

УДК 621.771.01;621.774.25

Доброносов Ю. К.  
Дмитриев С. А.  
Измайлов М. С.  
Семенов В. М.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ЛОКАЛЬНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ СВАРНОГО ШВА

В самом общем случае надежность и эксплуатационные показатели металлоконструкций, имеющих сварные соединения, во многом определяются качеством и прочностными характеристиками сварных швов, являющихся концентраторами напряжений вследствие различия геометрических характеристик и наличия остаточных напряжений в месте перехода усиления швов к основному металлу. Кроме того, литая крупнозернистая структура самого сварного шва отрицательно сказывается на показателях его прочности, вязкости и пластичности [1, 2].

Сварной шов отличается от основного катаного металла литой структурой, характеризующейся низкими механическими свойствами и большей вероятностью наличия дефектов сплошности. На переходе сварного шва к основному металлу имеется зона термического влияния, также отличающаяся по структуре и от сварного шва, и от основного металла, которая служит концентратором напряжений (рис. 1). Поэтому, прежде всего зона сварного шва является источником возникновения дефектов на сварных трубах. Несмотря на успехи, достигнутые в технологии сварки, отмеченные факторы не удается устранить полностью. Одним из способов повышения механических свойств сварного шва, является процесс его локальной термомеханической обработки (ЛТМО), осуществляемый горячей прокаткой до полного устранения усиления. Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность этого способа [1–5], однако представляет интерес оценка его энергосиловых параметров именно для обработки труб большого диаметра из стали категорий прочности X70–X90.

Целью работы является исследование энергосиловых параметров процесса, оценка структуры и механических свойств металла зоны шва, до и после обработки, на основе экспериментального исследования процесса локальной термомеханической обработки сварного шва.

В качестве объекта исследования были использованы образцы, вырезанные на участке сварного шва трубы из стали категории прочности X70 производства Харцызского трубного завода. Общий вид участка сварного шва, а так же микроструктуры изображены на рис. 1.

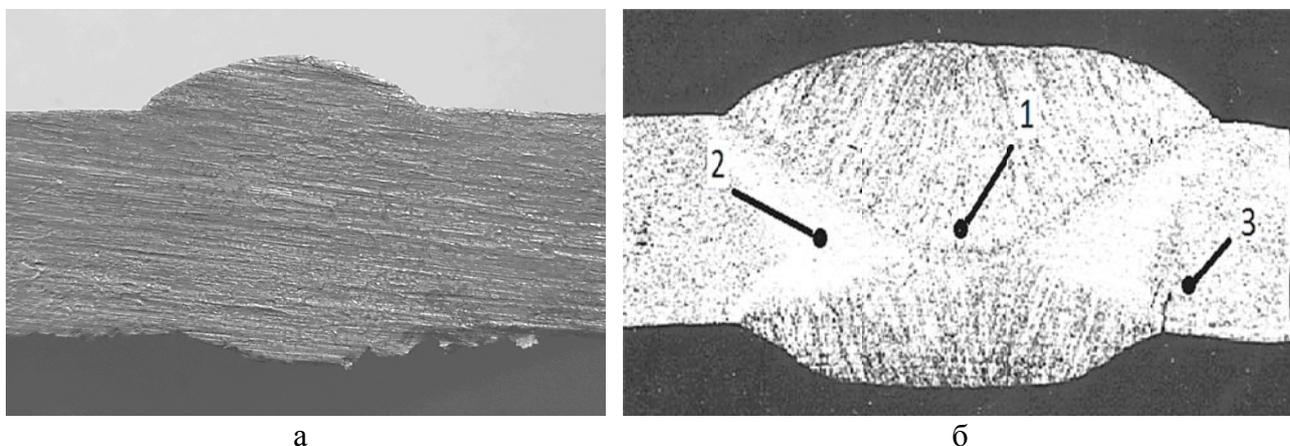


Рис. 1. Общий вид, а так же структура сварного шва:

1– зона сварного шва; 2 зона термического влияния; 3– зона основного металла

Толщина стенки трубы составляла  $19 (+0,3 - (-0,2))$  мм, толщина сварного шва по усилениям – 22–23 мм, ширина сварного шва – 28–30 мм. Всего было подготовлено и прокатано 2 образца. Еще один образец не обрабатывался и был использован для проведения сравнительных испытаний на ударную вязкость и микроструктурного анализа. Изображения в общем случае исходного и прокатанного образца изображены на рис. 2.

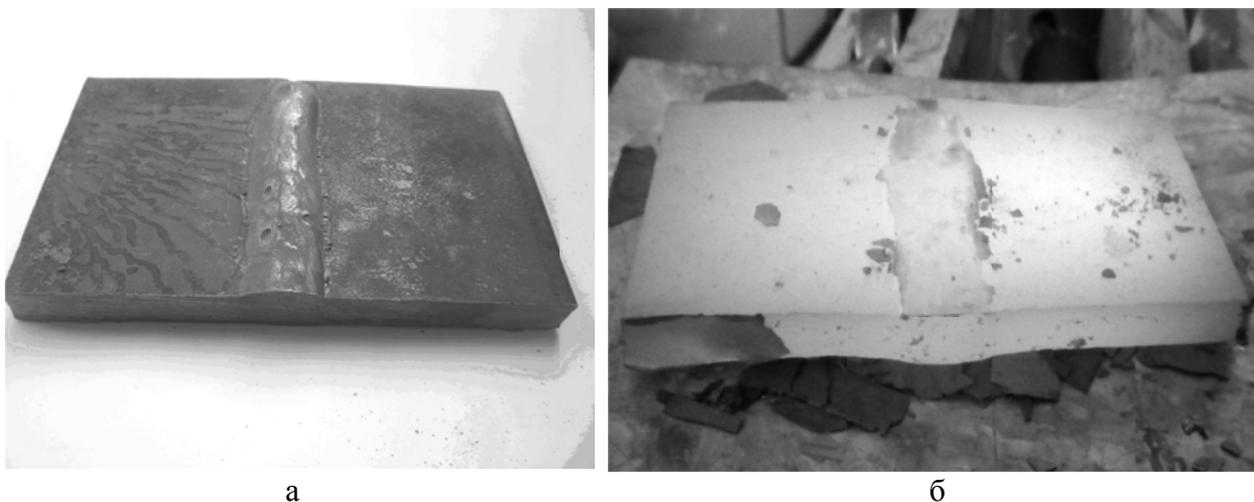


Рис. 2. Образцы участка сварного шва:  
а – исходный; б – прокатанный

Эксперименты были проведены с использованием оборудования Донбасской государственной машиностроительной академии. Методика эксперимента включала нагрев заготовки, собственно прокатку с измерением силы прокатки, исследование ударной вязкости и структуры образца до и после деформации.

Металл нагревали до температуры прокатки, которая составила  $1000\text{--}1050$  °С, нагрев образцов осуществляли в камерной электропечи сопротивления ОКБ-333С, контроль температуры – платино-родиевой термопарой с выводом показаний на потенциометр, проградуированный в °С

Для прокатки металла использовали промышленно-лабораторный стан  $260\times 250$  ДГМА (рис. 3). Стан находится в непосредственной близости от печи, что позволило исключить остывание образцов.

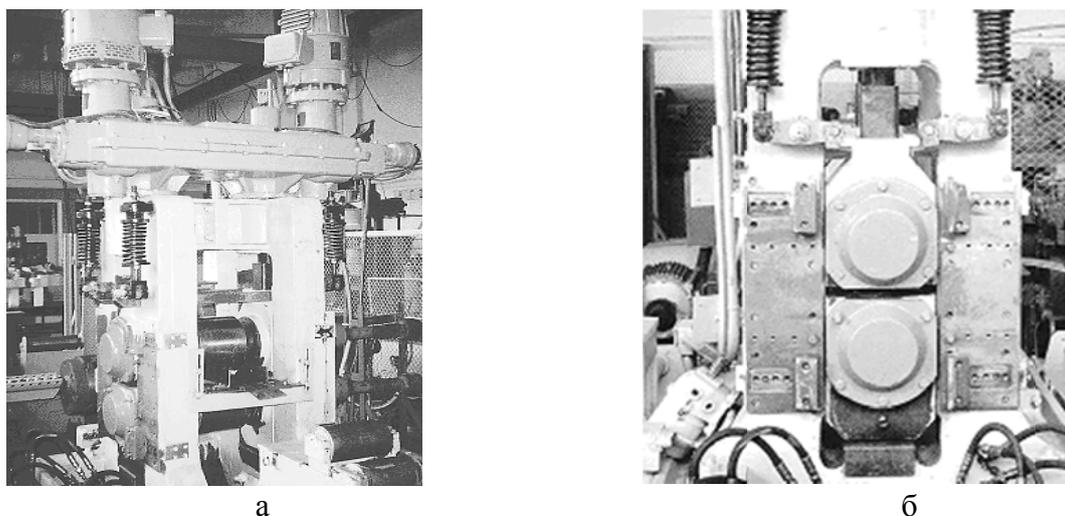


Рис. 3. Двухвалковая рабочая клеть типоразмера  $260\times 250$  реверсивного промышленно-лабораторного прокатного стана Донбасской государственной машиностроительной академии: а – общий вид; б – конструкция

Прокатку вели в один проход, относительное обжатие, соответствующее полному выкатыванию усиленной сварного шва, то есть выравнивания их по толщине с основным металлом, составило  $\varepsilon = 0,16-0,2$ . Скорость прокатки составила  $0,5-0,75$  м/с. Силу прокатки измеряли месдозами, установленными между подушками верхнего валка и нажимными винтами. Запись регистрируемых параметров исследуемого процесса осуществляется при помощи ПЭВМ со встроенным аналого-цифровым преобразователем АЦП-ЛОС16-32.

В результате расшифровки полученных осциллограмм силы прокатки было установлено, что она изменялась в пределах  $109-120$  кН. Теоретические расчетные значения, силы прокатки, полученные по методике работ [3, 4] для условий, соответствующих экспериментальным, составили  $103-111$  кН (соответственно, по минимальным и максимальным параметрам сварного шва), что свидетельствует о высокой сходимости теоретических и экспериментальных результатов.

Кроме того, была проведена оценка уширения сварного шва при его раскатке. Продольное течение металла имело место только на краях образцов (см. рис. 2, б), характеризующихся отсутствием внешних зон. Уширение на краях составило  $0,6-1,1$  мм, в то время как на остальной части образца, в зависимости от размеров усиления, оно изменялось в пределах  $2,4-6,1$  мм, что соответствовало теоретическим расчетам для поперечного течения металла шва исходя из закона постоянства объема (максимальное расчетное –  $6,4$  мм). Тем самым было подтверждено допущение о преимущественно поперечном течении металла при ЛТМО сварного шва.

Для исследования микроструктуры прокатанных образцов из них были изготовлены микрошлифы, которые изображены рис. 4, исследование проводили на металлографическом микроскопе МИМ 8 с увеличением  $\times 100$ .

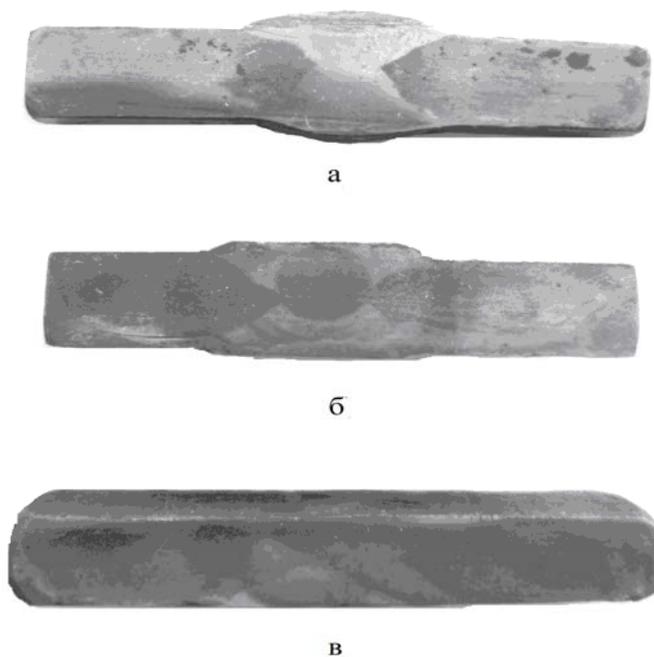


Рис. 4. Образцы микрошлифов исследуемых образцов:  
а – исходный; б – обработанные образцы фрагмента сварного шва

Для оценки показателей качества два прокатанных образца использовали для испытаний на ударную вязкость, а два – для микроструктурного анализа. Испытания на ударную вязкость проводились с использованием маятникового копра КМ 30 согласно методике ГОСТ 9454-78 при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  с оценкой KCV по центру сварного шва, на линии сплавления и для основного металла. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели ударной вязкости образцов KCV (Дж/см<sup>2</sup>)

	Неупрочненный образец	Упрочненный образец № 1	Упрочненный образец № 2
Центр шва	124	196	207
Зона сплавления	152	208	216
Основной металл	234	217	223

Таким образом, показатели ударной вязкости сварного шва в результате ЛТМО увеличились в 1,6–1,65 раза по отношению к необработанному образцу и составили  $\approx 0,85$  по отношению к основному металлу.

Производился так же анализ микроструктуры сварного шва до и после ЛТМО. Изображение анализируемой микроструктуры изображены на рис. 5, 6.

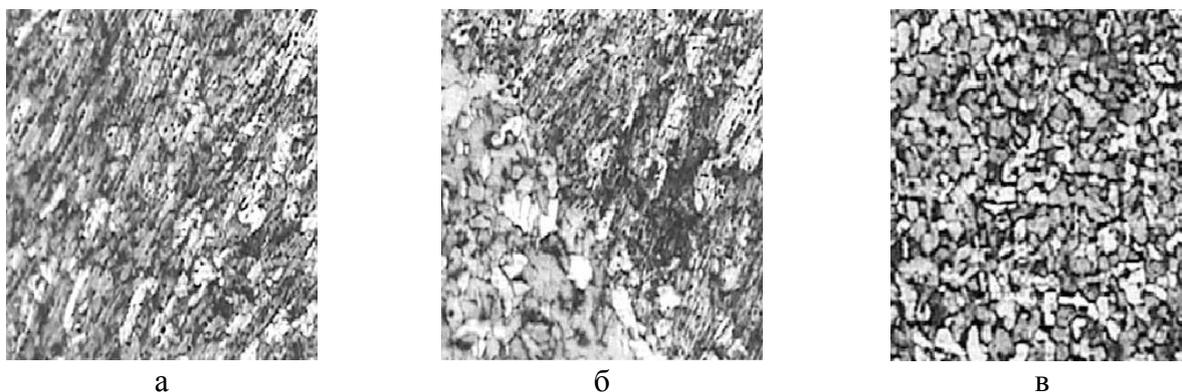


Рис. 5. Микроструктура металла исходного образца с увеличением  $\times 100$ : а – зона сварного шва; б – зона сплавления; в – зона основного металла

Как следует из рис. 4, а, на необработанном образце в центре шва имеет место ярко выраженная литая структура с баллом зерна 6–7. Так же мы можем видеть чётко выраженную границу между литым металлом сварного шва и переходной зоной с крупнозернистой структурой. В основном металле имеется мелкозернистая катаная структура с баллом зерна 9–10.

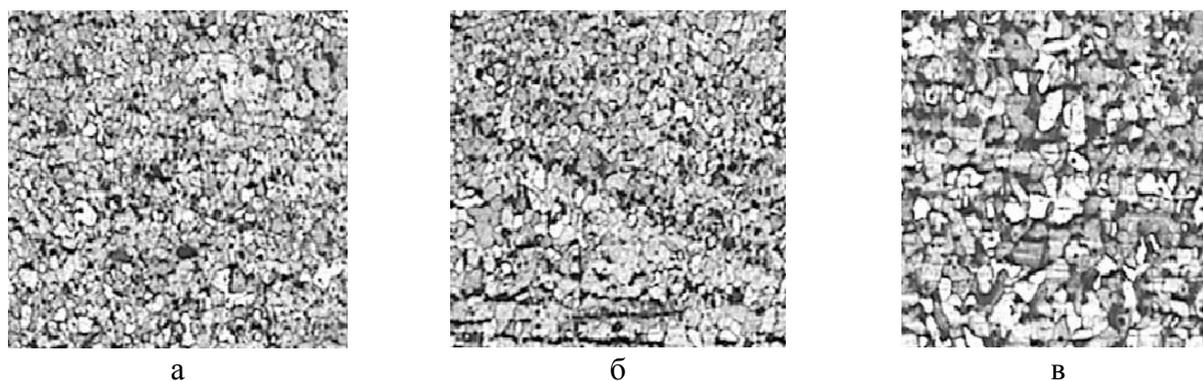


Рис. 6. Микроструктура металла образца после ЛТМО с увеличением  $\times 100$ : а – зона сварного шва; б – зона сплавления; в – зона основного металла

На прокатанных образцах (см. рис 5, б) мелкозернистая равноосная структура с баллом зерна 10 распространяется на всю зону сварного шва, при этом размеры зерна почти вдвое меньше, чем в основном металле. Переходная зона практически отсутствует. В то же время размеры зерна основного металла несколько выше, чем в исходном образце, вследствие исходного нагрева без последующей деформации.

В результате микроструктурного анализа, было также установлено, что при исследованных соотношениях ширины сварного шва к его высоте ( $b/h = 1,22 - 1,3$ ) с учетом усиленных, деформация проникает на всю его толщину. Об этом свидетельствует одинаковый размер зерна в зоне сварного шва по всей толщине, что подтверждает теоретические положения о возможности проработки сварного шва на всю глубину при  $b/h > 1$ .

### ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований подтверждена высокая эффективность процесса ЛТМО сварных труб. Высокая сходимость оценок энергосиловых параметров, полученных теоретически и экспериментально, свидетельствует о достоверности полученных ранее теоретических результатов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Морозов Ю. Д. Состояние и перспективы развития сталей для труб большого диаметра в России / Ю. Д. Морозов, Л. И. Эфрон // *Высокотехнологичное оборудование для металлургической промышленности*. – М. : ВНИИМетмаш, 2004. – С. 254–264.
- 2 Плясунов В. А. Локальная термомеханическая обработка сварных соединений газонефтепроводных труб большого диаметра / В. А. Плясунов, И. А. Романцов, А. А. Федоринов // *Сталь*. – 2001. – № 6. – С. 81–83.
- 3 Потапкин В. Ф. Технология, оборудование и методы расчета процесса локальной термомеханической обработки электросварных труб большого диаметра с использованием горячей прокатки / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, Ю. К. Доброносков, С. В. Новоселов, С. Б. Вольченко, А. В. Послушник // *Металлург*. – 2004 (Спецвыпуск). – С. 27–30.
- 4 Доброносков Ю. К. Повышение качества сварных швов путем локальной термомеханической обработки горячей прокаткой / Ю. К. Доброносков, В. В. Тимченко // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 37.
- 5 Экспериментальные исследования процесса локальной термомеханической обработки сварных швов с использованием процесса горячей прокатки / В. К. Заблоцкий, Ю. К. Доброносков, С. А. Дмитриев [и др.] // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 333–337.

### REFERENCES

- 1 Morozov Ju. D. Sostojanie i perspektivy razvitija stalej dlja trub bol'shogo diametra v Rossii / Ju. D. Morozov, L. I. Jefron // *Vysokotehnologichnoe oborudovanie dlja metallurgicheskoj promyshlennosti*. – M. : VNIIMetmash, 2004. – S. 254–264.
- 2 Pljasunov V. A. Lokal'naja termomehanicheskaja obrabotka svarnyh soedinenij gazonefteprovodnyh trub bol'shogo diametra / V. A. Pljasunov, I. A. Romancov, A. A. Fedorinov // *Stal'*. – 2001. – № 6. – S. 81–83.
- 3 Potapkin V. F. Tehnologija, oborudovanie i metody rascheta processa lokal'noj termomehanicheskoj obrabotki jelektrosvarnyh trub bol'shogo diametra s ispol'zovaniem gorjachej prokatki / V. F. Potapkin, A. V. Satonin, Ju. K. Dobronosov, S. V. Novoselov, S. B. Vol'chenko, A. V. Poslushnjak // *Metallurg*. – 2004 (Specvyпуск). – S. 27–30.
- 4 Dobronosov Ju. K. Povyshenie kachestva svarnyh shvov putem lokal'noj termomehanicheskoj obrabotki gorjachej prokatkoj / Ju. K. Dobronosov, V. V. Timchenko // *Vazhke mashinobuduvannja. Problemi ta perspektivi rozvitku*. – Kramators'k : DDMA, 2007. – S. 37.
- 5 Jeksperimental'nye issledovanija processa lokal'noj termomehanicheskoj obrabotki svarnyh shvov s ispol'zovaniem processa gorjachej prokatki / V. K. Zablockij, Ju. K. Dobronosov, S. A. Dmitriev [i dr.] // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2009. – № 1 (20). – S. 333–337.

Доброносков Ю. К. – канд. техн. наук, доц. каф. АММ ДГМА  
Дмитриев С. А. – инженер отдела ТСО ДГМА  
Измайлов М. С. – студент ДГМА  
Семенов В. М. – д-р техн. наук, проф. каф. ПТМ ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: [amm@dgma.donetsk.ua](mailto:amm@dgma.donetsk.ua)

Статья поступила в редакцию 22.02.2014 г.