

УДК 620.172.224.2

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-8-28-32

А.М. Иванов, Е.С. Александрова

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНОГО ОБРАЗЦА ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ 09Г2С, ПОДВЕРГНУТОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ И РАВНОКАНАЛЬНОМУ УГЛОВОМУ ПРЕССОВАНИЮ ПРИ УДАРНОМ ИЗГИБЕ

Рассмотрен механизм разрушения образцов Менаже из низколегированной стали 09Г2С со сварным соединением, подвергнутых закалке и равноканальному угловому прессованию (РКУП) при температуре 233 К. Показано, что разрушение сварных образцов, подвергнутых закалке и РКУП, в ЗТВ является вязким и характеризуется наличием ямочного микрорельефа так же, как и разрушение основного металла. А упрочненная посредством

РКУП сварная сталь 09Г2С в результате ударного изгиба при 233 К в ЗТВ разрушилась квазихрупко, при этом характерно смешанное разрушение, выражающееся в чередовании хрупких и вязких участков.

Ключевые слова: сталь, сварное соединение, закалка, равноканальное угловое прессование, фрактография, механизм разрушения.

А.М. Ivanov, E.S. Alexandrova

FRACTURE MECHANISM OF 09G2S LOW-ALLOY STEEL WELDED SAMPLE SUBJECTED TO HEAT TREATMENT AND EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING DURING IMPACT BENDING

The aim of the work: the investigation of a fracture mechanism in 09G2S low-alloy steel welded sample with K-shaped grooving on a thermal impact area (TIA) after equal channel angular pressing (ECAP) and tempering + ECAP.

There are carried out impact bending tests of 09G2S steel welded samples in which Menage incision is carried in the TIA. Micro-fractograms are presented and the analysis of a fracture mechanism in Menage samples of 09G2S steel with welded joints subjected to impact bending at the temperature of 233°K is carried out. It is shown that the fracture of welded samples subjected to tempering and the ECAP

in the TIA is ductile and characterized with the presence of a dimple micro-relief as well as basic metal fracture. In its turn, 09G2S welded steel strengthened by means of the ECAP as a result of impact bending at the temperature of 233°K is fractured quasi-brittle in the TIA. At the same time there are observed facets of quasi-microchip, micro-cracks and micro-dimples. A mixed fracture is also characteristic expressed in the interchange of brittle and ductile areas.

Key words: steel, welded joint, tempering, equal channel angular pressing, fractography, fracture mechanism.

Введение

Как известно, деформационная обработка соединений, состоящих из различающихся по химическому составу, структуре и физико-механическим свойствам материалов, вызывает определенные трудности. При этом затрудняется выбор оптимального режима обработки, направленной на сохранение целостности заготовки и в то же время на упрочнение материала соединения. Одним из таких соединений является неразъемное соединение, выполненное сваркой. Сварные соединения характеризуются химической неоднородностью структуры и различием в механических свойствах зон сварного соединения: основного металла, зоны термического

влияния и металла шва. Различные зоны сварного соединения по-разному сопротивляются пластической деформации. При деформации сварного соединения может произойти разрушение по зоне термического влияния.

Используемые в настоящее время методы интенсивной пластической деформации позволяют упрочнять заготовки, которые имеют однородные по объему свойства [1-8]. Впервые возможность РКУП сварного соединения из низкоуглеродистой стали СтЗсп с К- и Х-образной разделкой кромок заготовок была представлена в [9]. В этой работе была исследована

микроструктура в зонах сварного соединения и определены механические свойства сварного соединения до и после РКУП, а также после отжига и РКУП. Проведено исследование влияния термической обработки закалкой и РКУП на низкотемпературную ударную вязкость различных зон

Материал и методика исследований

Химический состав исследуемой стали 09Г2С в %: 0,12 С; 0,5-0,8 Si; 0,3 Cr; 1,3-1,7 Mn; 0,3 Ni; 0,3 Cu, а остальное Fe. Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «*Foundry-Master*» фирмы «*Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)*».

Цилиндрические заготовки из стали 09Г2С со сварным соединением К-образной разделкой швов были подвергнуты РКУП и закалке + РКУП. Электродуговая сварка заготовок выполнялась в нижнем положении электродами «УОНИ-13/45» Ø3 мм с помощью сварочного аппарата «Дуга-318М1». Сварочный ток составлял 150 А [10].

Ударному изгибу подвергались образцы в К-образной разделкой с выполнением U-образного надреза в ЗТВ (а – РКУП, $C, n=2, T=823$ К; б – закалка в воде от 1203 К и РКУП, $C, n=2, T=823$ К) [10]. РКУП по маршруту C представляет собой прессование объемных заготовок в пересе-

Результаты исследований и их обсуждение

Если ударная вязкость основного металла 09Г2С составляет $KCU=2,37$ МДж·м⁻², то с выполнением U-образного надреза в ЗТВ KCU в случае РКУП снижается примерно в 2,5 раза (0,93 МДж·м⁻²), а после закалки и РКУП KCU (2,01 МДж·м⁻²) повышается примерно в 2 раза по сравнению со случаем РКУП [10].

Макрорельеф разрушения при ударном нагружении образцов с U-образным надрезом из стали 09Г2С в состоянии поставки при 293 К показывает наличие матовой зоны в вершине надреза и практически на всём протяжении излома с выраженной рельефностью и значительной утяжки по толщине образца (рис. 1а), свидетельствующих о вязком характере за-

сварного соединения в образцах из низколегированной стали 09Г2С [10].

Целью работы является исследование механизма разрушения сварного соединения из низколегированной стали 09Г2С с К-образной разделкой кромок заготовок по зоне термического влияния (ЗТВ) после РКУП и закалки + РКУП.

Кающихся под углом 120° каналах с поворотом заготовки относительно её продольной оси перед каждым последующим циклом прессования на угол 180°. РКУП объемных заготовок размером Ø20×100 мм со сварными швами в $n = 2$ прохода при температуре 823 К осуществлялось с помощью гидравлического пресса ПСУ-125 с максимальным усилием 1250 кН.

Надрезы Менаже были выполнены в образцах из основного материала и в ЗТВ образцов со сварным швом с центром на расстоянии 1,5 мм от края сварного шва [10]. Испытания образцов Менаже на ударную вязкость проведены на копре *Amsler RKP-450 (Zwick, Германия)* при температуре 233 К.

Фрактографические исследования изломов образцов выполняли на сканирующем электронном микроскопе *HITACHI TM3030 (Япония)* в режиме вторичных электронов.

рождения трещины и высоком значении работы удара, затраченной на зарождение и развитие трещины [10]. Если в изломах образцов в ЗТВ для стали 09Г2С, подвергнутой РКУП, присутствуют хрупкие составляющие (рис. 1б), то поверхность разрушения в случае закалки и РКУП светлая, матовая с выраженной рельефностью (рис. 1в). Такая рельефность и наличие значительной утяжки по толщине образца в устье надреза и губ среза свидетельствуют о вязком характере зарождения трещины и высоком значении работы удара, затраченной на зарождение трещины. Область нестабильного хрупкого разрушения для образца с К-образным сварным швом и надрезом в ЗТВ, подвергнутого РКУП, за-

нимает практически всю поверхность разрушения образца за исключением небольшой зоны в вершине надреза, соответствующей этапу зарождения и развития

вязкой трещины – области докритического стабильного роста трещины (рис. 1б) [10].

Микрофрактография микрорельефа изломов образцов показала следующее.

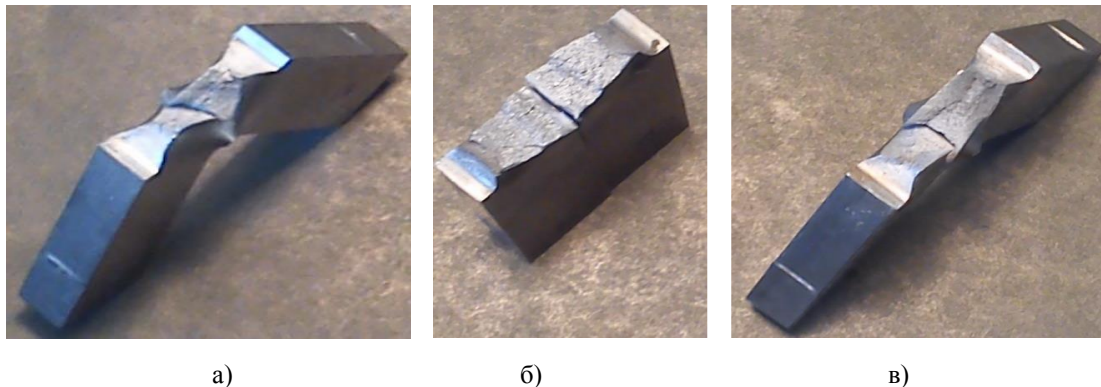


Рис. 1. Общий вид разрушенных при 233 К образцов Менаже из стали 09Г2С с надрезом: а - в основном металле; б - в ЗТВ после РКУП; в - в ЗТВ после закалки и РКУП образцов с К-образным сварным швом

Разрушение образцов из стали 09Г2С при 233 К. В ранних работах было показано, что закалка и РКУП существенно повышают прочность стали 09Г2С [11]. В то же время, термическая обработка в виде закалки перед РКУП значительно (в 2 с лишним раза) повышает ударную вязкость КСУ по сравнению с состоянием после РКУП, но примерно в 1,2 раза ниже, чем для исходного материала [10].

Вязкое разрушение стали 09Г2С при 233 К произошло в результате протекания

различных стадий – зарождения, роста и объединения пор внутри образца. Разрушение имеет волокнистый излом, микростроение которого имеет ямочный характер, состоит из соответствующих вязкому разрушению деталей, как ямки и микро-ямки (рис. 2а). Если ямки достигают размера примерно 10 мкм, то микро-ямки порядка 200 нм. Микроямки, в основном, расположены во впадинах, разделяющих ямки, и частично на тройных стыках гребней.

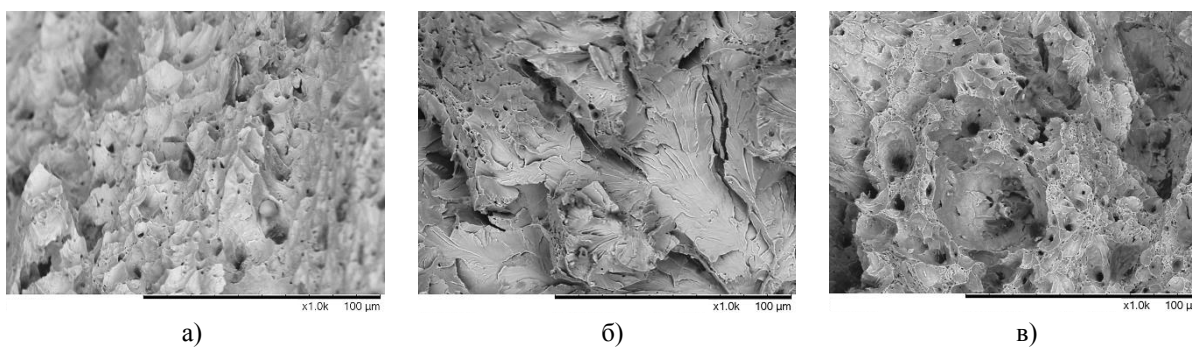


Рис. 2. Микрорельефы изломов (разрушения) образцов: а - образца из стали 09Г2С в состоянии поставки; б - сварного образца из 09Г2С, подвергнутого РКУП ($C, n=2, T=823$ К), в ЗТВ; в - сварного образца из 09Г2С после закалки (в воде от 1203 К) и РКУП ($C, n=2, T=823$ К) в ЗТВ, подвергнутых ударному изгибу при 233 К

Разрушение сварных образцов из стали 09Г2С в состоянии после РКУП ($C, n = 2, T=823$ К) при 233 К. С упрочнением и измельчением зерен разрушение стали в ЗТВ носит квазихрупкий характер, наблюдаются фасетки квазимикроскола, микро-

трещины и микроямки (рис. 2б). При температуре испытания 233 К превалируют фасетки квазискола, доля вязкого разрушения снизилась настолько, что ямки исчезли, остались только микроямки. В данном случае наблюдается смешанное раз-

рушение, выражающееся в чередовании хрупких и вязких участков, что характерно для разрушения сталей с ферритно-перлитной структурой [12].

Разрушение сварных образцов из стали 09Г2С в состоянии после закалки (в воде от 1203 К) и РКУП (С, n=2, T=823 К) при 233 К. Применение закалки перед РКУП повысило вязкость сварного соединения, разрушение в ЗТВ произошло по вязкому механизму с ямочным микрорельефом

(рис. 2в). Ямки в среднем имеют размеры 10-30 мкм, а микроямки – порядка 150 нм. По сравнению с разрушением основного металла количество микроямок в ЗТВ сварного образца, подвергнутого закалке и РКУП, значительно больше, что связано с измельчением зерен. На дне некоторых ямок присутствуют микрочастицы вытянутой формы.

Выводы

Фрактографические исследования изломов образцов Менаже из стали 09Г2С при ударном изгибе при 233 К показали, что разрушение сварных образцов, подвергнутых закалке и РКУП, в ЗТВ является вязким и характеризуется наличием ямочного микрорельефа так же, как и разрушение основного металла.

Упрочненная посредством РКУП (С, n = 2, T = 823 К) сварная сталь 09Г2С в результате ударного изгиба при 233 К в ЗТВ

разрушилась квазихрупко, при этом наблюдаются фасетки квазимикроскола, микротрещины и микроямки. Для данного случая характерно смешанное разрушение, выражающееся в чередовании хрупких и вязких участков.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологий для управления механическими свойствами и хладостойкостью конструкционных сталей, в том числе со сварным швом.

Работа выполнена в рамках научного проекта № III.28.1.1 Программы III.28.1 фундаментальных исследований Сибирского отделения Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: Академкнига, 2007. 398 с.
2. Zhu, Y.T., Jiang H., Huang J. etc. A new route to bulk nanostructured metals // Metallurgical and Materials Transactions A. 2001. V. 32. N. 6. Pp. 1559-1562. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0245-0>.
3. Сэстри Ш.М.Л., Добаткин С.В., Сидорова С.В. Формирование субмикроструктурной структуры в стали 10Г2ФТ при холодном равноканальном угловом прессовании и последующем нагреве // Металлы. 2004. № 2. С. 28-35.
4. Лотков А.И., Гришков В.Н., Дударев Е.Ф. [и др.]. Формирование ультрамелкозернистого состояния, мартенситные превращения и неупругие свойства никелида титана после «абс»-прессования // Вопросы материаловедения. 2008. № 1(53). С. 161-165.
5. Stolyarov V.V. Features of deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy // Reviews on Advanced Materials Science. 2010. V. 25. N. 2. Pp. 194-202.
6. Li L., Virta J. Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure // Materials Science and Technology. 2011. V. 27. N. 5. Pp. 845-862. DOI: [10.1179/026708310X12677993662087](https://doi.org/10.1179/026708310X12677993662087).
7. Maier G.G., Astafurova E.G., Maier H.J., etc. Annealing behavior of ultrafine grained structure in low-carbon steel produced by equal channel angular pressing // Materials Science and Engineering A. 2013. V. 581. N. 1. Pp. 104-107.
8. Ivanov A.M. Strengthening of Low-Alloy Steel by Extrusion, Helical Pressing, and Equal-Channel Angular Pressing // Russian Engineering Research. 2017. V. 37. N. 5. Pp. 420-423. DOI: [10.3103/S1068798X17050124](https://doi.org/10.3103/S1068798X17050124).
9. Ivanov A.M., Soshnikova E.P., Argunova A.A., etc. Microstructure and Strength of Welded Joints of Steel after Equal-Channel Angular Pressing // Materials Science Forum. Nanomaterials by Severe Plastic Deformation: NanoSPD5, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. V. 667-669. 2011. Pp. 921-924.
10. Иванов А.М. Ударная вязкость сварного образца из низколегированной стали 09Г2С после термообработки и равноканального углового прессования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. – №12. С. 65-68.
11. Лукин Е.С., Иванов А.М. Малоцикловая усталость стали 09Г2С, упрочненной методом ин-

тенсивной пластической деформации // Фундаментальные исследования. 2015. №11 (ч. 1). С. 92-95.

1. Valiev R.Z., Alexandrov I.V. *Bulk Nano-Structural Metal Materials: Manufacturing, Structure and Properties*. M.: Academkniga, 2007. pp. 398.
2. Zhu, Y.T., Jiang H., Huang J. et al. A new route to bulk nanostructured metals // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001. V. 32. N. 6. Pp. 1559-1562. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0245-0>.
3. Sestry Sh.M.L., Dobotkin S.V., Sidorova S.V. Formation of sub-microcrystalline structure in 10G2FT steel during cold equal channel angular pressing and further heating // *Metals*. 2004. No.2. pp. 28-35.
4. Lotkov A.I., Grishkov V.N., Dudarev E.F. [et al.]. Ultrafine-grained state formation, martensite transformations and non-elastic properties of titanium nickelid after “abc”-pressing // *Material Science Problems*. 2008. No.1 (53). pp. 161-165.
5. Stolyarov V.V. Features of deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2010. V. 25. N. 2. Pp. 194-202.
6. Li L., Virta J. Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure // *Materials Science and Technology*. 2011. V. 27. N. 5. Pp. 845-862. DOI: 10.1179/026708310X12677993662087.

12. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности // М.: Наука, 2008. 334 с.

7. Maier G.G., Astafurova E.G., Maier H.J., etc. Annealing behavior of ultrafine grained structure in low-carbon steel produced by equal channel angular pressing // *Materials Science and Engineering A*. 2013. V. 581. N. 1. Pp. 104-107.
8. Ivanov A.M. Strengthening of Low-Alloy Steel by Extrusion, Helical Pressing, and Equal-Channel Angular Pressing // *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37. N. 5. Pp. 420-423. DOI: 10.3103/S1068798X17050124.
9. Ivanov A.M., Soshnikova E.P., Argunova A.A., etc. Microstructure and Strength of Welded Joints of Steel after Equal-Channel Angular Pressing // *Materials Science Forum. Nanomaterials by Severe Plastic Deformation: NanoSPD5*, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. V. 667-669. 2011. Pp. 921-924.
10. Ivanov A.M. Impact elasticity of 09G2S low-alloy steel welded sample after heat treatment and equal channel angular pressing // *Factory Laboratory. Material Diagnostics*. 2015. Vol. 81. – No.12. pp. 65-68.
11. Lukin E.S., Ivanov A.M. Low-cycle fatigue of 09G2S steel strengthened with method of intensive plastic deformation // *Fundamental Investigations*. 2015. No.11 (Part 1). pp. 92-95.
12. Botvina L.R. *Destruction: Kinetics, Mechanisms, General Regularities* // Science, 2008. pp. 334.

Ссылка для цитирования:

Иванов А.М., Александрова Е.С. Механизм разрушения сварного образца из низколегированной стали 09Г2С, подвергнутой термообработке и равноканальному угловому прессованию при ударном изгибе // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020. № 8. С. 28 - 32 . DOI: 10.30987/1999-8775-2020-8-28-32.

Статья поступила в редакцию 21.01.20.

Рецензент: д.т.н., профессор, зам. директора по научной работе Института материаловедения

Хабаровского научного центра
Дальневосточного отделения РАН

Химухин С.Н.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 22.07.20.

Сведения об авторах:

Иванов Афанасий Михайлович, к. т. н., вед. науч. сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, e-mail: iam53@mail.ru.

Ivanov Afanasy Michailovich, Can. Sc. Tech., Leading scientific assistant, Federal Research Center “Yakut Scientific Center of RAS SB, Larionov Institute of Physical-Engineering Problems of the North, e-mail: iam53@mail.ru.

Александрова Екатерина Степановна, инженер I категории, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, e-mail: alex_es@list.ru.

Alexandrova Catherine Stepanovna, Engineer of 1st category, Federal Research Center “Yakut Scientific Center of RAS SB, Larionov Institute of Physical-Engineering Problems of the North, e-mail: alex_es@list.ru.