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, старший преподаватель

© О. В. Кузьмин, канд. техн. наук

© Е. В. Трунова, учебный мастер

© А. П. Щербakov, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: val-gor@yandex.ru, anzhelicka.abrosimova@yandex.ru,

ov-kuzmin@yandex.ru, elena.trunova.80@mail.ru,

shurbakov.aleksandr@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-128-133

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

© A. A. Abrosimova, senior teacher

© O. V. Kuz'min, PhD in Sci. Tech.

© 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, anzhelicka.abrosimova@yandex.ru,

ov-kuzmin@yandex.ru, elena.trunova.80@mail.ru,

shurbakov.aleksandr@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

THE INFLUENCE OF THERMAL AND THERMAL-CYCLE PROCESSING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEEL

Установлено, что прочностные свойства конструкционных сталей 08, 10, 20, Ст3, 09Г2С и 10ХСНД значительно зависят от вида режимов термической и термоциклической обработок (ТЦО). Увеличение числа циклов ТЦО до 3–6 значительно повышает прочность металла относительно высокотемпературного отжига и нормализации. При дальнейшем увеличении числа циклов процесс повышения прочности металла замедляется. Наличие легирующих элементов в сталях, снижая термодинамическую активность углерода, замедляет структурные превращения металла, что требует для их активизации, по сравнению с углеродистыми сталями, или повышения температуры термоциклирования, или увеличения числа циклов. Эффект повышения прочностных свойств металла в процессе контролируемой ТЦО пассивным феррозондовым методом можно использовать при усилении опасных локальных зон концентрации напряжений в сварных соединениях и элементах сварных металлоконструкций.

Ключевые слова: малоуглеродистые и низколегированные стали, металлические конструкции, термоциклическая обработка, пассивный феррозондовый метод.

It has been established that the strength properties of structural steels 08, 10, 20, St3, 09G2S and 10HSND substantially depend on the mode of thermal and thermal-cycle processing (TP). Increasing the number of TP cycles to 3–6 significantly increases the strength of the metal in relation to high-temperature annealing and normalization. With a further increase in the number of cycles, the process of increasing the strength of the metal slows down. The presence of alloying elements in steels, reducing the thermodynamic activity of carbon, slows down the structural transformations of the metal, which requires for them to be activated, in comparison with carbon steels, the increase of the thermal cycling temperature, or the increase of the number of cycles. The effect of increasing the strength properties of the metal in the process of the controlled TCP including the application of passive ferro-probe technique can be used in case of the dangerous local stress concentration zones strengthening in welded joints and elements of welded metal structures.

Keywords: low-carbon and low-alloy steels, metal constructions, thermal cycle processing, passive ferro-probe technique.

Известно, что значительное влияние на возникновение аварий сварных металлоконструкций (МК) оказывают эксплуатационные, конструкционные и технологические причины [1]. Эксплуатационным причинам способствует длительная работа сварных МК и рабочие условия

нагрузки: статические, динамические, циклические и ударные нагрузки; переменные температуры эксплуатации, воздействия агрессивных коррозионных сред и абразивный износ.

К конструкционным причинам можно отнести следующее: сложность формы сварных ме-

таллоконструкций (разнотолщинность стенок изделий, резкие переходы от одной толщины к другой), конструкционные непровары, вызывающие повышенную интенсивность действующих напряжений в опасных локальных зонах концентрации напряжений (КН).

Для технологических причин характерна структурная, механическая и химическая неоднородность металла по различным зонам сварных соединений и сварочные дефекты. При этом такие дефекты, как трещины, непровары, подрезы, шлаковые включения, газовые поры, несплавления и другие, значительно повышают склонность сварных соединений к образованию опасных локальных зон КН, что, конечно, требует своевременного периодического контроля технического состояния сварных МК [2–4].

Следует подчеркнуть, что исходная структура металла (крупнозернистая, мелкозернистая, деформированная) определяет механические свойства металла в элементах сварных МК и сварных соединениях. В связи с этим оценка влияния термической и термоциклической обработок на механические свойства конструкционных сталей с различным химическим составом в зависимости от структурного состояния металла является актуальной задачей.

Привлечение термоциклической обработки (ТЦО) в нашем случае объясняется тем, что она является наиболее эффективным способом получения мелкозернистых структур с заданной степенью дисперсности. ТЦО основана на накоплении положительных изменений в структуре металлов от цикла к циклу нагревов и охлаждений. При этом очень важным является отсутствие выдержек при крайних температурах, а также простой выбор оптимального рабочего диапазона изменения температуры.

При ТЦО резко изменяется микроструктура, субструктура и дислокационная структура. При этом главным структурным изменением в сталях является высокая степень измельчения зерна, будь это феррит, перлит, мартенсит или другая структура. В процессе ТЦО измельчение зерен сопровождается уменьшением разнотолщинности и однородным распределением химических элементов.

При ТЦО появляется возможность получения микроструктур металла, характерных для

поставляемого заводского проката, а также получения мелкозернистой структуры, недостижимых при обычных видах термической обработки. Такую возможность ТЦО можно использовать для восстановления структуры металла и усиления опасных локальных зон концентрации напряжений в элементах сварных МК и сварных соединениях, обладающих структурной неоднородностью, за счет получения в них более мелкозернистой структуры с повышенными прочностными свойствами. Однако разработка оптимальных режимов ТЦО (температуры нагрева, число циклов, характер охлаждения и т. д.) для каждой стали носит индивидуальный характер и не может переноситься механически от одной стали к другой.

Таким образом, ТЦО является весьма эффективной обработкой при восстановлении прочностных свойств конструкционных сталей в опасных зонах КН, дающей возможность повысить надежность и долговечность сварных МК при их длительной эксплуатации. Это объясняется тем, что локальные зоны КН малы по сравнению с элементами сварных МК, особенно в сварных соединениях, поэтому обычные методы усиления при сварке к ним практически не применимы, так как могут не только повысить трудоемкость, но и снизить надежность и безопасность сварных металлоконструкций в целом.

Для проведения исследований были выбраны широко применяемые в строительстве, машиностроении и других отраслях промышленности конструкционные стали 08, 10, 20, Ст3, 09Г2С и 10ХСНД. Выбор материала исследований и его обоснование приведены в работе [5], при этом был учтен тот факт, что для повышения степени достоверности результатов технического диагностирования длительно эксплуатируемых сварных МК экспериментальные исследования на лабораторных образцах необходимо проводить в тех же структурных состояниях, которые соответствуют реальным эксплуатируемым сварным металлоконструкциям, а также с той же структурной неоднородностью сварных соединений [2, 6].

Для проведения исследований из стальных листов поперек прокатки вырезались пластины

шириной 30 и длиной 150 мм, которые подвергались различным видам термической обработки.

Механические испытания исследуемых сталей совершались в разных структурных состояниях на поверенной разрывной машине в упругопластической области деформирования. Скорость растяжения составляла 2 мм/мин. В процессе испытаний оценивалась пластичность по относительному удлинению, предел прочности и предел текучести. Методика термической обработки образцов включала в себя проведение высокотемпературного отжига, нормализации и термоциклической обработки, контролируемой пассивным феррозондовым методом. Термическая обработка проводилась в программируемых муфельных печах с микропроцессорным управлением СНОЛ 8.2/1100 и СНОЛ 30.0/1100.

Механические свойства хорошо сваривающихся и наиболее широко применяемых конструкционных сталей Ст3 и 10ХСНД после высокотемпературного отжига при 1050 °С и последующей 1–10-кратной ТЦО при 770 °С приведены в табл. 1. Для сравнения приведены свойства модельной стали 08, имеющей низкое содержание углерода.

Видно, что как для малоуглеродистых сталей 08 и Ст3, так и низколегированной стали 10ХСНД после ТЦО наблюдается значительное повышение прочностных свойств, особенно после первых трех циклов. Однако с увеличением числа циклов более трех приращение прочностных свойств металла несколько замедляется. Следовательно, наиболее оптимальным режимом для исследуемых конструкционных сталей является ТЦО в течение первых 3–6 циклов, что хорошо согласуется с данными работы [7].

Изменения механических свойств конструкционных сталей 08, 10, 20, Ст3, 09Г2С и 10ХСНД в зависимости от различных видов термической обработки показаны в табл. 2. При этом стали в состоянии заводской поставки подвергались отжигу и нормализации при 900 °С и термоциклической обработке.

Из табл. 2 видно, что проведение ТЦО, позволяющей получить мелкозернистую структуру в конструкционных сталях, позволяет существенно изменить их механические характеристики. Так, предел текучести и предел прочности исследуемых сталей после трехкратной ТЦО по сравнению с отжигом и нормализацией значительно повышаются.

Повышение механических свойств углеродистых и легированных сталей отмечалось в других работах. Так, авторы [7] на углеродистых сталях 10 и 20 показали, что проведенная ТЦО повышает удельную работу разрушения до 50 % за счет увеличения вязкости, что повышает обрабатываемость сталей давлением даже при комнатных температурах. В этом случае возрастает штампуемость с глубокой вытяжкой металла. В работе [8] на литой стали 20Л показано значительное увеличение вязкости разрушения и трещиностойкости стали после ТЦО, которое авторы объясняют измельчением структуры до размера зерен 5...11 мкм. В результате механические свойства стали после ТЦО по сравнению с нормализацией повысились: $\sigma_{0,2}$ с 290 до 330 МПа, σ_B — с 520 до 530 МПа, а δ — до 24 %.

Следует отметить, что весьма высокой структурно-чувствительной характеристикой механических свойств является ударная вязкость, поэтому ее можно эффективно использовать для

Таблица 1

Механические свойства сталей после термоциклической обработки

Марка материала	Механические свойства, МПа	Число циклов ТЦО							
		0	1	2	3	4	5	7	10
08пс	$\sigma_{0,2}$	166,0	172,0	181,5	188,0	190,5	193,0	193,5	195,0
	σ_B	281,5	295,5	301,0	309,5	315,0	317,5	320,0	323,5
Ст3	$\sigma_{0,2}$	233,0	242,5	250,0	255,5	259,0	262,5	263,0	263,5
	σ_B	418,0	441,5	451,0	468,5	471,5	476,0	477,5	484,5
10ХСНД	$\sigma_{0,2}$	385,0	400,5	416,0	423,5	428,5	435,0	434,0	435,0
	σ_B	503,0	538,0	538,0	563,5	568,5	573,5	578,5	583,5

нахождения оптимального режима ТЦО. Авторы [9] на углеродистых сталях 30, 40 и 60 при испытаниях на ударную вязкость показали, что наиболее оптимальным режимом является 5–6 циклов ТЦО, что значительно повышает ударную вязкость и значительно снижает порог хладноломкости в область отрицательных температур [10]. Авторы отметили повышение предела текучести и пластичности по сравнению с нормализованным состоянием, а также сближение характеристик предела текучести и прочности после проведения ТЦО, что является положительным фактом с точки зрения прочности металлов.

За счет проведения ТЦО можно значительно повысить не только прочностные, но и пластические свойства сталей. Так, сфероидизирующая цементит ТЦО включает в себя 3–6-кратный нагрев стали до температуры на 30...50 °С выше точки A_{c1} с последующим охлаждением на воздухе до окончания $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, а затем в воде или масле [11]. После такой обработки сталь обладает более высокой вязкостью разрушения, чем после измельчающей структуру ТЦО, что делает обычную сталь хладостойкой и пригодной для работы как в условиях Севера, так и при криогенных температурах. В работе [7] на сталях 30, 40, 45, 60 показано, что сфероиди-

зация цементита в сталях за счет ТЦО по сравнению с нормализацией повышает предел текучести на 6–15 %, пластичность — на 10–25 %, а ударную вязкость — на 70–110 %. При этом сфероидизирующая цементит ТЦО повышает ударную вязкость как при комнатной, так и при пониженных температурах, что особенно важно для сварных МК, работающих в условиях Севера [10].

Как видно из табл. 2, существенное влияние ТЦО оказывает и на механические свойства легированных сталей. Основное отличие легированных сталей от углеродистых заключается в том, что термодинамическая активность углерода в них ниже, чем в простых углеродистых сталях. В то же время способы ТЦО углеродистых сталей могут быть применены без существенного изменения технологии ТЦО и к легированным сталям, если суммарное количество легирующих элементов не превышает 5 % [11]. В отличие от обычной термической обработки (отжиг и нормализация), проведение ТЦО оказывает наиболее благоприятное влияние на низколегированные стали, что видно из сравнения механических свойств.

Следует отметить, что структурные превращения при ТЦО легированных сталей происходят медленнее, вследствие чего максимальную

Таблица 2

Механические свойства сталей в зависимости от разных видов термообработки

Марка материала	Механические свойства, МПа	Вид термообработки		
		Отжиг	Нормализация	ТЦО, три цикла
08	$\sigma_{0,2}$	151,0	217,0	274,0
	σ_B	280,0	331,0	352,0
10	$\sigma_{0,2}$	149,0	223,0	250,0
	σ_B	265,0	304,0	328,0
20	$\sigma_{0,2}$	252,0	314,0	330,0
	σ_B	388,0	421,0	448,0
Ст3	$\sigma_{0,2}$	242,0	305,0	368,0
	σ_B	392,0	439,0	460,0
09Г2С	$\sigma_{0,2}$	279,0	338,0	404,0
	σ_B	438,0	494,0	528,0
10ХСНД	$\sigma_{0,2}$	425,0	492,0	615,0
	σ_B	618,0	684,0	727,0

температуру при нагреве следует несколько увеличить выше точки A_{c1} [11]. С увеличением содержания в стали легирующих элементов при той же температуре ТЦО следует увеличить и необходимое число циклов по сравнению с углеродистыми сталями, что мы и наблюдаем в табл. 2.

Проведение ТЦО, в отличие от термической обработки, позволяет в большей степени выявлять положительное воздействие легирования на прочностные и пластические свойства. При этом, значительно повышая прочность и пластичность, можно получить недостижимые ранее значения работы разрушения легированных сталей в процессе различных видов нагружения.

Таким образом, повышение механических свойств конструкционных сталей в процессе проведения контролируемой пассивным феррозондовым методом ТЦО позволяет рекомендовать ее для восстановления и усиления прочностных свойств металла в опасных локальных зонах КН как в сварных соединениях, так и в элементах сварных МК при ремонте.

Выводы

1. Установлено, что как для углеродистых 08, 10, 20, Ст3, так и для низколегированных конструкционных сталей 09Г2С и 10ХСНД увеличение числа циклов ТЦО приводит к повышению прочностных свойств металла. С увеличением числа циклов более 3–6 приращение прочностных свойств значительно замедляется.

2. Показано, что механические свойства исследуемых сталей значительно зависят как от вида, так и режимов термической и термоциклической обработки. Так, трехкратная ТЦО позволяет, по сравнению с отжигом и нормализацией, значительно повысить предел текучести и предел прочности исследуемых сталей.

3. Наличие легирующих элементов в сталях снижает термодинамическую активность углерода и замедляет структурные превращения металла, что по сравнению с углеродистыми сталями требует или повышения температуры термоциклирования, или увеличения числа циклов.

4. Эффект повышения прочностных свойств конструкционных сталей в процессе контролируемой ТЦО можно использовать при восстановлении и усилении прочности металла в локальных зонах КН в сварных соединениях и элементах сварных МК.

Библиографический список

1. Хромченко Ф. А. Сварные технологии при ремонтных работах. М.: Мир, 2004. 408 с.
2. Гордиенко В. Е., Березина А. А. Техническое диагностирование сварных металлоконструкций промышленных зданий, сооружений и строительных машин. СПб.: СПбГАСУ, 2015. 244 с.
3. Гордиенко В. Е., Гордиенко Е. Г., Березина А. А. Влияние структурно-чувствительных параметров металла на магнитные свойства сварных металлоконструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 2 (49). С. 138–144.
4. Березина А. А. Некоторые особенности оценки структурной и механической неоднородности сварных соединений металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 4 (51). С. 123–127.
5. Гордиенко В. Е., Абросимова А. А., Трунова Е. В., Щербаков А. П. К выбору конструкционных сталей для изготовления сварных металлических конструкций строительных машин // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 233–238.
6. Гордиенко В. Е., Гордиенко Е. Г., Березина А. А. Влияние структурной неоднородности металла сварных соединений металлоконструкций строительных машин на магнитные свойства // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6 (47). С. 188–193.
7. Федюкин В. К., Смагоринский М. Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.
8. Неразрушающий контроль материалов и элементов конструкций / под ред. А. Н. Гузя. Киев: Наукова думка, 1981. С. 115–165.
9. Почтман Ю. М., Зеленцов Д. Г. Некоторые модели задач оптимизации конструкций, взаимодействующими с агрессивными средами // Доклады АН УССР. Серия А. 1987. № 12. С. 39–43.
10. Кузьмин О. В. Методика контроля и повышения несущей способности металлоконструкций строительных машин в процессе эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 158 с.
11. Федюкин В. К. Научное обоснование и разработка технологий улучшающей термоциклической обработки металлических материалов: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1993. 323 с.

References

1. Khromchenko F. A. *Svarnye tekhnologii pri remontnykh rabotakh* [Welded technologies at repair work]. Moscow, Mir Publ., 2004, 408 p.
2. Gordienko V. E., Berezina A. A. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie svarnykh metallokonstruktsiy promysh-*

lennykh zdaniy, sooruzheniy i stroitel'nykh mashines [Technical diagnosing of welded metalwork of industrial buildings, structures and construction machines]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2015, 244 p.

3. Gordienko V. E., Gordienko E. G., Berezina A. A. *Vliyanie strukturno-chuvstvitel'nykh parametrov metalla na magnitnye svoystva svarnykh metallokonstruktsiy stroitel'nykh mashin* [The influence of structure-sensitive parameters of metal on magnetic properties of construction machines' welded steelworks]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 2 (49), pp. 138–144.

4. Berezina A. A. *Nekotorye osobennosti otsenki strukturnoy i mekhanicheskoy neodnorodnosti svarnykh soedineniy metallicheskih konstruktsiy stroitel'nykh mashin* [Some features of the assessment of structural and mechanical heterogeneity of metal design welded connections of construction machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 4 (51), pp. 123–127.

5. Gordienko V. E., Abrosimova A. A., Trunova E. V., Shcherbakov A. P. *K vyboru konstruktsionnykh staley dlya izgotovleniya svarnykh metallicheskih konstruktsiy stroitel'nykh mashin* [About selecting of structural steels for the production of welded metal designs of construction machines]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 6 (65), pp. 233–238.

6. Gordienko V. E., Gordienko E. G., Berezina A. A. *Vliyanie strukturnoy neodnorodnosti metalla svarnykh soedineniy metallokonstruktsiy stroitel'nykh mashin na magnitnye svoystva* [The influence of structural

heterogeneity of metal in welded connections of construction machines' metalwork on magnetic properties]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2014, no. 6 (47), pp. 188–193.

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

8. *Nerazrushayushchiy kontrol' materialov i ehlementov konstruktsiy* [Non-destructive control of materials and elements of designs]. Ed. by Guz A. N. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981, pp. 115–165.

9. Pochtman Yu. M., Zelentsov D. G. *Nekotorye modeli zadach optimizatsii konstruktsiy, vzaimodeystvuyushchimi s agressivnymi sredami* [Some models of optimization tasks for designs interacting with hostile environment]. *Doklady AN USSR. Seriya A – Reports of AS of USSR. Series A*, 1987, no. 12, pp. 39–43.

10. Kuz'min O. V. *Metodika kontrolya i povysheniya nesushchey sposobnosti metallokonstruktsiy stroitel'nykh mashin v protsesse ehkspluatatsii*. Diss. kand. tekhn. nauk [A technique of controlling and increasing the bearing ability of construction machine metalwork in operatic. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2011, 158 p.

11. Fedyukin V. K. *Nauchnoe obosnovanie i razrabotka tekhnologiy uluchshayushchey termotsiklicheskoy obrabotki metallicheskih materialov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific justification and development of technologies for improving the thermal cycle processing of metal materials. Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 1993, 323 p.