УДК [691.714:620.18:669.018.58-122-418]:621.77.016.3

© В. Е. Гордиенко, д-р техн. наук, профессор

© А. А. Абросимова, аспирант

© Е. В. Трунова, учебный мастер

© А. П. Щербakov, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: val-gor@yandex.ru, fotka3000@list.ru,

elena.trunova.80@mail.ru, shurbakov.aleksandr@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-233-238

© V. E. Gordienko, Dr. Sci. Tech., Professor

© A. A. Abrosimova, post-graduate student

© E. V. Trunova, educational master

© A. P. Scherbakov, post-graduate student

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: val-gor@yandex.ru, fotka3000@list.ru,

elena.trunova.80@mail.ru, shurbakov.aleksandr@yandex.ru

К ВЫБОРУ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

ABOUT SELECTING OF STRUCTURAL STEELS FOR THE PRODUCTION OF WELDED METAL DESIGNS OF CONSTRUCTION MACHINES

Для малоуглеродистых 08, 10, 20, Ст3 и низколегированных сталей 09Г2С и 10ХСНД разработаны оптимальные режимы термоциклической обработки с целью получения конечных структур с заданной степенью дисперсности, характерных для реальных сварных металлоконструкций. Установлено, что степень дисперсности получаемых структур зависит от исходной микроструктуры, химического состава сталей и числа циклов термоциклической обработки (ТЦО). Наличие менее крупнозернистой исходной структуры, увеличение степени легированности сталей и числа циклов ТЦО способствует получению более мелкозернистой структуры. Показано, что предварительная холодная пластическая деформация позволяет получить наиболее мелкозернистую микроструктуру в исследуемых сталях, степень дисперсности которой возрастает с увеличением степени пластической деформации.

Ключевые слова: малоуглеродистые и низколегированные стали, металлические конструкции, термоциклическая обработка, холодная пластическая деформация.

For low-carbon 08, 10, 20, St3 and low-alloy steels 09G2S and 0KhSND, there have been developed optimal modes of thermal cyclic treatment in order to obtain final structures with a specified degree of dispersion typical for real welded metal structures. It has been established that the degree of dispersion of the structures obtained depends on the initial microstructure, chemical composition of the steels, and the number of cycles in thermal cyclic processing (TCP). The availability of a less coarse-grained initial structure, an increase in the degree of steel alloying and the number of cycles of the TCP contributes to the production of a finer-grained structure. It is shown that preliminary cold plastic deformation makes it possible to obtain the most fine-grained microstructure in the steels under study, the degree of dispersion of which increases with the degree of plastic deformation.

Keywords: low-carbon and low-alloy steels, metal constructions, thermal cycle processing, cold plastic deformation.

Одной из особенностей сварных металлоконструкций (МК) строительных машин является то, что они обычно эксплуатируются в различных климатических и погодных условиях при наличии статических, динамических и циклических нагрузок и разнообразных режимов нагружения. При этом элементы сварных МК могут подвергаться воздействию агрессивных коррозионных сред, приводящих к коррозионному износу, а следовательно, и к изменению физико-механических

свойств конструкционных сталей. Появляющаяся коррозия может значительно снижать прочностные и деформационные свойства сталей, ускорять изнашивание и усталостные разрушения металла. В связи с этим конструкционная сталь для изготовления сварных МК должна быть выбрана таким образом, чтобы в процессе длительной эксплуатации обеспечивались необходимая надежность и конструкционная безопасность ее

элементов с минимальными затратами на изготовление [1].

Одним из обязательных требований для конструкционных сталей, используемых в сварных металлоконструкциях, является наличие высокой пластичности. Это обусловлено тем, что в результате возникновения и развития различных концентраторов и остаточных сварочных напряжений в отдельных зонах сварных соединений и элементах металлоконструкций могут проходить местные пластические деформации, поэтому конструкционная сталь должна иметь необходимый запас пластичности, чтобы выдерживать такие деформации без разрушения металла.

При эксплуатации сварных МК, особенно в области отрицательных температур, выбранная сталь должна иметь необходимую пластичность при самой низкой температуре из возможных рабочих температур. Наиболее чувствительны к низким температурам кипящие малоуглеродистые стали, в меньшей степени — спокойные, и наиболее пластичными при низких температурах являются низколегированные стали.

При работе сварных МК в агрессивных средах и в атмосфере различной степени загрязненности коррозия металла углеродистых сталей происходит значительно быстрее, чем у низколегированных, поэтому в таких случаях необходимо брать стали с повышенными антикоррозионными свойствами, содержащими в себе никель, хром, медь.

Следует отметить, что снижение пластичности низколегированных сталей вызывает их повышенную чувствительность к различного рода концентраторам напряжений. Однако по сравнению с углеродистыми сталями они имеют более высокие механические свойства за счет упрочнений феррита такими легирующими элементами, как Mn, Si, Ni, Cr, Cu и другими в количестве менее 2,5 %. Применение низколегированных сталей дает возможность в значительной степени снизить металлоемкость сварных МК, сэкономить большое количество металла и повысить его коррозионную стойкость.

Малоуглеродистые и низколегированные стали широко применяются для изготовления сварных МК строительных машин, магистральных нефте- и газопроводов, в машиностроении и других отраслях промышленности как в со-

стоянии заводской поставки, так и термоупрочненными [2].

Учитывая вышесказанное, для проведения экспериментальных механических и коррозионных испытаний были выбраны конструкционные стали с различным химическим составом: малоуглеродистые 08 (в качестве модельного материала), 10, 20, Ст3 и низколегированные стали 09Г2С и 10ХСНД. Химический состав сталей приведен в табл. 1.

Выбор этих сталей обусловлен следующим:

- стали широко применяются при изготовлении сварных МК строительных машин, в машиностроении и других отраслях промышленности;
- имеют высокие характеристики пластичности при обычных и низких температурах;
- имеют различный химический состав;
- имеют разные категории прочности и разную склонность к циклическому упрочнению и разупрочнению;
- обладают хорошей свариваемостью;
- имеют повышенные и обычные антикоррозионные свойства;
- выбор исследуемых сталей дает возможность распространить полученные закономерности на все стали, близкие к ним как по составу, так и по свойствам;
- ввиду низкого содержания углерода выбранные стали могут использоваться для изучения физики магнитомеханического явления.

Для изготовления сварных МК строительных машин заводской прокат может поставляться в различных состояниях (табл. 2), что определяет исходную структуру металла (крупнозернистую, мелкозернистую, деформированную), а следовательно, и механические свойства стали в элементах сварных МК [3].

С целью повышения достоверности результатов экспериментальных исследований выбранные стали подвергались различным видам предварительной обработки и последующей термоциклической обработке (ТЦО) для получения различных исходных микроструктур с заданной степенью дисперсности, характерных для реальных эксплуатируемых сварных МК и других изделий [4, 5]:

- состояние заводской поставки;
- высокотемпературный отжиг;

Таблица 1

Химический состав сталей

Марка стали	Химический состав, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
08	0,09	0,013	0,33	0,015	0,006	0,03	0,02	0,03
10	0,08	0,09	0,45	0,02	0,014	0,03	0,02	0,04
20	0,21	0,18	0,38	0,032	0,025	0,012	0,03	0,05
Ст3	0,19	0,21	0,53	0,034	0,032	0,06	0,03	0,07
09Г2С	0,11	0,68	1,33	0,008	0,015	0,03	0,02	0,03
10ХСНД	0,10	0,64	0,56	0,006	0,013	0,65	0,53	0,44

Таблица 2

№	Состояние поставляемого проката
1	Горячекатаный
2	Нормализованный
3	После термической обработки с прокатного нагрева
4	После термического улучшения (закалка + высокотемпературный отпуск)
5	Холоднокатаный
6	После термической обработки холоднокатаных листов

- нормализация;
- температура отжига и нормализации для сталей 08, 20, Ст3, 09Г2С и 10 ХСНД составляла 900 °С, для стали 10 — 920 °С, время выдержки 30 мин;
- закалка и высокотемпературный отпуск для стали 20 проводились при температурах 880 °С и 600 °С соответственно;
- термоциклическая обработка для исследуемых сталей осуществлялась при температуре 770 °С и последующем охлаждении на воздухе;
- холодная пластическая деформация (дробная прокатка) стали на степень деформации 20 и 50 %;
- термоциклическая обработка сталей после холодной пластической деформации.

Процесс формирования микроструктуры конструкционных сталей в процессе термического, термоциклического и деформационного воздействий контролировался с помощью микроструктурного анализа и пассивного феррозондового метода.

Наиболее крупнозернистая и равноосная структура в малоуглеродистых и низколегированных сталях получается в процессе высоко-

температурного отжига, тогда как для получения мелкого зерна положительные результаты достигаются за счет фазовых превращений. Например, в доэвтектоидных сталях мелкозернистая структура формируется после горячей деформации в двухфазной аустенитно-ферритной области [6, 7].

Проведенный анализ показал, что наиболее эффективным способом значительного измельчения зерен в конструкционных сталях является термоциклическая обработка, основанная на многократном циклическом нагреве сталей (аустенизация) и последующем охлаждении после каждого цикла. При этом сильное измельчение зерен сопровождается уменьшением разнотерности и более однородным распределением химических элементов, что обусловлено интенсификацией диффузионных процессов за счет усиления теплофизических факторов [8].

Металлографические исследования показали, что независимо от химического состава и исходной структуры исследуемых сталей после ТЦО во всех случаях формируется мелкозернистая структура с различной степенью дисперсности. Типичные структуры сталей после ТЦО приведены на рис. 1–3. Наибольшие изменения структуры сталей происходят в процессе первых 3–6 циклов ТЦО. Дальнейшее повышение числа циклов менее значительно повышает степень измельчения структуры, однако уменьшает разнотерность сталей. Аналогичная картина характерна и для других сталей с различным исходным структурным состоянием. Поэтому для получения оптимальной мелкозернистой структуры в конструкционных сталях требуется от 3 до 6 циклов ТЦО.

Исходная структура сталей перед ТЦО существенно влияет на конечный размер зерен. Более

Рис. 1. Изменение структуры стали 09Г2С при термоциклической обработке, $\times 650$: а — состояние поставки; б, в — после трех и шести циклов соответственно

Рис. 2. Изменение структуры стали 08пс при термоциклической обработке, $\times 650$: а — состояние (поставка + отжиг при 900 °С); б, в — после трех и шести циклов соответственно

Рис. 3. Изменение структуры стали 10ХСНД при термоциклической обработке, $\times 650$: а — состояние (поставка + прокатка на $\epsilon = 50\%$); б, в — после 3-го и 6-го циклов соответственно

крупнозернистой структуре сталей (поставка + отжиг при 900 °С) по сравнению со структурой в состоянии поставки соответствует и более крупнозернистая структура после термоциклической обработки [9] (см. рис. 1, 2).

Наличие деформированной структуры конструкционных сталей перед проведением ТЦО вносит существенные изменения в процессе структурных превращений как для малоуглеродистых, так и для низколегированных сталей. При этом формируется более мелкозернистая структура в отличие от других видов предварительной обработки (см. рис. 3) [10, 11].

Более высокое измельчение структуры при ТЦО после холодной пластической деформации

авторы [8] объясняют тем, что в ходе пластической деформации происходит перераспределение и повышение плотности дислокаций, вакансий, дефектов упаковки, интенсифицируется образование и развитие мало- и высокоугловых границ. Так как дефекты кристаллической решетки значительно влияют на формирование структуры сталей при фазовых и структурных превращениях, холодную пластическую деформацию перед ними можно эффективно использовать для создания оптимальной структуры при ТЦО сталей [12].

Следует отметить, что в низколегированных сталях 09Г2С и 10ХСНД после шестикратного термоциклирования по сравнению с малоугле-

родистыми сталями 08, 10, 20 и Ст3 формируется более мелкозернистая структура. Однако в сталях 09Г2С и 10ХСНД для получения мелкозернистой структуры без заметной разнородности требуется большее число циклов ТЦО, чем для малоуглеродистых сталей, что, вероятно, связано с влиянием легирующих элементов на формирование конечной микроструктуры в процессе ТЦО. У легированных сталей термодинамическая активность углерода ниже, чем в углеродистых сталях, и, следовательно, структурные изменения при ТЦО в них происходят медленнее. Поэтому при увеличении количества легирующих элементов в стали для получения равноосной мелкозернистой структуры требуется большее число циклов ТЦО.

Учитывая тот факт, что в районе низких температур с уменьшением размера зерен повышаются пределы текучести, прочности, ударная вязкость и усталостная прочность [13, 14], то получение мелкозернистой структуры в процессе ТЦО можно использовать при усилении элементов сварных МК и сварных соединений строительных машин в локальных опасных зонах концентрации напряжений за счет измельчения структуры металла по разработанному режимам ТЦО.

Выводы

1. Установлено, что независимо от химического состава и исходной структуры малоуглеродистых 08, 10, 20, Ст3 и низколегированных сталей 09Г2С и 10ХСНД в процессе термоциклической обработки у них формируется мелкозернистая структура с разной степенью дисперсности, характерная для реальных сварных металлических конструкций строительных машин. Наибольшие структурные изменения металла происходят в течение первых 3–6 циклов ТЦО. Дальнейшее увеличение числа циклов незначительно повышает степень измельчения структуры, однако снижает разнородность.

2. Показано, что более крупнозернистой структуре (поставка + отжиг и поставка + нормализация) по сравнению со сталью в состоянии заводской поставки соответствует и более крупнозернистая структура после ТЦО.

3. В низколегированных сталях по сравнению с малоуглеродистыми в процессе ТЦО формируется более мелкозернистая структура, что вероятно связано с более низкой термодинамической

активностью углерода, вследствие чего структурные изменения при ТЦО в них происходят медленнее, и поэтому с увеличением легирующих элементов в стали требуется большее число циклов для получения равноосной мелкозернистой структуры.

4. Установлено, что холодная пластическая деформация интенсифицирует прохождение структурных превращений в металле при ТЦО, в результате чего формируется более мелкозернистая структура, чем у стали после отжига, нормализации или в состоянии заводской поставки. Дисперсность структуры возрастает по мере увеличения степени холодной пластической деформации.

Библиографический список

1. Гордиенко В. Е., Березина А. А. Техническое диагностирование сварных металлоконструкций промышленных зданий, сооружений и строительных машин. СПб.: СПбГАСУ, 2015. 244 с.
2. Безлюдько Г. Я., Мужицкий В. Ф., Попов Б. Е. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) НДС и остаточного ресурса стальных МК // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. № 9. Т. 65. С. 53–57.
3. Справочник по кранам: в 2 т. / под ред. М. М. Гохберга. Л.: Машиностроение, 1989. Т. 1: Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций. Л.: Машиностроение, 1988. 536 с.
4. Гордиенко В. Е. Сварные конструкции промышленных зданий, сооружений и строительных машин. Оценка технического состояния применения пассивного феррозондового метода. СПб.: СПбГАСУ, 2012. 315 с.
5. Гордиенко В. Е., Абросимова А. А., Трунова Е. В., Корнеева Е. А., Щербаков А. П. Влияние структурных параметров конструкционных сталей на результаты оценки напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 194–199.
6. Morrison W. B. Superplasticity of low-alloy steels // ASM Trans Quart. 1968. Vol. 61. № 3. Pp. 423–434.
7. Болдырев А. М. Технология сварки в строительстве. Воронеж: ВГУ, 1987. 196 с.
8. Федюкин В. К., Смагоринский М. Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.
9. Гордиенко В. Е. Научные основы неразрушающего контроля металлических конструкций по остаточной намагниченности в области Рэлея: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2009. 46 с.

10. Гордиенко В. Е., Абросимова А. А., Трунова Е. В. Влияние холодной пластической деформации на структурную неоднородность сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 1 (54). С. 127–131.

11. Гордиенко В. Е., Абросимова А. А., Трунова Е. В. Влияние термоциклической обработки на структурные изменения пластически деформированных сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 174–180.

12. Власова О. А. Повышение эксплуатационных свойств инструментальных сталей методами термоциклической обработки: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2009. 186 с.

13. Сверхмелкое зерно в металлах: пер. с англ. В. В. Романеева и А. А. Григорьяна; под ред. Л. К. Гордиенко. М.: Металлургия, 1973. 384 с.

14. Floreen S., Hayden H. W. The deformation and fracture of stainless steels having microduplex structures (Deformation characteristics and fracture strength of Cr-Ni stainless steels with fine scale two phase ferrite plus austenite microstructures) // ASM TRANSACTIONS QUARTERLY. 1968. Vol. 61. Pp. 474–488.

References

1. Gordienko V. E., Berezina A. A. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie svarnykh metallokonstruktsiy promyshlennykh zdaniy, sooruzheniy i stroitel'nykh mashin* [Technical diagnosing of welded metalwork of industrial buildings, constructions and construction machines]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2015, 244 p.

2. Bezlyud'ko G. Ya., Muzhitskiy V. F., Popov B. E. *Magnitnyy kontrol' (po koehrsitivnoy sile) NDS i ostatochnogo resursa stal'nykh MK* [Magnetic control (on coercive force) VAT and residual resource of steel metal constructions]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 1999, no. 9, no. 65, pp. 53–57.

3. *Spravochnik po kranam. V 2 t.* [Reference book on cranes. In 2 parts]. Ed. by Gokhberg M. M. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, vol. 1.

4. Gordienko V. E. *Svarnye konstruktsii promyshlennykh zdaniy, sooruzheniy i stroitel'nykh mashin. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya primeneniya passivnogo ferrozondovogo metoda* [Welded construction of industrial buildings, structures and construction machinery. Technical assessment of application of passive fluxgate method]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2012, 315 p.

5. Gordienko V. E., et al. *Vliyanie strukturnykh parametrov konstruktsionnykh staley na rezul'taty otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarnykh*

metallokonstruktsiy [Influence of the structure parameters of structural steel on the assessment results of intense stress and strain state of welded metalwork]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 6 (59), pp. 194–199.

6. Morrison W. B. Superplasticity of low-alloy steels. *ASM Trans Quart.*, 1968. Vol. 61. № 3. Pp. 423–434.

7. Boldyrev A. M. *Tekhnologiya svarki v stroitel'stve* [Technology of welding in construction.]. Voronezh, VSU, 1987, 196 p.

8. Fedyukin V. K., Smagorinskiy M. E. *Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detaley mashin* [Thermal cyclic processing of metals and details of cars]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 255 p.

9. Gordienko V. E. *Nauchnye osnovy nerazrushayushchego kontrolya metallicheskh konstruktsiy po ostatochnoy namagnichennosti v oblasti Rehleya. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Scientific basics of non-destructive control of metal designs on residual magnetization in the Rayleigh region. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2009, 46 p.

10. Gordienko V. E., Abrosimova A. A., Trunova E. V. *Vliyanie kholodnoy plasticheskoy deformatsii na strukturnuyu neodnorodnost' svarnykh soedineniy metallicheskh konstruktsiy stroitel'nykh mashin* [The influence of cold plastic deformation on the structural heterogeneity of welded joints of metal constructions of building machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 1 (54), pp. 127–131.

11. Gordienko V. E., Abrosimova A. A., Trunova E. V. *Vliyanie termotsiklicheskoy obrabotki na strukturnye izmeneniya plasticheski deformirovannykh svarnykh soedineniy metallicheskh konstruktsiy stroitel'nykh mashin* [The influence of thermocyclic treatment on structural changes in plastically deformed welded joints of building machine metal constructions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 2 (55), pp. 174–180.

12. Vlasova O. A. *Povyshenie ehkspluatatsionnykh svoystv instrumental'nykh staley metodami termotsiklicheskoy obrabotki. Diss. kand. tekhn. nauk* [Increase in operational properties of industrial steel by methods of thermal cyclic processing]. Barnaul, 2009, 186 p.

13. *Sverkhmelkoe zerno v metallakh* [Super-fine grain in metals]. Transl. from English by Romaneev V. V., Grigor'yan A. A. Ed. by Gordienko L. K.. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973, 384 p.

14. Floreen S., Hayden H. W. The deformation and fracture of stainless steels having microduplex structures (Deformation characteristics and fracture strength of Cr-Ni stainless steels with fine scale two phase ferrite plus austenite microstructures). *ASM TRANSACTIONS QUARTERLY*, 1968, vol. 61, pp. 474–488.