

3. Zorin E. E. Razrabotka osnov prognozirovaniya rabotosposobnosti svarnykh truboprovodov iz ferritno-perlitnykh staley s uchetom uslovii éksplyuatatsii [Development of bases of forecasting performance of welded pipes of ferritic-pearlite steels with the operating conditions]. Author's Abstract of Doctoral Thesis. — Moscow, 1993. — 37 p. [in Russian].
4. Gumerov A. G., Zainullin R. S., Yamaleev K. M., Roslyakov A. V. Starenie trub nefteprovodov [Aging oil pipes]. — Moscow: Nedra, 1995. — 218 p. [in Russian].
5. Lyakishev N. P., Kantor M. M., Belkin A. A., Timofeev V. N. Ob otsenke vliyaniya dlitel'noi éksplyuatatsii na mekhanicheskie svoystva i strukturu metalla magistral'nykh nefteprovodov [An estimate of the impact of long-term operation on the mechanical properties and the metal structure of main oil pipelines] / Zavod Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 1. P. 75 – 82 [in Russian].
6. Lyakishev N. P., Kantor M. M., Voronin V. N., Timofeev V. N., Sharygin Yu. M. Issledovanie struktury metalla gazoprovodov posle ikh dlitel'noi éksplyuatatsii [Investigation of the structure of the metal pipeline after long-term operation] / Metally. 2005. N 1. P. 3 – 16 [in Russian].
7. P'in S. I., Smirnov M. A., Pashkov Yu. I., Anisimov Yu. I., Protopov V. A. Izmenenie struktury i svoystv trubnoi stali vo vremya dlitel'nykh vyderzhkek pod nagruzkoi [Changes in the structure and properties of the pipe steel during long exposures under load] / Izv. Chelyab. Nauch. Tsentra. 2002. N 4. P. 42 – 46.
8. Steklov O. I. Nadezhnost' magistral'nykh gazoprovodov v usloviyakh intensivatsii protsessov korrozii i stareniya [The reliability of the main gas pipelines in the conditions of intensification of processes of corrosion and aging] / Svaroch. Proizv. 2010. N 5. P. 40 – 43.
9. Makhutov N. A., Permyakov V. N., Kravtsova Yu. A., Botvina L. R. Otsenka sostoyaniya materiala produktovoda posle ego dlitel'noi éksplyuatatsii [Assessment of material product pipeline after long-term operation] / Zavod Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 2. P. 35 – 43.
10. Syromyatnikova A. S. Degradatsiya fiziko-mekhanicheskogo sostoyaniya metalla trub magistral'nogo gazoprovoda pri dlitel'noi éksplyuatatsii v usloviyakh kriolitozony [Degradation of the physical and mechanical condition of metal pipes of main gas pipeline in continuous operation in a permafrost zone] / Fiz. Mezomekh. 2014. Vol. 17. N 2. P. 85 – 91.

УДК 620.163.4:672.3

УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ СВАРНОГО ОБРАЗЦА ИЗ СТАЛИ 09Г2С ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ И РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ¹

© А. М. Иванов²

Статья поступила 15 октября 2012 г.

Рассмотрены вопросы обеспечения хладостойкости сварного соединения из низколегированной стали методом интенсивной пластической деформации по способу равноканального углового прессования в сочетании с закалкой. Представлены данные по ударной вязкости образцов Менаже из стали 09Г2С со сварными швами при температуре 233 К. Показано, что при комбинировании способов закалки и равноканального углового прессования более высокие показатели сопротивления разрушению при ударном изгибе и низкой температуре обеспечивает тип сварного соединения с X-образной разделкой кромок заготовок.

Ключевые слова: сталь; ударная вязкость; сварное соединение; закалка; равноканальное угловое прессование; упрочнение; разрушение.

Как известно, качество сварного соединения зависит от множества факторов. Широкие возможности для улучшения свойств сварного соединения открывают методы его обработки в послесварочный период. Дополнительная обработка материалов различными способами продиктована техническими условиями на изделия, требованиями к деталям машин и элементам конструкций по эксплуатационной надежности. Наряду с термообработкой и другими способами на практике применяют деформационную обработку материалов традиционными методами. Но известные деформационные методы обработки незначительно изменяют свойства металлических материалов. В на-

стоящее время достаточно широкое развитие получили методы интенсивной пластической деформации, с помощью которых упрочняют в основном однородные по составу и свойствам заготовки [1 – 3]. Комбинирование методов интенсивной пластической деформации и отжига способствует повышению хладостойкости конструкционных сталей [4 – 6].

Представляет интерес обработка заготовок с неоднородной структурой методами интенсивной пластической деформации. В работе [7] рассмотрен способ обработки заготовок из низкоуглеродистой стали ВСтЗсп со сварным соединением с К- и X-образными разделками швов равноканальным угловым прессованием (РКУП) и приведены характеристики прочности и пластичности материала.

Цель данной работы — исследование влияния термической обработки закалкой и РКУП на низко-температурную ударную вязкость различных зон свар-

¹ Представленная работа является частью исследований, выполненных при финансовой поддержке проектов РФФИ № 12-01-98509 и № 25.7 Программы президиума РАН.

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия;
e-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru



Рис. 1. Общий вид заготовок для сварного соединения с X-образной разделкой швов (а); для сварного соединения с K-образной разделкой швов — заготовки в узле специального приспособления для сварки (б); со сварным швом после выравнивания по диаметру (в)

ного соединения в образцах из низкоуглеродистой стали 09Г2С.

Исследовали сварное соединение из низколегированной стали 09Г2С следующего состава, %: 0,12 С; 0,5 – 0,8 Si; 0,3 Cr; 1,3 – 1,7 Mn; 0,3 Ni; 0,3 Cu, остальное Fe. Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре Foundry-Master фирмы World-wide Analytical Systems AG (WAS AG).

Цилиндрические заготовки из стали 09Г2С со сварным соединением с K-образной и X-образной разделкой швов были подвергнуты закалке и РКУП (рис. 1). Электродуговую сварку заготовок выполняли в нижнем положении электродами «УОНИ-13/45» Ø3 мм с помощью сварочного аппарата «Дуга-318М1»; сварочный ток — 150 А.

Значения ударной вязкости сварного соединения из стали 09Г2С при 233 К

№	Зоны сварного соединения при различных разделках швов и ТМО	KCU, МДж/м ²
Без сварного шва		
1	Основной металл	2,37
X-образная разделка (закалка + РКУП)		
2	ЗТВ	2,3
3	На краю СШ	1,78
K-образная разделка		
4	ЗТВ (РКУП)	0,93
5	ЗТВ (закалка + РКУП)	2,01

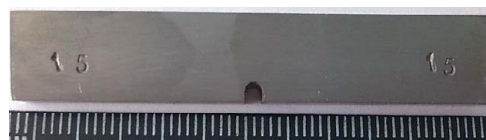


Рис. 2. Надрез Менаже в сварном соединении с K-образной разделкой

Ударную вязкость стали 09Г2С определяли на образцах:

1) без сварного шва;

2) с X-образной разделкой с выполнением U-образных надрезов на крае сварного шва и в зоне термического влияния (ЗТВ); термомеханическая обработка (ТМО) по режимам — закалка в воде от 1203 К и РКУП по маршруту С (поворот заготовки относительно ее продольной оси перед каждым последующим циклом прессования на угол 180°) в $n = 2$ прохода при температуре 823 К;

3) с K-образной разделкой с выполнением U-образного надреза в ЗТВ; ТМО по двум режимам: РКУП по маршруту С, $n = 2$; закалка в воде от 1203 К и РКУП по маршруту С, $n = 2$.

РКУП объемных заготовок размером Ø20 × 100 мм со сварными швами осуществляли с помощью гидравлического пресса ПСУ-125 с максимальным усилием 125 т (при угле пересечения каналов в технологической оснастке 120°).

Для визуализации сварного шва и выбора места выполнения U-образного надреза (рис. 2) поверхность образца травили в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Надрезы Менаже в образцах выполняли в основном металле и ЗТВ с центром на расстоянии 1,5 мм от края сварного шва, а также на краю сварного шва. Испытания образцов Менаже на ударную вязкость проводили на копре Zwick/Roell RKP-450 при температуре $T = 233$ К.

Как известно, РКУП приводит к существенному изменению структуры и механических свойств. А комбинация закалки и РКУП обеспечивает еще большее измельчение зерен и повышение прочностных характеристик [5].

Характеристики сопротивления разрушению, полученные при испытаниях на ударный изгиб образцов Менаже из стали 09Г2С при температуре испытания 233 К, представлены в таблице. Среднее значение ударной вязкости определяли по испытаниям на ударный изгиб 5 – 12 образцов. Видно, что наибольшее значение ударной вязкости KCU имеет образец с надрезом в основном металле. Ударная вязкость сварного соединения с X-образной разделкой незначительно снижается в ЗТВ. При одинаковых режимах обработки (закалка + РКУП), но разных разделках швов более высокое значение ударной вязкости наблюдается для сварного соединения с X-образной разделкой (см. таблицу, пп. 2 и 5). При этом же режиме обработки (закалка + РКУП) у образцов с надрезом на краю сварно-

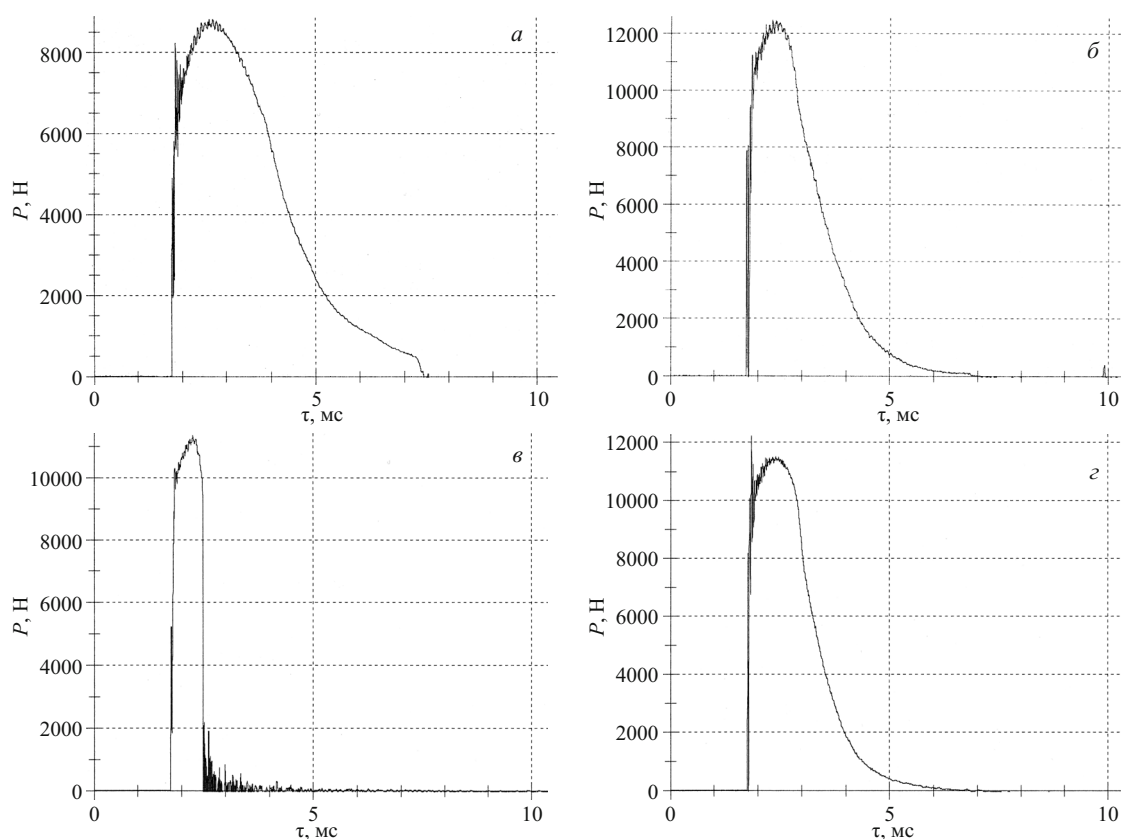


Рис. 3. Диаграммы нагружения образцов Менаже из стали 09Г2С при температуре 233 К с надрезом: в основном металле (*а*), в ЗТВ образца с Х-образным сварным швом, подвергнутого закалке и РКУП (*б*); в ЗТВ образцов с К-образным сварным швом после РКУП (*в*) и после закалки и РКУП (*г*)

го шва ударная вязкость примерно на 20 % ниже, чем у образцов с надрезом в ЗТВ.

Диаграммы нагружения ударных образцов представлены на рис. 3.

При температуре испытания 233 К образец из стали 09Г2С с надрезом в основном металле и образцы, соответствующие пп. 2 и 5 (см. таблицу), полностью не разрушились (рис. 4, *а, б, д*). Ударные изломы, за исключением образцов с самыми низкими значениями K_{CU} (пп. 3 и 4), — светлые, матовые с выраженной рельефностью. Для образца с надрезом в основном металле и образцов, подвергнутых закалке и РКУП, с надрезом в ЗТВ характерно наличие значительной утяжки по их толщине в устье надреза и губ среза, которые являются результатом образования и развития зоны сдвига. Такой вид излома свидетельствует о вязком характере зарождения трещины и высоком значении работы удара, затраченной на ее зарождение, что подтверждают и диаграммы нагружения ударных образцов (см. рис. 3, *а, б, г*).

На поверхности этих же образцов направление движения трещины составляет примерно 30° к линии продолжения надреза. Большая часть работы ударного разрушения расходуется на формирование губ среза, занимающих значительную часть излома и в которых разрушение происходит по вязкому механизму. Доля зоны хрупкого разрушения в изломе образца с Х-

разным сварным швом и надрезом на краю шва, подвергнутого закалке и РКУП, составляет примерно 50 % (см. рис. 4, *в*). Ударная вязкость образца с К-образным сварным швом и надрезом в ЗТВ, подвергнутого только РКУП, равно $0,93 \text{ МДж/м}^2$, т.е. самая низкая. Область нестабильного хрупкого разрушения, которая характеризуется изменением траектории трещины на расстоянии примерно 0,65 от ее длины и неоднородностью поверхности излома, занимает практически всю поверхность разрушения образца, за исключением небольшой зоны в вершине надреза, соответствующей этапу зарождения и развития вязкой трещины, — области докритического стабильного роста трещины (см. рис. 4, *г*). Диаграмма разрушения образца с К-образным сварным швом и надрезом в ЗТВ после РКУП (см. рис. 3, *в*) свидетельствует о низком сопротивлении материала к зарождению и распространению хрупкой трещины. Как известно, обработка РКУП, а также комбинированием закалки и РКУП приводит к измельчению зерен и значительному повышению характеристик прочности сталей [6]. При этом увеличение предела текучести при термомеханической обработке вызывает снижение параметра энергоемкости K_y (энергоемкость на стадии докритического роста трещины), а уменьшение размера зерна, наоборот, — повышение K_y [8] и возрастание сопротивления разрушению на стадии распространения



Рис. 4. Общий вид разрушенных при 233 К образцов Менаже из стали 09Г2С с надрезом: в основном металле (а); в ЗТВ (б) и на краю сварного шва (в) образцов с Х-образным сварным швом, подвергнутых закалке и РКУП; в ЗТВ после РКУП (г) и в ЗТВ после закалки и РКУП (д) образцов с К-образным сварным швом

трещины. Для выявления механизма ударного разрушения сварных образцов необходимо изучение микрорельефа изломов.

Таким образом, сварное соединение с Х-образной разделкой кромок заготовок при прочих равных условиях имеет более высокие значения ударной вязкости, чем сварное соединение с К-образной разделкой. Комбинирование закалки и РКУП дает возможность управлять не только прочностью и пластичностью стали, но и свойствами, характеризующими сопротивление хрупкому разрушению. Оптимальный выбор типа сварного шва, режима комбинированной обработки, сочетающей закалку и РКУП, позволит получить сварное соединение с необходимыми эксплуатационными свойствами.

Процедура комбинированной ТМО должна быть направлена на оптимизацию соотношения работы зарождения и распространения трещины в пользу увеличения работы распространения трещины для повышения хладостойкости стали при сохранении достаточно высокого уровня прочности. Результаты исследования могут быть полезны при разработке технологий обработки и повышения хладостойкости конструкционных сталей со сварными швами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев Р. З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. — М.: Академкнига, 2007. — 398 с.
2. Валиев Р. З., Александров И. В. Парадокс интенсивной пластической деформации металлов / Доклады РАН. 2001. Т. 380. № 1. С. 34 – 37.
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. Рааб Г. И., Иванов А. М., Гундеров Д. В. и др. Повышение прочности и хладостойкости конструкционных сталей интенсивной пластической деформацией и термической обработкой / II Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО-2007». Тезисы докладов. — Новосибирск, 2007. С. 390.

5. Прогрессивные машиностроительные технологии. Т. 1 / Под ред. А. В. Киричека. — М.: Издательский дом «Спектр». 2012. С. 230 – 262.
6. Иванов А. М., Сыромятникова А. С., Петрова Н. Д. Упрочнение интенсивной пластической деформацией и разрушение конструкционной стали / Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 3. С. 39 – 42.
7. Ivanov A. M., Soshnikova E. P., Argunova A. A., Gunderov D. V., Petrova N. D. 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, 2011. Vol. 667 – 669. P. 921 – 924.
8. Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.

REFERENCES

1. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. Ob’emnye nanostrukturnye metalliche-skie materialy: poluchenie, struktura i svoystva [Bulk nanostructured metallic materials: synthesis, structure and properties]. — Moscow: Akademkniga, 2007. — 398 p. [in Russian].
2. Valiev R. Z., Aleksandrov I. V. Paradoks intensivnoi plasticheskoi deformatsii metallov [The paradox of severe plastic deformation of metals] / Dokl. RAN. 2001. Vol. 380. N 1. P. 34 – 37.
3. Séstri Sh. M. L., Dobatkin S. V., Sidorova S. V. Formirovanie submikrokristallicheskoi struktury v stali 10G2FT pri kholodnom rovnokanal’nom uglovom pressovanii i posleduyushchem nagreve [Formation submicrocrystalline structure in steel 10G2FT at cold equal-channel angular pressing and subsequent heat] / Metally. 2004. N 2. P. 28 – 35 [in Russian].
4. Raab G. I., Ivanov A. M., Gunderov D. V. i dr. Povyshenie prochnosti i khladoistoikosti konstruksionnykh staley intensivnoi plasticheskoi deformatsiei i termicheskoi obrabotkoi [Increase strength and cold resistance of structural steels by severe plastic deformation and thermal treatment] / II All-Russian Conf. on Nanomaterials “NANO-2007.” — Novosibirsk, 2007. P. 390 [in Russian].
5. Progressivnye mashinostroitel’nye tekhnologii [Advanced engineering technology]. Vol. 1 / A. Kirichek (ed.). — Moscow: Izd. dom «Spektr». 2012. P. 230 – 262 [in Russian].
6. Ivanov A. M., Syromyatnikova A. S., Petrova N. D. Uprochnenie intensivnoi plasticheskoi deformatsiei i razrushenie konstruksionnoi stali [Strengthening by severe plastic deformation and fracture of structural steel] / Uprochn. Tekhnol. Pokryt. 2012. N 3. P. 39 – 42 [in Russian].
7. Ivanov A. M., Soshnikova E. P., Argunova A. A., Gunderov D. V., Petrova N. D. 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, 2011. Vol. 667 – 669. P. 921 – 924.
8. Botvina L. R. Razrushenie: kinetika, mekhanizmy, obshchie zakonomenosti [Destruction: kinetics, mechanisms, general regularities]. — Moscow: Nauka, 2008. — 334 p. [in Russian].