



ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ

Академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **Н. А. ПАЩИН**, **В. Ю. СКУЛЬСКИЙ**, кандидаты техн. наук,
В. П. ЛОГИНОВ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследования влияния электродинамической обработки (ЭДО) одиночными импульсами на кинетику упругих деформаций и напряженное состояние теплоустойчивых сталей. Представлена методика экспериментальных исследований и описана лабораторная установка для ЭДО. Установлено, что при обработке одиночными разрядами в материале инициируются поля упругих деформаций сжатия-растяжения, значения которых находятся в прямой зависимости от напряжения разряда. Показано, что ЭДО может быть использована для релаксации напряженных состояний конструкций из теплоустойчивых сталей.

Ключевые слова: электродинамическая обработка, теплоустойчивые стали, напряженно-деформированное состояние, электронно-дислокационное взаимодействие, плоский образец, цилиндрический образец, удельная энергия импульса

Развитие современного машиностроения вызывает необходимость поиска новых способов повышения прочностных характеристик сварных конструкций из высокопрочных сталей. Одним из перспективных направлений является разработка способа обработки металлов и сплавов путем воздействия на них электромагнитного поля [1]. Примером такого воздействия является обработка, в основе которой лежит эффект, проявляющийся под влиянием электродинамических сил на тонколистовые материалы. Изменяя длительность и энергию импульсов тока, воздействующего на электропроводный материал, через активацию дислокационных перемещений, фазовые изменения и другие процессы можно влиять на статическую и усталостную прочность, пластичность, твердость и напряженно-деформированное состояние металлов и сплавов, а также их сварных соединений [2]. Наблюдаемые эффекты можно объяснить на основании гипотезы об электронно-дислокационном взаимодействии [3].

Целью настоящей работы является разработка экспериментальной установки для электродинамической обработки (ЭДО) конструкционных сталей и их сварных соединений, а также оценка влияния такой обработки на служебные характеристики исследуемых материалов.

Преимущество ЭДО перед термической и другими видами обработки состоит в мобильности используемого оборудования. Кроме того, благодаря незначительной массе и габаритам установок ЭДО их можно использовать для обработки круп-

ногабаритных сварных конструкций в местах эксплуатации последних.

Для осуществления ЭДО нет необходимости в установках большой мощности, поскольку применяют электрические разряды длительностью 0,005...1,000 мс, что предполагает наличие малогабаритных импульсных источников питания, а элементная база обеспечивает следующие рабочие параметры режима: ток импульса $I_{\text{имп}} \leq 10$ кА; напряжение $U_{\text{имп}} \leq 3$ кВ. При определенных аварийных условиях значения тока и напряжения в токоведущих элементах электрических машин могут за весьма малый промежуток времени увеличиваться в десятки раз, поэтому необходимо наличие аппарата защиты [4]. Однако часто в устройствах промышленной электроники такие переходные процессы (ПП) являются штатными, а не характерными только для аварийного режима. ПП, связанные с зарядом и разрядом конденсаторов, лежат в основе работы электронных генераторов; они возникают в цепях, которые включают индуктивные элементы и элементы емкости. Разработанная установка для ЭДО относится к типичным приборам данного типа.

Процессы, протекающие при ЭДО, можно разделить на ПП в цепи с элементом емкости и резистором (зарядка конденсатора), ПП в цепи с заряженным конденсатором (разряд конденсатора), а также ПП в рабочем контуре.

Для исследования электродинамических ПП, протекающих при ЭДО, с рабочей частью контура соединялась контрольно-измерительная аппаратура, которая позволяет регистрировать электрические и механические параметры осуществляемой обработки.

Рабочим органом установки является электрод, представляющий собой катушку, расположенную

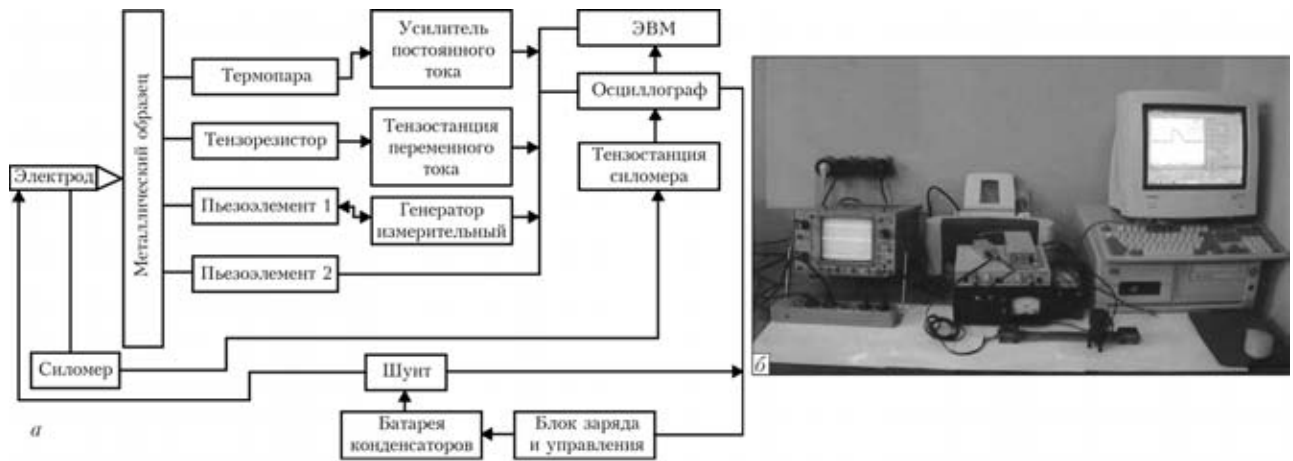


Рис. 1. Принципиальная блок-схема (а) и общий вид (б) лабораторной установки для ЭДО металлов и сварных соединений

в изолированном корпусе и подключенную к батарее конденсаторов. Катушка соединена с цилиндрическим стержнем из электротехнической меди марки М1, сферический торец которого является зоной контакта электрода с обрабатываемой поверхностью сварного соединения, т. е. областью, в которой имеет место электродинамический разряд конденсаторной батареи.

Принципиальная блок-схема и общий вид лабораторной установки для ЭДО металлов и сварных соединений представлены на рис. 1. Контрольно-измерительный комплекс для изучения ЭДО состоит из:

батареи конденсаторов для накопления и сброса энергии импульса тока с частотой 10 имп/мин;

блока заряда и управления для зарядки батареи конденсаторов до рабочего напряжения;

рабочего инструмента-электрода, укомплектованного шунтом для передачи электродинамического воздействия (импульса тока) обрабатываемому материалу с сопутствующим измерением значений тока (шунт);

тензостанции для измерения динамической составляющей ЭДО в момент действия импульса;

тензостанции для измерения усилий растяжения обрабатываемого образца;

термопары с усилителем постоянного тока для измерения температурной составляющей в момент действия импульса (интегральный джоулев разогрев);

пьезоэлементов для преобразования механических перемещений в электрический сигнал;

измерительного генератора для генерирования электрических колебаний и передачи сигнала на металлический образец;

осциллографа для записи и отображения электрических и механических сигналов при ЭДО;

компьютера для численной обработки сигналов, отображающих параметры ЭДО.

Главной оценочной характеристикой ЭДО является изменение начального напряженно-деформированного состояния металлического образца, ко-

торое возникает в результате обработки его поверхности и регистрируется элементами измерительного комплекса лабораторной установки. Начальное напряженно-деформированное состояние образца задавали продольным одноосным растяжением в специализированном силовом устройстве.

Установлено, что воздействие импульсов тока на металл, подвергаемый растяжению, приводит к релаксации его напряженно-деформированного состояния [5], что может положительно сказаться на повышении ресурса сварных конструкций.

Исследования влияния ЭДО на релаксацию напряженно-деформированного состояния конструкционных материалов проводили на образцах из теплоустойчивых сталей различных марок. Обработку центральной части рабочей зоны образцов выполняли сериями импульсов от одного до трех с интервалами 30...60 с.

Исследуемый образец с закрепленными на нем тензодатчиком и термопарой фиксировали в захватах силового устройства и растягивали вдоль продольной оси, при этом контролировали значения начальных относительных деформаций и температуры. С помощью блока заряда и управления измеряли напряжение импульса.

При контакте торца электрода с поверхностью образца производили разряд батареи и фиксировали значения относительных деформаций образца и тока в импульсе. После завершения действия импульса определяли значения остаточных деформаций и температуру поверхности исследуемого образца.

Кинетику деформационных процессов в металле околошовной зоны при ЭДО изучали на плоских образцах лопаточного типа из стали 15ХН с размером рабочей зоны 120×15×3 мм, которые закрепляли в оснастке без растяжения. Осуществляли ЭДО средней части рабочей зоны образцов одиночными разрядами со следующими рабочими параметрами импульса: ток $I_{имп} = 2400$ А, напряжение $U_{имп} = 165$ В, частота действия импуль-



сов $W_{\text{имп}} = 1600$ Гц и время их воздействия $t_{\text{имп}} = 0,3$ мс. В момент действия импульса измеряли относительные деформации ε , инициируемые токовым разрядом. Форма импульсов тока и вызванных им относительных деформаций образцов представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что кривая относительных деформаций ε имеет выраженный синусоидальный характер и электродинамическое воздействие вызывает в материале высокоградиентное упругое сжатие, компенсируемое упругим растяжением с последующим затуханием до нулевых значений ε . При этом активация механического воздействия электрического разряда начинается с некоторым (приблизительно 0,1 мс) запаздыванием с момента возрастания тока в импульсе $I_{\text{имп}}$, а приращение деформаций в областях сжатие-растяжение происходит скачкообразно. С позиций гипотезы электронно-дислокационного взаимодействия [1] это объясняется тем, что до момента нарастания значений тока в импульсе от $I_{\text{имп}}$ до I_0 (начала процесса сжатия) дислокации находятся на непреодолимых стопорах для данного состояния образца. После достижения током значения I_0 в металле образца активизируется перемещение дислокаций по линиям скольжения, сопровождающееся прорывом движущимися дислокациями препятствий в виде неоднородностей различного типа и дислокационных скоплений [6].

На рис. 2 видно, что длительность импульса тока составляет 0,3 мс, а время активации механического воздействия на металл в результате ЭДО — 0,10...0,15 мс. При этом максимальное значение ε соответствует максимальным значениям тока и напряжения разряда, а следовательно, эффективность процесса ЭДО определяется не временем воздействия импульса тока $t_{\text{имп}}$, а его удельной энергией q , которая приходится на единицу объема обрабатываемого материала.

Для подтверждения влияния q на интенсивность электродинамического воздействия на металл изучали кинетику изменения ε при различных значениях напряжения на электроде U_3 при ЭДО образца из стали 15ХН. Обработку плоских образцов выполняли на режимах, аналогичных используемым ранее, но U_3 варьировали от 200 до 400 В. В момент действия одиночного импульса проводили измерения деформаций ε (рис. 3) и температуры образца T (джоулев разогрев). Анализируя функцию $\varepsilon = f(U_{\text{имп}})$, можно видеть, что приращение значений ε находится в прямой зависимости от напряжения на электроде и соответственно удельной энергии импульса. Увеличение U_3 приводит к возрастанию градиентов временных деформаций как в области сжатия, так и растяжения.

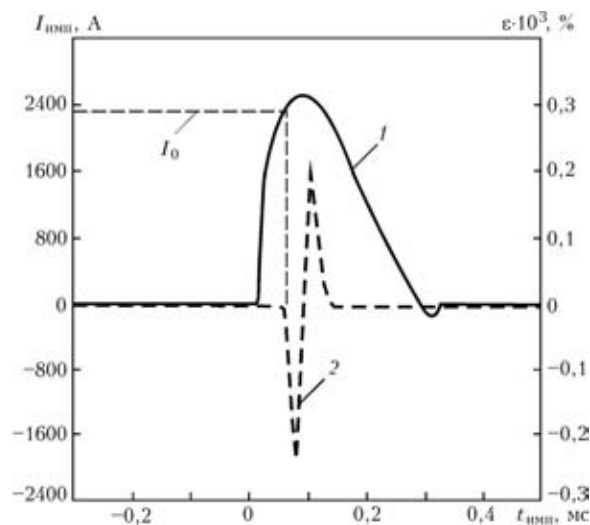


Рис. 2. Изменение формы импульсов тока $I_{\text{имп}}$ (1) и кинетика относительных деформаций ε (2) при ЭДО образцов из стали 15ХН

Следует отметить, что проводимые во всех экспериментах текущие измерения температуры металла для учета влияния нагрева образца при ЭДО показали, что она не изменяется ни в момент действия разряда, ни после завершения обработки при $T = (20 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Проводили эксперименты по оценке влияния длительности временного промежутка воздействия разряда тока на эффективность ЭДО. С этой целью на плоском образце из стали 15ХГМР, закрепленном без растяжения, проводили серию одиночных разрядов на указанном выше режиме при $U_3 = 400$ В, при этом $t_{\text{имп}}$ изменяли от 0,01 до 0,13 мс. Критерием эффективности процесса являлись максимальные значения упругих деформаций ε , определяемых зависимостью $\varepsilon = f(t_{\text{имп}})$, представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что увеличение длительности импульса при стабилизации прочих параметров ЭДО приводит к снижению его относительных деформаций. Это сви-

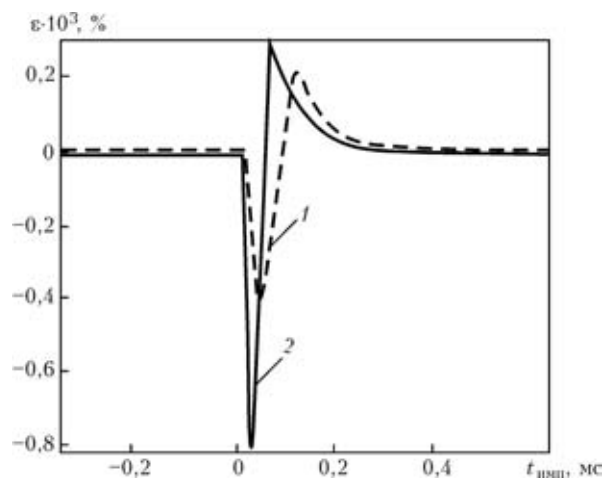


Рис. 3. Кинетика изменения относительных деформаций ε при ЭДО образца из стали 15ХН в момент действия одиночного разряда при $U_3 = 200$ (1) и 400 В (2)

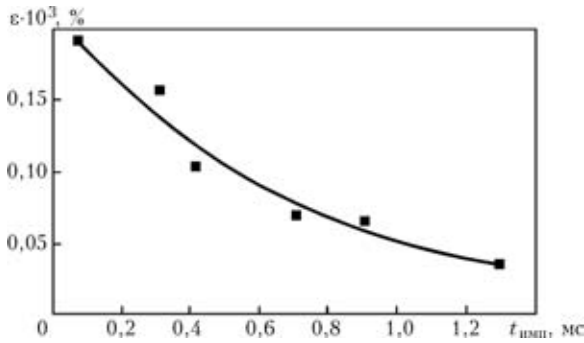


Рис. 4. Зависимость максимальных значений относительных деформаций ε в образцах из стали 15ХГМР от времени $t_{имп}$ воздействия импульса при ЭДО

детельствует о снижении энергии воздействия разряда на материал, а значит, негативно сказывается на эффективности процесса ЭДО. Следовательно, при ЭДО целесообразно минимизировать время электродинамического воздействия при сопутствующем увеличении мощности (удельной энергии q).

Проводили исследования влияния ЭДО на релаксацию продольных напряжений растяжения на образцах цилиндрической формы из стали 18ХГА (рис. 5). Образец закрепляли в захватах специализированной оснастки и подвергали растяжению вдоль продольной оси, значения которого фиксировали тензодатчиком. После достижения требуемой нагрузки в рабочей зоне проводили серию одиночных разрядов с сопутствующим тензометрированием релаксационных процессов в материале. Режим ЭДО соответствовал выбранному ранее для плоского образца из стали 15ХГА при $U_3 = 400$ В. Критерием оценки эффективности процесса служила релаксация продольных напряжений растяжения $\Delta\sigma_p$ — абсолютная величина падения уровня растяжения образца σ_p , инициируемая импульсным разрядом тока. Зависимость $\Delta\sigma_p$ от уровня предварительного растяжения представлена на рис. 6, из которого видно, что при приложении малых значений растягивающих усилий (до 50 МПа) с помощью ЭДО можно снижать уровень значений напряжений растяжения в образцах из стали 18ХГА на 50%. В то же время при более высоком уровне нагружения $\sigma_p = 200$ МПа $\Delta\sigma_p$ снижается на 10...15%. Следует также отметить, что при предварительном растяжении

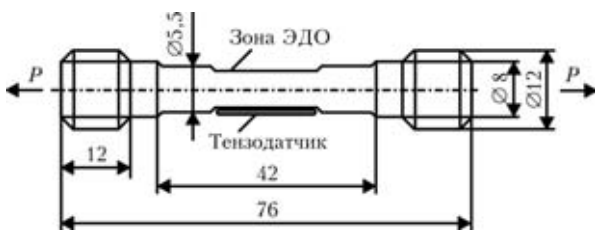


Рис. 5. Схема образца из стали 18ХГА для оценки влияния ЭДО на продольные напряжения растяжения (P — растягивающая нагрузка)

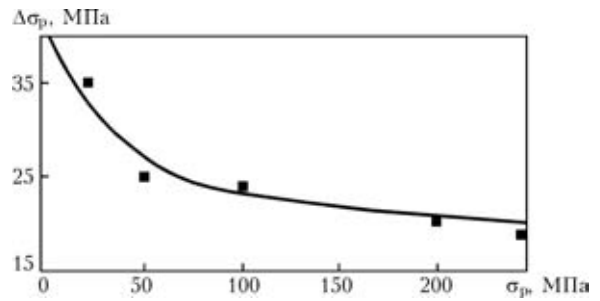


Рис. 6. Изменение напряжений растяжения $\Delta\sigma_p$ в образцах из стали 15ХГА после ЭДО при различных уровнях предварительного растяжения σ_p

образца до 25 МПа после ЭДО удалось получить незначительные (до 10 МПа) напряжения сжатия.

Для оценки влияния количества последовательно выполняемых импульсов n на снижение σ_p образец из стали 18ХГА (см. рис. 5) был подвергнут растяжению до 130 МПа. Затем его последовательно обрабатывали серией из трех разрядов на указанном выше режиме ЭДО. На основании проведенного тензометрирования установлено, что эффективность ЭДО не возрастает с увеличением количества импульсных разрядов при постоянной энергии, запасаемой батареей конденсаторов. Характер исследуемой экспериментальной зависимости представлен на рис. 7. Наибольшее снижение механических напряжений растяжения в исследуемых образцах получено при воздействии первого импульса и составляет 65...70% общего уровня падения напряжений σ_p . При повторном разряде уровень напряжений снижается не более чем на 10...15%, а после третьего — не более чем на 1...5% общего уровня растягивающих напряжений.

На основании полученных результатов можно заключить, что ЭДО является перспективным способом повышения ресурсных характеристик металлических конструкций, в том числе и сварных. Однако вопросы оценки влияния ЭДО на механические свойства сварных соединений различных конструкционных материалов требуют еще дальнейшего изучения.

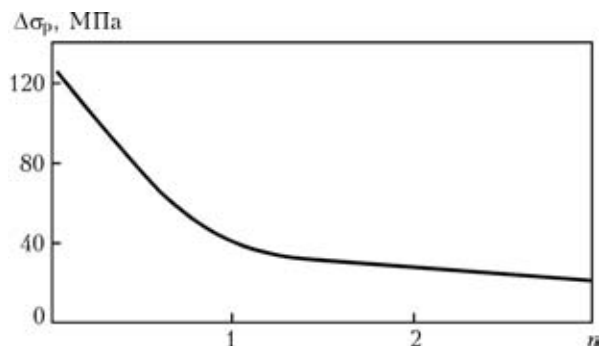


Рис. 7. Влияние количества n импульсов тока на напряжения растяжения σ_p в образцах из стали 18ХГА после ЭДО



1. *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы* / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Авраамов и др. — М.: МГИУ, 2001. — 844 с.
2. *Пластичность и прочность металлических материалов при импульсном воздействии высокоэнергетического электромагнитного поля* / Н. Н. Беклемишев, Н. М. Горбунов, Н. И. Корякин и др. — М.: ИПМ АН СССР, 1989. — 560 с.
3. *Электропластическая деформация металлов* / В. И. Спицин, О. А. Троицкий. — М.: Наука, 1985. — 160 с.
4. *Александров Г. И.* Теория электрических аппаратов. — М.: Высш. шк., 1985. — 312 с.
5. *Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов* / Н. А. Семешко, Р. Ф. Крупский, А. В. Купов и др. // *Материаловедение*. — 2004. — № 7. — С. 29–33.
6. *Финкель В. М.* Физические основы торможения разрушения. — М.: Металлургия, 1997. — 359 с.

Results of investigation into the effect of electrodynamic treatment (EDT) using single pulses on the kinetics of elastic strains and stressed state of heat-resistant steels are given. The experimental procedure is presented, and the laboratory EDT unit is described. It has been established that treatment using single discharges initiates the fields of elastic compression-tension strains in the material treated, and that the values of these strains are in direct dependence upon the discharge voltage. It is shown that EDT can be employed for relaxation of the stressed state of heat-resistant steel structures.

Поступила в редакцию 24.06.2005

Рожденная быть надежной

Любые изделия могут быть повреждены на рабочих площадках, на судостроительных заводах и даже в рабочих цехах. Необходима особая сварочная система, чтобы противостоять таким ситуациям. В идеале она должна быть портативной, удароустойчивой и долговечной. Компания «Fronius» разработала серию машин, удовлетворяющих отмеченным условиям лучше всего: в частности, установку TransPocket 2500/3500 для сварки проволочным электродом и сварки ТИГ. Она оснащена цифровым управлением, обладает резонансным искусственным интеллектом для обеспечения стабильной дуги и идеального качества швов. Установка компактна, легка, портативна.

TransPocket 2500

- Повышенная механическая устойчивость благодаря улучшенной конструкции — идеальна для наружного использования
- Мобильность: весит всего 12,5 кг
- Резонансный искусственный интеллект: стабильная длина дуги на весь период работы и, как следствие, превосходные характеристики сварочного процесса
- Оптимальные характеристики процесса сварки для всех типов электродов (с целлюлозным, рутиловым и основным видами покрытий) диаметром до 5 мм

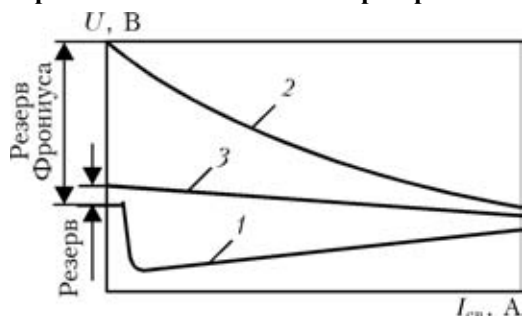
Технические данные

Напряжение сети $\pm 10\%$, В	3×380
Первичный ток, А	до 16
ПВ (при 250 А), %	35
Диапазон тока для сварки	
проволочным электродом, А	10...250
Диапазон тока для сварки ТИГ, А	10...250
Напряжение холостого хода, В	90
Класс защиты	IP23
Тип охлаждения	AF
Масса, кг	12,5



Характеристика дуги:

1 — типичная; 2, 3 — характерные соответственно для резонансного и обычного преобразователя



Характеристики сварки

- Управление мощностью на основе искусственного интеллекта
- Резонансный искусственный интеллект определяет мощность
- Оптимальная адаптация выходных характеристик к процессу сварки
- Специальная характеристика, оптимальная для электродов с целлюлозным покрытием
- Неограниченное использование электродов с целлюлозным покрытием вплоть до диаметра 5 мм
- Специальная характеристика, оптимальная для электродов с основным покрытием (SoftStar)