО Газпром 2-4.1-273-2008; введен 02.11.2013. М.: ОАО «Газпром», 2014. 146 с.
3. СТО Газпром 2-2.2-136-2007 Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промысловых и магистральных газопроводов. Часть I. Введ. 22.09.2007. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. 241 с.
4. СТО Газпром 2-2.2-358-2009 Инструкция по производству сварочных работ при строительстве сухопутных и подводных газопроводов из сталей X80, X100. Введен 05.12.2009. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2009. 203 с.

References:

1. Efimenko L.A., Prygaev A.K., Elagina O.U. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka svarynyh soedinenij [Metallurgy and heat treatment of welded joints]. Moscow, Logos Publ., 2007. 456 pp.
2. STO Gazprom 2-4.1-713-2013 Tehnicheskie trebovaniya k trubam i soedinitel'nym detaljam: standart organizacii [Specifications for pipes and fittings: a standard organization]. Ed. instead ofits. STO Gazprom 2-4.1-273-2008; 11.02.2013 introduced. Moscow, Gazprom JSC, 2014. 146 pp.
3. STO Gazprom 2-2.2-136-2007 Instrukcija po tehnologijam svarki pri stroitel'stve i remonte promyсловyh i magistral'nyh gazoprovodov [Instructions welding technologies in construction and repair of commercial and main gas pipelines]. Part I. Introduced 22.09.2007. Moscow, Publishing Company «RPI Gazprom», 2007. 241 pp.
4. STO Gazprom 2-2.2-358-2009 Instrukcija po proizvodstvu svarochnyh rabot pri stroitel'stve suhoputnyh i podvodnyh gazoprovodov iz stalej H80, H100 [Instructions for the production of welding in the construction of land and underwater gas pipelines of steels X80, X100]. Introduced 05.12.2009. Moscow, Publishing Company «RPI Gazprom», 2009. 203 pp.