

ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ПРОКОВКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

© 2019

Е.А. Кузьмина, аспирант

Оренбургский государственный университет, Оренбург (Россия)

Е.Ю. Приймак, кандидат технических наук,

заведующий лабораторией металловедения и термической обработки,

доцент кафедры материаловедения и технологии материалов

ОАО «Завод бурового оборудования», Оренбург (Россия)

Оренбургский государственный университет, Оренбург (Россия)

Ключевые слова: ротационная сварка трением (РСТ); сила проковки; зона термомеханического влияния (ЗТМВ); микроструктура; микротвердость; механические свойства; 32Г2; 40ХН.

Аннотация: Возросший интерес к процессу сварки трением связан с широким распространением данной технологии на предприятиях машиностроения ввиду технологических преимуществ данного способа и высокого качества получаемых сварных соединений из одноименных и разноименных металлов и сплавов. Ротационная сварка трением (РСТ) является одной из разновидностей сварки, использующих нагрев трением, и применяется для деталей, имеющих форму цилиндра или труб. Основными технологическими параметрами процесса РСТ являются усилие при разогреве, усилие проковки, частота вращения при разогреве, длина оплавления. Все параметры связаны между собой и оказывают влияние на процесс формирования и свойства сварного соединения.

В работе исследуется влияние усилия проковки на микротвердость, свойства при растяжении и микроструктуру сварных соединений из сталей 32Г2 и 40ХН. Проанализированы фазовые превращения, происходящие в свариваемых материалах в результате термомеханического воздействия. Показано изменение протяженности зоны термомеханического влияния (ЗТМВ) в зависимости от усилия проковки. Получены результаты распределения микротвердости по сварному шву, иллюстрирующие образование упрочненных и разупрочненных участков. Приведены результаты испытаний сварных соединений на растяжение и ударную вязкость. Показаны морфологические особенности разрушения сварного стыка после испытаний на ударный изгиб.

Установлено, что сила проковки влияет на микроструктурные характеристики, протяженность зоны термомеханического влияния привариваемых материалов, механические свойства и фрактографические особенности сварного стыка при испытании на ударный изгиб. Даны рекомендации по определению оптимальных значений силы проковки.

ВВЕДЕНИЕ

Сварка трением является одной из наиболее прогрессивных технологий получения неразъемных соединений металлов и находит все более широкое применение в различных производствах. К настоящему моменту реализовано более 20 технологических решений процесса сварки, использующих нагрев трением. Наиболее распространенными из таких решений являются сварка трением с перемешиванием [1–3], линейная сварка трением [4–6], ротационная сварка трением (РСТ) [7; 8].

В отечественной научной литературе основные исследования процесса РСТ, направленные на внедрение ее в промышленное производство, относятся к 60–70-м гг. XX в. и изложены в работах [8; 9]. В них представлен накопленный эмпирический опыт по промышленному применению, оборудованию и режимам сварки, которые преимущественно подбирались, исходя из результатов определения механических свойств сварных соединений или средств неразрушающего контроля. К сожалению, более современных отечественных исследований получаемых подобным образом сварных соединений в научных публикациях не представлено. Однако применение данной технологии на передовых отечественных машиностроительных предприятиях, в том числе для производства геологоразведочных и нефтяных буровых труб из среднеуглеродистых сталей [10], указывает на потребность в более глубоком понимании процесса ротационной сварки.

В зарубежной научной литературе опубликованы данные по исследованию сварных соединений, выполненных способом ротационной сварки трением, из различных материалов. В работах [12–14] исследованы механические свойства и структура фрикционных сварных швов из быстрорежущих, среднеуглеродистых и нержавеющей сталей. В работе [15] изучали влияние скорости вращения и давления проковки на механические свойства и структуру поверхности раздела сварного шва нержавеющей стали AISI 304L со среднеуглеродистой легированной сталью AISI 4340. Авторы [16] сосредоточили свое внимание на анализе влияния параметров процесса на твердость сварных соединений из высокоуглеродистой стали. В работах [17; 18] предпринята попытка построить статистическую модель влияния содержания углерода в стали, скорости вращения и давления проковки на механические свойства получаемых сварных соединений. Несмотря на это, публикаций, отражающих влияние технологических режимов ротационной сварки на структуру и свойства сварных соединений из среднеуглеродистых сталей, в научной литературе не представлено.

Процесс сварки трением осуществляется в несколько стадий. Свариваемые заготовки устанавливаются в стационарный зажим (рис. 1 а), одной из них сообщается вращательное движение, заготовки сближаются, и осуществляется притирка приконтактных поверхностей (рис. 1 б). Далее прикладывается усилие трения, при котором заготовки нагреваются до температуры,

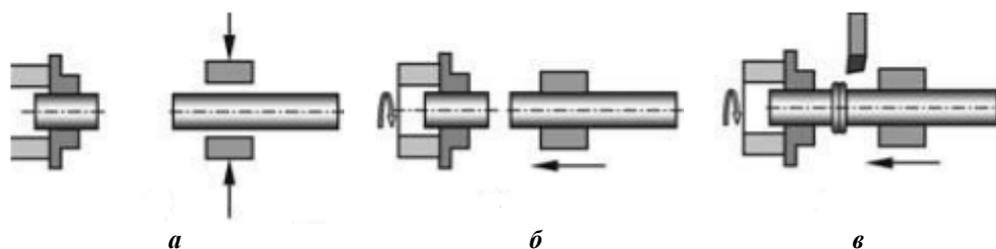


Рис. 1. Стадии процесса РСТ

а – установка заготовок в стационарный зажим;
б – притирка приконтактных поверхностей заготовок; *в* – нагрев заготовок

необходимой для образования сварного соединения (рис. 1 в). После этого вращение быстро прекращают, и к заготовкам прикладывают осевую силу проковки. Затем осуществляется точение сварочного грата, который представляет собой избыточный металл, выдвинутый при сварке. Прочность образующегося соединения определяется свойствами металла соединяемых заготовок, степенью пластического деформирования их концов при нагреве и режимом проковки.

Цель исследования – установление влияния усилия проковки на особенности формирования структуры и свойств сварных соединений среднеуглеродистых сталей 32Г2 и 40ХН.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав привариваемых материалов представлен в таблице 1. Обе стали предварительно были

подвергнуты объемной термической обработке по режиму закалки и высокого отпуска с получением уровня механических свойств, указанных в таблице 2.

Сварка трением трубных заготовок диаметром 63,5 мм и толщиной стенки 4,5 мм из исследуемых сталей с целью изготовления экспериментальных образцов осуществлялась на автоматизированной машине для сварки трением “Thompson-60” по режимам, представленным в таблице 3.

Из сварных соединений изготавливались продольные образцы для металлографического анализа. Исследование структуры проводили с использованием оптического микроскопа Nikon ECLEPSEMA 10. Твердость измеряли на приборе HVS-1000 при нагрузке 2 Н [18]. Испытания на ударный изгиб осуществляли на маятниковом копре “WANCE PIT 452 C2” на образцах 4×10×55 с V-образным надрезом согласно ГОСТ 9454-78, надрез

Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей (в % по масс.)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mo	Ni	Cu
32Г2	0,32	0,17	1,48	0,07	0,003	0,007	0,02	0,11	0,13
40ХН	0,35	0,25	0,56	0,53	0,006	0,005	0,01	1,05	0,19

Таблица 2. Механические свойства исследуемых сталей в состоянии перед сваркой

Марка стали	HRC	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
32Г2	25,3–27,1	769–814	829–954	13,4–15,8
40ХН	27,1–30,2	788–816	948–962	13,1–14,5

Таблица 3. Режимы сварки

№ режима	Сила разогрева F_1 , кН	Время разогрева* τ , с	Осадка нагрева l_n , мм	Сила проковки F_2 , кН	Суммарная величина осадки l , мм	Частота вращения при разогреве n , об/мин.
1	50	5–6	8 мм	70	8,9	800
2				100	9,9	
3				130	11,4	
4				160	13,8	

*время разогрева фиксировалось автоматически и считывалось с компьютерного интерфейса машины

наносился непосредственно в стыке сварного соединения в радиальном направлении [19]. Испытания на статическое растяжение осуществляли на разрывной машине Р-50 в соответствии с ГОСТ 6996-66 на образцах с шириной рабочей части 20 мм и начальной расчетной длиной 50 мм [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена типичная макро- и микроструктура поперечного сечения сварного соединения исследуемых сталей.

В зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) можно выделить три характерных участка:

– участок воздействия деформаций и температур, превышающих критическую точку A_{C3} (зона 1);

– участок воздействия деформаций и температур в интервале от A_{C1} до A_{C3} (зона 2);

– участок рекристаллизации, где температура была близка к A_{C1} (зона 3).

На рис. 3 и рис. 4 представлены фотографии микроструктур, позволяющие детально рассмотреть структурные составляющие каждой из зон. В областях, примыкающих к сварному стыку зоны 1, можно наблюдать образование преимущественно бейнитной структуры со стороны стали 32Г2 (рис. 3 а) и игольчатой мартенситной структуры с участками нижнего бейнита со стороны стали 40ХН (рис. 4 а). Образование закалочных структур в ЗТМВ обеих сталей связано с их локальным разогревом до температур выше температуры их полиморфного превращения и дальнейшим ускоренным охлаждением за счет реализации

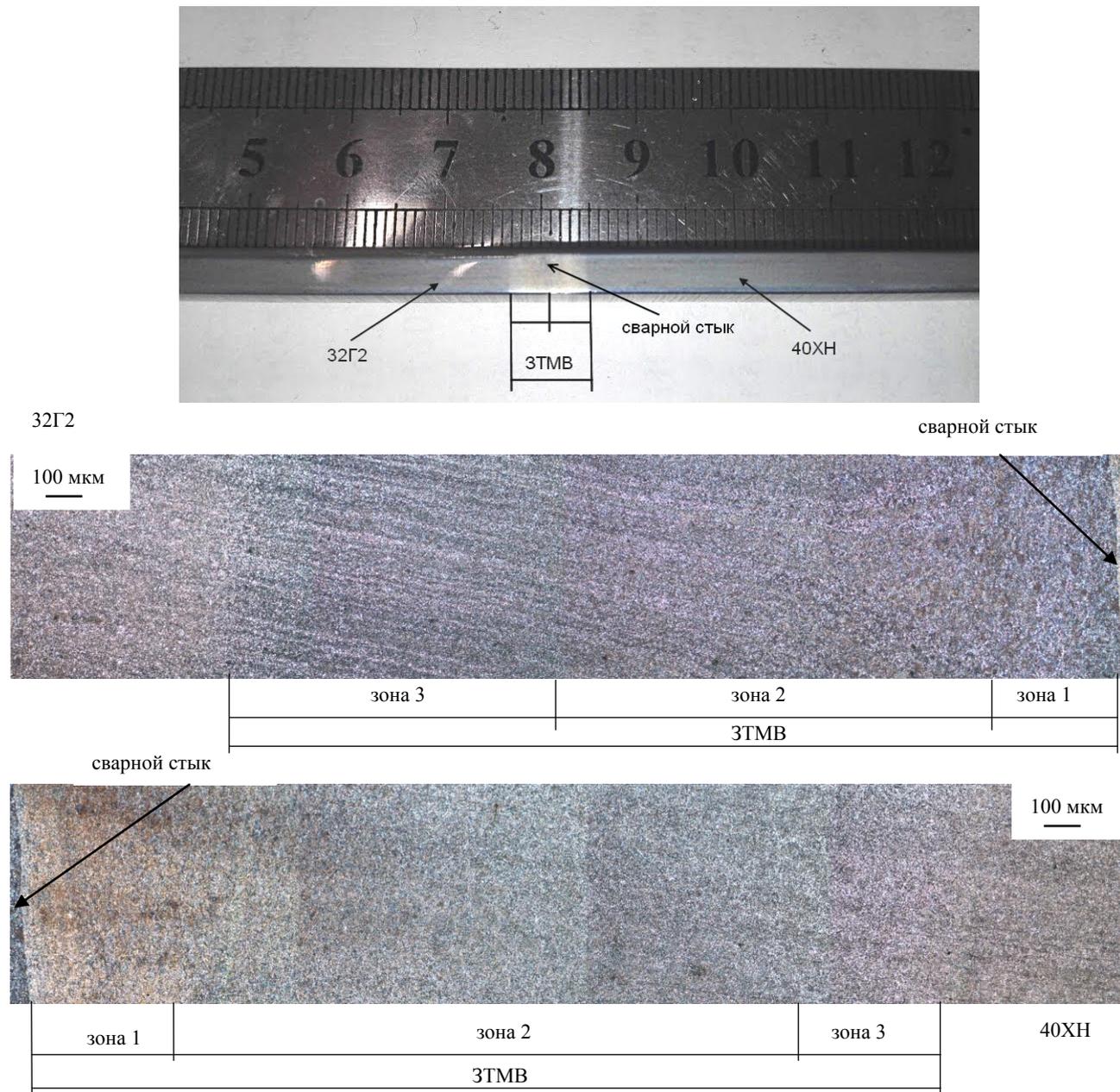


Рис. 2. Типичная макро- и микроструктура сварного соединения, полученного ротационной сваркой трением ($F_1=50кН$, $F_2=160 кН$)

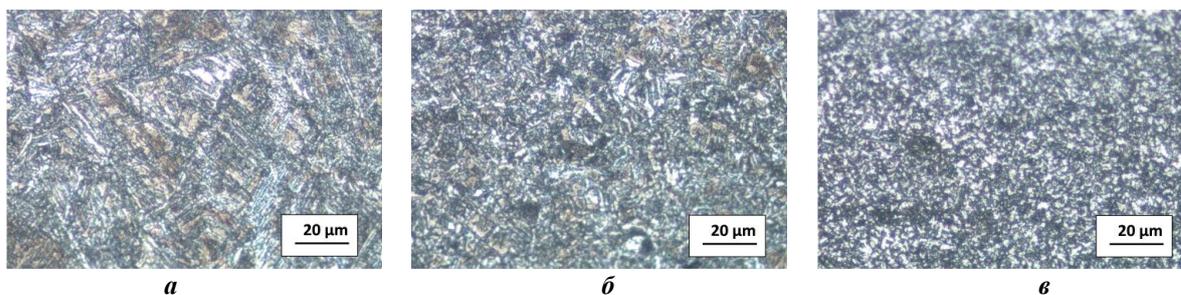


Рис. 3. Типичная микроструктура ЗТМВ стали 32Г2 ($F_1=50$ кН, $F_2=100$ кН):
а – зона 1; б – зона 2; в – зона 3

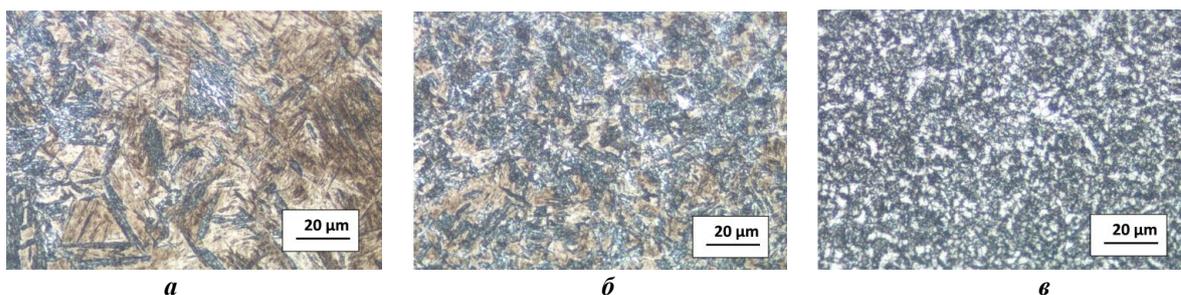


Рис. 4. Типичная микроструктура ЗТМВ стали 40ХН ($F_1=50$ кН, $F_2=100$ кН):
а – зона 1; б – зона 2; в – зона 3

быстрого теплообмена между узкой, нагретой в процессе трения зоной и прилегающими областями металла с комнатной температурой. Таким образом, фазовые превращения в данной зоне происходили в твердом состоянии. Следует отметить, что в ЗТМВ распределение зерна по размеру и геометрии имеет сложный характер: наряду с крупными зёрнами образуются и более мелкие. Деформация материала ориентирована параллельно сварному стыку.

При удалении от сварного стыка микроструктура претерпевает изменения. В зоне 2 обеих сталей она представляет собой слоистое строение и состоит из чередующихся полос закалочной структуры и мелкодисперсной феррито-цементитной смеси, плавно меняющих направление от параллельного сварному стыку к перпендикулярному ему (рис. 3 б, рис. 4 б). Также можно отметить, что размер зёрен здесь значительно меньше, чем в зоне 1.

Зона 3 (рис. 3 в, рис. 4 в) характеризуется образованием равноосных мелких зёрен феррита и перлита, что свидетельствует об интенсивном развитии рекристаллизационных процессов. Микроструктура мелкая, равномерная.

Исследования показали, что сила проковки оказывает влияние на протяженность зоны термомеханического влияния со стороны привариваемых материалов (таблица 4).

Из таблицы 3 видно, что изменение силы проковки в диапазоне от 70 до 160 кН приводит к сокращению ЗТМВ от 4,5 до 2,5 мм в стали 32Г2 и от 4,5 до 2,7 мм в стали 40ХН, т. е. при увеличении силы проковки в грат выдавливается большая часть разогретого материала, что и приводит к сокращению протяженности ЗТМВ. Рассмотрим, как при этом изменяется структура в областях, примыкающих к линии контакта (рис. 5).

Данные металлографических исследований показывают, что зона соединения представляет собой ориентированную в плоскости контакта границу. В некоторых участках линии контакта видно образование общих зёрен. Это позволяет считать, что при ротационной сварке взаимодействие в зоне соединения на некоторых участках не ограничивается образованием межатомных связей, а происходит взаимная объемная рекристаллизация.

При наименьшем значении силы проковки $F_2=70$ кН вблизи линии контакта характерно образование грубоигольчатой структуры в обеих сталях (рис. 5 а). В стали 40ХН образовалась микроструктура мартенсита с локализованными участками нижнего бейнита. Размер образующихся игл мартенсита находится в диапазоне от 10 до 60 мкм. Со стороны стали 32Г2 структура соответствует верхнему бейниту и представляет собой

Таблица 4. Протяженность зоны термомеханического влияния при изменении параметра давления проковки при сварке сталей 32Г2 и 40ХН

F_2 , кН	70		100		130		160	
Материал	32Г2	40ХН	32Г2	40ХН	32Г2	40ХН	32Г2	40ХН
Общая протяженность ЗТМВ, мм	4,5	4,5	3,9	4,15	3,2	3,3	2,5	2,7

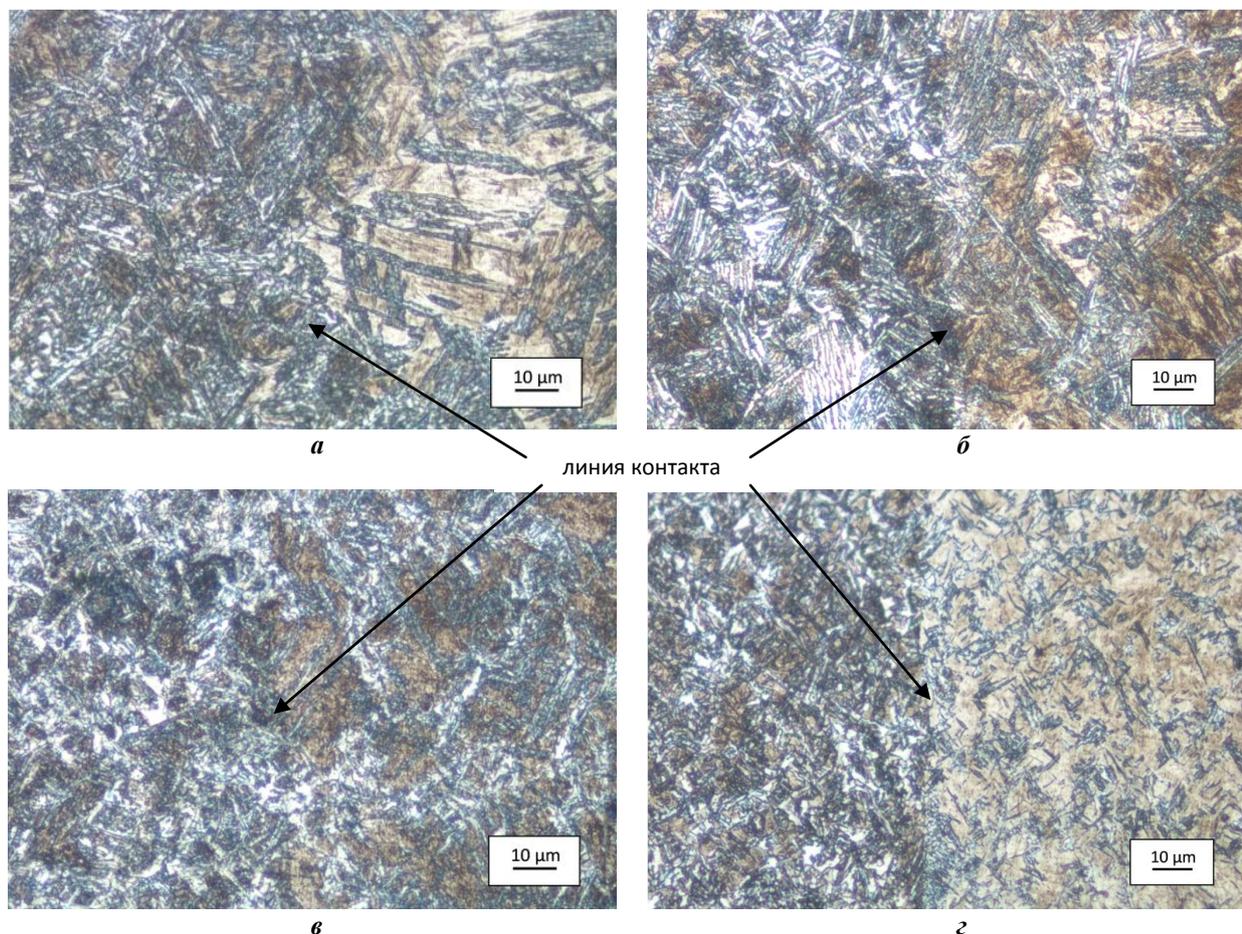


Рис. 5. Микроструктура сварного стыка сталей 32Г2-40ХН при различных значениях усилия проковки:
а – $F_2=70$ кН; **б** – $F_2=100$ кН; **в** – $F_2=130$ кН; **г** – $F_2=160$ кН

иглообразные пластины феррита размером от 10 до 35 мкм с цементитными выделениями удлиненной формы.

Увеличение силы проковки приводит к уменьшению размеров зерен в приконтактной поверхности привариваемых материалов, так как в этом случае в контакт вступают слои металла, разогретые в процессе трения до меньших температур (рис. 5 б, 5 в, 5 г). В связи с этим в зоне схватывания оказываются слои металла с меньшим размером зерна. Так, при усилнии проковки $F_2=160$ кН размер зерна в стали 40ХН находится в диапазоне от 7 до 15 мкм, а в стали 32Г2 – от 5 до 10 мкм (рис. 5 г).

Рассмотрим характер изменения микротвердости по протяженности ЗТМВ (рис. 6) с изменением силы проковки.

Полученные результаты свидетельствуют, что характер изменения микротвердости по протяженности ЗТМВ соответствует структурным изменениям, вызванным термодформационным влиянием сварочного процесса. Видно, что в процессе сварки в ЗТМВ произошло образование как упрочненных, так и разупрочненных участков по отношению к основному металлу привариваемых материалов. Наличие мартенситной фазы со стороны стали 40ХН объясняет высокую твердость в зоне 1, близлежащей к линии контакта. При удалении от линии контакта значения микротвердости плавно

снижаются, достигая минимума в зоне развития рекристаллизации. Характер изменения твердости со стороны стали 32Г2 аналогичен, однако уровень значений во всех зонах несколько ниже, чем у стали 40ХН.

Образование физического контакта и прочности связей между свариваемыми материалами проследим на основе исследования поверхности разрушения сварных соединений после испытаний на ударный изгиб при нанесении концентратора напряжений непосредственно в стыке (рис. 7), а также механических испытаний сварных соединений на разрыв с фиксированием нагрузки и места разрушения образцов относительно линии контакта (таблица 5).

Анализ полученных фрактограмм показывает, что в тех участках, где произошло схватывание приконтактных поверхностей с образованием металлических связей, поверхность разрушения образована фасетками транскристаллитного скола и квазискола и микротрещинами, распространяющимися вглубь. Размер фасеток зависит от размера зерна закалочных структур, образованных в приконтактной зоне. Помимо этого, при более низких значениях усилия проковки от 70 до 100 кН в изломе отмечается наличие участков «несхватывания», имеющих микрорельеф относительно крупных ямок, на дне которых в ряде случаев залегают частицы окислов, образовавшихся при окислении разогретого металла на воздухе и не удалившихся в грат на этапе проковки (рис. 7 а, 7 б).

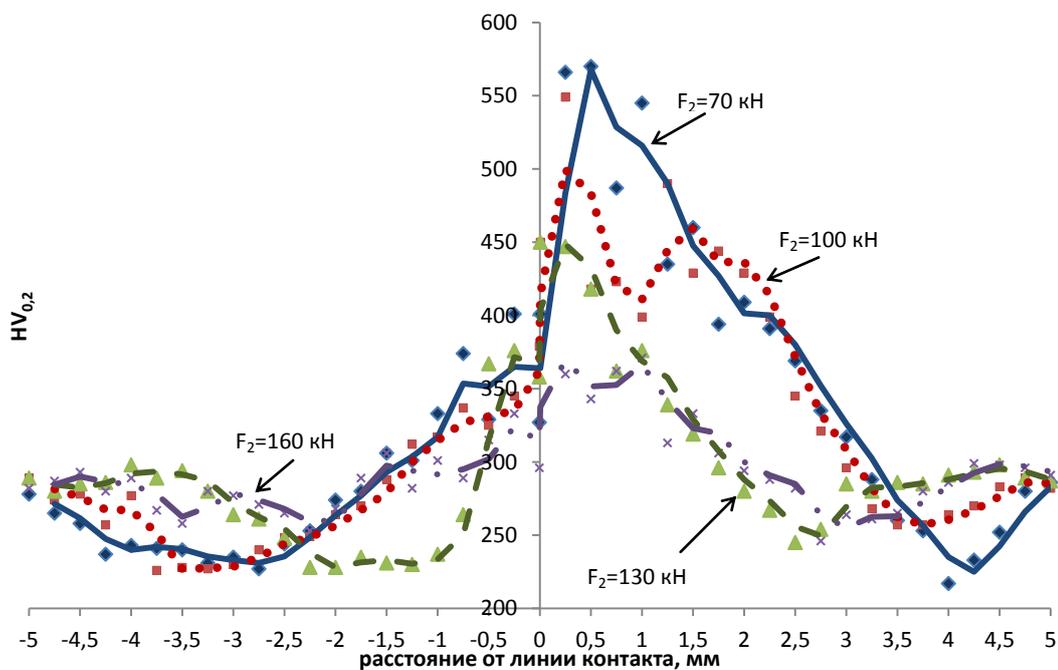


Рис. 6. Изменение микротвердости по протяженности ЗТМВ сварного соединения сталей 32Г2-40ХН при различных значениях силы проковки

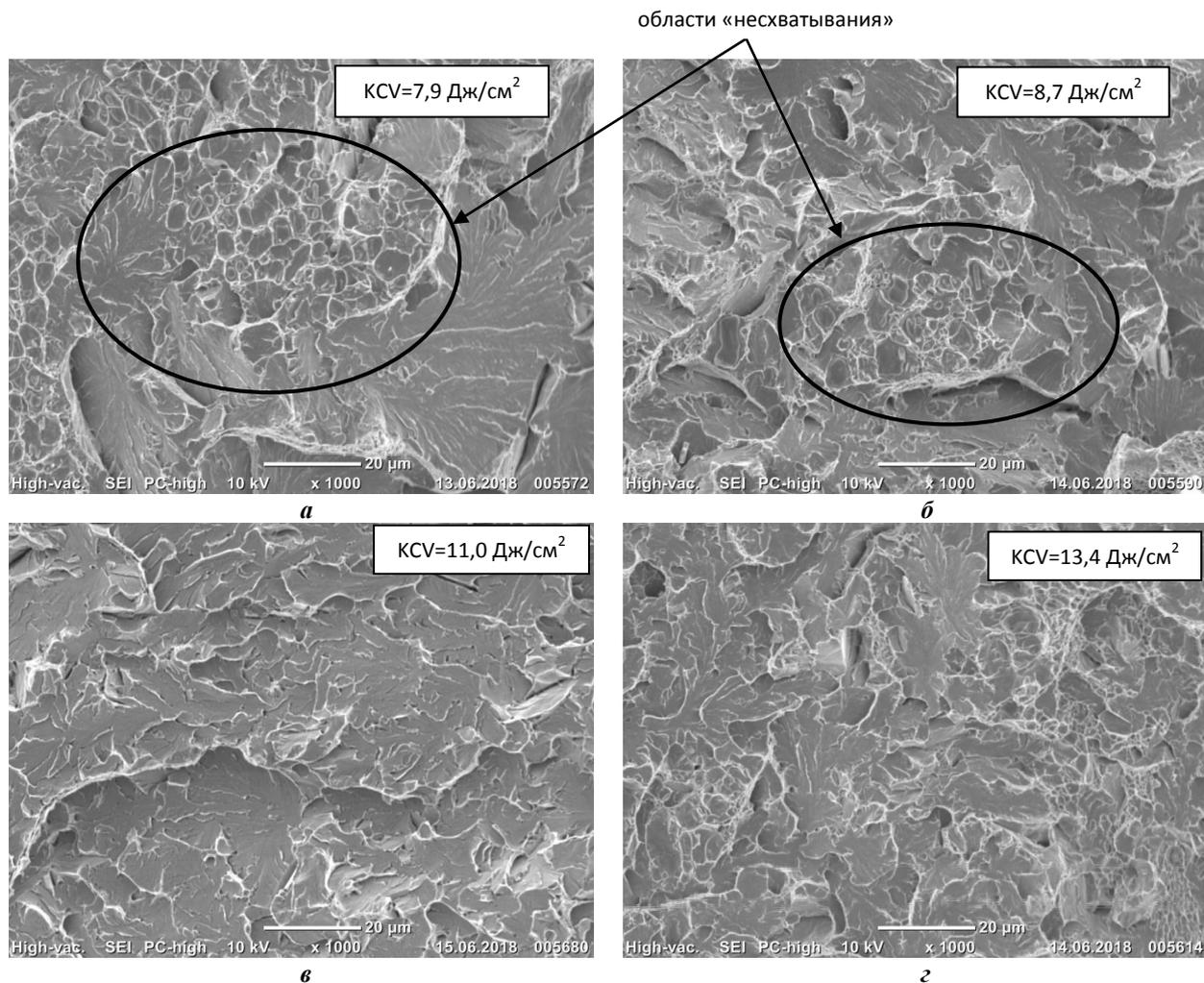


Рис. 7 Фрактограммы сварных соединений после испытаний на ударный изгиб при нанесении концентратора напряжений в стыке:

а – $F_2=70$ кН; б – $F_2=100$ кН; в – $F_2=130$ кН; г – $F_2=160$ кН

Таблица 5. Механические свойства сварного соединения сталей 32Г2-40ХН, полученные при испытании на разрыв

Режим сварки		Условный предел текучести σ_{02} , МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное сужение Ψ , %	Место разрушения при разрыве
№	F_2 , кН				
1	70	742	817	53	обрыв со стороны стали 32Г2 на расстоянии 9 мм от линии контакта
2	100	786	834	48	обрыв со стороны стали 32Г2 на расстоянии 7 мм от линии контакта
3	130	807	854	32	обрыв со стороны стали 32Г2 на расстоянии 5 мм от линии контакта
4	160	808	867	23	обрыв со стороны стали 32Г2 на расстоянии 2 мм от линии контакта

При приложении силы проковки в размере 130 кН доля микропластической деформации при разрушении несколько возрастает ввиду того, что поверхность разрушения инициирована преимущественно фасетками квазискола с гребнями отрыва (рис. 7 в). Участков, в которых не произошло образования межатомных связей, т. е. «несхватывания», практически нет.

При дальнейшем повышении силы проковки до 160 кН на фоне квазихрупкого разрушения можно отметить формирование вязких участков с мелкоячеистым микро-рельефом, в которых превращение при охлаждении произошло преимущественно по диффузионному механизму (рис. 7 г). Структурные элементы излома отличаются наименьшими размерами и наибольшими значениями ударной вязкости.

При анализе результатов механических испытаний на разрыв можно отметить, что разрушение образцов во всех случаях зафиксировалось по материалу 32Г2, при этом значения прочностных свойств находятся на уровне не ниже основного металла. Локализация деформации и разрушения происходили в разупрочненном участке зоны рекристаллизации. При $F_2=160$ кН разрыв образца произошел наиболее близко к линии контакта сварного соединения, так как и расположение зоны рекристаллизации в этом случае наиболее близко к сварному стыку. Таким образом, во всех случаях прочность сварного стыка оказалась выше прочности участка разупрочненной зоны, в которой произошло разрушение.

Примечательно также, что с увеличением давления проковки происходит рост прочности сварного соединения, однако пластичность, характеризующая площадь образованной шейки, снижается.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние силы проковки на формирование структуры и механических свойств сварных соединений из сталей 32Г2 и 40ХН в процессе ротационной сварки трением, в результате чего установлено ее влияние на микроструктурные характеристики, прочность и площадь атомного взаимодействия привариваемых материалов.

2. С увеличением силы проковки возрастает объем разогретого металла, выдавливаемого в грат, что приводит к сокращению протяженности ЗТМВ. При этом микроструктура вдоль линии контакта изменяется от крупнозернистой к мелкозернистой, что сказывается на росте ударной вязкости.

3. С увеличением силы проковки наблюдается рост прочности сварного соединения и снижение пластичности в зоне разрушения. При этом прочность сварного соединения определяется прочностью участков рекристаллизации стали 32Г2, в которых произошло разрушение при испытании на разрыв, и полученные прочностные характеристики не уступают материалу тела трубы после закалки и отпуска.

4. При сваривании трубных заготовок $\varnothing 63,5$ мм и толщиной стенки 4,5 мм из сталей 32Г2 и 40ХН оптимальным диапазоном значения ковочного усилия является от 130 до 160 кН при заданных значениях остальных параметров сварки (сила разогрева 50 кН, частота вращения при разогреве 800 об/мин, длина оплавления при нагреве 8 мм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты вышеприведенных исследований позволяют заключить, что при определении оптимальных значений силы проковки среднеуглеродистых сталей при ротационной сварке трением следует руководствоваться результатами испытаний на разрыв (разрушение на некотором расстоянии от сварного стыка с механическими свойствами не ниже основного материала) и результатами микрофрактографического анализа сварного стыка (отсутствие участков «несхватывания», мелкозернистая структура).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friction Stir Welding and Processing / ed. R.S. Misha, M.W. Mahoney. San Francisco: ASM International, 2005. 298 p.
2. Красильников В.В., Шагабудинов Э.Р., Кузнецов М.Е., Бородулин И.В., Каратыш В.В. Точечная сварка трением с перемешиванием с разделением цикла сварки

- для нахлесточных соединений // *Master's Journal*. 2015. № 1. С. 48–53.
3. Рзаев Р.А., Чуларис А.А., Досимов А.С., Наумов А.А., Зотов О.Г. Использование технологических приемов для повышения прочности разнородных сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2018. № 1. С. 67–76.
 4. Зяхор И.В., Завертаный М.С., Чернобай С.В. Линейная сварка трением металлических материалов // *Автоматическая сварка*. 2014. № 12. С. 29–36.
 5. Хуснуллин А.М., Кашаев Р.М. Управление линейной сваркой трением // *Письма о материалах*. 2016. Т. 6. № 3. С. 227–230.
 6. Kelly M.R., Schmid S.R., Adams D.S., Fletcher J. Induction Pre-Heated Linear Friction Welding // *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 767. P. 331–340.
 7. Shete N., Deokar S.U. A Review Paper on Rotary Friction Welding // *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 5. № 6. P. 1557–1560.
 8. Li W., Vairis A., Preuss M., Ma T. Linear and rotary friction welding review // *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61. № 2. P. 71–100.
 9. Виль В.И. Сварка металлов трением. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.
 10. Сварка трением: справочник / под ред. В.К. Лебедева. Л.: Машиностроение, 1987. 236 с.
 11. ГОСТ Р 50278–92. Трубы бурильные с приваренными замками. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2010. 16 с.
 12. Sahin M. Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 168. № 2. P. 202–210.
 13. Sahin M. Characterization of properties in plastically deformed austenitic-stainless steels joined by friction welding // *Materials and Design*. 2009. Vol. 30. № 1. P. 135–144.
 14. Sahin M. Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding // *Materials and Design*. 2007. Vol. 28. № 7. P. 2244–2250.
 15. Ozdemir N., Sarsilmaz F., Hascalik A. Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel // *Materials and Design*. 2007. Vol. 28. № 1. P. 301–307.
 16. Selvamani S.T., Umanath K., Palanikumar K., Vigneswar K. The microhardness analysis of friction welded AISI 52100 grade carbon steel joints // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 984-985. P. 613–617.
 17. Satyanarayana V.V., Reddy G.M., Mohandas T. Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 160. № 2. P. 128–137.
 18. Kalsi N.S., Sharma V.S. A statistical analysis of rotary friction welding of steel with varying carbon in workpieces // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 57. № 9-12. P. 957–967.
 19. ГОСТ СССР 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Издательство стандартов, 1977. 33 с.
 20. ГОСТ СССР 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартинформ, 2007. 66 с.
 21. ГОСТ СССР 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 10 с.

REFERENCES

1. Misha R.S., Mahoney M.W., eds. Friction Stir Welding and Processing. San Francisco, ASM International Publ., 2005. 298 p.
2. Krasilnikov V.V., Shagabutdinov E.R., Kuznetsov M.E., Borodulin I.V., Karatysh V.V. The friction stir spot welding by lap joint with separation of the weld cycle. *Master's Journal*, 2015, no. 1, pp. 48–53.
3. Rzaev R.A., Chularis A.A., Dosimov A.S., Naumov A.A., Zotov O.G. The application of technological methods for enhancing the strength of dissimilar joints produced by friction stir welding. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 67–76.
4. Zyakhor I.V., Zavertanny M.S., Chernobay S.V. Linear friction welding of metallic materials. *Avtomaticheskaya svarka*, 2014, no. 12, pp. 29–36.
5. Khusnullin A.M., Kashaev R.M. Control of linear friction welding. *Pisma o materialakh*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 227–230.
6. Kelly M.R., Schmid S.R., Adams D.S., Fletcher J. Induction Pre-Heated Linear Friction Welding. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 767, pp. 331–340.
7. Shete N., Deokar S.U. A Review Paper on Rotary Friction Welding. *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 5, no. 6, pp. 1557–1560.
8. Li W., Vairis A., Preuss M., Ma T. Linear and rotary friction welding review. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 71–100.
9. Vil V.I. *Svarka metallov treniem* [Welding metals by friction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 176 p.
10. Lebedev V.K., ed. *Svarka treniem: spravochnik* [Friction welding: A Handbook]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 236 p.
11. *GOST R 50278–92. Truby burilnye s privarennyimi zamkami. Tekhnicheskie usloviya* [GOST R 50278–92. Drill pipes with weld-on tool joints. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 16 p.
12. Sahin M. Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 168, no. 2, pp. 202–210.
13. Sahin M. Characterization of properties in plastically deformed austenitic-stainless steels joined by friction welding. *Materials and Design*, 2009, vol. 30, no. 1, pp. 135–144.
14. Sahin M. Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding. *Materials and Design*, 2007, vol. 28, no. 7, pp. 2244–2250.
15. Ozdemir N., Sarsilmaz F., Hascalik A. Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel. *Materials and Design*, 2007, vol. 28, no. 1, pp. 301–307.

16. Selvamani S.T., Umanath K., Palanikumar K., Vigneswar K. The microhardness analysis of friction welded AISI 52100 grade carbon steel joints. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 984-985, pp. 613–617.
17. Satyanarayana V.V., Reddy G.M., Mohandas T. Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 160, no. 2, pp. 128–137.
18. Kalsi N.S., Sharma V.S. A statistical analysis of rotary friction welding of steel with varying carbon in workpieces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 57, no. 9-12, pp. 957–967.
19. GOST SSSR 9450-76. *Izmerenie mikrotverdosti vdavlivaniem almaznykh nakonechnikov* [GOST SSSR 9450-76. Measurements microhardness by diamond instruments indentation]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1977. 33 p.
20. GOST SSSR 6996-66. *Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv* [GOST SSSR 6996-66. Welded joints. Methods of mechanical properties determination]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 66 p.
21. GOST SSSR 9454-78. *Metally. Metod ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennykh, komnatnoy i povyshennykh temperaturakh* [GOST SSSR 9454-78. Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2003. 10 p.

INFLUENCE OF FORGING FORCE ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEDIUM-CARBON STEELS WELDED JOINTS IN ROTARY FRICTION WELDING

© 2019

E.A. Kuzmina, postgraduate student

Orenburg State University, Orenburg (Russia)

E.Yu. Priymak, PhD (Engineering),

Head of Laboratory of metallurgy and heat treatment,
assistant professor of Chair “Material Science and Materials Technology”

ZBO Drill Industries, Inc., Orenburg (Russia)

Orenburg State University, Orenburg (Russia)

Keywords: rotary friction welding (RFW), forging force, microstructure, thermomechanical affected zone (TMAZ), microstructure, microhardness, tensile strength, impact strength; 32-2-Mn; 40-Cr-Ni.

Abstract: The increasing interest in the process of friction welding is associated with the wide spreading of this technology at the enterprises of mechanical engineering due to the technological advantages of this method and the high quality of welded joints of the similar and dissimilar metals and alloys. Rotary friction welding (RFW) is one of the types of welding using friction heating and is used for parts having the shape of a cylinder or a pipe. The main technological parameters of the RFW process are the force during heating, forging force, the rotation frequency during heating, and the burning-off length. All parameters are interconnected and influence the process of formation and the properties of a welded joint.

The paper studies the influence of forging pressure on microhardness, tensile properties, and microstructure of welded joints from 32-2-Mn and 40-Cr-Ni steels. The authors analyzed the phase transformations occurring in the materials to be welded as a result of high temperature and deformation effects. The study showed the change in the length of the thermomechanically affected zone (TMAZ) depending on forging pressure. The results of microhardness distribution along the weld seam illustrate the formation of hardened and weakened zones. The paper presents the results of the breakdown and impact-viscosity tests of welded joints. The study showed the morphological features of fracture in the welded joint after the impact-bending tests.

The study identified that the forging force affects the microstructural characteristics, the length of thermomechanically affected zone of the materials being welded, the mechanical properties, and the fractographic features of a welded joint during the impact-bending test. The authors give recommendations for determining the optimal forging force values.