

УДК 621.791.725.051.4; 669.14.08.262

***А. И. Лазарева\*, Д. А. Горленко, О. А. Никитенко***

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,  
г. Магнитогорск

\**Anna\_Lazareva89@bk.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *Н.В. Коцева*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ ПОЛОСЫ ИЗ СТАЛИ МАРКИ 10ПС В УСЛОВИЯХ АГРЕГАТА АНО/АГЦ В ОАО «ММК»

### АННОТАЦИЯ

В работе исследовано распределение остаточных напряжений до и после рекристаллизационного отжига в сварном соединении свариваемых полос при укрупнении холоднокатаных рулонов на стыкосварочных машинах фирмы MIEBACH в условиях технологического агрегата непрерывного отжига и горячего цинкования в комплексе холодной прокатки ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

*Ключевые слова:* низкоуглеродистая сталь, холоднокатаная полоса, лазерная сварка, остаточное напряжение, микроструктура, микротвердость.

***A. I. Lazareva, D. A. Gorlenko, O. A. Nikitenko***

## INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINT OF STRIP STEEL GRADE 10PS IN AN ENVIRONMENT OF A CONTINUOUS ANNEALING AND HOT-DIP GALVANIZING UNIT OF OJSC “MMK”

### ABSTRACT

In the article was investigated the distribution of residual stresses before and after recrystallization annealing in the welding joint of welded stripes during consolidation of the rolls by laser welding on MIEBACH laser machines in an environment of a continuous annealing and hot-dip galvanizing unit in the cold rolling complex of Open Joint Stock Company «Magnitogorsk Iron and Steel Works».

*Keywords:* low carbon steel, cold-rolled strip, laser welding, residual stress, microstructure, microhardness.

В современной России важными аспектами дальнейшего развития экономики является внедрение и освоение передовых мировых технологий и тенденций на отечественных промышленных предприятиях. На одном из ведущих предприятий металлургической отрасли России ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО ММК) в последние годы освоена новейшая технология производства современных и

перспективных видов холоднокатаной продукции для автомобильной и строительной отраслей промышленности, а также для производства товаров широкого потребления [1]. Летом 2012 г. в листопрокатном цехе № 11 (ЛПЦ–11) ОАО ММК была запущена в строй вторая очередь, включающая агрегат непрерывного отжига, совмещенный с агрегатом непрерывного горячего цинкования (АНО/АГЦ), агрегат непрерывного горячего цинкования холоднокатаных полос (АНГЦ) и линию инспекции (АИ). Особенностью технологий, осваиваемых в этом комплексе холодной прокатки, явилось применение укрупнения рулонов методом лазерной сварки [2]. В головной части этой линии установлена лазерная стыкосварочная машина CSLH19 фирмы MIEBACH, на которой производятся сварные швы, пригодные для транспортирования через агрегат.

Такой вид технологической операции впервые применен на отечественном прокатном производстве [3]. Огромное влияние на устойчивость технологического процесса оказывает качество сварного соединения. Если сваренную полосу с некачественным сварным соединением отправить в линию агрегата, может произойти обрыв в зоне сварного шва и полная остановка линии до тех пор, пока полоса не будет извлечена. Это вызывает необходимость достаточно длительной остановки технологического процесса, продолжительность которой может достигать до двух дней. Кроме того, при непрерывности движения полосы по агрегату на значительных скоростях (более 180–200 м/мин) практически отсутствует запас времени на дополнительную сварку в случае неудовлетворительного качества сварного шва. Поэтому необходима такая технология лазерной сварки, которая обеспечивала бы в достаточно широком диапазоне режимов гарантированно стабильное качество сварного шва, а также давала бы возможность производить отгрузку металлопроката потребителю со сварным соединением.

Возникающие при сварке остаточные напряжения могут явиться одной из основных причин появления обрывов в зоне сварного шва. В связи с вышесказанным целью данной работы явилось исследование распределения остаточных напряжений в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного соединения и в зоне основного металла холоднокатаной полосы.

Работа выполнялась в условиях НИИ Наносталей ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на образце сварного соединения полосы из стали марки 10пс толщиной 0,4 мм, прошедшего полную обработку на комбинированном агрегате АНО/АГЦ в ЛПЦ–11, т. е. после проведения лазерной сварки образец был отожжен. Лазерная сварка концов холоднокатаных полос осуществлялась СО<sub>2</sub>-лазером непрерывного действия за один проход перемещением сварочной тележки вдоль стыкуемых кромок металлопроката.

Комплекс металлографических исследований был проведен с использованием светового микроскопа Meiji Techno при увеличении от 50 до 1000 крат. Микротвердость измерялась на твердомере Buehler Micromet

методом Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450-76 вдавливанием алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями  $136^\circ$ . Микротвердость измерялась в поперечном сечении нетравленных шлифов в направлении от оси сварного шва к основному металлу с шагом 0,5 мм в трех участках по толщине листа: на периферии вблизи каждой из поверхности листа со стороны широкой части шва (ряд 1) и со стороны узкой части шва (ряд 3), а также по средней линии сечения (ряд 2).

Рентгеноструктурный анализ производился на дифрактометре SHIMADZU XRD 7000 с использованием  $K_\alpha$  излучения хромового анода. Анализ напряжений осуществлялся по линии (211)  $\alpha$ -фазы (двойной угол дифракции  $2\theta \approx 156^\circ$ ). Толщина анализируемого слоя, дающая 90 % интенсивности дифрагированного пучка, составляет 16 мкм [4]. Угол наклона образца относительно падающего луча  $\psi$  принимался равным от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  с шагом в  $5^\circ$ . Образец на рентгеновском дифрактометре устанавливали таким образом, чтобы определять макронапряжения параллельно нормали к поверхности образца.

С помощью металлографического анализа были выявлены особенности микроструктуры сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) после осуществления лазерной сварки полосы. Установлено, что в сварном соединении наблюдаются следующие кристаллические зоны: зона 1 – зона кристаллизации сварного шва, зона 2 – зона перегрева, зона 3 – зона нормализации, зона 4 – зона рекристаллизации и зона 5 – зона основного металла (рис. 1).

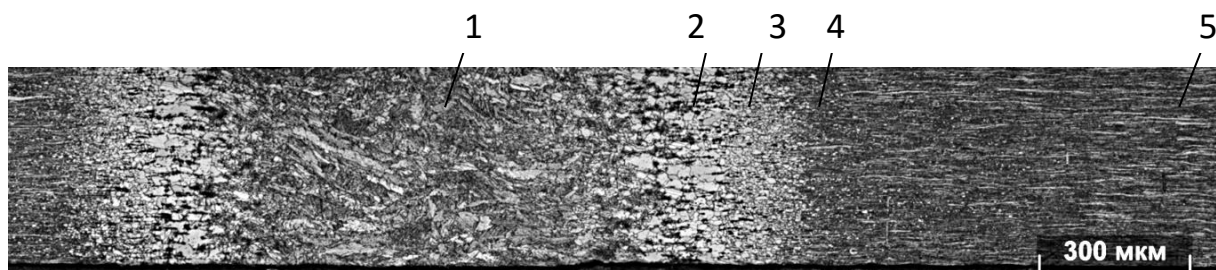


Рис. 1. Панорамная микрофотография микроструктуры в поперечном сечении сварного соединения, полученного лазерной сваркой полосы из стали марки 10пс

Распределения микротвердости и остаточных напряжений в различных участках сварного соединения представлены на рис. 2. Анализ полученных результатов показал, что после проведения операции рекристаллизационного отжига на агрегате АНО/АГЦ произошло уменьшение уровня микротвердости как в ЗТВ, так и в зоне основного металла. Твердость в ЗТВ снизилась на 16 %, а твердость в основном металле на 30 %.

Выявлено, что величина остаточных напряжений в ЗТВ сварного соединения выше, чем в области основного металла. После отжига в агрегате АНО/АГЦ остаточные напряжения в ЗТВ уменьшились на 40 %, а в основном металле на 47 %.

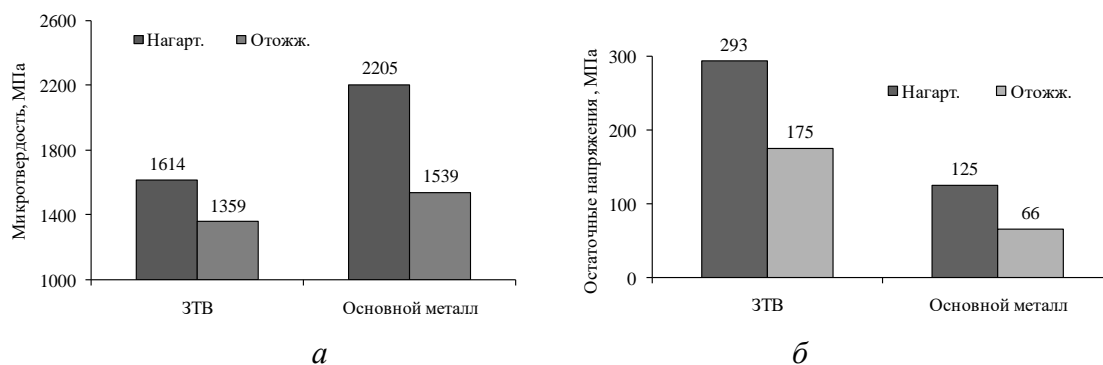


Рис. 2. Микротвердость – а и остаточные напряжения – б в ЗТВ и в основном металле в нагартованном состоянии и после отжига сварного соединения полосы из стали марки 10пс

**Закключение.** Отжиг в агрегате АНО/АГЦ полосы со сварным соединением, полученным методом лазерной сварки, приводит к более однородному распределению микротвердости в поперечном сечении, а величина остаточных напряжений как в ЗТВ, так и в области основного металла уменьшается приблизительно одинаково.

*Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (№ 11.1525.2014К от 18.07.2014 г.), базовой части государственного задания в сфере научной деятельности «Обеспечение проведения научных исследований».*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние пространственно-энергетических параметров лазерной сварки на структуру и микротвердость сварного соединения полосы из стали 10пс / А. И. Лазарева, Н. В. Копцева, Ю. Ю. Ефимова, О. А. Никитенко, Э. М. Голубчик // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 3. С. 13–17.
2. Влияние отжига на формирование микроструктуры и свойств сварных соединений, полученных при лазерной сварке полос из низкоуглеродистых сталей / Э. М. Голубчик, Н. В. Копцева, А. И. Мешкова, Ю. Ю. Ефимова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2013. № 2 (42). С. 56–59.
3. Освоение технологий производства проката в новом комплексе холодной прокатки / Б. А. Дубровский, П. В. Шилияев, С. А. Ласьков, А. В. Горбунов, С. А. Лукьянов, Э. М. Голубчик // Сталь. 2012. № 2. С. 63–65.
4. Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Шершнева Л. С. Оценка внутренних напряжений в трубной стали контролируемой прокатки группы прочности Х70 // Материалы IV Российской конференции “Ресурс и диагностика материалов и конструкций” [Электронный ресурс]. 2009. Статья № 175. 6 с.