



# ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**А. К. ЦАРИЮК, В. Ю. СКУЛЬСКИЙ**, кандидаты техн. наук, **С. И. МОРАВЕЦКИЙ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**В. А. СОКИРКО**, канд. техн. наук (НПК ООО «ДС», г. Николаев)

Обсуждены опубликованные результаты исследований воздействия импульсов электрического тока высокой плотности на ударную вязкость стали Ст3. Отмечено, что предполагаемый авторами механизм электромагнитного воздействия может иметь место лишь в узком слое около поверхности металлического образца. Приведены результаты экспериментальных исследований, показывающие, что пропускание через металл стальных сварных соединений электрического тока сравнительно низкой плотности также приводит к заметному изменению его ударной вязкости.

*Ключевые слова:* сталь, сварные соединения, термическая обработка, электромагнитные воздействия, электрофизическая обработка, деформация, механические свойства

В последнее время растет интерес к использованию энергии электромагнитного поля и электрического тока для воздействия на микро- и субмикроструктуру конструкционных сплавов и их сварных соединений. В связи с этим становится актуальным получение новых экспериментальных данных о влиянии электромагнитных воздействий (ЭМВ) на механические свойства и напряженное состояние металла сварных соединений современных конструкционных материалов [1–4].

В настоящее время нет общепринятой терминологии для обозначения способов, позволяющих с помощью ЭМВ целенаправленно изменять механические свойства и напряженное состояние металлических материалов. Обозначения для них принимаются различными авторами в зависимости от собственного представления о виде и механизме воздействия. Названия способов, предполагающих пропускание электрического тока непосредственно через обрабатываемое изделие, могут содержать такие термины, как электростимулированная (прокатка), электрическая, электроимпульсная, электроразрядная, электродинамическая, электромеханическая (обработка) и т. п. В названиях способов, требующих экспозицию изделия в магнитном поле, создаваемом, например, с помощью соленоида, можно встретить такие понятия, как термомагнитная, магнитоимпульсная, магнитоабразивная (обработка) и т. п.

Структурная перестройка при реализации упомянутых выше способов в отличие от термичес-

кой обработки происходит в результате взаимодействия внешнего электромагнитного поля (электрического тока) с электромагнитным полем реальной кристаллической решетки как магнитных, так и немагнитных материалов. Механизмы этого явления на сегодня до конца неясны. Это связано с тем, что ЭМВ представляет собой комплексное воздействие, включающее:

магнитодинамическое, связанное с перемагничиванием ферромагнетика в магнитном поле протекающего электрического тока. При смещении междоменных границ происходит магнитоупругое взаимодействие с дислокационной структурой ферромагнетика;

электродинамическое, связанное с возникновением пинч-эффекта (статического или динамического), генерирующего в материале упругие механические напряжения;

термическое (джоулево тепло, вихревые токи и др.), которое сопровождается термофлуктуационным изменением структуры материала, а также в ряде случаев возникновением внутренних термоупругих напряжений и деформаций;

взаимодействие электронов проводимости с полем упругих деформаций дислокаций, которое снижает силу электронного торможения дислокации и величину потенциальных барьеров, что приводит к нетермической перестройке дислокационной структуры металла с уменьшением плотности дислокаций.

Отмеченные воздействия на структуру материалов характерны для широкого класса способов обработки, называемых электрофизическими [5]. Поэтому в своих исследованиях считаем целесообразным использовать общий термин «электро-



физическая обработка» (ЭФО) с указанием ее вида и параметров. Последнее позволяет дифференцировать такую обработку по принципу воздействия и виду применяемой энергии среди широко распространенных для сварных конструкций видов обработки (термическая и механическая обработка). При недостаточно известных механизмах и определяющих факторах ЭМВ (электрический ток или электромагнитное поле) детализация ЭФО в названиях способов возможна лишь исходя из второстепенных технологических особенностей осуществления ЭМВ, что приводит к излишнему многообразию терминов.

В работе [4] показано, что ЭФО низкоуглеродистой стали марки Ст3 импульсами тока высокой плотности привела к многократному возрастанию ее ударной вязкости без существенного изменения твердости материала. При этом нагрев материала вследствие ЭФО составил несколько градусов. Световая микроскопия не позволила выявить каких-либо изменений микроструктуры стали. Результаты лишней раз подтверждают реальную возможность создания высокоэффективных энергосберегающих способов обработки сталей (как и их сварных соединений) с целью получения заданных механических свойств. Для успешного применения таких способов крайне важно знание сущности и особенностей механизмов влияния ЭМВ на структуру материалов.

Предварительно высказанное авторами работы [4] мнение о механизме влияния ЭМВ базируется на способности электрического тока концентрироваться в окрестности микроскопических неоднородностей структуры металла (трещины, поры, неметаллические включения, границы зерен), вызывая там значительные локальные разогревы. Пространственно дискретный (мозаичный) характер выделения тепла обуславливает термоупругое поле, пики микронапряжений сжатия у которого совпадают с максимумами температуры, а последние, в свою очередь, локализованы около несовершенств структуры. Такое действие тока приводит к интенсивному пластическому деформированию и последующей рекристаллизации микроразъемов, связанных с дефектами, «залечиванию» последних и в итоге к изменению остаточных механических свойств металла. Условием такого теплового воздействия является рассеяние в металле определенного количества электромагнитной энергии, вводимой импульсом за время меньшее, чем необходимое для выхода температурного поля на стационарный режим [6].

В порядке дискуссии к этому можно добавить следующее. Очевидно, что механизм мозаичного температурного поля, «залечивающего» микроскопические очаги разрушения в результате концентрации электрического тока на неоднородностях структуры, предполагает, что ток распределен

по всему обрабатываемому сечению. Плотность импульсного тока можно считать однородной, если не происходит отеснения тока к поверхности (скин-эффект). Длительность импульсов тока определяет частоту электромагнитного поля и ее критическое значение, при котором толщина металла равна глубине скин-слоя:  $f_{кр} = (\pi\mu_0\mu\gamma\delta^2)^{-1}$ , где  $f_{кр}$  — критическая частота, выше которой возникает скин-эффект, Гц;  $\gamma$  — удельная проводимость стали, См/м;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость стали;  $\delta$  — толщина материала, м [7–9].

В качестве источника тока использовали батарею конденсаторов 600 мФ × 5 кВ [4]. По нашей оценке, разрядный ток указанной батареи может достигать не менее 100 кА при длительности импульса  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  с, что соответствует частоте электромагнитного поля 1...100 кГц. Для образца стали Ст3 с поперечным сечением 10×10 мм (принимая  $\mu_n = 200$ ,  $\gamma = 8 \cdot 10^6$  См/м) критическая частота  $f_{кр} \approx 1,5$  Гц, поэтому при ЭФО с частотой электромагнитного поля 1 кГц и выше обязательно возникает скин-эффект. Расчетная оценка показала, что глубина скин-слоя может составлять  $(0,04 \dots 0,4) \cdot 10^{-3}$  м.

Таким образом, изложенный выше механизм воздействия может иметь место в достаточно узком слое около поверхности образца. Однако фактическое значение доли вязкой составляющей в изломе образцов после ЭФО [4] было близко к 100 %. Отмеченное противоречие, по нашему мнению, может быть устранено, если предположить, что доминирующую роль в структурных преобразованиях может играть электродинамическое (силовое) действие мощных импульсов электрического тока — динамический пинч-эффект, обусловленный сильным поверхностным эффектом. При этом происходит генерирование упругих механических напряжений колебательного характера [10], действующих на внутренние области материала подобно ультразвуковому воздействию, что способно существенно повлиять на микроструктуру металла [11, 12]. Однако следует также учесть большое значение разрядного тока и тот факт, что рассчитанная выше глубина скин-слоя — это расстояние, на котором плотность тока снижается в  $e$  раз ( $e = 2,7182818 \dots$ ). В этом случае можно допустить, что несмотря на сильный скин-эффект удаленные от поверхности слои сечения также подверглись воздействию электрического тока сравнительно малой плотности. Поэтому при трактовке механизма воздействия мощных токовых импульсов на структуру стали представляет интерес расчетная или экспериментальная оценка плотностей тока в центральной части обрабаты-

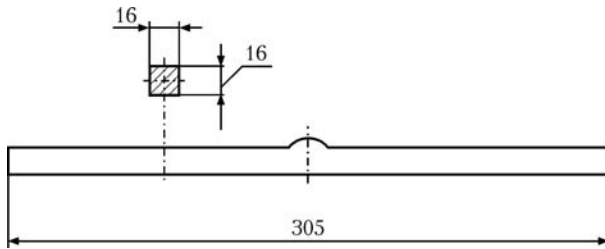


Рис. 1. Схема темплетта, вырезанного поперек сварного соединения

ваемого сечения и учет механизмов воздействия, характерных для тока малой плотности.

Считаем, что для развития представлений о механизме ЭВМ на ферромагнитные материалы будет уместным более подробно изложить результаты собственных исследований влияния ЭФО электрическим током низкой плотности на механические свойства металла стальных сварных соединений, ставшие в свое время предметом доклада [13].

Химический состав сталей 20 (ГОСТ 1050–88) и 09Г2С (ГОСТ 19282–73), выбранных для исследований, приведен в табл. 1. Стыковые соединения пластин указанных сталей толщиной 16 мм сваривали ручной дуговой многопроходной сваркой в V-образную разделку кромок электродами УОНИ-13/55 диаметром 4 мм при токе сварки 120...130 А. Химический состав металла швов приведен в табл. 1. Сварные соединения были порезаны на поперечные темплеты (рис. 1), которые разделили на три группы. Темплеты первой группы были термически обработаны (нагрев до 650 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью), второй — подвергались ЭФО, третьей — оставались в состоянии после сварки.

ЭФО образцов выполняли с помощью установки DS10D (Пат. Украины 43290А) с рабочим током до 10 кА при напряжении до 30 В. Заданный закон изменения тока поддерживает система автоматического управления установкой. ЭФО осуществляли (рис. 2) путем пропускания вдоль темплетта (поперек шва) импульсов электрического тока со следующими параметрами: трапецеидальная форма импульса, полярность импульсов знакопеременная, амплитуда тока 4...10 кА, длительность амплитудного значения тока 1,5...2,0 с,

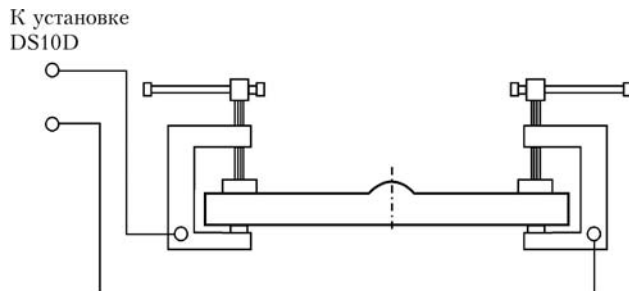


Рис. 2. Схема подключения образца к установке при проведении ЭФО металла сварных соединений

Таблица 1. Химический состав металла сварных соединений, мас. %

Объект контроля	C	Si	Mn	S	P
Сварные соединения стали 20					
Шов	0,102	0,400	1,09	0,019	0,020
ОМ	0,193	0,180	0,50	0,018	0,011
Сварные соединения стали 09Г2С					
Шов	0,086	0,31	0,97	0,016	0,018
ОМ	0,107	0,61	1,42	0,026	0,029

длительность переднего и заднего фронта 0,5...1,0 с, длительность паузы между импульсами 5...10 с, количество импульсов за цикл ЭФО до 100. Выбранные параметры ЭФО соответствовали частоте электромагнитного поля 0,25...0,4 Гц, что меньше критической  $f_{кр} \approx 0,6$  Гц для темплетов толщиной 16 мм. Следовательно, возможность возникновения скин-эффекта при ЭФО исключалась.

ЭФО оказывала тепловое воздействие, для минимизации которого темплет погружался в емкость из диэлектрического материала с водой, что позволяло косвенно контролировать температуру нагрева металла. Можно считать маловероятной возможность того, что температура обрабатываемого металла превышала 100...150 °С, поскольку признаков кипения воды к концу цикла ЭФО каждого темплетта не наблюдалось.

Из темплетов по ГОСТ 6996–66 изготавливали цилиндрические образцы (тип II) для испытания металла сварного соединения на статическое растяжение и образцы Шарпи (тип IX) для испытания металла сварного соединения на ударный изгиб. В цилиндрических образцах линия сплавления проходит через середину рабочей части образца (рис. 3, а). С целью определения ударной вязкости металла в области зоны сплавления и граничащего с ней участка перегрева острый надрез в образцах Шарпи выполнялся таким образом, чтобы его вершина попадала на линию сплавления (рис. 3, б).

Принципиальных отличий в микроструктуре металла сварных соединений в состояниях после сварки, термообработки и после ЭФО с помощью оптической микроскопии выявлено не было. Результаты механических испытаний металла сварных соединений представлены в табл. 2.

Испытания на ударный изгиб показывают существенное влияние ЭФО на свойства металла. Объяснить это явлениями, характерными для условий термической обработки, не удается. Не подходит как теория динамического нагрева с явлением концентрации электромагнитных полей в окрестности микродефектов и неоднородностей структуры, так и теория электродинамического воздействия. В настоящее время мы находим сле-



Таблица 2. Зависимость механических свойств металла сварных соединений от вида послесварочной обработки

Сталь	Вид обработки металла	Временное сопротивление при испытании на растяжение $\sigma_B$ , МПа	Ударная вязкость $KCV$ , Дж/см <sup>2</sup> , при температуре испытаний, °С	
			+20	-20
Сталь 20	Без обработки	$\frac{459,3-467,8}{463,6}$	$\frac{78,7-115,7-66,3}{86,9}$	$\frac{48,2-18,0-27,8}{31,3}$
	Термическая обработка	$\frac{455,8-445,4}{450,6}$	$\frac{111,3-118,6-158,6}{129,5}$	$\frac{50,1-68,6-97,7}{72,1}$
	ЭФО	$\frac{468,3-463,2}{465,8}$	$\frac{204,5-230,5-120,5}{185,2}$	$\frac{191,1-82,3-184,5}{152,6}$
09Г2С	Без обработки	$\frac{499,3-521,9}{510,6}$	$\frac{354,6-291,4-253,6}{299,9}$	$\frac{236,2-50,7-57,6}{114,8}$
	Термическая обработка	$\frac{483,9-478,7}{481,3}$	$\frac{296,8-300,5-287,4}{294,9}$	$\frac{237,8-343,9-233,1}{271,6}$
	ЭФО	$\frac{520,3-497,7}{509,0}$	$\frac{344,7-336,7-232,8}{335,1}$	$\frac{37,2-325,2-325,7}{229,4}$

Примечание. Значения  $\sigma_B$  усреднены по данным двух испытаний на растяжение, значения  $KCV$  — по результатам трех испытаний на ударный изгиб.

дующее, основанное на литературных данных, объяснение обнаруженному влиянию.

Известно, что пластическая деформация протекает во всем деформируемом объеме крайне неравномерно. В связи с этим способность материала к деформированию лимитируется исчерпанием пластичности отдельных микрообъемов, вследствие чего в них происходит зарождение очагов разрушения. При этом микрообъемы металла, смежные с указанными, деформируются мало. Известна также роль скоплений дислокаций в образовании очагов разрушения [14].

Деформирование наклепанного металла без разрушения возможно только после рекристаллизационного отжига. При этом тепловая энергия (сообщаемая всему объему металла) приводит к ослаблению межатомных связей и потере упругих свойств металла, благодаря чему за счет потенциальной упругой энергии, накопленной при пластической деформации, становятся возможными структурные перестройки релаксационного характера, которые в принципе сводятся к преобразованию дислокационной структуры.

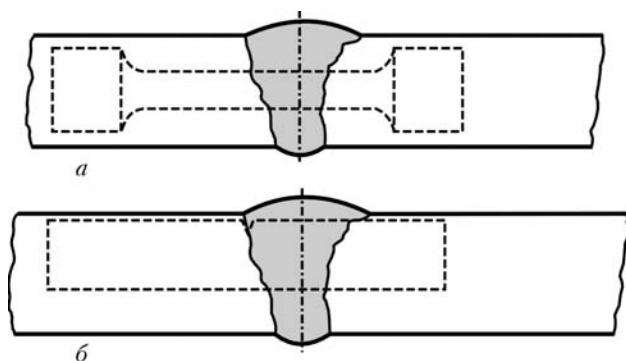


Рис. 3. Схема вырезки из темплетов сварных соединений образцов типа II (а) и IX (б) для механических испытаний

Переменное магнитное поле, вызываемое в объеме ферромагнитного материала импульсами тока, обуславливает процессы смещения междоменных границ (стенок Блоха) и вращения векторов намагниченности доменов [15]. Магнитоупругое взаимодействие блоховских стенок с дислокациями способно стать причиной движения дислокаций в ферромагнитных кристаллах при намагничивании [16, 17]. Кроме того, слабое магнитное поле влияет на состояние электронов, обеспечивающих ковалентную связь атомов, образующих комплекс дислокация — стопор. В ряде случаев благодаря этому снижается высота потенциальных барьеров, облегчается отрыв дислокаций от стопоров и уменьшается количество примесей, способных стать эффективными стопорами [18]. Процессы вращения векторов намагниченности доменов приводят к появлению активных напряжений II рода между смежными микрообъемами металла [15], что также способствует структурным перестройкам.

Взаимодействие электронов проводимости с дислокационной структурой материалов снижает силу электронного торможения дислокации (влияние «электронного ветра») и величину потенциальных барьеров [19–21]. Это взаимодействие происходит прежде всего на головных дислокациях неравновесных групп дислокаций (в скоплениях), которые находятся накануне срыва со стопора. Импульс тока инициирует их разрядку, которая сопровождается микропластической деформацией и осуществляется за счет энергии внутренних напряжений, накопленных в процессе предварительной пластической деформации. Поэтому импульс тока может быть незначительным по уровню эквивалентного воздействия. Напри-



мер, влияние на ползучесть материала обнаруживается уже при плотности тока  $0,15 \text{ А/мм}^2$  [22].

Указанные выше физические процессы с участием электромагнитного поля и электрического тока низкой плотности приводят, по-видимому, к нетермическому преобразованию дислокационной структуры, которое сопровождается уменьшением плотности дислокаций в скоплениях и улучшением структурно чувствительных характеристик металла. В случае ЭФО при ярко выраженном скин-эффекте, вероятно, наряду с динамическим пинч-эффектом имеет место влияние и рассмотренных процессов на структуру и свойства материала средней части сечения.

1. Лоскутов С. В., Левитин В. В. Влияние электроимпульсной обработки на структуру и долговечность титановых сплавов // Журн. техн. физики. — 2002. — 72, № 4. — С. 133–135.
2. Валеев И. Ш., Барыкин Н. П., Трифонов В. Г. Изменение структуры и механических свойств алюминиевого сплава АМг6 при воздействии мощными импульсами тока // Физ. мет. и металловедение. — 2003. — 96, № 4. — С. 85–89.
3. Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. Ю. Скульский, В. П. Логинов // Автомат. сварка. — 2006. — № 5. — С. 11–15.
4. Бабуцкий А. И., Чижик Г. В., Пахотних А. П. Вплив обробки імпульсним електричним струмом на ударну в'язкість сталі // Металознавство та обробка металів. — 2007. — № 2. — С. 19–23.
5. Аренков А. Б. Обработка материалов энергией импульсного магнитного поля // Основы электрофизических методов обработки материалов / Под ред. А. В. Донского. — Л.: Машиностроение, 1967. — С. 350–368.
6. Пластичность и прочность металлических материалов при импульсном воздействии высокоэнергетического электромагнитного поля / Н. Н. Беклемишев, Н. М. Горбунов, Н. И. Корягин и др.: Препр. — М.: Ин-т пробл. механики АН СССР, 1989. — 56 с.
7. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П. Н. Дашук, С. Л. Зайенц, В. С. Комельков и др. / Под общ. ред. В. С. Комелькова. — М.: Атомиздат, 1970. — 472 с.
8. Кайдалов А. А., Сокирко В. А. Размагничивание изделий перед сваркой // Сварщик. — 2005. — № 5. — С. 21–23.
9. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. — М.: Физматгиз, 1962. — 208 с.
10. Белова М. М., Проценко С. С., Иванов А. В. Динамика деформирования упругопластического слоя при импульсном энерговыделении // Пробл. прочности. — 1987. — № 12. — С. 87–91.
11. Беликов А. М., Макаров В. В., Роцупкин А. М. Изменение структуры и кинетические особенности поведения поликристаллического алюминия при ультразвуковом воздействии // Физ. мет. и металловедение. — 1989. — 67, вып. 6. — С. 1209–1214.
12. Снижение остаточных сварочных напряжений ультразвуковой обработкой / И. Г. Полоцкий, А. Я. Недосека, Г. И. Прокопенко и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 5. — С. 74–75.
13. Моравецкий С. И. Влияние послесварочной электрофизической обработки на механические свойства сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей // Тези доп. II Всеукр. наук.-техн. конф. молодих учених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології», смт Ворзель 25–27 червня. 2003. — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2003. — С. 31.
14. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов. — М.: Metallurgy, 1984. — 280 с.
15. Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. — М.: Metallurgy, 1980. — 320 с.
16. Чеботкевич Л. А., Урусовская А. А., Ветер В. В. Движение дислокаций под действием магнитного поля // Кристаллография. — 1965. — 10, № 5. — С. 688–691.
17. Взаимодействие блоховских стенок с дислокациями в слабых полях / Л. А. Чеботкевич, А. А. Урусовская, В. В. Ветер, А. Д. Ершов // Физ. твердого тела. — 1967. — 9, № 4. — С. 1093–1097.
18. Головин Ю. И. Магнитопластичность твердых тел // Там же. — 2004. — 46, № 5. — С. 769–803.
19. Батаронов И. Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образоват. журн. — 1999. — № 10. — С. 93–99.
20. Фикс В. Б. Увлечение и торможение подвижных дефектов в металлах электронами проводимости. Роль закона дисперсии электронов // Журн. эксп. и теор. физики. — 1981. — 80, № 4. — С. 1539–1542.
21. Фикс В. Б. О взаимодействии электронов проводимости с одиночными дислокациями в металлах // Там же. — 1981. — 80, № 6. — С. 2313–2316.
22. Кишкин С. Т., Клытин А. А. Эффекты электрического и магнитного воздействия на ползучесть металлов и сплавов // Докл. АН СССР. — 1973. — 211, № 2. — С. 325–327.

The paper deals with published results of investigations of the impact of high density electric current pulses on impact toughness of St3 steel. It is noted that the electromagnetic impact mechanism suggested by the authors can only be manifested in a narrow layer near the metal sample surface. Results of experimental investigations are given, which demonstrate that the passing the electric current of a comparatively low density through the metal of steel welded joints also leads to a marked change of its impact toughness.

Поступила в редакцию 26.01.2008