

Эволюция структуры и механических свойств сварных соединений среднеуглеродистых сталей, выполненных ротационной сваркой трением, при нагреве*

Атамашкин А.С., Приймак Е.Ю.

Оренбургский государственный университет
г. Оренбург, Российская Федерация
atamashkin2017@yandex.ru

Кузьмина Е.А.

ОАО “Завод бурового оборудования”
г. Оренбург, Российская Федерация
kuzmina0902@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены результаты исследований сварных соединений из сталей 32Г2 и 30ХГСА, выполненных ротационной сваркой трением на сварочной машине Thompson 60. Проанализирована структура в исходном состоянии и после различных температурных режимов нагрева. Приведены результаты измерения твердости в различных зонах сварного соединения, представлены результаты испытаний на разрыв и ударную вязкость. Показаны особенности фазовых превращений, происходящих в свариваемых материалах в процессе сварки и последующем нагреве при различных температурах, повлиявших на степень механической неоднородности и уровень механических свойств. Показано, что интегральные механические свойства сварного соединения сталей 32Г2-30ХГСА при испытании на разрыв определяются свойствами зоны термомеханического влияния или индукционного нагрева стали 32Г2, как наименее прочного участка, в котором происходит локализация деформации и последующее разрушение. На основании проведенных исследований рекомендован оптимальный температурный режим отжига с позиции равнопрочности и надежности конструкции.

Ключевые слова: сварка трением, сварное соединение, микроструктура, механическая неоднородность, механические свойства, отжиг.

ВВЕДЕНИЕ

Метод сварки трением широко применяется в трубной промышленности для изготовления бурильных труб, так как отличается высокой производительностью и высоким качеством сварного соединения [1-5]. В процессе эксплуатации бурильная колонна подвергается значительным изгибающим и растягивающим усилиям, поэтому необходимы трубы, сочетающие высокую прочность и пластичность, в том числе и в зоне образования сварного соединения тела бурильной трубы с замками из более прочной стали. Однако, в связи с разнородностью свариваемых материалов, обеспечить равнопрочность в зоне соединения в процессе последующей термической обработки, необходимо для снятия сварочных напряжений, весьма затруднительно. Особенно данная проблема актуальна для геологоразведочных бурильных труб для комплексов ССК, отличающихся гладкоствольностью наружной и внутренней поверхности [6]. Представляется важным

оценка механических свойства сварного соединения как в исходном состоянии, так и после реализации различных режимов термической обработки, необходимой для снятия остаточных сварочных напряжений [7-9].

Целью настоящей работы явилась оценка влияния различных температурных режимов послесварочного нагрева структур и механические свойства сварных соединений разнородных сталей 32Г2-30ХГСА, предназначенных для производства бурильных труб и разработка рекомендаций по режимам термической обработки, обеспечивающих эксплуатационную надежность зоны соединения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для изготовления замковой части бурильных труб используется сталь 30ХГСА (ГОСТ 4543-71) после закалки от 900 °С в масле и высокого отпуска при температуре 600 °С в воде. После такой термической обработки сталь имеет структуру преимущественно сорбита отпуска с твердостью от 30 до 32 НРС. Для изготовления тела труб использовалась холоднотянутая заготовка из стали 32Г2А типоразмера $\varnothing 70 \times 5$ мм. Микроструктура стали представляет собой деформированные зерна феррита и перлита, ориентированные в направлении деформации. Механические свойства привариваемых материалов представлены в табл. 1, из которой видно, что они отличаются незначительно. Основное различие состоит в относительном удлинении: у стали 32Г2А оно несколько ниже, что объясняется неоднородностью структуры и особенностями упрочнения посредством наклепа.

Таблица 1

Механические свойства привариваемых материалов

Марка стали	Предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	KCU
30ХГСА	852-860	933-956	11,8-12,3	153-162
32Г2А	819-833	945-958	8-8,3	145-162

Сварка трением трубных заготовок осуществлялась в производственных условиях на машине для сварки трением “Thompson-60” при частоте вращения заготовок $n = 1000$

* Работа выполнена при поддержке ФГБУ “Фонд содействия развитию малым форм предприятий в научно-технической сфере” (Фонд содействия инновациям) в рамках конкурсной программы “УМНИК-2017” (договор № 0038777). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции “Материаловедение и металлургические технологии” (RusMetalCon-2018).

об/мин. и удельном давлении P равном от 100 до 200 МПа. В процессе трения осуществлялся разогрев заготовок до пластического состояния, и схватывание привариваемых частей под давлением с образованием металлических связей.

Термическая обработка производилась на установке индукционного нагрева СЧГ-3. Нагрев осуществлялся до температур 680 °С, 730 °С, 780 °С и 830 °С со скоростью 14-17 °С/сек.

Металлографический анализ, определение твердости и механических свойств осуществлялись по стандартным методикам. В образцах на определение ударной вязкости концентратор напряжения наносился непосредственно в месте стыка.

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ И ПОСЛЕ НАГРЕВА ДО РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР

В процессе сварки трением происходит разогрев металла до температур, превышающих критические, что приводит к изменениям в структуре свариваемых материалов в зонах, подверженных нагреву. В зависимости от химического состава свариваемых материалов, определяющего их способность воспринимать закалку, возможно получение различных структур в нагреваемых зонах сварного соединения. На рис. 1 представлена микроструктура зоны термомеханического влияния (ЗТМВ) сварного соединения сталей 32Г2-30ХГСА со значениями микротвердости.

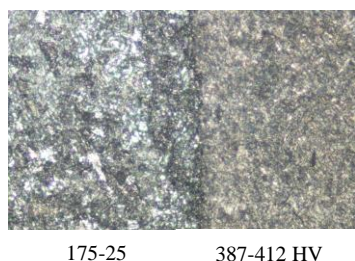


Рис. 1. Микроструктура сварного соединения 32Г2-30ХГСА в исходном состоянии после сварки трением

Металлографический анализ показывает, что в процессе сварки и при последующем охлаждении стали 30ХГСА произошло образование закалочной мартенсито-бейнитной структуры, с повышенной твердостью в диапазоне от 387 до 412 HV. Это объясняется тем, что данная сталь содержит элементы, которые повышают способность принимать закалку (такие как хром, марганец и кремний) и поэтому при охлаждении образовавшийся при разогреве металла аустенит был преобразован в мартенсит и бейнит ввиду превышения критической скорости охлаждения.

При удалении от стыка в виду градиента температур количество закалочной фазы уменьшается, и при просмотре микрошлифа она выглядит в виде обособленных светлых выделений на фоне однородной феррито-цементитной смеси.

Со стороны стали 32Г2 в ЗТМВ произошло образование мелкозернистой структуры феррито-карбидной смеси с небольшими участками обособленных включений фер-

ритной фазы и игольчатых выделений бейнита. Разброс твердости данной структуры достаточно широк и составляет от 175 до 257 HV. Прокаливаемость данной стали несколько ниже и при охлаждении из аустенитного состояния произошло образование феррито-цементитной смеси. Частично образованный бейнит свидетельствует о наличии промежуточного превращения. При удалении от зоны стыка бейнитная фаза исчезает, и микроструктура представляет собой мелкодисперсную феррито-карбидную смесь [6, 7].

Таким образом, сварное соединение сталей 32Г2 и 30ХГСА характеризуется структурной неоднородностью, преимущественно связанной с образованием закалочных структур со стороны стали 30ХГСА, что вызывает повышенные напряжения в сварном соединении. Для устранения этой неоднородности необходимо произвести термическую обработку.

Рассмотрим структурные изменения, произошедшие в ЗТМВ и зонах нагрева при термической обработке.

При нагреве сварного соединения сталей 32Г2 и 30ХГСА до температуры 680 °С (рис. 2, а) видимых структурных изменений по сравнению с состоянием после сварки не наблюдается. Однако такой нагрев привел к некоторому снижению значений микротвердости в ЗТМВ в связи со снятием закалочных напряжений и частичным распадом мартенсито-бейнитной смеси. Со стороны стали 30ХГСА в ЗТМВ микротвердость находится в диапазоне от 362 до 398 HV, а в стали 32Г2 от 175 до 257 HV. В зонах, подверженных индукционному нагреву основного металла, видимых структурных изменений по сравнению с исходным состоянием свариваемых материалов не наблюдалось.

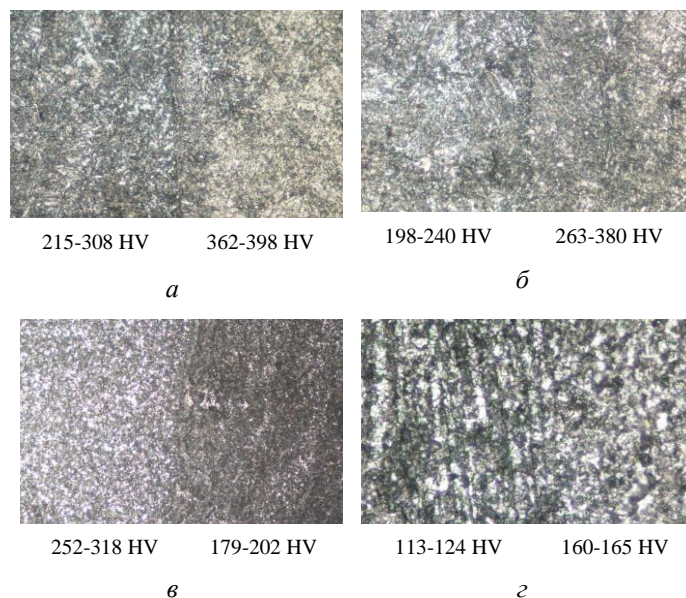


Рис. 2. Микроструктура сварного соединения 32Г2-30ХГСА после нагрева до различных температур: а – 680 °С; б – 730 °С; в – 780 °С; г – 830 °С

Микроструктура сварного соединения после нагрева до температуры 730 °С аналогична предыдущей (рис. 2, б), наблюдается лишь дополнительное снижение микротвердости в ЗТМВ до значений от 263 до 380 HV в стали

30ХГСА и от 198 до 240 со стороны стали 32Г2, вызванной рекристаллизацией α -фазы при нагреве.

Нагрев сварного соединения до температуры 780 °С (рис. 2, в) привел к частичной перекристаллизации структуры с образованием однородной мелкодисперсной феррито-цементинной смеси с размером зерен избыточного феррита порядка от 1 до 2 мкм во всех нагреваемых зонах независимо от марки свариваемого материала. В зонах, подверженных индукционному нагреву основного металла, наблюдается изменение морфологии ферритной и перлитной фазы по сравнению с исходным состоянием свариваемых заготовок. Существенного различия в значениях микротвердости во всех зонах сварного соединения не наблюдается, и они колеблются в диапазоне от 162 до 188 HV.

Дальнейшее повышение температуры нагрева до 830 °С (рис. 2, г) привело к росту зерна и образованию грубой феррито-цементинной структуры с размером зерен феррита порядка от 5 до 6 мкм. Наблюдается усиление различий в микротвердости свариваемых материалов, вызванное различием в их химическом составе. В стали 30ХГСА в зоне индукционного нагрева значения микротвердости составляют от 130 до 160 HV, а в стали 32Г2 – от 97 до 113 HV.

Для оценки степени неоднородности структуры, образованной в результате сварки и последующего локального индукционного нагрева сварного соединения на рис. 3 представлены результаты измерения микротвердости по всему сечению сварного соединения с захватом зон основного металла, неподверженных индукционному нагреву. Замеры производились с шагом 0,5 мм.

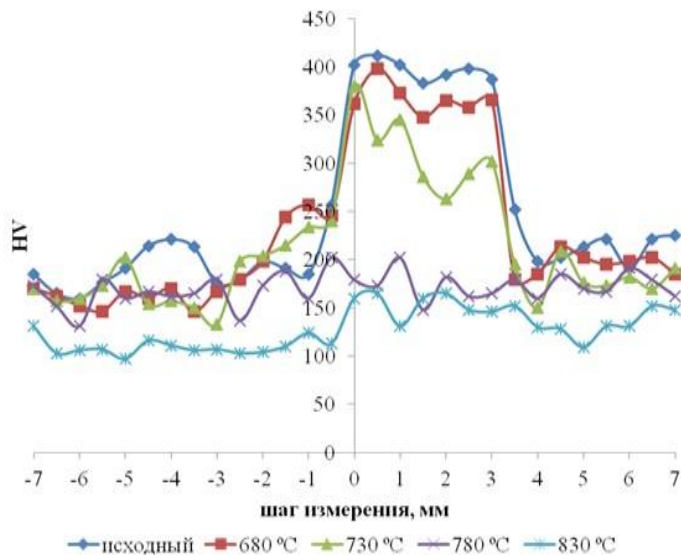


Рис. 3. Распределение микротвердости по сечению сварных соединений после различных режимов термической обработки

Анализ характера изменения микротвердости по сечению сварного соединения показывает, что непосредственно после сварки трением механическая неоднородность соединения наиболее ярко выражена, наглядно прослеживается протяженность участка образования закалочных структур со стороны стали 30ХГСА, имеющего наиболее

высокие значения микротвердости. Проведение отжига при температурах 680 °С и 730 °С на характер распределения микротвердости значительного влияния не оказало. Дальнейшее увеличение температуры отжига до 780 °С способствовало более равномерному распределению микротвердости по сечению сварного соединения, причем с повышением температуры отжига общий уровень значений в нагреваемой зоне постепенно снижается.

Важно обеспечить наименьшую разницу в значениях в нагреваемой зоне и основного металла сварного соединения. С этой точки зрения при температуре отжига 830 °С со стороны стали 32Г2 наблюдается провал и разница в значениях нагреваемой зоны и основного металла составляет около 30 единиц HV. Таким образом, более или менее равномерное распределение микротвердости наблюдается после реализации температурного режима отжига 780 °С.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ

Результаты определения характеристик прочностных и пластических свойств, полученных в ходе испытаний на разрыв и ударный изгиб, приведены в табл. 2, анализируя которые можно увидеть, что непосредственно после сварки трением формируется сварное соединение, обладающее высокой прочностью, но низкой пластичностью и ударной вязкостью ввиду образования закалочных структур со стороны обеих сталей. Место разрушения при разрыве фиксировалось по трубе из стали 32Г2 на расстоянии 7 мм от сварного стыка, то есть в районе перехода от зоны термомеханического влияния к основному металлу.

Таблица 2

Механические свойства сварного соединения сталей 32Г2-30ХГСА до и после индукционного нагрева

Режим отжига №	$T_{max}, ^\circ C$	σ_{02}, MPa	σ_{02}, MPa	$\delta_5, \%$	Место разрушения при разрыве	KCU, Дж/см ²
без отжига		890	933	11,4	по трубе в 7 мм от СШ*	76
1	680	870	910	10,7	по трубе в 6 мм от СШ*	78
2	730	654	726	14,3	по трубе в 8 мм от СШ*	143
3	780	640	705	20	по трубе в 16 мм от СШ*	156
4	830	504	623	19,7	по трубе в 17 мм от СШ*	171

*СШ – сварной шов

Нагрев сварного соединения до температуры 680 °С заметного влияния на структуру и свойства сварного соединения не оказал, поэтому отмечается низкая пластичность и ударная вязкость соединения в целом, свойственная исходному состоянию после сварки. Место разрушения образца при разрыве также зафиксировано со стороны стали 32Г2 в месте границы ЗТМВ и основного металла.

Увеличение температуры нагрева до 730 °С, которая способствовала частичному снятию закалочных напряжений с образованием мелкодисперсных продуктов распада закалочных структур, привело к снижению прочностных характеристик в среднем на 200 МПа, и увеличению относительного удлинения и ударной вязкости. При этом наименее прочное место при разрыве фиксируется на расстоянии 8 мм от сварного стыка, что указывает на его не-

которое смещение в сторону тела трубы и повышением запаса прочности зоны термомеханического влияния.

Дальнейший нагрев до температуры 780 °С значительного влияния на прочностные характеристики по сравнению с предыдущим режимом не оказал, однако пластичность и ударная вязкость соединения повысились существенно, так как произошла частичная перекристаллизация, и структура со стороны обеих сталей представляла собой мелкодисперсную феррито-карбидную смесь. Место разрушения зафиксировалось по телу трубы на расстоянии 16 мм от шва, что свидетельствует о высокой надежности зоны соединения.

После нагрева до температуры 830 °С, когда произошла полная перекристаллизация в зоне нагрева, сварное соединение обладает наиболее низкой прочностью в сочетании с высокой пластичностью и ударной вязкостью. Место разрушения при разрыве также отмечается по телу трубы на расстоянии 17 мм от сварного стыка.

Таким образом, с увеличением температуры индукционного нагрева при отжиге сварного соединения сталей 32Г2А-30ХГСА происходит снижение прочностных характеристик и увеличение пластических и ударной вязкости, что связано с распадом закалочных структур, сформированных в процессе сварки, и последующей перекристаллизацией зоны отжига в целом. Место разрушения при разрыве с повышением температуры смещается в сторону тела трубы.

Выводы

На основании проведенных исследований сварного соединения сталей 32Г2-30ХГСА, и анализа структуры и механических свойств после различных температурных режимов отжига можно сделать следующие выводы:

- установлено изменение структуры различных зон сварного соединения сталей 32Г2-30ХГСА, вызванное термомеханическим воздействием в процессе сварки, заключающееся в образовании закалочных структур с повышенной твердостью в ЗТМВ со стороны стали 30ХГСА и мелкодисперсной феррито-карбидной смеси с участками бейнита со стороны стали 32Г2;

- с увеличением температуры индукционного нагрева при

отжиге сварного соединения сталей 32Г2-30ХГСА происходит снижение прочностных характеристик и увеличение пластических и ударной вязкости, что связано с распадом закалочных структур, сформированных в процессе сварки, и последующей перекристаллизацией зоны отжига в целом. Место разрушения при разрыве с повышением температуры смещается в сторону тела трубы;

- исходя из соображений обеспечения максимального сочетания вязкости и прочности зоны соединения рекомендуемым температурным режимом индукционного отжига сварного соединения сталей 32Г2-30ХГСА является 780 °С, при котором обеспечивается высокий запас вязкости и пластичности соединения при статических и динамических нагрузках в сочетании с приемлемыми прочностными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ellis C.R.G. Recent Industrial developments in friction welding // Welding Journal. – 1975. – № 8. – P. 582-589.
2. Лебедев В.К. Сварка трением: справочник. – М.: Металлургия, 1987. – 487 с.
3. Вилль В.И. Сварка металлов трением. – Ленинград: Машиностроение, 1970. – 176 с.
4. ГОСТ Р 50278–92 Трубы бурильные с приваренными замками. – М.: Стандартинформ, 2010. – 16 с.
5. ГОСТ Р 51245-99 Трубы бурильные стальные универсальные. – М.: ГОССТАНДАРТ России, 1999. – 11 с.
6. ГОСТ 26250-84 Трубы бурильные для снарядов со съемными керноприемниками. – М.: Стандартинформ, 2010. – 14 с.
7. Земзин В.Н. Термическая обработка и свойства сварных соединений. / В.Н. Земзин, Н.З.Л. Шрон. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1978. – 367 с.
8. Винокуров В.А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. – М.: Машиностроение, 1973. – 396 с.
9. Хромченко Ф.А. Технология и оборудование для термической обработки сварных соединений. / Ф.А. Хромченко, П.М. Корольков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

DOI: 10.24892/RIIE/20190103

Evolution of the Structure and Mechanical Properties of Welded Joints of Medium-Carbon Steels, Made by Rotational Friction Welding, with Heating

Atamashkin A.S., Priymak E.Yu.

Orenburg state university
Orenburg, Russian Federation
atamashkin2017@yandex.ru

Kuzmina E.A.

ZBO Drill Industries
Orenburg, Russian Federation
kuzmina0902@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of investigations of welded joints made of 32G2 and 30HGSA steels made by rotational friction welding on a Thompson 60 welding machine. The structure is analyzed in the initial state and after various temperature modes of heating. The results of the hardness measurement in various zones of the welded joint are given, the results of the

tensile and toughness tests are presented. The features of phase transformations occurring in welded materials during welding and subsequent heating at different temperatures, which affect the degree of mechanical inhomogeneity and the level of mechanical properties are shown. It is shown that the integral mechanical properties of a welded joint of 32G2-30HGSA steels during a

tensile test are determined by the properties of the zone of thermomechanical influence or induction heating of 32G2 steel, as the least durable area in which deformation is localized and subsequent destruction. On the basis of the studies carried out, the optimal temperature annealing regime is recommended from the position of equal strength and reliability of the structure.

Keywords: friction welding, welded joint, microstructure, mechanical heterogeneity, mechanical properties, annealing.

REFERENCES

1. Ellis C.R.G. Recent Industrial developments in friction welding, *Welding Journal*, 1975, no.8, pp. 582-589.
2. Lebedev V. *Svarka treniem: spravochnik* [Friction welding: reference book], Moscow, Metallurgy, 1987, 487 p.
3. Ville V.I. *Svarka metallov treniem* [Welding metals by friction], Leningrad, Mechanical Engineering, 1970, 176 p.
4. GOST R 50278–92 *Truby buril'nye s privarennymi zamkami* [Drill pipes with welded locks], Moscow, Standardinform, 2010, 16 p.

Библиографическое описание статьи

Атамашкин А.С. Эволюция структуры и механических свойств сварных соединений среднеуглеродистых сталей, выполненных ротационной сваркой трением, при нагреве / А.С. Атамашкин, Е.Ю. Приймак, Е.А. Кузьмина // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2019. – Т.7, №1. – С. 14-18. DOI: 10.24892/RIJIE/20190103

5. GOST R 51245-99 *Truby buril'nye stal'nye universal'nye* [Steel universal boring pipes], Moscow, GOSSTANDART of Russia, 1999, 11 p.

6. GOST 26250-84 *Truby buril'nye dlya snaryadov so s'emnymi kernoprienikami* [Drill pipes for projectiles with removable core conditioners], Moscow, Standardinform, 2010, 14 p.

7. Zemzin VN, Shron N.Z. *Termicheskaya obrabotka i svoystva svarnykh soedineniy* [Thermal treatment and properties of welded joints], Leningrad, Mechanical Engineering, Leningrad Department, 1978, 367 p.

8. Vinokurov V.A. *Otpusk svarnykh konstruksiy dlya snizheniya napryazheniy* [Vacation of welded structures to reduce stress], Moscow, Mashinostroenie, 1973, 396 p.

9. Khromchenko F.A., Korolkov P.M. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya termicheskoy obrabotki svarnykh soedineniy* [Technology and equipment for heat treatment of welded joints], Moscow, Energoatomizdat, 1987, 200 p.

Reference to article

Atamashkin A.S., Priymak E.Yu., Kuzmina E.A. Evolution of the structure and mechanical properties of welded joints of medium-carbon steels, made by rotational friction welding, with heating, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2019, vol.7, no.1, pp. 14-18. DOI: 10.24892/RIJIE/20190103