

Сувень Чен<sup>1,2</sup>, Гуоу Танг<sup>1</sup>, Шеньхуа Сонг<sup>2</sup>,  
Гуолин Сонг<sup>1</sup>, В.Е. Громов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт перспективных материалов, Высшая школа постдипломного образования в г. Шеньжень, Университет Циньхуа (Китай)

<sup>2</sup> Факультет материаловедения и инженерии, Высшая школа постдипломного образования в г. Шеньжень, Харбинский технологический институт (Китай)

<sup>3</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛОСОВОЙ СТАЛИ Q235\*

**Аннотация.** Успешно проведена электроимпульсная обработка низкоуглеродистой полосовой стали Q235. По сравнению с обычной термической электроимпульсная обработка позволяет получить полосовую сталь с такими же или даже лучшими механическими свойствами. Выявлено, что напряжение 180 В и частота 500 Гц являются оптимальными, обуславливают предел прочности на растяжение и удлинение при растяжении 371 МПа и 47,5 % соответственно. Исследования с помощью оптической микроскопии показали, что электроимпульсная обработка полосовой стали Q235 с напряжением 180 В и частотой 500 Гц может ускорить образование полностью рекристаллизованной микроструктуры, размер зерен в которой становится меньше и однороднее по сравнению с удлиненным зерном холоднокатаного образца. Электроимпульсная обработка с меньшей частотой обеспечивает лишь частичную рекристаллизацию зерен, а с большей частотой – рост зерен в образце. И в том и в другом случае не представляется возможным получить удовлетворительное сочетание прочности и деформируемости стали

**Ключевые слова:** электроимпульсная обработка, обычная термическая обработка, механические свойства, микроструктура.

## EFFECT OF ELECTROPULSING TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF Q235 STEEL STRIP

**Abstract.** The electropulsing treatment (EPT) has been successfully applied to the processing of a low carbon Q235 steel strip. Comparing with the conventional heat treatment (CHT), a proper EPT is capable of achieving the similar or even better effect on the mechanical properties of the steel strip. It was found that the optimum combination of the EPT parameters are 180 V in voltage and 500 Hz in frequency (180 V – 500 Hz) leading to a combination of tensile strength-elongation of 371 MPa – 47.5 %. Optical microscopy analyses indicates that the EPT/180 V – 500 Hz for Q235 steel strip can accelerate the formation of the completely recrystallized microstructure in which the grain size become relatively finer and more uniform compared to the elongated one formed in the cold-rolled sample. Such phenomenon is consistent with the improvement of the mechanical performance of the Q235 steel sample under the EPT. However, the EPT with inadequate frequency can only result in partial recrystallization of the grains, while the one with an exceed frequency may lead to the apparent grain growth within the sample. Both cases can not produce satisfactory combination of strength and ductility for the steel samples.

**Keywords:** electropulsing treatment, the conventional heat treatment, mechanical properties, microstructure.

Впервые электроимпульсная обработка (ЭИО) была использована для снижения сопротивления деформированию металлов в 1969 г. [1]. Такая обработка является методом мгновенного ввода энергии, который в настоящее время широко применяется для улучшения микроструктуры и механических свойств материалов. Работы Ванга и его коллег [2, 3] показывают, что улучшение пластичности листа TA15 можно получить при помощи вызванными ЭИО локальной рекристаллизации и возврата. Конрад и другие ученые [4, 5] установили, что ЭИО измельчает зерна и увеличивает скорость зарождения центров кристаллизации в ходе отжига холоднодеформированной меди. Это явление объясня-

ется повышенной подвижностью дислокаций под воздействием ЭИО [6]. Чжу и Ли [7 – 9] обнаружили, что при испытании на растяжение под воздействием ЭИО можно получить большее удлинение образца сплава Zn – Al по сравнению с обычным испытанием. Влияние электрических импульсов на удлинение может быть объяснено динамикой дислокаций и эволюцией микроструктуры. Исследования, выполненные Ли и другими учеными [10], показывают, что ЭИО может увеличивать эффект памяти формы сплава на основе железа в результате ускорения выделения частиц карбида ниобия NbC. В работах [11 – 13] Сюй и другие исследователи получили ультрамелкие зерна при рекристаллизации в холоднокатаной полосе AZ31 с использованием ЭИО, при этом рекристаллизация во время обработки может быть вызвана ускорением движения дислокаций и их аннигиляцией, а также повышением подвижности

\* Работа выполнена в рамках грантов 12-02-00092-а, 11-02-91150-ГФЕН, а РФФИ и государственного заказа Минобрнауки РФ № 2.4807.2011.

вакансий. В целом ЭИО, вероятнее всего, способствует улучшению пластичности металлов или сплавов без ухудшения их прочностных свойств.

Низкоуглеродистая сталь Q235 широко используется как конструкционный материал, поскольку обладает хорошими механическими свойствами (предел текучести при комнатной температуре 235 МПа) и превосходной пластичностью. При производстве полосовой стали Q235 используется холодная прокатка, что обычно приводит к наклепу, и следовательно, необходим отжиг. Обычная термическая обработка (ОТО) стали в печи, как правило, занимает много времени, при этом потребляется большое количество энергии. Для того, чтобы уменьшить затраты энергии и улучшить механические свойства полосовой стали, в настоящей работе была успешно использована ЭИО холоднокатаной полосовой стали Q235.

В качестве исследуемого материала использовали промышленную полосовую сталь Q235 шириной 20 мм и толщиной 1 мм. Химический состав стали следующий: 0,098 % С, 0,38 % Мн, 0,12 % Si, 0,027 % S, 0,002 % Р и 0,025 % Cr, остальное железо (по массе). Для сравнительного изучения проводили ЭИО и ОТО.

Процесс типичной ЭИО схематично представлен на рис. 1. В реальном масштабе времени образец полосовой стали Q235,двигающийся с постоянной скоростью 14 м/мин между двумя контактами, расположенными на расстоянии 300 мм друг от друга, подвергали воздействию электрических импульсов. Время, необходимое полосе для преодоления расстояния от анода к катоду, составляло около 21 с. Для подачи электрических импульсов использовали изготовленный в лабораторных условиях генератор. Давление между электродными роликами и полосой поддерживали на достаточном уровне для обеспечения хорошего электрического контакта, при котором не вызываются нежелательные деформации полосы. Использовали электрические импульсы длительностью около 70 мкс с разными напря-

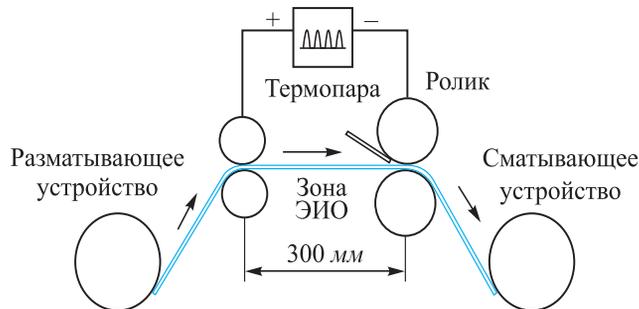


Рис. 1. Схема процесса ЭИО

жением и частотой. Характеристики тока (частоту  $f$ , среднеквадратичное значение плотности тока ( $J_e$ ), амплитуду и длительность импульсов тока) регистрировали датчиком Холла, соединенным с осциллографом. Температуру  $T$  образца полосы Q235 измеряли инфракрасным термоскопом Raytek MX2. Параллельно с этим для сравнения осуществляли ОТО такого же образца Q235 в печи при 873 К в течение 2 ч. Электроимпульсную и термическую обработки выполняли в естественных атмосферных условиях; параметры этих обработок приведены в таблице.

Поверхности образцов после ЭИО и ОТО полировали и травили раствором (4 % азотной кислоты и 96 % этилового спирта). Исследования проводили с помощью оптического микроскопа. Испытания на растяжение образцов размерами 100×20×1 мм были выполнены на универсальной испытательной машине при скорости траверса 5 мм/мин.

Как можно судить по перечисленным в таблице параметрам, температура образца в процессе ЭИО возрастает с увеличением частоты при том же напряжении или с увеличением напряжения при той же частоте. Более высокая частота или напряжение приводит к росту среднеквадратичного значения плотности тока и более выраженным термическим и атермическим эффектам [14].

#### Параметры ЭИО и ОТО для полосовой стали Q235

Обработка	$U$ , В	$f$ , Гц	$J_m$ , А/мм <sup>2</sup>	$J_e$ , А/мм <sup>2</sup>	$T$ , К	$\sigma_p$ , МПа	$e$ , %
ХП	–	–	–	–	298	728	3,4
ОТО	–	–	–	–	873	361	44,5
ЭИО 1	150	500	121	10,26	533	658	6,9
ЭИО 2	180	300	114	12,57	460	665	6,5
ЭИО 3	180	500	107	14,57	674	371	47,5
ЭИО 4	180	700	114	16,76	883	426	22,6
ЭИО 5	200	500	130	17,33	823	376	34,5
ЭИО 6	220	500	137	18,00	903	540	11,9

П р и м е ч а н и е. ХП – холодная прокатка;  $U$  – напряжение;  $f$  – частота;  $J_m$  – амплитуда плотности тока при электроимпульсной обработке;  $J_e$  – среднеквадратичное значение плотности тока в процессе ЭИО (связанное с выделением джоулева тепла);  $T$  – температура;  $\sigma_p$  – предел прочности на растяжение;  $e$  – удлинение.

Значения предела прочности при растяжении и удлинение холоднокатаных образцов после ЭИО и ОТО также приведены в таблице. В состоянии после холодной прокатки предел прочности при растяжении составлял 728 МПа, удлинение – 3,4 %. После ОТО стального образца предел прочности при растяжении был снижен до 361 МПа, а удлинение составляло 44,5 %. После ЭИО с той же частотой (500 Гц) предел прочности при растяжении составлял 658, 371 и 540 МПа при изменении подаваемого напряжения от 150 В до 180, 200 и 220 В с изменением удлинения от 6,9 % до 47,5, 34,5 и 11,9 % соответственно. Таким образом, оптимальное сочетание прочности и пластичности полосовой стали Q235 получено с помощью ЭИО при напряжении 180 В. В таких условиях и прочность (371 МПа), и пластичность (47,5 %) образцов стали выше, чем характеристики, полученные путем применения ОТО (361 МПа и 44,5 %). Хотя разница в характеристиках образцов стали, полученных после ЭИО и ОТО, не столь значительна, однако существенное преимущество ЭИО заключается в значительной экономии энергии по сравнению с использованием ОТО. При одинаковом (180 В) напряжении оба параметра (прочность и пластичность) обрабатываемых образцов меняются в зависимости от частоты, и наилучшие значения этих параметров получены при частоте 500 Гц. Таким образом, оптимальное сочетание электрических характеристик ЭИО для полосовой стали Q235: напряжение 180 В, частота 500 Гц.

Микроструктуры образцов, подвергнутых различной обработке, показаны на рис. 2. Микроструктура холоднокатаных образцов удлиненная (рис. 2, а), после ОТО удлиненная структура стали переходит в рекристаллизованную, в которой зерна довольно мелкие и однородные (рис. 2, б). После проведения ЭИО при различных параметрах удлиненная микроструктура стали трансформируется в другие виды. В образцах, обраба-

тываемых электрическими импульсами при  $U = 180$  В и  $f = 300$  Гц, только небольшая часть удлиненной микроструктуры рекристаллизуется (рис. 2, в). Скорее всего это происходит из-за того, что температура (460 К) образцов во время ЭИО слишком низкая, чтобы инициировать процесс рекристаллизации. Микроструктура образцов, полученная при использовании ЭИО (при  $U = 180$  В и  $f = 500$  Гц), схожа со структурой, полученной при ОТО. В этом случае температура образцов составляет 674 К, что на 200 К меньше, чем при ОТО (см. таблицу). Это говорит о том, что ЭИО может значительно способствовать кинетике процесса рекристаллизации. После ЭИО при  $U = 180$  В и  $f = 700$  Гц происходит рост зерен в стали, ее микроструктура становится менее однородной. Это, вероятно, происходит из-за того, что температура при ЭИО (883 К) слишком высока для рекристаллизации и приводит к худшему сочетанию значений прочности и пластичности.

Поскольку рекристаллизацию можно объяснить движением и взаимодействием дислокаций, то повышенная подвижность дислокаций, вызванная электрическими импульсами, может способствовать процессу рекристаллизации. Ряд исследований [15 – 17] показал, что взаимосвязь между электронами и дислокациями определяет термический и атермический эффекты, когда металлы подвергаются действию электрических импульсов. Тем не менее, реальный механизм атермического эффекта до сих пор не совсем ясен. Одно возможное объяснение может заключаться в дополнительной силе, которая возникает при воздействии электронов на дислокации – так называемый «ветер электронов» [4]. Предполагается, что электрические импульсы могут ускорять миграцию вакансий, связанную с переползанием дислокаций. Переползание дислокаций тесно взаимосвязано с суммарным потоком диффундирующих атомов ( $J$ ) [18]

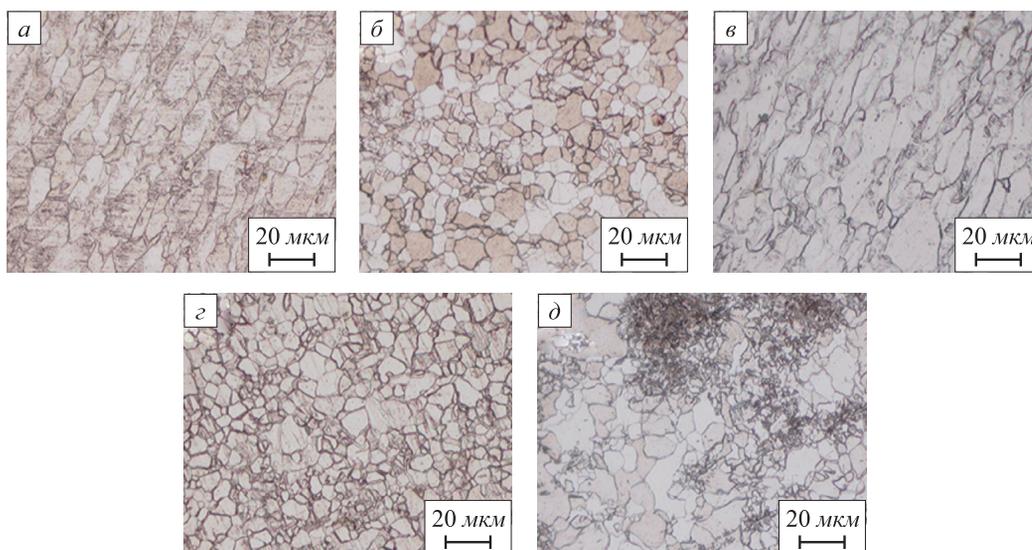


Рис. 2. Микроструктура образцов, подвергнутых различным видам обработки:

а – холодная прокатка; б – ОТО; в – ЭИО при  $U = 180$  В,  $f = 300$  Гц; г – ЭИО при  $U = 180$  В,  $f = 500$  Гц; д – ЭИО при  $U = 180$  В,  $f = 700$  Гц

$$J = J_{th} + J_{ath} = J_{th} + \frac{D_1}{kT} (K_{ew} \Omega J_m + N_1 \rho e Z_1^* J_m); \quad (1)$$

здесь  $J_{th}$  и  $J_{ath}$  – поток диффундирующих атомов, вызванный термическим и атермическим эффектом;  $D_1$  – коэффициент диффузии в решетке;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\Omega$  – объем атома;  $N_1$  – количество атомов решетки на единицу объема;  $T$  – абсолютная температура;  $K_{ew}$  – коэффициент силы «ветра электронов»;  $eZ_1^*$  – эффективный заряд атомов решетки.

В дополнение к этому число дислокаций, переползающих на границы субзерен за единицу времени, в терминах  $n_c$  можно записать в виде уравнения [19]:

$$\frac{dn_c}{dt} = J \frac{\Omega}{b}, \quad (2)$$

где  $b$  – вектор Бюргера.

Из уравнения (1) хорошо видно, что даже если поток диффундирующих атомов по причине термического эффекта в электроимпульсном процессе мал при относительно низкой температуре, можно значительно увеличить значение  $J$  путем увеличения  $J_m$ . Поэтому в соответствии с уравнением (2) переползание дислокаций на границы субзерен за единицу времени может быть значительно ускорено.

Детальный механизм атермического эффекта может быть описан следующим образом. Известно, что движение электронов происходит в интервале между  $K_0$  и  $K_{max}$  через определенные промежутки времени, когда металлы подвергаются воздействию электрических импульсов. Значение  $K_{max}$  увеличивается с ростом  $J_m$  ( $K_{max} = m^* v_{max} = m^* J_m / en$ , где  $m^*$  – эффективная масса электрона;  $v_{max}$  – максимальная скорость электронов;  $e$  – заряд электрона;  $n$  – плотность электронов). В соответствии с законом сохранения импульса импульс силы может трансформироваться в ударную силу  $K_{max} = \int_0^{\tau} F dt$ , где  $F$  – ударная

сила,  $\tau$  – длительность электрических импульсов. По причине малой (70 мкс) длительности импульсов в этих экспериментах сила воздействия электронов может становиться значительной, что в дальнейшем ускоряет неравномерное движение атомов, основанное на термическом эффекте (влияние джоулева тепла). Безусловно, чем выше  $J_m$ , тем сильнее атермический эффект при резком увеличении  $F$ .

При ЭИО полосовой стали Q235 совместно проявляются термический и атермический эффекты. Необходимо отметить, что атермический эффект, способствующий пластической деформации, нуждается в дальнейшем изучении.

**Выводы.** Проведена электроимпульсная обработка низкоуглеродистой полосовой стали Q235. Выявлены оптимальные параметры ЭИО, приводящие к наилучшему сочетанию прочности и пластичности образцов. Обнаружено, что наилучшим сочетанием параметров ЭИО является напряжение 180 В и частота 500 Гц, при которых предел прочности при растяжении и удлинение при растяжении составляют 371 МПа и 47,5 % (это лучшие характеристики по сравнению с характеристиками после ОТО). После ЭИО микроструктура образцов полностью рекристаллизована, зерна мелкие и однородные, что вызывает улучшение механических характеристик (наилучшее сочетание прочности и пластичности) полосовой стали после ЭИО.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Троицкий О.А. // Письма в ЖЭТФ. Т. 2. № 10. С. 18 – 22.
2. Wang Z., Song H. // Journal of Alloys and Compounds. 2009. Vol. 470. P. 522 – 530.
3. Wang Z., Song H. // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2009. Vol. 19. P. 409 – 413.
4. Conrad H., Karam N., Mannan S. // Scripta Materialia. 1983. Vol. 17. P. 411 – 416.
5. Conrad H., Karam N., Mannan S. // Scripta Materialia. 1984. Vol. 18. P. 275 – 280.
6. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермаер. – М.: Недра, 1996. – 290 с.
7. Zhu Y.H., Lee W.B., Liu X.M. et al. // Materials Science and Engineering A. 2009. Vol. 501. P. 125 – 132.
8. To S., Zhu Y.H., Lee W.B. et al. // Materials Transaction. 2009. Vol. 50. P. 1105 – 1112.
9. To S., Zhu Y.H., Lee W.B. et al. // Materials Transaction. 2009. Vol. 50. P. 2772 – 2777.
10. Liu W.B., Wen Y.H., Li N., Yang S.Z. // Journal of Alloys and Compounds. 2009. Vol. 472. P. 591 – 594.
11. Xu Z.H., Tang G.Y., Ding F. et al. // Applied Physics A. 2007. Vol. 88. P. 429 – 433.
12. Guan L., Tang G.Y., Jiang Y.B., Chu P.K. // Journal of Alloys and Compounds. 2009. Vol. 487. P. 309 – 313.
13. Guan L., Tang G.Y., Chu P.K., Jiang Y.B. // Journal of Materials Research. 2009. Vol. 24. P. 3674 – 3679.
14. Jiang Y.B., Tang G.Y., Guan L. et al. // Journal of Materials Research. 2008. Vol. 23. P. 2685 – 2690.
15. Troitskii O.A., Spitsyn V.I., Sokolov N.V., Ryzhkov V.G. // Physica Status Solidi A. 1979. Vol. 52. P. 2685 – 2690.
16. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H. // Acta Materialia. 1986. Vol. 34. P. 1145 – 1150.
17. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. // Materials Science and Engineering A. 1980. Vol. 45. P. 109 – 116.
18. Sprecher F., Mannan S.L., Conrad H. // Acta Materialia. 1983. Vol. 17. P. 769 – 772.
19. Xu Z.H., Tang G.Y., Tian S.Q. et al. // Journal of Materials Research. 2007. Vol. 182. P. 128 – 133.

© 2013 г. Сувень Чен, Гуо Танг, Шеньхуа Сонг,  
Гуолин Сонг, В.Е. Громов  
Поступила 12 декабря 2012 г.