



ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МЕТАЛЛЫ И ИХ СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ (Обзор)

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

Обобщены опубликованные данные об основных особенностях и механизмах электромагнитного воздействия на структуру основного металла и сварных соединений.

Ключевые слова: металлические материалы, сварные соединения, обработка, электромагнитные воздействия, пластическая деформация, механические свойства, остаточные сварочные напряжения

При изготовлении ответственных сварных конструкций выдвигаются требования к повышению пластических свойств металла шва и зоны термического влияния, претерпевших термомеханический цикл сварки (ТДЦС), а также к снятию остаточных сварочных напряжений (ОСН). Сущность любого способа послесварочной обработки для удовлетворения этим требованиям сводится к способу передачи энергии в объем металла, ее виду и роли. Под влиянием послесварочной обработки происходит релаксация упругой энергии, накопленной во время ТДЦС, путем протекания пластической деформации на разных масштабных уровнях металла. Последняя, протекая на уровне макроскопического металлического тела, обуславливает возможность снижения ОСН I рода, а на уровнях зерен, субзерен и кристаллической решетки металла является одним из ключевых факторов, влияющих на остаточные механические свойства металла сварных соединений. В известных к настоящему времени способах обработки металла используются такие виды энергии, как тепловая, химическая и механическая (энергия взрыва).

В силу объективных и субъективных обстоятельств до настоящего времени остается практически неизученным влияние электромагнитных воздействий (ЭМВ) на физико-механические свойства металла сварного соединения и уровень ОСН. Между тем многочисленные работы в области технической физики показывают, что энергия электромагнитного происхождения может оказывать весьма существенное влияние на протекание пластической деформации, напряженное состояние металлического тела и заметно изменять его механические характеристики. В связи с этим проведенные впервые в середине XIX в. [1] исследования такого рода начиная с 1950–

1960-х гг. приобрели систематический характер. В настоящее время исследуется изменение свойств и механическое поведение большой номенклатуры металлических материалов и неметаллов как без нагрузки, так и под активным нагружением, процесс ползучести или релаксации напряжений под воздействием импульсных и постоянных электрических (ЭП) и магнитных (МП) полей, а также электрического тока (ЭТ) широкого диапазона значений в интервале температур от 4,2 до $1 \cdot 10^3$ К. Параллельно с получением опытных данных разрабатываются теории механизмов влияния ЭМВ, накопленные в этой области знания получили отражение в монографиях и обзорах [1–6]. Результаты некоторых работ приобрели прикладное значение, благодаря им созданы различные промышленные способы обработки металла с использованием ЭМВ, нашедшие широкое практическое применение.

В настоящее время среди публикаций по указанной тематике довольно мало работ по исследованию влияния ЭМВ на металл сварного соединения. Известно, что во время ТДЦС в металле свариваемых деталей протекают процессы термомеханического возбуждения и сопутствующие, но некомпенсирующие их процессы релаксации. При этом происходят упругие, диффузионные и пластические деформации. Имеет место большая неравномерность пространственного распределения последних как в макро-, так и в микрообъемах металла, приводящая к появлению очагов разрушения. Соединение после сварки представляет собой неравновесную систему с высоким уровнем накопленной упругой энергии, до 98 % которой приходится на внутренние напряжения III рода.

Авторы не претендуют на полноту обзора и исчерпывающую глубину понимания физической сути ЭМВ. Тем не менее представляется необходимым составить общую характеристику ЭМВ как потенциального инструмента для оказания влияния на сварочные процессы и процессы, лежащие в основе различных послесварочных обработок, и возможного создания новых самостоятель-



ных и комбинированных способов обработки сварных соединений. Небезынтересны, вероятно, и сложившиеся к настоящему времени представления о механизмах указанного влияния. Практическая полезность такого обзора состоит не столько в анализе фундаментальных физических обобщений, сколько в освещении и осмыслении прикладного значения фактов, полученных исследователями в различных областях физики металлов и изложенных в литературных источниках. Далее кратко излагаются основные особенности влияния ЭМВ на механические свойства материалов и их поведение под нагрузкой исходя из известных результатов исследований.

Влияние электромагнитных воздействий на механическое поведение и свойства материалов. В качестве критериев для оценки уровня ЭМВ можно принять классификацию МП, представленную в работе [1], согласно которой МП по напряженности H делят на сверхслабые ($1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^2$), слабые ($1 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^5$), средние ($1 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^6$), сильные ($5 \cdot 10^6 \dots 80 \cdot 10^6$) и сверхсильные (более $80 \cdot 10^6$ А/м). ЭТ можно оценивать в рамках той же классификации по напряженности создаваемого им МП, максимум которого в случае прямолинейного бесконечного проводника круглого сечения приходится на его поверхность и вычисляется просто.

В многочисленных работах В. И. Спицина, О. А. Троицкого, В. И. Сташенко и других исследователей импульсы ЭТ плотностью $j \sim 1 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^3$ А/мм², длительностью $\tau \sim 1 \cdot 10^{-4}$ с приводили к многократному увеличению деформации, накопленной образцом из цинка с поперечным сечением приблизительно 1 мм² за время испытания в режиме ползучести при температуре 78 К. При воздействии импульсного МП ($H \sim 1 \cdot 10^5$ А/м), а также переменного, постоянного и импульсного ЭТ при равной эффективной плотности $10^2 \dots 10^3$ А/мм² происходит заметное (5...130 %) увеличение скорости деформации из образцов индия, свинца, олова и цинка, нагружаемых в режиме ползучести [7]. Под воздействием импульсов на диаграммах растяжения образцов наблюдаются синхронные сбросы растягивающего усилия [1, 2], что, по мнению исследователей [2], свидетельствует о разупрочнении металла в момент импульса.

С помощью сильных ЭМВ в некоторых случаях можно интенсивно пластически деформировать металлические образцы без приложения к ним механической нагрузки. Так, импульсами МП вызывали остаточную деформацию образцов из сплавов меди [1, 8] и алюминия [9], а импульсами ЭТ ($500 \dots 7000$ А/мм²) существенно изменяли рельеф полированной поверхности фольг из меди за счет выхода на нее дислокаций и перегруппировки исходных неровностей [10].

Заметное влияние на механическое поведение материалов оказывают также слабые ЭМВ. При испытаниях таких металлов, как алюминий, кобальт, медь, железо, никель и титан, а также сплавов Д16, ХН77ТЮ, Х18Н10Т и других, на ползучесть при $T = 20 \dots 1150$ °С отмечен многократный рост скорости ползучести при наложении ЭП (напряженность электрического поля $E = 10$ В/мм), МП ($H = 1,6 \dots 40$ кА/м) и протекании постоянного ЭТ ($j = 0,15$ А/мм²). Степень проявления эффекта указанных воздействий была максимальной в первые несколько минут после их начала, с течением времени она уменьшалась, и приблизительно через 0,5 ч деформирования в условиях ЭМВ скорость ползучести снижалась примерно до своего исходного значения [11–14].

Экспозиция материалов (LiF, NaCl, кремния и алюминия) в слабом МП или во время протекания через проводящие твердые тела ЭТ ($j < 0,3$ А/мм²) при некоторых условиях позволяет увеличить от нескольких десятков до нескольких сотен процентов пробег дислокаций за фиксированное время нагружения образцов [6, 15–17]. Эффект увеличения подвижности дислокаций наблюдается не только при совмещении ЭМВ с нагружением, но и после завершения пятичасовой экспозиции кремния в слабом МП он сохранялся практически неизменным первые 150 ч и уменьшился вдвое через 400 ч [16]. Постэффекты наблюдались также и при сильных ЭМВ [2].

Применение рентгеновских и электронных методов исследования позволяет выявить в микроструктуре материалов широкую гамму изменений, вызываемых ЭМВ [2]. Так, изучалось влияние обработки импульсами тока с чередующейся полярностью ($j = 6,0 \dots 16,4$ А/мм²; $\tau = 2,0 \dots 2,5$ с при паузе 4...10 с) образцов из высокопрочной стали АК-25, имитирующих соединения, полученные электронно-лучевой сваркой. Рентгеноструктурным анализом установлено снижение плотности дислокаций и напряжений II рода в металле образцов, полученных электронно-лучевой сваркой, после обработки [18]. При этом также наблюдались заметные изменения структурно зависимых магнитных характеристик материала. В целом изменения микроструктуры, вызываемые ЭМВ, весьма разнообразны, и их исследования могли бы стать предметом отдельной статьи. Для нас целесообразнее рассмотреть изменение структурно зависимых механических свойств материалов, подвергшихся ЭМВ.

Механические свойства оцениваются как после завершения ЭМВ (остаточные), так и во время ЭМВ. Во втором случае ЭМВ имеют место в течение всего времени испытания или на определенных его стадиях, например, по достижении заданного значения деформации или напряжения, на стадии неустановившейся ползучести и пр.



Электромагнитная обработка несколькими импульсами тока ($\tau \sim 10^{-2} \dots 10^{-1}$ с, $j \sim 10^2$ А/мм²), не исключая тепловое воздействие, обеспечивает высокие остаточные пластические свойства сплавов титана и алюминия [19, 20]. Авторы этих работ сообщают о повышении относительного остаточного удлинения на 30...60 %, ударной вязкости на 20...50 % и снижении предела текучести на 30...50 % по сравнению с исходным состоянием сплавов с заданным наклепом. При этом ударная вязкость и характеристики трещиностойкости сплавов алюминия на 10...15 % превышают уровень, который обеспечивается традиционным отпусканием этих сплавов в течение 1 ч, а временное сопротивление σ_b может как возрастать на 5...30 %, так и значительно снижаться.

ЭМВ оказывают влияние при циклическом нагружении материалов. Электромагнитной обработкой (в том числе постоянным ЭТ, $j \sim 0,1$ А/мм², совмещенным с усталостными испытаниями) в 2...3 раза увеличивали долговечность армко-железа, сталей и сплавов титана [21–23].

Изменение механических свойств материалов при совмещении ЭМВ с процессом испытаний весьма разнообразно, но не всегда благоприятно с точки зрения практических потребностей и зависит от многих факторов (природы и исходного состояния материала, вида и параметров электромагнитного воздействия, внешней среды, температуры, скорости деформации и др.). Оно исследовалось в основном для коррозионностойких сталей, сплавов титана, алюминия и меди [1], но есть также данные о высокочистом и техническом железе [11].

В работах М. Л. Бернштейна, В. Н. Пустовойта [4] и других авторов показана высокая эффективность совмещения операций термообработки и ЭМВ, которая выражается в появлении под влиянием слабых и сильных МП полезных для практики устойчивых изменений в структуре, фазовом составе и механических свойствах сталей различных классов.

Воздействие МП позволяет полностью реализовать механизмы упрочнения углеродистых и легированных конструкционных сталей при закалке на мартенсит. Так, σ_b сталей 45Х и 30ХГСА, закаленных с наложением МП ($H \sim 10^6$ А/м), оказалось в 1,5 раза выше, чем после закалки без МП. Изучение характеристик изломов и диаграмм растяжения показало при закалке в МП наличие пластической деформации, предшествовавшей разрушению, и позволило определить условный предел текучести, что было бы невозможным при закалке без МП.

Наложение МП на процесс бейнитного превращения низколегированных сталей может приводить как к разупрочнению сталей (1...3 % для 30ХГСА и 45Х), так и к их упрочнению (3...8 %

для 65Г и 14Х2ГМР), но при этом во всех случаях имело место увеличение ударной вязкости KCU на 11...87 %. Наложение МП на перлитное превращение заэвтектоидных углеродистых сталей приводит к упрочнению с некоторым снижением пластичности и ударной вязкости. Доэвтектоидные стали, претерпевшие перлитное превращение в МП, существенно разупрочняются и имеют заметно увеличенное относительное остаточное удлинение при несколько меньшем относительном остаточном сужении по сравнению со сталями, прошедшими превращение без МП [4].

Воздействие постоянным МП ($H = 66$ кА/м) во время отпуска стали 40Х при температуре 550 °С позволило избежать отпускного охрупчивания, вызванного диффузией серы и фосфора к границам зерен. В этом случае сталь после указанной обработки имела ударную вязкость в 3 раза выше, чем после отпуска без МП при равной твердости [24].

Представления о механизмах электромагнитных воздействий. Накоплен значительный массив экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что с применением различного вида ЭМВ с легко измеряемыми или рассчитываемыми параметрами связаны то или иное изменение механических свойств материалов, которые также несложно определить. Однако промежуточные звенья этой причинно-следственной цепи до сих пор остаются вне поля зрения исследователей в силу сложности непосредственного наблюдения процессов на микроуровне вещества. В то же время физической науке известно многообразие проявлений взаимодействия электромагнитного поля и вещества.

Такое положение дел пока не позволило объяснить все экспериментально наблюдаемые эффекты с позиций одной универсальной теории. Вместо этого отдельными исследователями и физическими школами в качестве механизмов ЭМВ обсуждаются представления и гипотезы о связи явлений на малоизученных структурных уровнях твердого тела с видимым изменением его механических характеристик [1–6, 25].

При объяснении влияния мощного импульсного ЭТ на механическое поведение высокочистых монокристаллов и технических сплавов ключевая роль нередко отводится явлению электрон-дислокационного взаимодействия (ЭДВ) [1, 3, 26]. Квантово-механическому описанию ЭДВ посвящены работы В. Я. Кравченко, аналитически предсказавшего это явление, а также ряда других исследователей [27–29]. При характеристике ЭДВ используют аналогию между динамическим действием обычного ветра на неподвижные предметы и воздействием электронов проводимости, образующих ЭТ «электронный ветер», на дислокации, предполагая, что электронный газ, как и всякий



газ, отличается определенной вязкостью [26]. В силу указанного воздействия электронного газа имеет место ускорение скользящих дислокаций и облегчение срыва со стопоров закрепленных дислокаций, что и является причиной интенсификации пластической деформации и снижения сопротивления металла деформированию.

Рассчитано напряжение $\sigma(j)$, характеризующее механический эквивалент воздействия электронного ветра, на скользящие и неподвижные дислокации, которое зависит от плотности тока и квантово-механических характеристик решетки металла. Вычислен также порядок плотности тока ($1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^5$ А/мм²), при котором будет происходить размножение дислокаций в результате работы источников Франка–Рида без внешней механической нагрузки.

Обсуждаемое взаимодействие обратимо: направленный поток любых структурных дефектов приводит к возмущению электронной подсистемы кристалла и появлению электрического поля или тока [27, 28, 30], что и подтверждается в ходе наблюдений при сварке давлением [31].

Результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований Ю. И. Головина, В. М. Финкеля, А. А. Слеткова и других ученых показали, что вершины макро- и микротрещин, неметаллические включения и другие неоднородности структуры металла при прохождении по нему импульса ЭТ большой плотности являются концентраторами электромагнитного и температурного полей.

В зависимости от параметров ЭТ и вида неоднородностей температура, до которой нагреваются смежные с этими дефектами малые локальные объемы металла, может достигать значений температуры его рекристаллизации и даже плавления. При этом температура за пределами этих объемов не превышает своих значений, заметно влияющих на исходную структуру. Эти явления оказывают влияние на рост развивающейся трещины, ускоряя и подавляя его [32].

В работе [19] принято обоснованное результатами экспериментов и опытов Ю. И. Головина с сотрудниками положение о том, что если в металл вводится удельная энергия, равная приблизительно $1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^{10}$ Дж/м³, за время τ , меньшее чем время τ^* выхода температурного поля в установившийся режим ($\tau^* \sim \rho c \lambda^{-1} l^2$, где ρ — плотность; c — удельная теплоемкость; λ — теплопроводность материала; l — характерный структурный размер материала, принятый приблизительно $1 \cdot 10^{-4}$ м), то вводимая энергия будет рассеиваться преимущественно в микрообъемах металла с электрической проводимостью ниже матричной (структурные неоднородности, микро- и субмикродомены), вызывая там значительный нагрев. Для

металлов расчет τ^* дает порядок $1 \cdot 10^{-4}$ с. При $t < \tau^*$ понятие общего нагрева макрообъема металла теряет смысл, поскольку температурное поле за время τ не успевает выравняться между зонами преимущественного тепловыделения и остальным объемом металла, т. е. имеет локально-неоднородный (мозаичный) характер. Повышение остаточных пластических свойств металлов, обработанных мощными электрическими импульсами, авторы указанной выше работы объясняют действием в локальных объемах электромагнитных и термоупругих усилий, вызывающих микропластическую деформацию, способствующую процессам рекристаллизации и «залечивания» микродефектов структуры. Снижение же сопротивления металлов деформированию в момент импульса согласно данной научной школы обусловлено наступлением «состояния динамической (высокоскоростной) сверхпластичности» [19].

Специфические процессы в ферромагнетиках под воздействием внешнего МП оказывают влияние на структуру, фазовый состав и микропластическую деформацию соответствующих сталей. Они способствуют измельчению продуктов превращения $\gamma \rightarrow \alpha$, а также более раннему и полному его протеканию. Как следует из работы [4], основное влияние оказывают следующие факторы: изменение магнитного состояния аустенита выше точки Кюри, приводящее к самопроизвольному появлению малых однодоменных ферромагнитных областей, возникающих и аннигилирующих в парамагнитной γ -матрице по статистическим законам; снижение термодинамического потенциала ферромагнитных фаз сталей; появление магнитострикционных локальных напряжений; анизотропия смещений атомов кристаллической решетки, нарушающая структурную эквивалентность октаэдрических пустот и меняющая ход диффузионных процессов.

В частности, смещения доменных границ в ферромагнитных кристаллах при намагничивании способствуют откреплению дислокаций от стопоров и вызывают скольжение незакрепленных дислокаций на расстояния приблизительно $1 \cdot 10^{-6}$ м [33, 34].

Рассматривают и такой фактор интенсификации пластической деформации с помощью ЭТ и МП, как пондеромоторное действие — электродинамическое действие электрических и магнитных полей, вызывающее объемную силу F , сжимающую материал проводника в радиальном направлении (пинч-эффект). В работах [1, 9, 25] утверждается, что пинч-эффект в условиях импульсных МП при сильно выраженном скин-эффекте может оказать доминирующий вклад в пластическое деформирование металлов. Степень его проявления зависит от напряженности МП, глу-



бины его проникновения в материал и природы материала проводника. В различных работах вклад пинч-эффекта при протекании через проводник ЭТ оценивают по формулам, которые сводятся к известному выражению:

$$\mathbf{F} = \mathbf{j}\mathbf{B}, \quad (1)$$

где \mathbf{j} — вектор плотности тока; \mathbf{B} — вектор магнитной индукции, создаваемой этим током.

Проведены эксперименты [7, 35] по выяснению роли пинч-эффекта, в которых последний создавался изолированно от ЭДВ. Из результатов экспериментов и расчетов по (1) вытекает, что напряжения, вызываемые пинч-эффектом, пренебрежимо малы даже при значительной плотности тока. Однако следует отметить, что используемые методики [7, 35] не безупречны с точки зрения соответствия характера, специально создаваемого МП в материале образца при прохождении через него ЭТ. Вывод о малости рассчитанного по (1) значения объемного усилия может быть применим к диа- и парамагнетикам. Однако в случае ферромагнетиков индукция \mathbf{B} внутри материала может быть представлена как $\mathbf{B} = B_0 + \mathbf{B}_j$ (здесь B_0 — вектор индукции внешнего МП, \mathbf{B}_j — вектор индукции, обусловленной намагниченностью самого тела). При намагничивании ферромагнетика \mathbf{B}_j может меняться в широких пределах и при определенных условиях достигать значений напряжений поля Вейсса [36]. Это поле обусловлено обменным взаимодействием электронов незаполненных *d*- и *f*-подуровней атомов переходных ферро- и антиферромагнитных металлов и имеет место внутри их доменов. Напряженность поля Вейсса составляет $1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^9$ А/м [37], что соответствует плотности тока $1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$ А/мм². Кроме того, изменения магнитной проницаемости μ и плотности γ ферромагнетиков, помещенных во внешнее МП, также влияют на \mathbf{F} .

На этом основании объемная радиальная сила пинч-эффекта для проводника из ферромагнитного материала должна определяться из выражения [38]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{j}\mathbf{B} - 1/2H^2 \text{grad } \mu + 1/2 \text{grad } (H^2 \gamma \delta \mu / \delta \gamma), \quad (2)$$

где первое слагаемое представляет собой силу, сжимающую проводник с током в МП, второе — усилие, обусловленное пространственным изменением магнитной проницаемости, третье — усилие, вызванное зависимостью магнитной проницаемости от плотности ферромагнетика. Составляющие \mathbf{F} могут меняться в широких пределах. Так, начальная магнитная проницаемость μ_n магнитомягких и магнитотвердых материалов составляет $40 \dots 35000$ ед. При определенном значении внешнего МП μ_n снижается до единицы, следо-

вательно, ее изменение может составлять $1 \cdot 10 \dots 1 \cdot 10^4$ раз.

Можно подсчитать, что порядок плотности ЭТ, достаточный для пластической деформации ферромагнитного образца в результате пинч-эффекта, составляет $1 \cdot 10^5$ А/мм² [38, 39]. При этом возникают трудности в планировании и проведении экспериментов как по выбору мощных источников тока, так и по способам интенсивного теплоотвода, исключаяющего тепловое действие тока. Очевидно, в случае ферромагнитного материала трудности могут быть устранены при использовании поля Вейсса, создающего объемные усилия, достаточные для пластического деформирования образца. Известно [40], что возбуждение поля Вейсса при соблюдении определенных условий возможно при прохождении через ферромагнетик тока плотностью всего $8 \dots 12$ А/мм².

Влияние слабых ЭМВ (магнитная индукция $B \cong 1$ Тл, $j \cong 10^{-1}$ А/мм²) на скорость ползучести, подвижность дислокаций невозможно объяснить их силовым или энергетическим действием по изложенным выше механизмам, поскольку энергия, сообщаемая такими ЭМВ любому структурному элементу, обычно ниже порога активации любых изменений. В этом случае пластическое течение в материале представляют как совокупность химических реакций между межузельными атомами, атомами из состава примесных атмосфер — стопоров дислокаций — и атомами в составе ядер дислокаций.

Тогда в рамках теории спин-зависимых проявлений в химической физике предлагается механизм влияния слабых МП на синглет-триплетные переходы (спиновую конверсию) в атомах, составляющих комплекс взаимодействующих дислокаций и стопора. Высота создаваемого примесью потенциального барьера движению дислокации определяется спиновыми характеристиками, радиусами и зарядами ионов, их количеством в комплексе. МП изменяет состояние электронов, обеспечивающих ковалентную связь в комплексе дислокация – стопор, снимая или налагая спиновые запреты на те или иные термодинамически возможные реакции. В ряде случаев это делает возможным уменьшение доли ковалентной связи в общей энергии взаимодействия стопора и дислокации, тем самым снижается высота потенциального барьера, облегчается срыв дислокаций со стопоров и уменьшается концентрация центров примесей, способных стать эффективными стопорами. В работе [25] предполагается, что, кроме ковалентной составляющей энергии взаимодействия стопора и дислокаций, МП может снижать и долю электростатического их взаимодействия. Указанные факторы обуславливают наблюдаемое увеличение подвижности дислокаций. На пластичность химически чистых, механически ненаг-



руженных материалов, а также при высокой частоте изменения МП (приблизительно $1 \cdot 10^2$ Гц) слабые МП влияют неэффективно [6].

Кроме основных физических процессов, рассмотренных выше, изучается и обсуждается также роль явлений на внутренних и внешних поверхностях раздела [3, 14, 25], макронеоднородных температурных полей [1, 25], роль динамической неравновесности скоплений дислокаций [25], джоулевого нагрева и др.

Практическое использование электромагнитных воздействий. Результаты исследований влияния ЭМВ на протекание пластической деформации в металлах позволили предложить новые способы обработки металлов давлением (например, электропластическое волочение проволок и трубок малого диаметра [2, 41], электростимулированная прокатка тонких лент из ванадия и молибдена, а также из сплавов [26, 42]), а также способы обеспечения высоких эксплуатационных свойств конструкций.

Данные работ М. А. Кривоглаза, В. Д. Садовского, М. Л. Бернштейна, В. Н. Пустовойта создают предпосылки для весьма перспективного применения термообработки, совмещенной с наложением МП. Например, закалка и отпуск в МП быстрорежущей стали обеспечивает ее фазовый состав и механические свойства на том же уровне, что и традиционная термообработка, т. е. закалка и трехкратный отпуск. Вместе с тем, экспозиция в МП сверл после традиционной обработки малоэффективна (их износостойкость заметно возрастает лишь при малых скоростях резания) [4], либо вообще неэффективна [43].

В основе некоторых способов обработки металла лежит возможность осуществления сверхбыстрого нагрева и охлаждения его тонкого поверхностного слоя с помощью импульсных ЭМВ [44].

В области сварочного производства широко используют электромагнитные воздействия на зону сварки для управления массопереносом, кристаллизацией и формой шва.

Однако известны единичные попытки использования электромагнитной энергии для обработки металла сварных соединений. В частности, осуществление процесса электрошлаковой сварки с сопутствующей электроразрядной обработкой позволило отказаться от нормализации соединений стали перлитного класса, а также повысить коррозионную стойкость соединений стали 10X18N10T, полученных способом электрошлаковой сварки с электроразрядной обработкой [45]. Имеются данные [5] о том, что обработка импульсами тока оказывает благоприятное влияние на прочностные и пластические свойства неоднородных материалов типа биметаллов, полученных сваркой взрывом.

Таким образом, установлено, что ввод электромагнитной энергии в металл вызывает в нем широкую гамму сложных процессов, происходящих на макро-, микро- и субмикроскопическом уровне. Это может оказать влияние на поведение металла, а также на его остаточные механические свойства. Целесообразны дальнейшие исследования по оценке влияния электромагнитных воздействий на металл сварных соединений.

1. *Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В.* Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. — Киев: Наук. думка, 1990. — 160 с.
2. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. — М.: Наука, 1985. — 168 с.
3. *Савенко В. С.* Механическое двойникование металлов в условиях внешних энергетических воздействий. — Минск: Технопринт, 2000. — 212 с.
4. *Бернштейн М. Л., Пустовойт В. Н.* Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. — М.: Машиностроение, 1987. — 256 с.
5. *Методы оценки механических свойств металлических материалов в условиях электрических воздействий / А. И. Тананов, Н. Н. Беклемишев, Б. Н. Журкин и др. // Завод. лаб. — 1983. — № 7. — С. 59–66.*
6. *Головин Ю. И.* Магнитопластичность твердых тел // Физика твердого тела. — 2004. — 46, № 5. — С. 769–803.
7. *Спицин В. И., Троицкий О. А.* Влияние электрического тока и импульсного магнитного поля на скорость ползучести металла // Докл. АН СССР. — 1974. — 216, № 6. — С. 1266–1269.
8. *Стрижало В. А., Воробьев Е. В.* Скачкообразная деформация металла в условиях воздействия импульсного магнитного поля и криогенных температур // Пробл. прочн. — 2003. — № 1. — С. 137–142.
9. *Головин Ю. И., Тялин Ю. Н., Умрихин В. М.* Поле механических напряжений и прочность цилиндрических проводников в пинчующих электромагнитных полях // I Всесоюз. конф. «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность металлов и сплавов», г. Юрмала, 29 сент. – 1 окт. 1987 г.: Тез. докл. — М.: Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова АН СССР, 1987. — С. 37.
10. *Щербаков И. П., Чураев Д. В., Светлов В. Н.* Исследование изменения субмикрорельефа поверхности медных образцов при пропускании по ним импульсов электрического тока большой плотности // Журн. техн. физики. — 2004. — 74, № 4. — С. 139–142.
11. *Каменецкая Д. С., Пилецкая И. Б., Ширяев В. И.* О влиянии магнитного поля на пластическую деформацию железа // Докл. АН СССР. — 1971. — 199, № 6. — С. 1289–1291.
12. *Кишкин С. Т., Клытин А. А.* Эффекты электрического и магнитного воздействия на ползучесть металлов и сплавов // Там же. — 1973. — 211, № 2. — С. 325–327.
13. *Клытин А. А.* О влиянии магнитного и электрического полей на ползучесть // Металловедение и терм. обраб. металлов. — 1973. — № 8. — С. 2–6.
14. *Клытин А. А.* О пластической деформации металлов при наличии электрического воздействия // Пробл. прочн. — 1975. — № 7. — С. 20–25.
15. *Дацко О. И., Абрамов В. С.* Влияние импульсов слабого магнитного поля на процессы микропластической деформации и деформационного старения // Физ. и техн. высоких давлений. — 2003. — 13, № 1. — С. 84–90.
16. *Бадьлевич М. В., Иунин Ю. Л., Кведер В. В.* Влияние магнитного поля на стартовые напряжения и подвижность индивидуальных дислокаций в кремнии // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 2003. — 124, № 3. — С. 664–669.



17. Дацко О. И. Дислокационное внутреннее трение материала с вакансиями в импульсах слабого магнитного поля // Физ. твердого тела. — 2002. — 44, № 2. — С. 289–293.
18. Исследование остаточных напряжений в металле сварных соединений / В. А. Сокирко, Е. Ю. Бережинская, П. П. Дивак, Ю. Л. Надеждин // Всесоюз. науч.-техн. конф. «Электронно-лучевая сварка в машиностроении», г. Николаев, 12–14 сент. 1989 г.: Тез. докл. — Николаев: ВНИИТСМ «Сириус», 1989. — С. 104.
19. Пластичность и прочность металлических материалов при импульсном воздействии высокоэнергетического электромагнитного поля / Н. Н. Беклемишев, Н. М. Горбунов, Н. И. Корягин и др. / АН СССР. Ин-т пробл. механики. — Препр. — М., 1989. — 56 с.
20. Валеев И. Ш., Барыкин Н. П., Трифонов В. Г. Изменение структуры и механических свойств алюминиевого сплава АМГб при воздействии мощными импульсами тока // Физ. мет. и металловедение. — 2003. — 96, № 4. — С. 85–89.
21. Влияние электрического тока на малоцикловую усталость стали / Г. В. Карпенко, О. А. Кузин, В. И. Ткачев, В. П. Руденко // Докл. АН СССР. — 1976. — 227, № 1. — С. 85–86.
22. Эволюция ферритоперлитной структуры при импульсном воздействии электроток / О. В. Соснин, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов и др. // Физ. и хим. обраб. материалов. — 2003. — № 4. — С. 63–69.
23. Лоскутов С. В., Левитин В. В. Влияние электроимпульсной обработки на структуру и долговечность титановых сплавов // Журн. техн. физики. — 2002. — 72, № 4. — С. 133–135.
24. Пудов В. И., Соболев А. С. Оптимизация физико-механических свойств поликристаллических многокомпонентных ферромагнитных материалов методом термомагнитной обработки. Ч. 2. Термомагнитная обработка легированных сталей // Физ. и хим. обраб. материалов. — 2004. — № 5. — С. 94–97.
25. Батаронов И. Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журн. — 1999. — № 10. — С. 93–99.
26. Климов К. М., Шнырев Г. Д., Новиков И. И. Об «электропластичности» металлов // Докл. АН СССР. — 1974. — 219, № 2. — С. 323–324.
27. Фикс В. Б. Увлечение и торможение подвижных дефектов в металлах электронами проводимости. Роль закона дисперсии электронов // Журн. эксп. и теорет. физики. — 1981. — 80, № 4. — С. 1539–1542.
28. Фикс В. Б. О взаимодействии электронов проводимости с одиночными дислокациями в металлах // Там же. — 1981. — 80, № 6. — С. 2313–2316.
29. Нацик В. Д., Маковоз Д. Б. Взаимодействие плазменных колебаний электронов проводимости металла с дислокациями // Физ. мет. и металловедение. — 1987. — 63, № 4. — С. 645–653.
30. Кравченко В. Я. О возможности наблюдения движения дислокаций в проводящих кристаллах по электрическим эффектам // Физ. твердого тела. — 1967. — 9, № 4. — С. 1050–1056.
31. Харченко Г. К., Фальченко Ю. В., Игнатенко А. И. О механоэлектрическом эффекте при сварке давлением // Автомат. сварка. — 1997. — № 1. — С. 50.
32. Слетков А. А. Торможение трещин импульсами электрического тока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Воронеж, 1977. — 18 с.
33. Чеботкевич Л. А., Урусовская А. А., Ветер В. В. Движение дислокаций под действием магнитного поля // Кристаллография. — 1965. — 10, № 5. — С. 688–691.
34. 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.
35. Стицин В. И., Троицкий О. А. Электропластический эффект в металлах // Вест. АН СССР. — 1977. — № 11. — С. 10–15.
36. Паршенков Н. А. Оценка влияния индуктивной составляющей намагничивания ферромагнитных конструкций на сварочные процессы // Автомат. сварка. — 1991. — № 5. — С. 23–28.
37. Гуденаф Дж. Магнетизм и химическая связь / Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1963. — 325 с.
38. Шимони К. Теоретическая электротехника / Пер. с нем. — М.: Мир, 1964. — 773 с.
39. Киттель Ч. Элементарная физика твердого тела / Пер. с англ. — М.: Наука, 1965. — 366 с.
40. Латышев А. П. Теория размагничивания. — Л.: ВМОЛА, 1960. — 350 с.
41. Троицкий О. А. Электропластическая деформация стали растяжением и волочением // Сталь. — 1974. — № 5. — С. 450–453.
42. Климов К. М., Новиков И. И. О перспективах развития методов электростимулированной прокатки металлов // Металлы. — 2004. — № 3. — С. 45–51.
43. Структура та властивості поверхневого шару інструменту з сталі Р6М5 після магнітно-абразивної обробки / М. М. Бобіна, В. С. Майборода, Н. В. Ульяненко, А. В. Бобін // Фізика і хімія твердого тіла. — 2002. — 3, № 4. — С. 577–580.
44. Дудкина Н. Г., Захаров И. Н. Исследование микротвердости поверхностного слоя углеродистых сталей после электромеханической обработки // Металлы. — 2004. — № 4. — С. 64–70.
45. Дудко Д. А., Кузьменко А. Б. Виброимпульсное воздействие на кристаллизующийся металл сварочной ванны при ЭШС // Автомат. сварка. — 1997. — № 11. — С. 32–36.

Data on the main features and mechanisms of electromagnetic action on the structure of the base metal and welded joints are described.

Поступила в редакцию 23.07.2006