

Сёмка Ярослав Сергеевич^{1,2*}, Приймак Елена Юрьевна^{1,2}

¹Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

²АО «Завод бурового оборудования», г. Оренбург

*semkazbo@bk.ru

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЯ «АУСТЕНИТНАЯ СТАЛЬ – ПЕРЛИТНАЯ СТАЛЬ»

В работе приведены результаты механических испытаний на разрыв разнородных сварных соединений, образованных в результате процесса ротационной сварки трением (РСТ) низкоуглеродистой стали 32Г2 и высокопрочной аустенитной стали 10Х11Н23Т3МР при изменении силы при разогреве заготовок. Проведена оценка микроструктуры и микротвердости зоны термомеханического влияния (ЗТМВ). С помощью фрактографического анализа показаны особенности разрушения при растяжении исследуемых образцов сварных соединений. Рекомендован оптимальный режим.

Ключевые слова: ротационная сварка трением (РСТ), сварное соединение, зона термомеханического влияния (ЗТМВ), микротвердость, микроструктура, механические свойства, среднеуглеродистая сталь, аустенитная сталь.

Yaroslav S. Syomka^{1,2}, Elena Yu. Priymak^{1,2}

¹Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

²JSC "Drilling Equipment Plant", Orenburg, Russian Federation

INFLUENCE OF ROTARY FRICTION WELDING PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE “AUSTENITIC STEEL – PEARLITIC STEEL” JOINT

The paper presents the results of mechanical tensile tests of dissimilar welded joints formed as a result of the process of friction rotation welding. (RFW), low-carbon steel 32G2 and high-strength austenitic steel 10KH11N23T3MR when changing the force during heating of the workpieces. The microstructure and microhardness of the thermomechanically affected zone (TMAZ) were assessed. Fractographic analysis showed the features of fracture during tension of the studied welded joint samples. The optimal mode was recommended.

Key words: friction rotation welding (FRW), welded joint, thermomechanically affected zone (TMAZ), microhardness, microstructure, mechanical properties, medium-carbon steel, austenitic steel

Потребность современной техники в соединениях из разнородных материалов велика, например при создании биметаллических конструкций

технологических труб для капитального ремонта нефтяных и газовых скважин. Ротационная сварка трением является технологией, которая позволяет соединять разнородные материалы, так как процесс осуществляется в твердой фазе, что исключает образование характерных для сварки плавлением дефектов [1]. Во время ротационной сварки трением высокие температуры и деформации воздействуют на приконтактные области трубных заготовок, создавая при этом зону термомеханического влияния (ЗТМВ). Эта зона имеет различную протяженность и свойства в зависимости от величин параметров сварки [2, 3]. Ранними исследованиями установлено, что одним из параметров, оказывающим влияние на механические свойства сварного соединения является сила при разогреве. Данная работа посвящена оценке влияния силы при разогреве на механические свойства и микроструктуру сварных соединений из низкоуглеродистой стали и аустенитной стали.

Исследованию подлежали сварные соединения в сочетании сталей 32Г2 и 10Х11Н2ЗТ3МР, полученные при сварке трубных заготовок диаметром 73 мм и толщиной стенки 9 мм. Заготовки предварительно были подвергнуты закалке и высокому отпуску (старению). Механические свойства исходных материалов составили: 32Г2 - $\sigma_{02}=722$ МПа, $\sigma_B=808$ МПа, $\delta=12\%$; 10Х11Н2ЗТ3МР - $\sigma_{02}=686$ МПа, $\sigma_B=971$ МПа, $\delta=18\%$. Сварка трением экспериментальных образцов осуществлялась на сварочном оборудовании Thompson-60, которое оснащено программным комплексом, позволяющим задавать и контролировать параметры сварки. При сварке варьировалась сила при разогреве, которая составила 70 кН, 140 кН и 210 кН при неизменных остальных параметрах сварки (сила проковки 280 кН, частота вращения при разогреве 800 об/мин, осадка при нагреве 6 мм).

Металлографические исследования продольных микрошлифов сварных соединений позволили установить протяженность образованной ЗТМВ, которая составила 13 мм, 10 мм и 8 мм соответственно при увеличении силы при разогреве. Распределение микротвердости в исследуемых образцах сварных соединений представлено на рисунке 1.

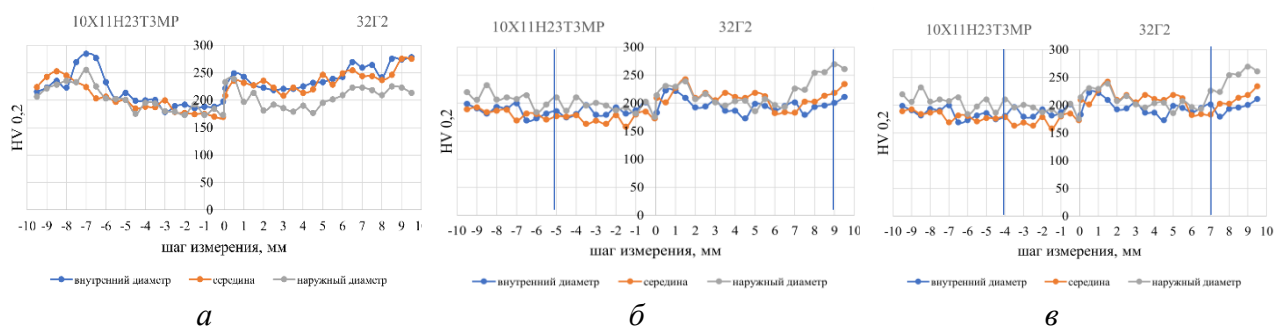


Рис. 1. Изменение микротвердости по протяженности ЗТМВ в сварных соединениях низкоуглеродистой стали 32Г2 и аустенитной стали 10Х11Н2ЗТ3МР, выполненных РСТ при различном усилии при нагреве: а – сила при нагреве 70 кН; б– сила при нагреве 140 кН; в– сила при нагреве 210 кН

В стали 32Г2 значения микротвердости в ЗТМВ немного ниже, чем у основного материала за счет образования преимущественно бейнитной

структуры. При этом значения микротвердости стали 10X11H23T3MP в ЗТМВ и зоне основного металла существенно не различаются. Также изменений микротвердости по толщине стенки трубы не наблюдается. Сила при нагреве оказывает преимущественное влияние только на протяженность ЗТМВ. Более существенное сокращение ЗТМВ с увеличением силы при нагреве наблюдается со стороны стали 32Г2, что объясняется более низкими механическими свойствами данной стали при высокой температуре и увеличением объема металла, выдавленного в грат.

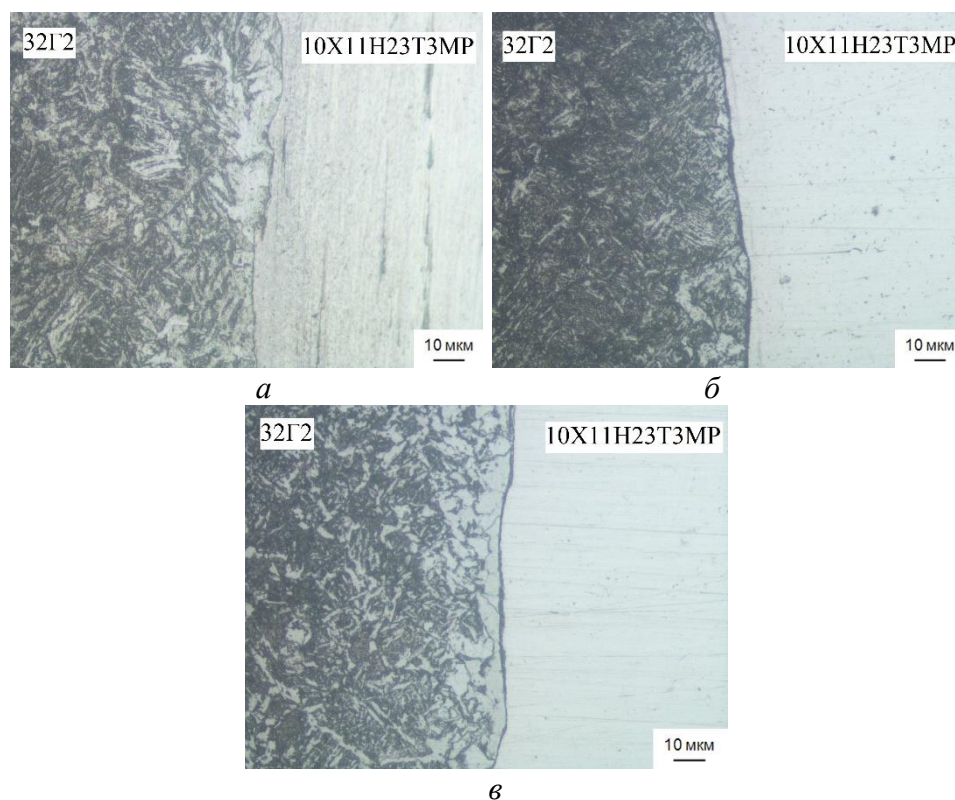


Рис. 2. Микроструктура сварных соединений и ЗТМВ сталей 32Г2 (а) и 10X11H23T3MP (б) после реализации различных режимов сварки: а – сила при нагреве 70 кН; б– сила при нагреве 140 кН; в– сила при нагреве 210 кН

Анализ микроструктуры сварного стыка показал, что между соединенными сталями имеется четкая граница. Вблизи границы сопряжения со стороны стали 32Г2 содержание феррита повышено, что указывает на диффузию углерода из данной стали в нержавеющую сталь, где его практически нет. По результатам металлографического анализа средняя протяжённость диффузионной зоны при силе при нагреве 70 кН составила 70 мкм, 140 кН – 30 мкм, 210 кН – 20 мкм.

Механические испытания на разрыв образцов сварных соединений низкоуглеродистой стали 32Г2 и аустенитной стали 10X11H23T3MP проводились согласно ГОСТ 1497 на плоских образцах длиной рабочей части 50 мм, шириной рабочей части 15 мм. Результаты механических испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства сварных соединений сталей 32Г2 и 10Х11Н23Т3МР, выполненных РСТ

№ режима	Сила при нагреве, кН	Предел текучести и σ_{02} , МПа	Предел прочности и σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Место разрушения
1	70	490	646	8,2	ЗТМВ 10Х11Н23Т3МР
2	140	492	639	4,3	сварной стык
3	210	518	596	2,4	сварной стык

Согласно полученным результатам значения прочностных свойств после реализации режимов 1 и 2 находятся примерно на одном уровне. Наименьшее значение прочности соединения фиксируется после реализации режима 3. Пластичность сварного соединения максимальна после реализации режима 1 с разрушением в ЗТМВ аустенитной стали. В остальных случаях имеет место хрупкое разрушение по сварному стыку с минимальной деформацией образцов.

Фрактограммы, представленные на рисунке 3, демонстрируют характер разрушения испытанных образцов.

На СЭМ – изображениях разрушенного в ЗТМВ аустенитной стали образца можно наблюдать пористую поверхность, характерную для вязкого разрушения (рис. 3, а). На изломе видны области в виде каверн (ямок) [4], что указывает на высокую пластичность материала перед разрушением.

В поверхности разрушения сварного стыка выявляются следы деформационного течения материалов, создающие полосчатый микрорельеф (рис. 3, б, в). Контрастные светлые и темные участки указывают на принадлежность различным сталям. Согласно литературным источникам [1], механизм образования сварных соединений из разнородных материалов определяется развитием диффузионных процессов, происходящих на их границе раздела. С увеличением силы при разогреве, происходит сокращение времени данного этапа за счет более раннего достижения заданной осадки. В ходе сварки экспериментальных образцов машиной сварки трением зафиксировано, что при силе разогрева 70 кН время этапа нагрева составило 54 с, при силе нагрева 140 кН – 20 с, при силе нагрева 210 кН – 11 с. Существенное ограничение времени с увеличением силы при разогреве, по всей вероятности, способствует подавлению диффузионных процессов на границе раздела сталей, вследствие чего разрушение по сварному стыку опережает деформацию, несмотря на близкие значения временного сопротивления.

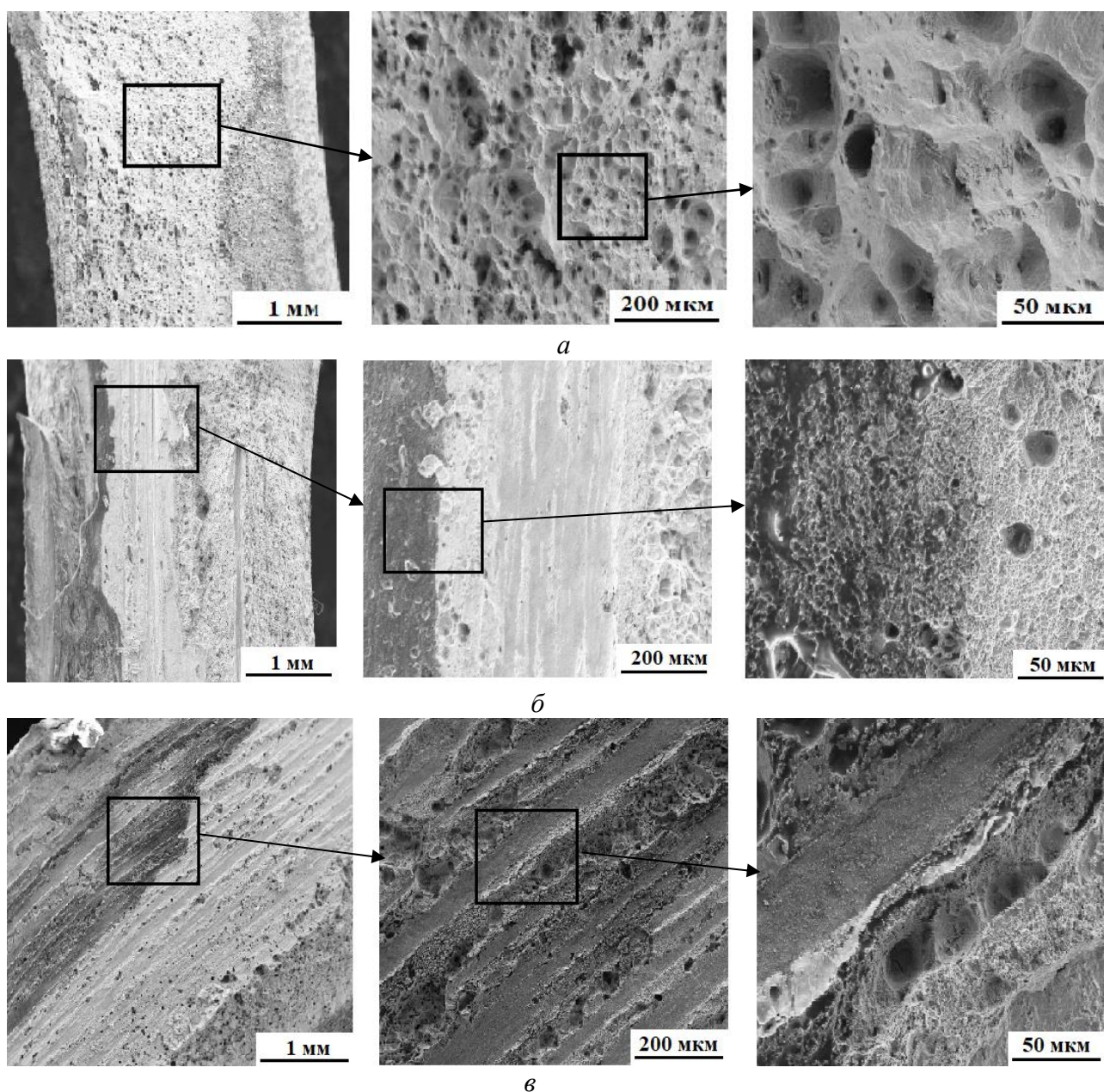


Рисунок 3 – Фрактограммы сварных образцов сталей 32Г2 и 10Х11Н23Т3МР после испытаний на растяжение: *а* – сила при нагреве 70 кН; *б*– сила при нагреве 140 кН; *в*– сила при нагреве 210 кН

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что с точки зрения достижения сочетания наиболее высоких прочностных и пластических свойств при растяжении оптимальным режимом сварки сталей 32Г2 и 10Х11Н23Т3МР заданного типоразмера заготовок будет являться следующий режим: сила при разогреве 70 кН, сила проковки 280 кН, частота вращения при нагреве 800 об/мин, осадка при нагреве 6 мм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00333, <https://rscf.ru/project/25-29-00333>

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Martinsen K, Hu SJ, Carlson BE. Joining of dissimilar materials. *Cirp Ann.* 2015;64(2):679–99.
2. Виль В.И. Сварка металлов трением / В.И. Виль. // М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
3. Лебедев, В.К. Сварка трением: Справочник / В.К. Лебедев, И.А. Черненко, В. И. Виль и др. // Л.: Машиностроение, 1987. 236 с.
4. Огневой В.Я. Основы фраттографии. Учебное пособие / Алт. Гос. Техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. - 95 с.

REFERENCES

1. Martinsen K, Hu SJ, Carlson BE. Joining of dissimilar materials. *Cirp Ann.* 2015;64(2):679–99.
2. Vil V.I. Friction welding of metals / V.I. Vil. // M.: Mashinostroenie, 1970. – 176 p.
3. Lebedev, V.K. Friction welding: Handbook / V.K. Lebedev, I.A. Chernenko, V.I. Vill et al. // L.: Mashinostroenie, 1987. 236 p.
4. Ognevoy V.Ya. Basics of fractography. Textbook / Alt. State Tech. University named after I.I.Polzunova. – Barnaul: AltGTU Publishing House, 2004. - 95 p.