

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА СВАРКИ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ МЕТАЛЛА ЗТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В. Д. ПОЗНЯКОВ, Л. И. МАРКАШОВА, С. Л. ЖДАНОВ, Е. Н. БЕРДНИКОВА,
А. В. ЗАВДОВЕЕВ, А. А. МАКСИМЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Одним из важных показателей механических свойств, которые наряду с другими факторами определяют качество и работоспособность сварных соединений, является ударная вязкость. Ударная вязкость характеризует способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под воздействием ударной нагрузки. В данной статье проведена сравнительная оценка влияния сварки на ударную вязкость металла ЗТВ образцов, изготовленных из валиковых проб, и модельных, обработанных по термическому циклу сварки, из стали 10Г2ФБ. Определено, что влияние термических циклов сварки на показатели ударной вязкости металла ЗТВ сварных соединений стали 10Г2ФБ неоднозначно. Резкое снижение значений KCU и KCV наблюдается при скоростях охлаждения $w_{6/5} < 6$ °C/с. С повышением скорости охлаждения ударная вязкость металла ЗТВ увеличивается и в некоторых случаях достигает значений KCU и KCV основного металла. При этом установлена хорошая корреляция значений ударной вязкости между образцами, обработанными по термическому циклу сварки, и образцами, изготовленными из сварных соединений. Отмечено незначительное отличие их характера разрушения. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: низколегированная сталь, ударная вязкость, термический цикл сварки, валиковая проба, зона термического влияния, структура, поверхность излома

Одним из важных показателей механических свойств, которые наряду с другими факторами определяют качество и работоспособность сварных соединений, является ударная вязкость. Ударная вязкость характеризует способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под воздействием ударной нагрузки [1].

Поскольку различные участки сварных соединений (металл шва, зона термического влияния) могут отличаться по химическому составу, структуре, а соответственно и свойствам, то ударная вязкость определяется отдельно для каждого из указанных участков. Отбор проб, изготовление и испытание образцов на ударный изгиб осуществляется по ГОСТ 6996–66. В зависимости от цели испытаний надрез располагают по металлу шва, по зоне сплавления и в различных участках околошовной зоны на определенном расстоянии от линии сплавления. Надрез может быть V-образным или U-образным. В соответствии с этим ударная вязкость имеет индекс KCV или KCU . Чаще всего такой подход к испытанию сварных соединений на ударный изгиб используется при аттестации технологических процессов сварки и сварщиков, а также на завершающем этапе проверки разработанных технологий сварки.

При проведении научно-исследовательских и экспериментальных работ по изучению влияния сварки на основной металл, включая оценку этого влияния на ударную вязкость металла зоны термического влияния (ЗТВ), используются несколько другие методы.

Один из них — «Метод валиковой пробы для определения допустимых режимов дуговой сварки и наплавки» (ГОСТ 13585–68) применяется для оценки изменения механических свойств основного металла, вызываемых термическим циклом сварки как непосредственно в ЗТВ, примыкающей к зоне сплавления, так и в других участках ЗТВ [2]. Сущность данного метода заключается в наплавке валиков на сплошные или составные пластины исследуемой стали при различной погонной энергии и последующем определении ударной вязкости и прочих свойств ЗТВ. При этом наибольший интерес представляют данные о том, как погонная энергия сварки влияет на ударную вязкость металла на участке полной перекристаллизации ЗТВ. В этом случае надрез на образцах наносят таким образом, чтобы его дно располагалось на оси валика ниже границы сплавления на расстоянии не более 0,5 мм в сторону основного металла. Особенностью указанных образцов является то, что при испытании на ударный изгиб лишь начало разрушения происходит в контролируемой зоне, в то время как его развитие про-

исходит по основному металлу. При этом чем ниже погонная энергия сварки, тем больше основного металла будет вовлечено в разрушение. Исходя из этого, можно предположить, что испытания по методу валиковых проб, по-видимому, должны достаточно хорошо характеризовать способность металла ЗТВ сопротивляться зарождению разрушения. Однако достоверность информации относительно того как такой металл будет сопротивляться развитию разрушению вызывает сомнения. В особенности это касается тех случаев, когда при наплавке валиков на пластину используются относительно небольшие режимы сварки и соответственно ширина ЗТВ будет малой, а также когда показатели ударной вязкости стали существенно превышают ударную вязкость металла ЗТВ.

Влияние сварки на основной металл может оцениваться также с использованием метода, при котором термическое воздействие на металл осуществляется без применения сварки (ГОСТ 23870–79) [3–6]. В этом случае заготовки (брусочки определенных размеров) из исследуемой стали нагреваются и охлаждаются по режиму, сопоставимому с термическим циклом сварки (ТЦС). Для этого заготовки проходящим током нагреваются до заданной температуры, а затем принудительно охлаждаются. В результате такого воздействия на металл в нем формируется приблизительно такая же структура, как и в металле ЗТВ сварных соединений, который испытывал аналогичное термическое воздействие при сварке. Поскольку при имитации ТЦС все сечение посередине заготовок нагревается и охлаждается равномерно, то можно предположить, что и ударная вязкость металла в разных участках этого сечения будет достаточно близкой. Следовательно, по результатам испытания образцов по данному методу может быть получена более достоверная информация относительно способности металла ЗТВ той или иной стали сопротивляться развитию разрушения при ударном изгибе.

Принимая ко вниманию изложенное выше, цель настоящей работы состояла в том, чтобы на примере одной из низколегированных сталей провести сравнительную оценку влияния сварки на ударную вязкость металла ЗТВ образцов, изготовленных из валиковых проб и обработанных по ТЦС заготовок основного металла.

Методики исследований. Для исследований по методу валиковых проб использовали пластины шириной 250...450 мм и длиной 600 мм. Они вырезались таким образом, что направление валика при последующей наплавке совпадало с направлением прокатки. Перед сваркой средняя часть пластин, предназначенная для наплавки валика, очищалась от окалины и продуктов коррозии на общую ширину 80 мм (по 40 мм в каждую от оси наплавки сторону).

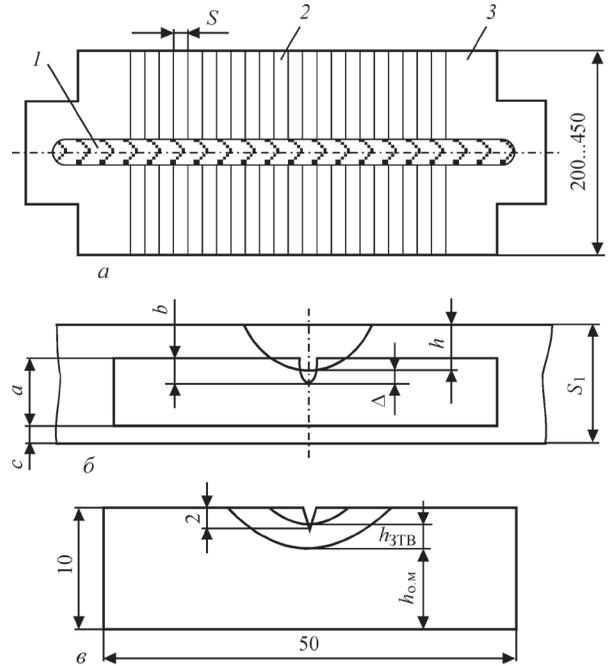


Рис. 1. Валиковая проба с наплавкой (а), схема вырезки образцов для испытаний на ударный изгиб (б) и обозначение участков сварного соединения, которые входят в состав ударного образца (в): 1 — наплавленный валик; 2 — составные бруски; 3 — выводная планка; h — участок с наплавленным металлом; $h_{ЗТВ}$ — участок ЗТВ; $h_{о.м}$ — участок основного металла

Валик наплавлялся вдоль продольной оси симметрии пластины (рис. 1) на режимах, обеспечивающих изменение скорости охлаждения в интервале температур 600...500 °C ($w_{6/5}$) от 3 до 30 °C/c. Такая интенсивность охлаждения металла на участке перегрева ЗТВ характерна для большинства дуговых процессов сварки — автоматической под слоем флюса, механизированной в среде защитных газов, ручной штучными электродами. Параметры режимов сварки и соответствующие скорости охлаждения металла ЗТВ валиковых проб приведены в табл. 1.

Наплавка валика осуществлялась в кондукторе проволокой Св-08ГА диаметром 4 мм под флюсом АН-348 на постоянном токе обратной полярности при температуре в помещении 27 °C. Колебания проволоки не допускалось. После окончания наплавки валика пластину оставляли в кондукторе до полного остывания образца.

Из подготовленных и наплавленных указанным выше способом пластин изготавливали образцы для механических испытаний. Чтобы эти образ-

Таблица 1. Режимы наплавки и скорость охлаждения металла ЗТВ валиковых проб из пластин толщиной 18,7 мм

$I_{св}$, А	U_d , В	$v_{св}$, м/ч	$Q_{св}$, кДж/см	$w_{6/5}$, °C/c
580...600	34...38	12,9	50,6	3
580...600	34...38	20,0	35,7	6
580...600	34...38	23,7	28,6	10
380...400	30...32	20,0	20,4	20
380...400	30...32	23,7	17,0	30

цы соответствовали требованиям, предъявляемым ГОСТ 13585–68, на начальном этапе работ из валиковых проб изготавливали шлифы, по которым определяли параметры валика (ширину валика, усиление валика, глубину проплавления и параметры ЗТВ). Это позволило установить толщину слоя металла, который необходимо было удалить перед изготовлением образцов.

Для исследований с использованием обработанных по термическому циклу сварки заготовок использовали изготовленные из исследуемой стали брусочки размером 13×13×150 мм. Их термообработку проводили на установке МСР-75, разработанной в ИЭС им. Е.О. Патона. Нагрев брусочков осуществлялся проходящим током до температуры 1200...1300 °С (соответствует участку перегрева металла ЗТВ сварных соединений) со скоростью 170...200 °С. При этой температуре они выдерживались в течение приблизительно 2 с, а затем охлаждались. Для обеспечения охлаждения брусочков со скоростью $w_{6/5}$ от 2,5 до 7,5 °С/с медные зажимы установки охлаждали проточной водой. Более интенсивные скорости охлаждения образцов достигались в результате дополнительного обдува образцов инертным газом, что позволяло за счет изменения величины расхода газа изменять $w_{6/5}$ от 8 до 30 °С/с.

Дополнительно ударную вязкость металла ЗТВ оценивали по результатам испытания образцов, изготовленных из стыковых соединений толщиной 18,7 мм с V-образной разделкой кромок (С21 по ГОСТ 5264–80 и 14771–76), выполненных ручной сваркой покрытыми электродами и механизированной сваркой в CO_2 . В этом случае вырезка образцов и нанесение надреза осуществлялось по ГОСТ 6996–66.

Ручную дуговую сварку осуществляли электродами марки АНП-10 диаметром 4 мм на режиме: $I_{св} = 160...170$ А; $U_{д} = 24...25$ В; $v_{св} = 8,5...9,0$ м/ч, который обеспечивал интенсивность охлаждения металла ЗТВ сварного соединения со скоростью $w_{6/5} = 30$ °С/с. Для механизированной сварки использовали порошковую проволоку Megafil 821R диаметром 1,2 мм и следующий режим: $I_{св} = 180...200$ А; $U_{д} = 28...30$ В; $v_{св} = 13,5...15,0$ м/ч. При этом скорость охлаждения на участке металла ЗТВ составляла 21 °С/с. Во всех случаях сварку осуществляли на постоянном токе обратной полярности.

Скорость нагрева – охлаждения образцов контролировалась хромель-алюмелевой термопарой диаметром 0,5 мм, а оценивалась по результатам обработки осциллограмм, запись которых велась на осциллограф 117/1 в координатах температура – время.

Для определения ударной вязкости металла ЗТВ из валиковых проб и обработанных по ТЦС заготовок изготавливались образцы размерами 10×10×55 мм (тип VI с круглым надрезом и тип IX с острым надрезом по ГОСТ 6996–66). Вырезку образцов проводили механическим способом. Для предотвращения нагрева металла образцы охлаждались эмульсией.

Испытание образцов проводили при температурах 20 и –40 °С (не менее трех образцов при каждой температуре). Определяли ударную вязкость в участке полной перекристаллизации металла ЗТВ (KCU_{20} , KCU_{-40} , KCV_{20} , KCV_{-40} , Дж/см²).

Исследования структуры поверхности изломов образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа марки СЭМ-515 фирмы «Philips» (Нидерланды).

Результаты исследований и их обсуждение. В качестве объекта исследований выбрана высокопрочная конструкционная микролегированная ниобием и ванадием сталь марки 10Г2ФБ толщиной 18,7 мм следующего химического состава, мас. %: 0,08 С; 0,25 Si; 1,57 Mn; 0,19 Mo; 0,05 Nb; 0,05 V; 0,032 Al; 0,006 N; 0,007 S; 0,013 P. В состоянии поставки (контролируемая прокатка) сталь имеет следующие механические свойства: $\sigma_T = 531...581$ МПа; $\sigma_B = 610...660$ МПа; $\delta_5 = 24,8...26,3$ %; $\psi = 62,0...64,8$ %, $KCU_{20} = 340...350$ Дж/см²; $KCU_{-40} = 280...320$ Дж/см²; $KCV_{20} = 300...330$ Дж/см²; $KCV_{-40} = 190...210$ Дж/см².

По результатам испытания образцов, изготовленных из валиковых проб, из сварных соединений, а также из термообработанных заготовок исследуемой стали установлено, что под воздействием термических циклов сварки ударная вязкость стали изменяется. По отношению к основному металлу она, как правило, снижается (рис. 2).

Наиболее заметное снижение показателей ударной вязкости металла на участке перегрева ЗТВ наблюдается в том случае, когда наплавка на пластины (при изготовлении валиковых проб) осуществлялась на режимах, обеспечивающих высокую погонную энергию ($Q_{св} = 50,6...35,7$ кДж/см; $w_{6/5} = 3...6$ °С/с), а термообработка заготовок — по термическим циклам, обеспечивающим указанную скорость охлаждения металла в интервале температур 500...600 °С. Следует отметить, что при таких условиях охлаждения показатели ударной вязкости образцов, изготовленных из валиковых проб, и обработанных по термическому циклу сварки заготовок исследуемой стали достаточно близки.

При снижении погонной энергии сварки $w_{6/5}$ увеличивается (табл. 1), а показатели ударной вязкости металла ЗТВ повышаются. Наиболее заметное повышение показателей KCU и KCV (практи-

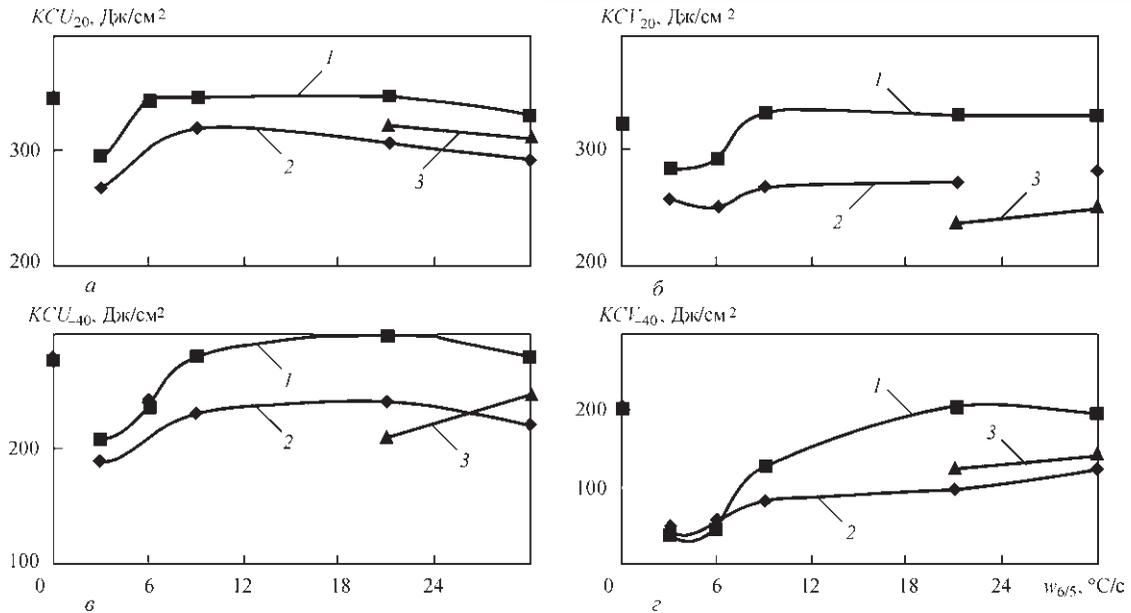


Рис. 2. Влияние скорости охлаждения на ударную вязкость образцов, изготовленных из валиковых проб (1); заготовок, обработанных по ТЦС (2); сварных соединений (3) (в точке $w_{6/5} = 0$ приведены значения показателей ударной вязкости основного металла)

чески до уровня основного металла) наблюдается в том случае, когда исследования проводили с использованием образцов, изготовленных из валиковых проб, наплавка которых осуществлялась на режимах, обеспечивающих $Q_{св} \leq 28,6$ кДж/см ($w_{6/5} \geq 10$ °C/c). При этих же условиях охлаждения ударная вязкость термообработанных по ТЦС образцов также повышается, однако во всех случаях она ниже, чем у образцов, изготовленных из основного металла и валиковых проб.

Как указывается в работе [7], изменение показателей ударной вязкости стали 10Г2ФБ в результате воздействия на нее термических циклов сварки связано с изменением фазово-структурного состава металла ЗТВ, а именно, с образованием в нем крупнозернистой ферритно-бейнитной структуры при $w_{6/5} \leq 10$ °C/c и мелкозернистой бейнитной структуры при $w_{6/5} \geq 10$ °C/c.

Чтобы объяснить отличия между показателями ударной вязкости образцов, изготовленных из валиковых проб, и обработанных по ТЦС брусочков, следует рассмотреть какие участки сварного соединения входят в состав ударных образцов и их соотношение в зоне разрушения.

Что касается образцов, изготовленных из обработанных по ТЦС брусочков, можно отметить следующее. Поскольку в процессе термообработки средняя часть образца, на которую впоследствии наносили надрез, нагревалась и охлаждалась равномерно, то в ней сформировалась однородная по составу структура. Соответственно в этом случае разрушение образца происходило по металлу, который имеет приблизительно одинаковые механические свойства. Как показано схематически на рис. 1, ударный образец, изготовленный из валиковых проб, частично состоит из слоя наплавленного металла, ЗТВ и основного металла. Наплавленный металл в разрушении образца участия не принимает, поскольку в нем расположен надрез. Поскольку ударные нагрузки приходятся на ЗТВ и основной металл, то именно по этим участкам и происходит разрушение образца.

Рассмотрим, как изменяется соотношение между шириной участка, соответствующего ЗТВ ($h_{ЗТВ}$) и основного металла ($h_{о.м.}$) в зависимости от погонной энергии сварки. Такие данные приведены на рис. 3. Они свидетельствуют о том, что в зоне разрушения ударных образцов, изготовленных из валиковых проб, наплавка которых осу-

Т а б л и ц а 2. Характер разрушения и размеры элементов микрорельефа поверхностей изломов в зоне развития магистральной трещины

Характер разрушения		Сварное соединение	Имитация ТЦС	Валиковая проба	Основной металл
Вязкое	$V_{д^*}$, %	5...7	5	100	95
	$d_{я^2}$, МКМ	1...3	1...3	1...10	1...10
	$D_{я^3}$, МКМ	-	-	20...70×70...250 (ср.45×160)	10...70×20...150 (ср.40×85)
Хрупкое внутризеренное	$V_{д^*}$, %	95	95	-	5
	$d_{ф^2}$, МКМ	10...20	20...60	-	10...25
Вторичные микротрещины	$l_{тр^2}$, МКМ	5...10	5...30	-	-

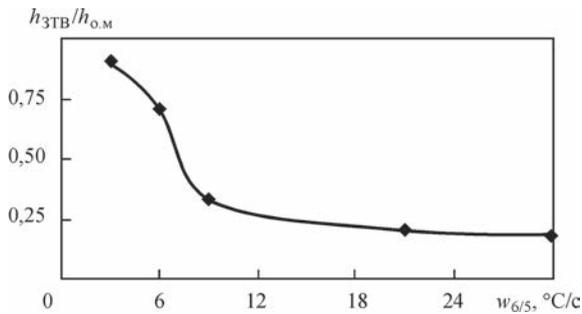


Рис. 3. Влияние скорости охлаждения валиковых проб на соотношение между шириной участков металла ЗТВ ($h_{\text{ЗТВ}}$) и основного металла ($h_{\text{о.м.}}$), принимающих участие в разрушении ударных образцов

существовала с использованием большой погонной энергии, соотношение между $h_{\text{ЗТВ}}$ и $h_{\text{о.м.}}$ составляет 0,9. Следовательно, в данном случае разрушение образца будет преимущественно происходить по металлу ЗТВ, как и в образцах, обработанных по термическому циклу сварки. Поэтому вполне закономерно, что и показатели ударной вязкости образцов, изготовленных из валиковых проб, и термообработанных заготовок, практически совпадают.

По мере снижения погонной энергии сварки (увеличения $w_{6/5}$), ширина ЗТВ уменьшается. В этой связи уменьшается и соотношение $h_{\text{ЗТВ}}/h_{\text{о.м.}}$. При

$Q_{\text{св}} \leq 28,6$ кДж/см ($w_{6/5} \geq 10$ °C/c) доля участия в разрушении образцов ЗТВ снижается практически до 25 %. Соответственно основное разрушение ударных образцов происходило по основному металлу. Этим, по-видимому, и можно объяснить тот факт, что показатели ударной вязкости образцов, изготовленных из валиковых проб, сварка которых осуществлялась на пониженных режимах, сопоставимы с показателями ударной вязкости основного металла.

Что касается разрушения образцов, изготовленных из сварных соединений, то в них оно происходило преимущественно по металлу ЗТВ. При этом в разрушение были вовлечены все участки ЗТВ, как высокотемпературные, так и низкотемпературные. Поэтому показатели ударной вязкости таких образцов существенно отличались от значений KCU и KCV образцов, изготовленных из валиковых проб и относительно хорошо коррелируют с аналогичными свойствами термообработанных образцов.

Закономерность полученных результатов подтверждена фактографическими исследованиями изломов образцов. Их цель заключалась в сопоставлении характера разрушения (транскристаллитное или интеркристаллитное; хрупкое; квазихрупкое;

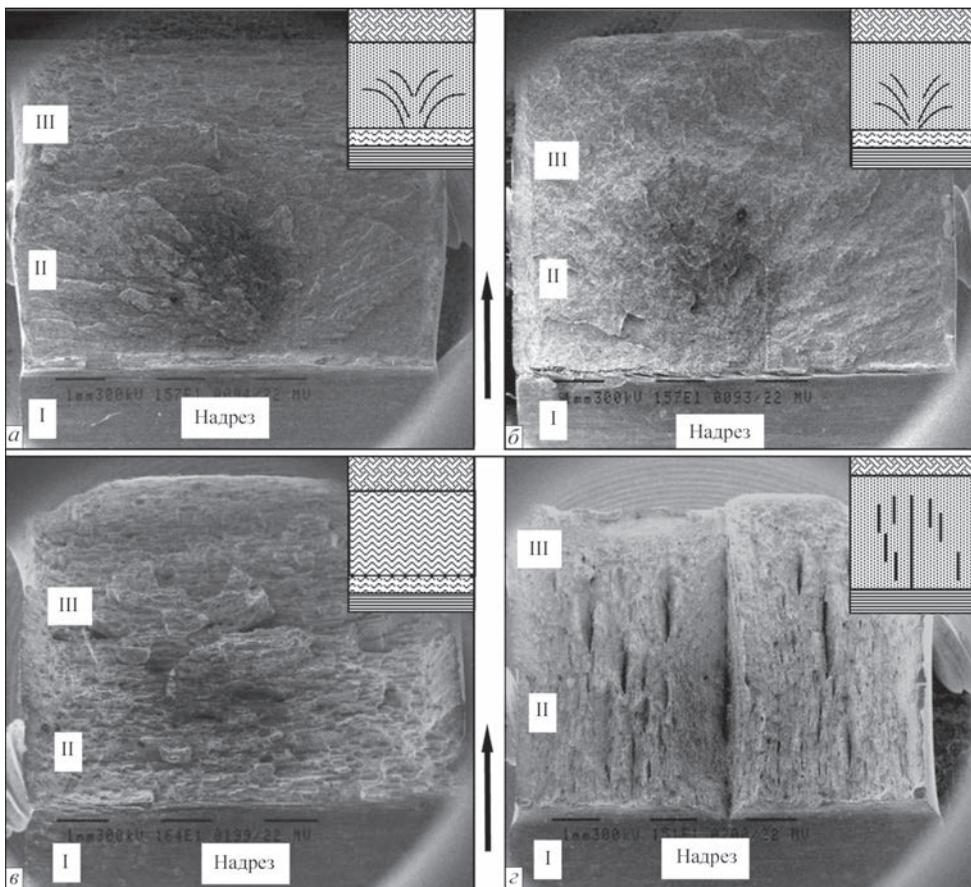


Рис. 4. Общий вид поверхности изломов по зонам разрушения образцов, изготовленных из: сварного соединения (а); обработанных по ТЦС заготовок (б); валиковой пробы (в); основного металла (г), $\times 16$ (в верхней правой части кадров схематическое изображение изломов) (обозначения см. в тексте)

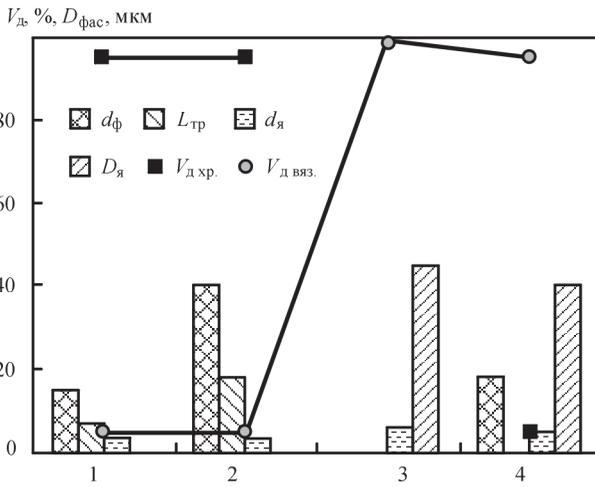


Рис. 5. Изменение объемной доли хрупкого ($V_{д.хр.}$, %) и вязкого ($V_{д.вяз.}$, %) разрушения, размера фасеток ($d_{фас}$, мкм) хрупкого внутризеренного скола и ямок ($d_я$, $D_я$, мкм) вязкого разрушения, длины вторичных трещин ($L_{тр}$, мкм) в изломе образцов, изготовленных из: сварного соединения (1); обработанных по ТЦС заготовок (2); валиковой пробы (3); основного металла (4)

вязкое или смешанное) металла сварных соединений по зонам разрушения (I — зона очага разрушения у надреза; II — магистрального развития трещины; III — зона долома), а также в анализе структуры изломов сварных соединений с учетом параметров элементов микрорельефа поверхности разрушения: размеров фасеток скола $d_{фас}$, ямок вязкой составляющей (дисперсных $d_я$, крупных $D_я$), длины вторичных трещин $l_{тр}$. Общий вид изломов образцов при-

веден на рис. 4. Стрелками обозначено направление разрушения.

Поскольку для зоны I (у надреза) и зоны III (долом) всех исследуемых образцов характерен одинаковый вязкий тип разрушения, в дальнейшем они детально не рассматривались. Более целесообразным представлялось провести сравнительный анализ в зоне магистрального развития трещины (II), где наблюдалось существенное отличие в характере разрушения.

Анализ излома образцов показал, что по макрорельефу поверхности разрушения в зоне II образцов, изготовленных из обработанных по ТЦС заготовок, и из сварных соединений похожи. В обоих случаях радиальные рубцы (рис. 4, а, б), идущие от очага разрушения, совпадают с общим направлением распространения трещины.

Детальные исследования микросообщностей поверхностей разрушения в зоне магистральной трещины показали, что разрушение образцов, изготовленных из сварных соединений, и обработанных по ТЦС заготовок, может характеризоваться как хрупкий внутризеренный скол (табл. 2; рис. 5; рис. 6, а, б) с локальными участками вязкой составляющей (дисперсные ямки размером $d_я = 1...3$ мкм, объемная доля $V_{д.} \sim 5\%$). Такие детали микрорельефа как участки вязкой составляющей свидетельствуют о локальной пластической деформации, т.е. развитие хрупкого скола в сосед-

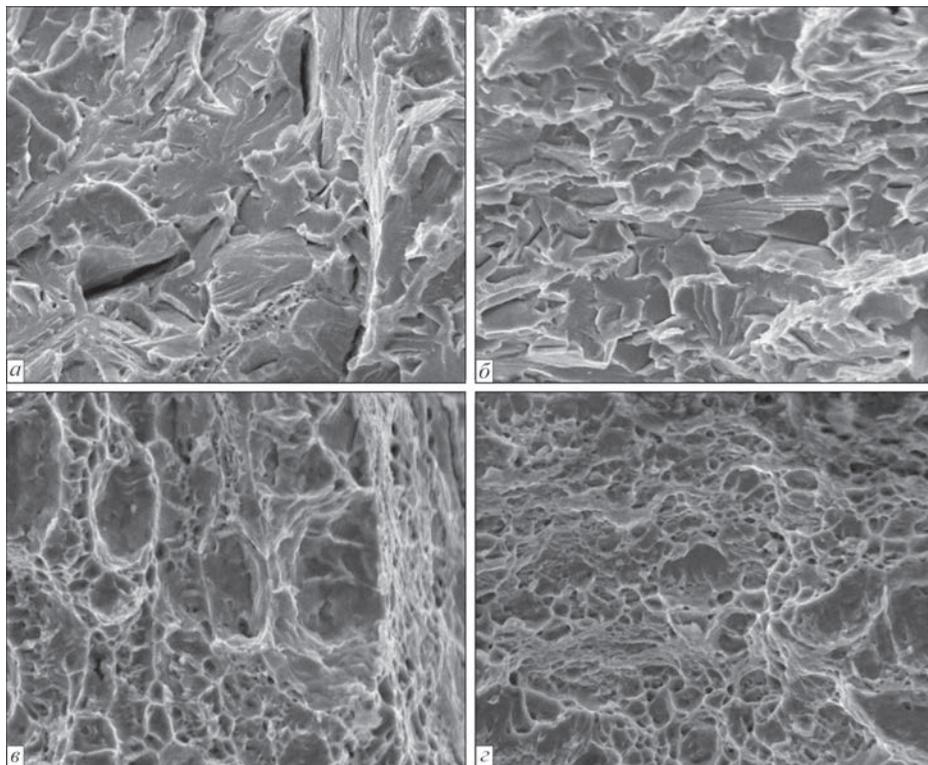


Рис. 6. Характер разрушения в зоне магистральной трещины: а, б — хрупкий транскристаллитный скол в изломах образцов, изготовленных из сварного соединения (а), и обработанных методом ТЦС (б); в, г — вязкое разрушение образца из валиковой пробы (в) и основного металла (г), $\times 1550$

нее зерно может происходить с заметной пластической деформацией в переходной зоне.

Анализ характера разрушения образцов, изготовленных из сварных соединений, показал, что размер фасеток скола на поверхности разрушения составляет $d_{\text{фас}} \sim 10 \dots 20$ мкм, размер единичных вторичных микротрещин $l_{\text{тр}} \sim 5 \dots 10$ мкм (рис. 6, а).

На поверхности излома образцов, изготовленных из обработанных по ТЦС заготовок, также наблюдаются вторичные микротрещины протяженностью 5...10 мкм. Однако фасетки скола в таких образцах в 2...3 раза крупнее, чем в образцах, изготовленных из сварных соединений — достигают размеров примерно 20...60 мкм (рис. 6, б). Объясняется это может тем, что разрушение образцов, изготовленных из обработанных по ТЦС заготовок, происходит по металлу с крупным зерном, который характерен для участка перегрева ЗТВ сварных соединений, а в образцах, изготовленных из сварных соединений, по всем участкам ЗТВ.

Совершенно иначе происходит разрушение образцов, изготовленных из валиковых проб, и основного металла. Анализ изломов этих образцов показал, что в обоих случаях на их поверхности наблюдается вязкий ямочный тип разрушения (рис. 6, в, г). Отличие заключается лишь в том, что волокнистой поверхности излома образцов, изготовленных из валиковых проб, характерны выраженные расщепления по смещенным уровням в поперечном направлении распространения магистральной трещины (рис. 4, в), а излом основного металла имеет волокнисто-полосчатую структуру в продольном направлении (рис. 4, г). По-видимому, это связано с тем, что образцы, изготовленные из валиковых проб, и основного металла, вырезались в разных по отношению к прокату направлениях. То, что характер разрушения таких образцов приблизительно одинаковый, вполне закономерно, поскольку, как было отмечено ранее, и видно из рис. 1 и 3, развитие магистральной трещины в образцах, изготовленных из валиковых проб, сварка которых осуществляется при малых погонных энергиях, происходит главным образом по основному металлу.

Выводы

1. Влияние термических циклов сварки на показатели ударной вязкости металла ЗТВ сварных соединений стали 10Г2ФБ неоднозначно. Резкое снижение значений KCU и KCV наблюдается при скоростях охлаждения $w_{6/5} < 6$ °С/с. С повышением скорости охлаждения ударная вязкость металла ЗТВ увеличивается и в некоторых случаях достигает значений KCU и KCV основного металла.

2. При снижении погонной энергии сварки скорость охлаждения $w_{6/5}$ металла ЗТВ валиковых проб увеличивается, а ширина этого участка в соединении уменьшается.

3. При малых скоростях охлаждения металла ЗТВ ($w_{6/5} < 6$ °С/с), характерных для процессов сварки, выполняемых на повышенной погонной энергии ($Q_{\text{св}} > 35$ кДж/см), разрушение образцов происходит преимущественно по металлу ЗТВ, а показатели KCU и KCV образцов, изготовленных из валиковых проб, и обработанных по термическому циклу сварки заготовок, отличаются незначительно.

4. С увеличением $w_{6/5}$ до 10 °С/с и выше ($Q_{\text{св}} < 30$ кДж/см), разрушение образцов, изготовленных из валиковых проб, происходит главным образом по основному металлу. За счет этого разница между показателями ударной вязкости образцов, изготовленных из валиковых проб, и обработанных по термическому циклу сварки заготовок, становится заметной.

5. Выявлена хорошая корреляция значений ударной вязкости между образцами, изготовленными из сварных соединений, и обработанных по термическому циклу сварки заготовок. Характер разрушения таких образцов отличается незначительно.

1. Металловедение и термическая обработка стали: справ. изд. в 3-х т.; под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. – 4-е изд., перераб. и доп. Т.1. Методы испытаний и исследования: В 2-х кн. Кн.2. – М.: Металлургия, 1991. – 462 с.
2. Емелюшин А. Н. Исследование свариваемости высокопрочной трубной стали класса прочности К56 / А. Н. Емелюшин, А. Б. Сычков, М. А. Шекшеев // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – Вып. № 3. – С. 26–30.
3. Методика и оборудование для имитации термического цикла сварки (наплавки) / С. В. Гулаков, Б. И. Носовский, А. С. Новохацкая [и др.] // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту. – 2008. – Вып. 18, Ч. 1. – С. 179–183.
4. Свариваемость высокопрочных трубных сталей для газопроводных труб большого диаметра / В. И. Столяров, Л. А. Ефименко, О. Ю. Елагина [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2008. – № 3. – С. 39–47.
5. Comparison of Weldability of High-Strength Pipe Steels Microalloyed with Niobium, Niobium and Vanadium / A. V. Nazarov, E. V. Yakushev, I. P. Shabalov [et al.] // Metallurgist. – 2014. – Vol. 57, Is. 9. – P. 911–917.
6. Оценка влияния технологических и эксплуатационных параметров на долговечность и безопасность монтажных сварных соединений запорной арматуры / Л. А. Ефименко, О. Ю. Елагина, Е. М. Вышемирский [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 2. – С. 42–45.
7. Влияние циклического нагружения на микроструктуру и хладостойкость металла ЗТВ стали 10Г2ФБ / В. Д. Позняков, Л. И. Маркашова, А. А. Максименко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2014. – № 5. – С. 3–11.

Поступила в редакцию 01.04.2016