

ВЫБОР РЕЖИМОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТПУСКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОДАМИ THERMANIT MTS616

В. Ю. СКУЛЬСКИЙ, А. К. ЦАРЮК, А. Р. ГАВРИК, М. А. НИМКО, Г. Н. СТРИЖИУС

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua, vsku@paton.kiev.ua

Одной из проблем получения сварных соединений сложнолегированных теплоустойчивых сталей является обеспечение требуемого уровня ударной вязкости металла шва. Улучшение его пластичности и вязкости достигается высоким отпуском после сварки с использованием режимов, регламентированных разработчиком сварочных электродов. В случае выполнения сварки опытной высокохромистой мартенситной стали электродами Thermanit MTS 616 (типа 10X9B2МФБ), с учетом условий ее получения, требовалось проведение термической обработки на 30...40 °С ниже, чем обычно применяется для швов указанного типа. Определено влияние режимов ручной дуговой сварки и длительности отпуска при 730...720 °С на твердость и ударную вязкость металла швов. Установлены интервалы выдержек при отпуске, при которых наблюдалось вторичное твердение. Выбраны режимы, обеспечивающие требуемый уровень ударной вязкости швов (работы удара $KV \geq 41$ Дж). Показано, что наряду с выбранной длительностью отпуска важным фактором, обеспечивающим повышение вязкости наплавленного металла, является применение многопроходной сварки на пониженной погонной энергии. Библиогр. 11, рис. 4.

Ключевые слова: сталь теплоустойчивая мартенситная, сварка ручная дуговая покрытыми электродами, металл шва, высокотемпературная термическая обработка, режим отпуска, твердость, ударная вязкость

Получение сварных соединений закаливающихся теплоустойчивых сталей сопряжено с необходимостью проведения после сварки высокотемпературной термической обработки. Назначение такой операции — приведение в равновесное состояние (отпуск) закалочных структур, придание сварным соединениям требуемых механических свойств и снятие остаточных напряжений. При этом одной из проблем, которой уделяется особое внимание при отпуске сварных соединений мартенситных сталей с повышенным содержанием хрома, является обеспечение требуемого уровня ударной вязкости металла шва — например, для швов с 9 % Cr работы удара $KV \geq 41$ Дж при 20 °С (при испытании образцов Шарпи, что соответствует удельной работе разрушения $KCV \approx 51$ Дж/см²) [1, 2]. Для гарантированного получения высоких значений ударной вязкости положительным фактором является повышение температуры и длительности выдержки при отпуске. По этой причине, если отсутствуют особые условия относительно возможного изменения свойств стали, отпуск выполняют при температуре отпуска основного металла на стадии его получения. Для исключения дополнительного снижения прочностных свойств основного металла может предусматриваться выполнение отпуска после сварки на 20...40 °С ниже температуры, использованной при его (основного металла) изготовлении [3]. Подобная ситуация возникла при сварке одной из опытных мартенситных сталей

с повышенным содержанием хрома в рамках исследований, выполняемых по проекту Z-Ultra 7-й Европейской программы [4]. Для сварки выбраны электроды Thermanit MTS616 (Böhler Thyssen Schweisstechnik) с мартенситным типом наплавленного металла типа 10X9B2МФБ. Рекомендуемый отпуск для такого металла швов заключается в выдержке при 760 °С в течение 2 ч [5]. Разработчиком опытной стали, с учетом режима ее термической обработки, регламентирован отпуск сварных соединений не выше 730...720 °С. Возникла необходимость проверки возможности обеспечения требуемого уровня ударной вязкости швов при указанных условиях отпуска.

Цель работы заключалась в выборе режима термической обработки сварных соединений теплоустойчивой стали с мартенситным швом типа MTS616 (10X9B2МФБ) при температуре, ниже рекомендуемой разработчиком сварочных электродов.

В экспериментах изучали свойства металла швов, полученных при ручной дуговой сварке стыковых соединений пластин толщиной 20 мм электродами Thermanit MTS616 диаметром 3,2 мм. Химический состав металла, наплавленного электродами Thermanit MTS616, мас. %: 0,11 С, 0,19 Si, 0,63 Mn, 0,016 P, 0,006 S, 8,50 Cr, 0,56 Mo, 0,57 Ni, 0,18 V, 1,58 W, < 0,1 Cu, 0,055 Nb, 0,044 N. В качестве основного металла использовали сталь, несколько отличающуюся от системы легирования металла, наплавленного выбранными элект-

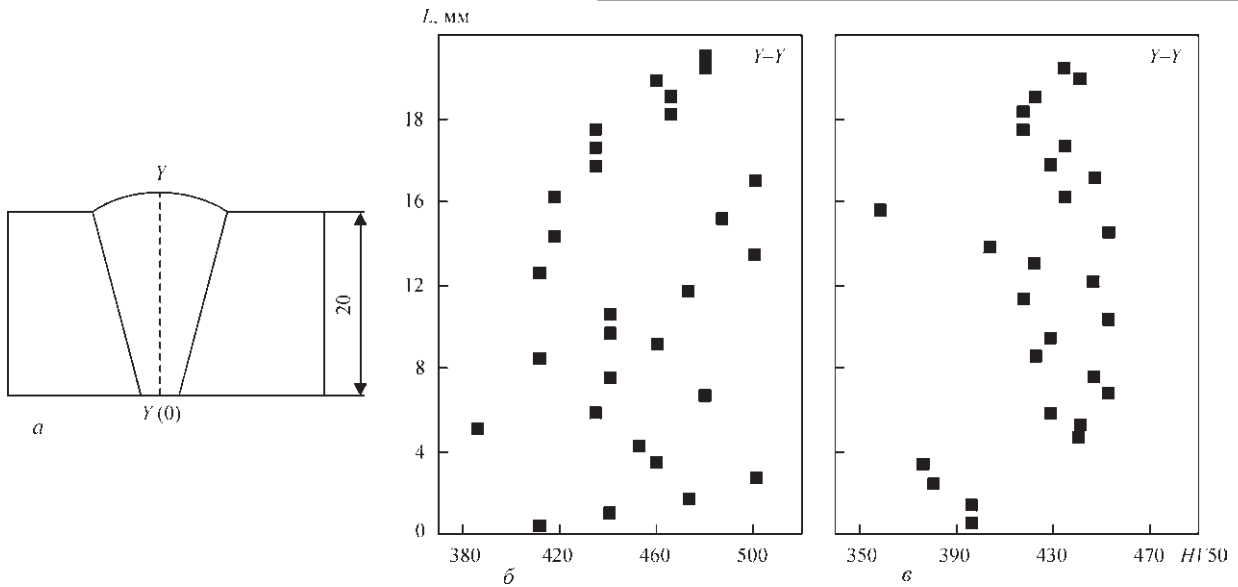


Рис. 1. Изменение твердости в центре швов: а — зона измерения в соединении; б, в — результаты для значения $I_{cb} = 100$ и 120 А соответственно (нулевой отметке соответствует точка $Y(0)$ в корневом проходе)

тродами. Для исключения перемешивания стали и электродного металла кромки пластин были облицованы металлом типа МТS616. Такой подход позволил оценивать свойства «чисто» электродного металла. Определяли влияние длительности отпуска (в пределах от 4 до 12 ч) при 720 и 730 °С на твердость и ударную вязкость металла шва при комнатной температуре. Твердость измеряли с использованием метода Виккерса при нагрузке на индентор 5 кг. Испытания на ударный изгиб выполнены с применением образцов сечением 10×10 мм с острым надрезом (тип IX по ГОСТ 6996-66).

В практике получения соединений трудносвариваемых теплоустойчивых сталей для достижения улучшенных значений ударной вязкости металла шва рекомендуется выполнять сварку валиками малой толщины на пониженных режимах [6, 7]. Этим достигается получение мелкокристаллической первичной структуры, а также частичный отпуск ранее выполненных слоев при наложении последующих валиков. Последующий высокий отпуск швов с дезориентированной кристаллической микроструктурой и с частично улучшенной вязкостью позволяет достичь требуемого уровня значений ударной вязкости. Подобный подход использован в настоящей работе.

Предварительно выполнены эксперименты по выбору режима сварки, обеспечивающего стабильное горение электрода, качественное формирование шва, хорошее сплавление наплавляемого и основного металла, легкость осуществления процесса сварки и валики малой толщины. Опыты показали, что при сварке на минимально возможном для стабильного горения дуги и пониженном токе (80...90 А) сложнее обеспечить сплавление наплавляемого металла и кромок свариваемой стали. При этом для формирования качественного

валика сварку необходимо вести на малой скорости. В таких условиях погонная энергия q/v может иметь более высокие значения, чем в случае сварки на большем токе, поскольку в последнем случае возрастание скорости плавления электрода позволяет увеличивать скорость сварки без ущерба для качества формируемого шва. Установлено, что оптимальным является сварочный ток в диапазоне 100...120 А. Для использованных в опытах режимов и техники сварки погонная энергия q/v составляла: для $I_{cb} = 100$ А — 5,15 кДж/см, для $I_{cb} = 120$ А — 3,29 кДж/см. Ток более 130...140 А приводит к сильному перегреву электродного стержня, осыпанию обмазки и усилению разбрызгивания.

Оценка характера изменения твердости вдоль вертикальной оси $Y-Y$ в поперечном сечении швов в состоянии после сварки показывает (рис. 1), что металл швов, выполненных на токе 120 А более однороден — значения твердости имеют меньший разброс, чем в случае сварки на токе 100 А. В целом можно отметить, что в данном типе швов слабо проявляется реакция металла на тепловое отпускное воздействие при выполнении последующих проходов. Под влиянием повторного нагрева твердость снижается незначительно и остается на уровне, близком к состоянию закаленного мартенсита ($HV50 - 420...500$ при сварке на токе $I_{cb} = 100$ А и около $HV50 - 400...450$ при $I_{cb} = 120$ А).

На рис. 2 и 3 представлены результаты оценки влияния длительности отпуска при температурах 720 и 730 °С на показатели вязкости (KCV, KV) и твердость металла швов, полученных при сварке на токах 100 и 120 А. Измерения твердости выполнены в четырех участках поперечного сечения шва, отстоящих друг от друга приблизительно на 1/4 толщины соединения (согласно схеме на рис. 2, а). Во всех случаях после выполненной

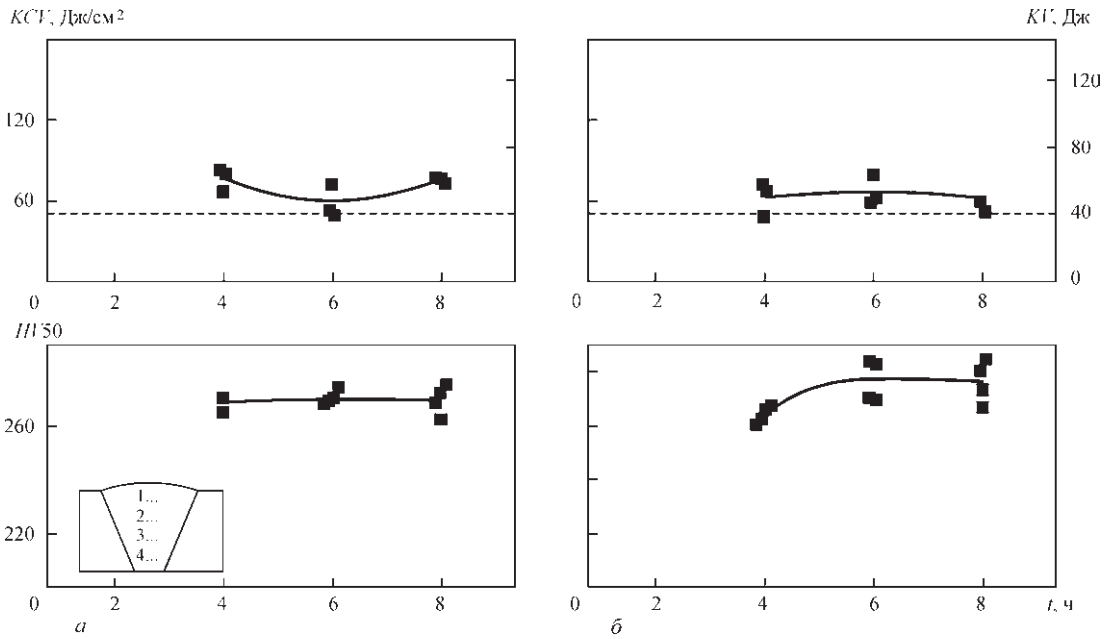


Рис. 2. Влияние режима отпуска на ударную вязкость и твердость металла шва, полученного при сварке с $I_{св} = 100$ А: а — отпуск при 720; б — 730 °С

термической обработки твердость швов соответствовала требованиям DIN EN ISO 15614-1 [8] — составляла менее HV350 согласно норме для соединений из сталей 6 группы (по DIN CEN ISO/TR 15608 [9]), к которым относится металл швов исследуемого типа. Значения ударной вязкости также превышали минимальный допустимый уровень (на графиках обозначен горизонтальной прерывистой линией). Однако у швов, выполненных на токе 120 А показатели ударной вязкости были выше, чем у швов, сваренных на токе 100 А. Это, по-видимому, связано с большей однородностью наплавленного металла и более эффективным отпуском ранее выполненных слоев под влиянием

повторного сварочного нагрева. По этой причине режим многопроходной сварки на токе 120 А можно считать более предпочтительным.

Как видно из рис. 3, твердость швов, выполненных на токе 120 А, после отпуска при 720 °С в течение 4 ч находится на более высоком уровне, чем после более длительной выдержки. Исходя из характера изменения твердости, в качестве приемлемой можно принять длительность отпуска при этой температуре, равную около 5 ч. При этом обеспечивается достаточно высокая ударная вязкость — на уровне 100 Дж/см². При отпуске при 730 °С и выдержке более 4 ч у обоих типов исследованных швов (сваренных на режимах со

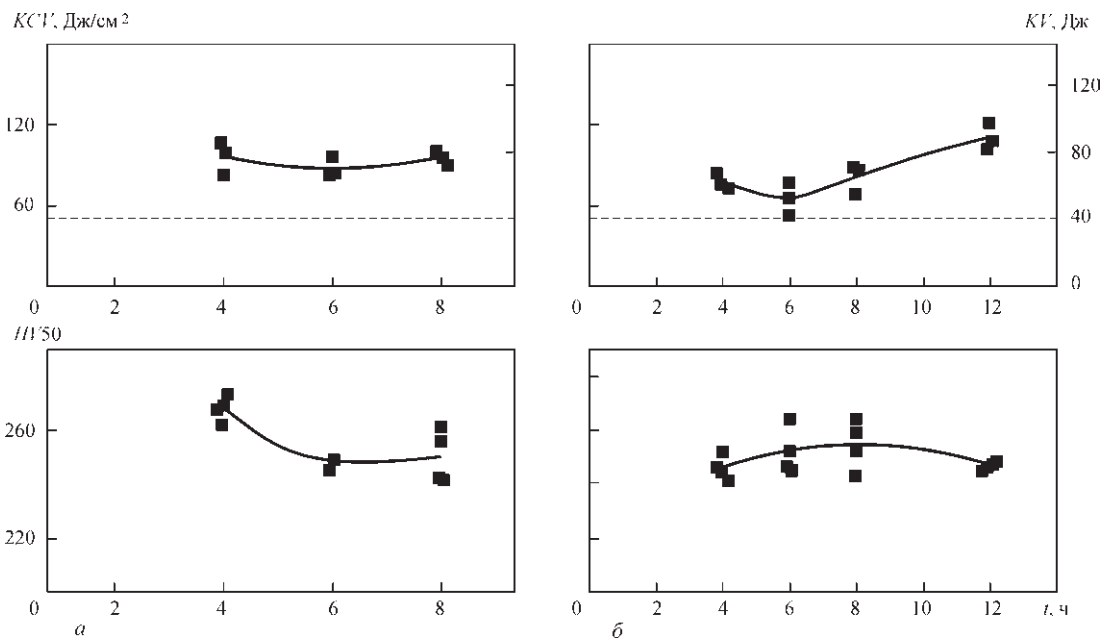


Рис. 3. Влияние режима отпуска на ударную вязкость и твердость металла шва, полученного при сварке с $I_{св} = 120$ А: а — отпуск при 720; б — 730 °С

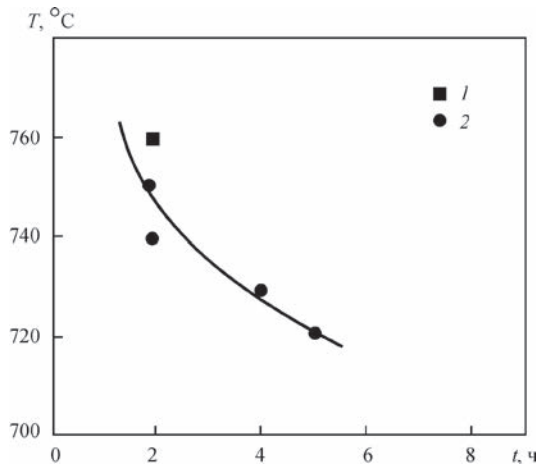


Рис. 4. Связь между температурой и выдержкой при высоком отпуске для обеспечения требуемой ударной вязкости металла швов, выполненных ручной дуговой электросваркой (1 — рекомендации изготовителя электродов, 2 — результаты экспериментов)

100 и 120 А) проявилась тенденция ко вторичному твердению. При этом у швов, выполненных на токе 120 А, заметно снизились значения KCV , которые вновь стали возрастать после выдержки в течение 8 ч и более. Учитывая, что высокотемпературная термическая обработка является энергозатратной и дорогой операцией, экономически более выгодным является отпуск при возможных меньших выдержках. Поэтому в случае термической обработки при 730 °С целесообразно применять выдержку около 4 ч. После такого режима отпуска значения KCV достигают уровня примерно 80 Дж/см². Эти же режимы отпуска можно применять и для швов, выполненных на токе 100 А, однако, как показали полученные результаты, в этом случае швы имеют более низкую ударную вязкость (на уровне около 60 Дж/см²).

В качестве обобщения на рис. 4 представлена зависимость, показывающая связь между температурой и длительностью выдержки в процессе высокого отпуска, при которых обеспечивается ударная вязкость металла швов KV не ниже минимальной величины 41 Дж.

Следует отметить, что в некоторых случаях при оценке свойств металла шва в качестве критерия допустимой величины ударной вязкости используют значение $KV = 27$ Дж [10]. Данная величина KV регламентирована для поперечного сечения бесшовных труб из теплоустойчивых сталей (см., например, стандарт BS EN 1021602:2002 [11]). Однако, по нашему мнению, применение такого критерия для швов представляется дискуссионным. Пониженная вязкость в поперечном сечении стенки трубы, в случае резкого возрастания действующих нагрузок (которые, например, формируются при опробовании трубных систем при

гидроиспытаниях или запуске высокотемпературных компонентов), вероятнее всего может вызвать разрушение в виде расслоения без сквозного повреждения. Такая же низкая вязкость металла шва с литой структурой может обусловить его поперечное разрушение и формирование сквозного повреждения, что является весьма опасным дефектом. Поэтому в данной работе авторы все же стремились обеспечить более высокие значения ударной вязкости металла швов, руководствуясь требованием $KV \geq 41$ Дж.

Таким образом, выполненные исследования показали возможность обеспечения требования к ударной вязкости $KV \geq 41$ Дж металла мартенситного шва типа 10X9B2MФБ, выполненного ручной дуговой сваркой электродами Thermanit MTS616, при отпуске при температуре на 30...40 °С ниже температуры, рекомендуемой разработчиком электродов. Условиями обеспечения требуемого уровня вязкости являются:

- многопроходная сварка тонкими валиками на режимах с пониженной погонной энергией (например 3,3...5,1 кДж/см при сварке электродами диаметром 3,2 мм);

- высокотемпературная термическая обработка после сварки при температуре 730...720 °С в течение 4...5 ч.

1. Bergquist E.-L. Consumables and welding modified 9Cr-1Mo steel / E.-L. Bergquist // Svetsaren. – 1999. – № 1–2. – P. 22–25.
2. Хойзер Г. Присадочные материалы для сварки в энергетическом машиностроении / Г. Хойзер // Автоматическая сварка. – 1997. – № 9. – С. 40–44, 47.
3. Петров Г. Л. Сварка жаропрочных нержавеющей сталей / Г. Л. Петров, В. Н. Земзин, Ф. Г. Гонсеровский. – М.: Машгиз, 1963. – 248 с.
4. Режим доступа <http://www.z-ultra.eu> – Z phase strengthened steels for ultra-supercritical power plants.
5. Welding filler metals. Welding guide. – Hamm: Böhler Thyssen Sveisstechnik, 2005. – 576 p.
6. Rosenbrock L. A. A critical overview of the welding of P91 Material / L. A. Rosenbrock // Australia Welding Journal. – 2001. – 46, Second Quarter. – P. 5–8.
7. Welding of new types of steel for power plant construction / W. Adam, W. Mischok, G. Wellnitz [et al.] // Welding and Cutting: Welding Conference in Bremen (28th-30th Sept. 1994). – Böhle Welding special addition, 1994. – 11 p.
8. DIN EN ISO 15614-1. Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen. Deutsche Fassung prEN ISO 15614-1:20013.
9. DIN CEN ISO/TR 15608. Schweißen – Richtlinien für eine Gruppeneinteilung von metallischen Werkstoffen. Deutsche Fassung CEN ISO/TR 15608:2013.
10. Мохила П. Влияние послесварочной термической обработки на механические свойства сварных соединений стали P92, выполненных дуговой сваркой под флюсом / П. Мохила, К. Фолдынова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 4. – С. 36–39.
11. BS EN 1021602:2002. Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions. Part 2: Non-alloy steel tubes with specified elevated temperature properties. CEN 2007.

Поступила в редакцию 29.02.2016