

УДК 621.791.09:785.375:539.4

Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, О. Л. Миходуй, Т. Г. Соломийчук

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОС ТЕКУЧЕСТИ И
СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

Досліджено вплив ЕДО на особливості формування макропластичних деформацій при одновісному розтягненні основного металу та зварних з'єднань малоуглецевої сталі Ст3. Досліджено механізм формування слуг Чернова-Людерса при одновісному розтягненні зразків Ст3 в умовах електродинамічного впливу. Металографічний аналіз зразків Ст20, показав, що при ЕДО відбувається еволюція феритно-перлітної структури.

Ключові слова: *електродинамічна обробка, макропластична деформація, слуги Чернова-Людерса, одновісний розтяг, феритно-перлітна структура.*

Развитие современной техники вызывает необходимость исследования перспективных подходов к продлению ресурса металлических конструкций. Одним из новых направлений является разработка методов обработки конструкционных материалов и их сварных соединений, базирующихся на воздействии импульсного электрического поля [1]. Таковой, в частности, является электродинамическая обработка (ЭДО), основанная на эффекте воздействия электродинамических сил на токопроводящие материалы. За счет преобразования электрической энергии импульсов тока в энергию магнитного поля, инициирующего в металле деформационные процессы, можно влиять на механические свойства конструкционных материалов. При суперпозиции электродинамических сил с внешними нагрузками, приложенными к металлическим материалам, в них могут возникать пластические деформации, влияющие на их структуру и свойства.

Представленные в работах [2–4] данные показывают, что при электроимпульсных воздействиях в металлах и сварных соединениях возникают местные деформации, достигающие предела текучести материала. Полученные данные основывались на измерениях снижения сопротивления материала деформированию при различных параметрах электродинамического воздействия и внешнего нагружения. Экспериментальные методики [3, 4] не позволяют визуально исследовать характер протекания процессов макропластического деформирования при электродинамическом воздействии. Эффективным методом визуализации распределения полей пластических деформаций в малоуглеродистой стали является изучение распределения полос Чернова-Людерса (ПЧЛ), появление которых обусловлено развитием “местной” текучести. Они возникают, когда металл обладает четко выраженным пределом текучести, что характерно для малоуглеродистой стали. При этом концентрация напряжений способствует появлению и развитию этих полос деформации [5]. Изучение формирования ПЧЛ при ЭДО малоуглеродистой стали позволяет

© Лобанов Леонід Михайлович, академік НАН України, заступник директора ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, Пашин Микола Олександрович, Миходуй Ольга Леонідівна, кандидати технічних наук, наукові співробітники цього ж інституту Соломийчук Тетяна Григорівна, інженер цієї ж установи.

выявить закономерности протекания макропластического деформирования материала при импульсном воздействии электрического тока.

Цель работы — изучить закономерности формирования полей пластических деформаций (на основе ПЧЛ) и изменения структуры малоуглеродистой стали при ЭДО.

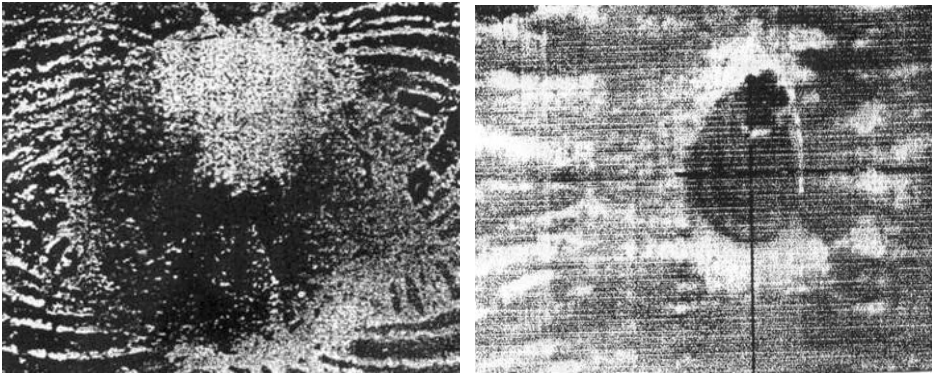
Для оценки влияния ЭДО на распределение ПЧЛ использовали образцы “лопаточного типа” из малоуглеродистой стали Ст3 толщиной 4 мм с размерами рабочей части 110×30 мм. Обработку рабочей части образцов проводили сериями разрядов тока с помощью лабораторной установки, принцип работы которой изложен в [2]. После завершения ЭДО проводили полировку и термообработку поверхности металла, что позволило четко выявлять остаточную картину ПЧЛ.

В настоящей работе изучали распределение ПЧЛ в малоуглеродистой стали при ЭДО в условиях продольного растяжения образцов. Из работы [3] известно, что при обработке токовыми разрядами предварительно растянутых образцов металла в материале дискретно снижается сопротивление деформированию, наблюдаемое в виде характерных сбросов нагружения на диаграмме растяжения σ – ϵ .

Испытания выполняли на разрывной машине ЦДМ-10 с усилием растяжения до 10 т при скорости деформирования 6 мм/мин при температуре 293 К. В течение всего цикла нагружения проводили текущую запись изменения растягивающего усилия до момента достижения образцом предела текучести (образования “шейки”). При этом на различных этапах нагружения и обработки импульсами тока фиксировались картины распределения ПЧЛ на поверхности металла. Для этого образец, закрепленный в захватах испытательной машины, растягивали до заданной величины и проводили ЭДО серией импульсов тока с текущей фиксацией падения деформирующего усилия и картин ПЧЛ. Для импульсной обработки применяли такие параметры режима ЭДО: напряжение U и максимальное амплитудное значение силы тока на электроде I_2 соответственно 480 В и 3200 А.

Проводили исследования формирования картин ПЧЛ в основном металле и стыковых сварных соединениях. Сварные швы выполнялись вручную покрытым электродом диаметром 4 мм марки АНО4 на режиме: наплавки: напряжение $U_d = 70$ В, сварочный ток $I = 150$ А, скорость сварки $V_{св} — 5$ м/час.

На начальном этапе исследования проводили сопоставление картин ПЧЛ при механическом и электродинамическом воздействии на малоуглеродистую сталь. Для этого одна серия полированных образцов подвергалась статическому нагружению посредством вдавливания шарика (проба Эриксона) [5], а другая — электродинамическому воздействию одиночным разрядом тока на режиме, представленном выше (рис. 1). Оба вида нагружения имеют общий признак — локальность приложения нагрузки, то есть точечный контакт рабочего органа (шарик или электрод) с обрабатываемой поверхностью. Кроме того, в обоих случаях имеет место высокая интенсивность импульсного воздействия (механического или электродинамического), благодаря чему в месте индентирования рабочего органа возникают локальные зоны пластических деформаций, характеризующихся высоким градиентом и расположенные вблизи места контакта рабочего органа с поверхностью образца.



a

б

Рис. 1. Полосы Чернова-Людерса:

a — при механическом вдавлении шарика (проба Эриксона); *б* — при электродинамическом воздействии, где - - - - линия измерения профилограмм полос

Анализ полос (рис. 1) показывает, что геометрические характеристики точечного механического воздействия отличаются от наблюдаемых при ЭДО. ПЧЛ при вдавлении шарика имеют форму эллипсоидов (рис. 1, *a*), размеры которых сравнимы с диаметром отпечатка. Это говорит о высокой концентрации зон “местной” текучести при точечном механическом нагружении малоуглеродистой стали.

Иная картина распределения полос наблюдается при одиночном токовом разряде (рис. 1, *б*). В этом случае ПЧЛ представляют собой систему взаимно параллельных полос, расходящихся в обе стороны от контактного пятна. Если при надавливании шарика ПЧЛ сконцентрированы в зоне отпечатка, то при ЭДО полосы пересекают все поперечное сечение. Различные системы ПЧЛ, образующиеся при сварке и остывании малоуглеродистой стали, подобные представленным на рис. 1, *б*, классифицируются как “поперечные”. Проводили исследования по измерению профилограмм образцов вдоль продольной оси на лицевой и обратной поверхностях в зоне импульсного воздействия (контакта электрода). Измерения выполняли до и после одиночного разряда тока с помощью специализированной линейки, укомплектованной индикаторной головкой с ценой деления 1,0 мкм. Профилограммы поверхностей образца, представляющие собой разность h , мкм показаний прибора до и после ЭДО, представлены на рис. 2. Измерения показали, что остаточное формоизменение поверхностей образца в зоне обработки длиной

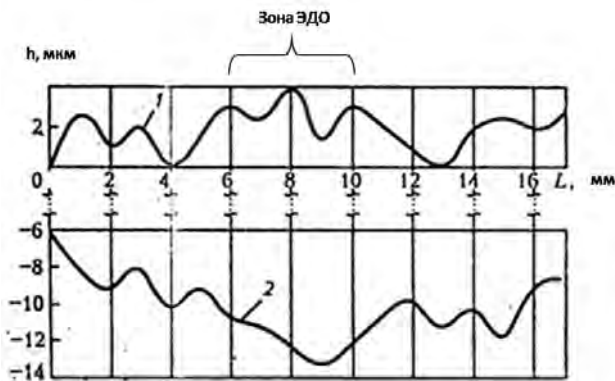


Рис. 2. Профилограммы лицевой (1) и оборотной (2) поверхностей образца после ЭДО, где L , мм — длина измеряемого участка, h , мкм, высота полос после ЭДО

L имеет волновой характер. Волнообразная форма профилограммы обеих сторон образца свидетельствует о том, что эффект электродинамического воздействия имеет объемный.

На первом этапе исследований особенностей формирования полей пластических деформаций при ЭДО ступенчато нагружали продольным растяжением плоские шлифованные образцы “лопаточного типа” из Сталь 3 (рис. 3).

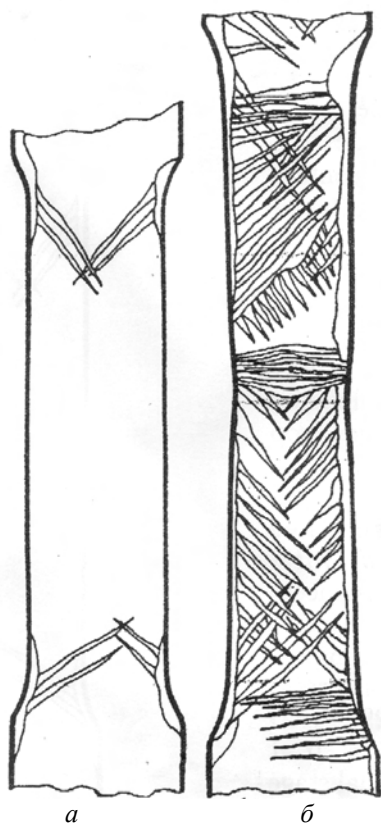


Рис. 3. Типичные системы ПЧЛ на образцах стали Ст3 при одноосном растяжении при различных уровнях нагружения σ , МПа: при $\sigma = 290$ МПа (а); в области предразрушения (образования “шейки”) при $\sigma = 320$ МПа (б)

После растяжения образца до заданной величины процесс останавливали с выдержкой по времени 12–15 мин. При этом визуально осматривали полированную поверхность металла и фиксировали появление ПЧЛ. При сопоставлении картины ПЧЛ с соответствующим уровнем нагружения можно видеть, что процесс образования полос текучести начинается при $\sigma = 280$ МПа (рис. 3, а) в зонах концентраторов у краев рабочей части образца. Полосы ориентированы под углом 45° к линии нагрузки. После растяжения до значений σ , превышающих 300 МПа (образования “шейки”) нагружение

было прекращено. При этом отмечали активное пластическое течение всей рабочей части образца, характеризующееся развитой системой ПЧЛ, ориентированных под углами 45 и 90 градусов к оси растяжения (рис. 3, б), что свидетельствует о наличии касательной и нормальной составляющих напряженного состояния в фазе предразрушения металла. Сопоставляя картину ПЧЛ у “шейки” образца, то есть в зоне активного пластического течения металла в стадии предразрушения, с полосами при электродинамическом воздействии (рис. 1, б), можно видеть их геометрическое подобие. При нагружении образцов основного металла с сопутствующей ЭДО, процессы формирования пластических деформаций начинаются при более низких уровнях растяжения по сравнению с вариантом, показанным на рис. 3. Так, при растяжении образца до 190 МПа с последующей ЭДО после трех импульсов значения σ упали до 110 МПа, а на полированной поверхности металла образовались поперечные ПЧЛ (рис. 4, а). При этом в зонах импульсного воздействия и крепления на образце тактного провода (рис. 4, поз. 1,

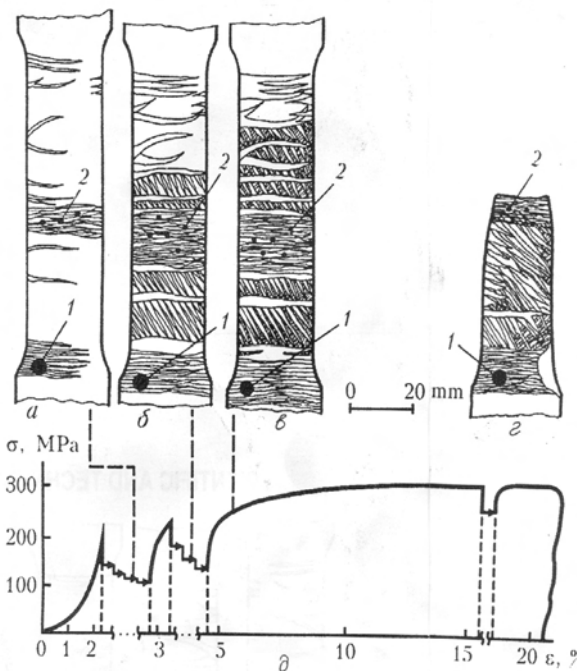


Рис. 4. Системы ПЧЛ на образцах Ст3 при ЭДО в условиях одноосного растяжения, где 1 — место крепления провода, 2 — зона контакта электрода с образцом при ЭДО:

а — при растяжении до при $\sigma = 190$ МПа и после 3-х импульсов тока; б — при $\sigma = 230$ МПа и после 2-х импульсов; в — после единичного токового воздействия и растяжения до при $\sigma = 250$ МПа; г — после разрушения; д — диаграмма σ - ϵ растяжения образцов стали Ст3 при сопутствующей ЭДО

2) наблюдали сгущение полос, что свидетельствует об интенсивном пластическом течении металла, локализованном в зонах электрического контакта. Следует отметить, что процесс образования пластических деформаций стали Ст3 без применения ЭДО начинается при значениях растягивающей нагрузки в 2 раза больших, чем при обработке токовыми импульсами. При повторном нагружении образца до 230 МПа с последующей ЭДО наблюдали дискретное падение значений σ до 140 МПа. Это сопровождалось развитием поперечных полос, их сгущением у зоны контакта и появлением наклонных ПЧЛ с ориентацией под 45° к оси нагрузки (рис. 4, б). После электродинамического воздействия и растяжения образца до $\sigma = 250$ МПа концентрация ПЧЛ увеличивается. При этом наблюдается появление полос различной ориентации (рис. 4, в). Сравнивая ПЧЛ, полученные при $\sigma = 250$ МПа (рис. 4, в) с сопутствующей ЭДО, с представленными на рис. 3, а ($\sigma = 290$ МПа) можно видеть отличия в картинах формирования полос. Если при нагружении без ЭДО до 290 МПа наблюдали начальную стадию процесса образования локальных пластических деформаций (рис. 3, а), то в случае применения ЭДО уже при $\sigma = 200$ МПа (рис. 4, в) имеет место развитое пластическое деформирование рабочей части образца, близкое к картине, наблюдаемой при разрушении материала (рис. 4, г). Диаграмма σ - ϵ при ЭДО стали Ст3 представлена на рис. 4, д.

Локальное пластическое течение при одноосном растяжении образцов сварных соединений (рис. 5, а) при значениях $\sigma = 230$ МПа на 20% ниже, чем при нагружении основного металла (рис. 3, а). При этом процесс формирования ПЧЛ носит более интенсивный характер, а полосы имеют различную ориентацию по отношению к линии нагрузки. При возрастании значений σ до 270–280 МПа наблюдали развитие ПЧЛ (рис. 5, б), интенсивность которых возрастала пропорционально росту нагрузки до образования “шейки” (рис. 5, в). При этом характер формирования пластических деформаций близок к наблюдаемому на образцах основного металла (рис. 3, б).

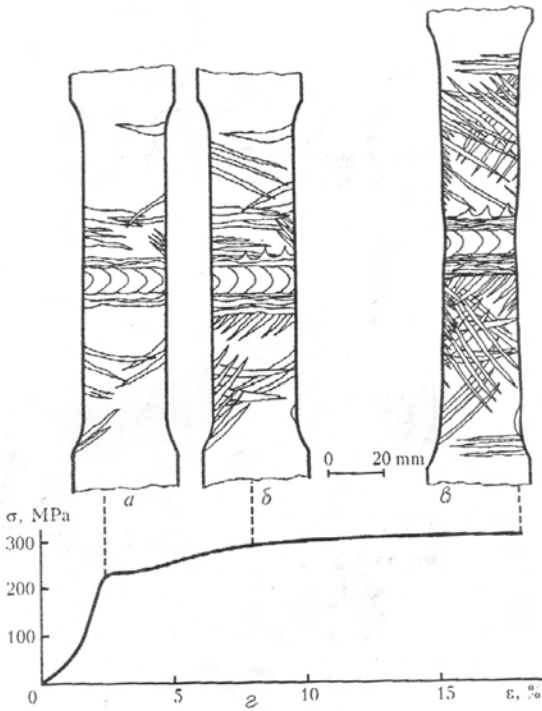


Рис. 5. Типичные системы ПЧЛ на образцах сварных соединений стали Ст3 при одноосном растяжении, где 1, 2 — аналогично рис. 4: *a* — при $\sigma = 230$ МПа; *b* — при $\sigma = 280$ МПа; *в* — в области предразрушения (образование “шейки”); *г* — диаграмма σ - ϵ при растяжении образцов стали Ст3

240 МПа и после трех импульсов тока (рис. 6, б) интенсивность формирования ПЧЛ намного выше, чем при тех же уровнях нагрузки, но без ЭДО (рис. 5, б).

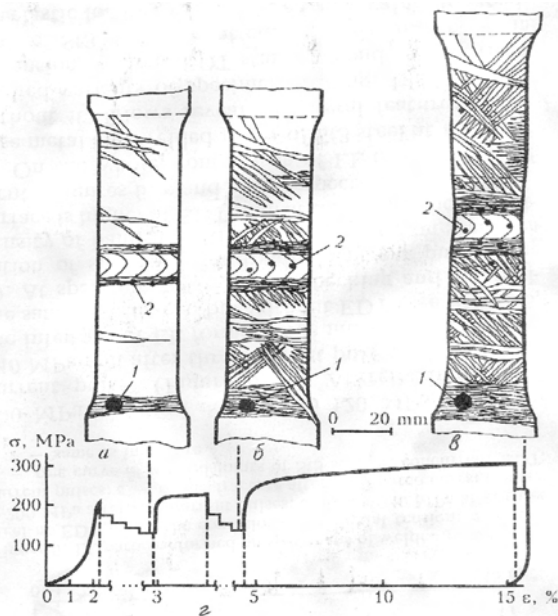


Рис. 6. Системы ПЧЛ на образцах сварных соединений Стали 3 при ЭДО в условиях одноосного растяжения: *a* — при $\sigma = 200$ МПа и после 4-х импульсов тока; *b* — при $\sigma = 240$ МПа и после 3-х импульсов тока; *в* — перед разрушением после одиночного импульса тока; *г* — диаграмма σ - ϵ растяжения сварных соединений Стали Ст3 при сопутствующей ЭДО

При растяжении образца до образования шейки и последующего одиночного импульса тока насыщенность поверхности образца разнонаправленными полосами при ЭДО выше, чем при растяжении без обработки (соответственно рис. 6, *в* и 5, *в*).

В целом, сопоставляя полосы образцов основного металла и сварных соединений стали Ст3 при и без ЭДО можно выделить ряд особенностей, характерных для двух исследуемых вариантов. Так, образование ПЧЛ при растяжении без ЭДО начинается за пределом упругости стали 3, а при импульсном воздействии тока — в упругой области нагружения. При равных значениях σ для вариантов нагружения с применением и без ЭДО в случае токового воздействия интенсивность пластического течения (частота полос) выше. Это видно из сопоставления рис. 5, *б* и 6, *б*. На стадии предразрушения, то есть образования “шейки”, в случае ЭДО наблюдается более интенсивное развитие ранее образовавшихся полос по сравнению с обычным растяжением образца (рис. 5, *в* и 6, *в*). Таким образом, получены визуальные подтверждения того факта, что импульсы тока вызывают в сварных соединениях малоуглеродистой стали образование зон пластического течения.

Изучали особенности структурообразования малоуглеродистой стали при электродинамических воздействиях импульсным током. Изменение структур после ЭДО изучали методами электронной фрактографии и металлографического анализа. Изучение топографии изломов образцов проводили с использованием растрового электронного микроскопа JSM 840, укомплектованного системой микроанализаторов “Analitik Link” — 860/500 и “Optek” при ускоряющем напряжении до 20 кВ в режиме вторичных электронов.

Для металлографических исследований использовали образцы стали Ст20 размерами $20 \times 20 \times 7$ мм, обработанные на режиме ЭДО, используемом для инициирования ПЧЛ. Микроструктуру выявляли посредством травления в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Изучение структур проводили на микроскопе “Неофот-32” при различных увеличениях, а измерения микротвердости исследуемых образцов проводили на микротвердомере М-400 при нагружении 10 г.

Фрактографический анализ изломов стали Ст3 проводили после ЭДО образцов лопаточного типа, которые доводили до разрушения по описанной выше методике.

Сопоставление топографии изломов стали Ст3 в исходном состоянии и после ЭДО представлены на рис. 7. Поверхность излома необработанного металла пронизана точечными дефектами типа “расслой” (рис. 7, *а*), а в зоне влияния ЭДО (светлый текстурированный участок на рис. 7, *б*) на изломах обработанных образцов протяженность и количество расслоев уменьшилось. При более детальном изучении излома материала в исходном состоянии (рис. 8) можно видеть, что его ферритоперлитная структура состоит из равноосных ямок отрыва, чередующихся с фасетками квазискола и линейными дефектами типа расслой, ориентированными вдоль проката (рис. 8, *а*, *б*). Характер разрушения вдоль берегов расслоя характеризуется как хрупкий из-за преобладания крупных фрагментов скола (рис. 8, *в*).

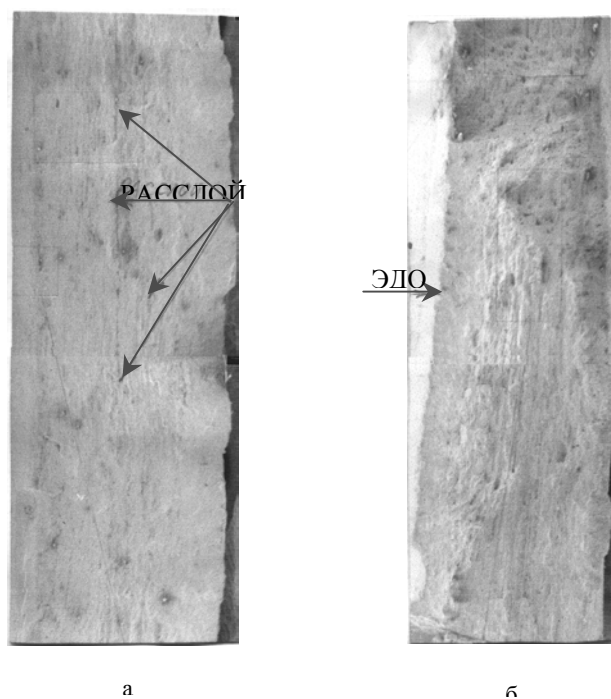


Рис. 7. Фрактограммы изломов поперечного сечения разрушенных образцов стали Ст3 (x18): а — исходный металл с расслоенной структурой; б — металл после ЭДО

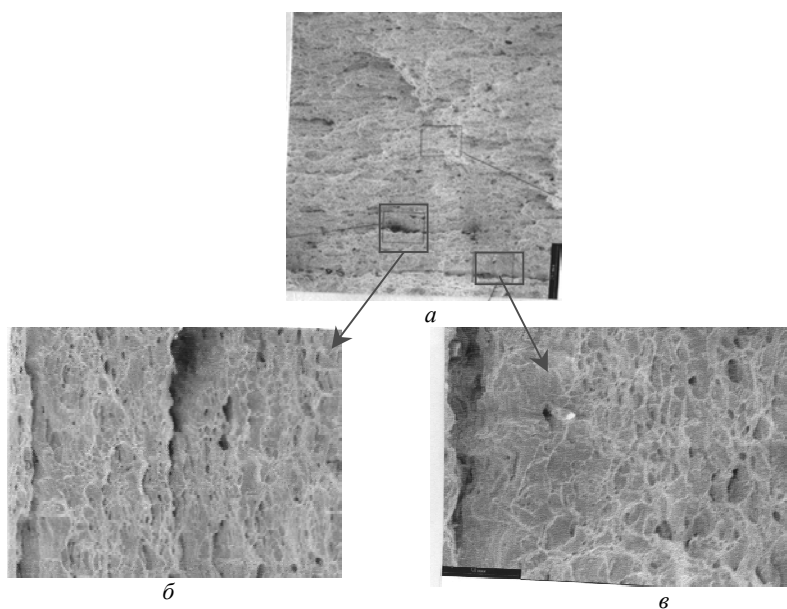


Рис. 8. Фрактограммы изломов стали Ст3 в исходном состоянии: а — общий вид (x100); б — структура расслоя (x300); в — фрагменты скола в зоне расслоя (x500)

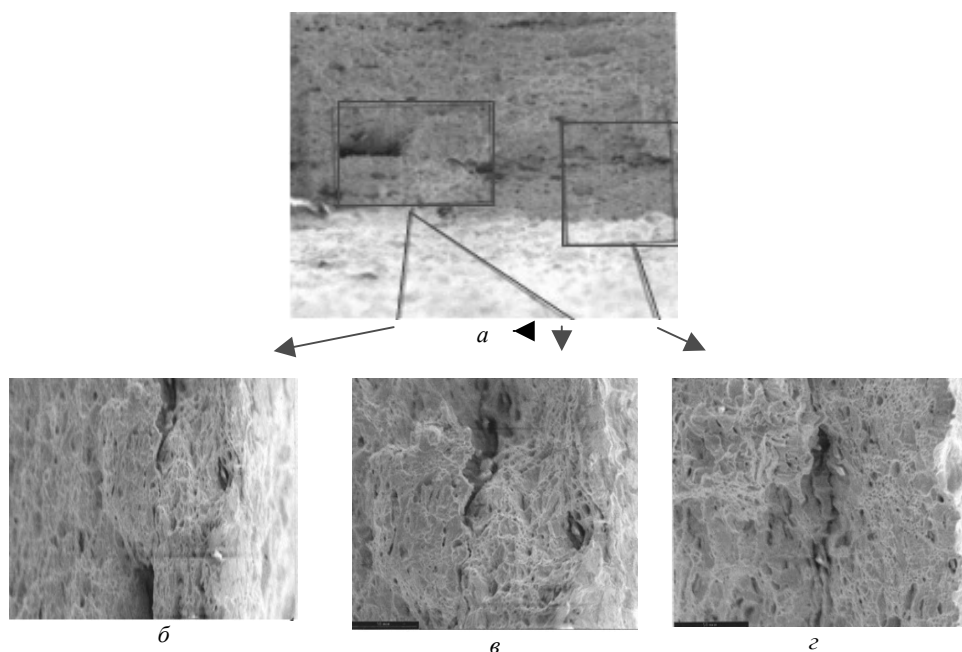


Рис. 9. Фрактограммы изломов стали Ст3 после ЭДО: общий вид (а); $\times 100$, притупление вершины расслоя после ЭДО (б); $\times 300$, укрупненная структура излома в зоне притупления расслоя (в); $\times 500$, г) сегрегация структуры при сращивании берегов расслоя $\times 500$

После ЭДО в зоне электродинамического воздействия наблюдали изменение топографии излома (рис. 9). Доля фасеток квазискола уменьшилась при сопутствующем увеличении участков с равноосным ямочным рельефом, что свидетельствует о возрастании вязкой составляющей разрушения. ЭДО инициировала сегрегацию участков с ямочным рельефом и фрагментами скола в зоне импульсного воздействия (рис. 9, а, г) взамен упорядоченной неоднородной структуре необработанной стали. После ЭДО в зоне расслоя наблюдали сращивание берегов дефекта с образованием перемычки (рис. 9, а, б, в), которая состоит из разориентированных фасеток квазискола, чередующихся с мелкими равноосными ямками. Площадь фрагментов скола после ЭДО уменьшилась в 3–5 раз (рис. 9, б) по сравнению с необработанной структурой стали Ст3 (рис. 8, б). Образование перемычки можно объяснить на основании работы [6], где отмечено, что трещиноподобные дефекты при электроимпульсных воздействиях могут играть роль концентратора энергии электрического поля, доводя ее значения в малых объемах полости дефекта до критических значений. Это, наряду со скоростным деформированием электродом образца из-за электродинамического давления, инициируемого при ЭДО, может вызывать диффузионное сращивание берегов расслоя.

Изучали особенности структурообразования малоуглеродистой стали Ст20 в зоне электродинамического скоростного деформирования под воздействием одиночных разрядов тока при зарядном напряжении 480 В без учета начального растяжения металла. Задачей этой части исследования явилась оценка изменения структуры металла в зоне импульсного контактного нагружения, осуществляемого в импульсном электрическом поле, инициируемом ЭДО. Известно, что на процесс разрушения

II. Результати наукових досліджень

материалов при скоростном деформировании, в том числе, и при ЭДО из-за касательных усилий на контактных поверхностях вследствие различия их кривизны [7] возникают градиенты деформаций (как указано выше) и температур, что может вызвать нежелательный нагрев и расплавление обрабатываемого материала. При импульсном контактном давлении полусферической поверхности электрода на плоскость лицевой поверхности образца могут развиваться трещины в направлении главных нормальных напряжений. Оценка поверхности металла в зоне ЭДО представляет интерес с точки зрения ее повреждаемости при совместном воздействии импульсного тока и высокоскоростного деформирования.

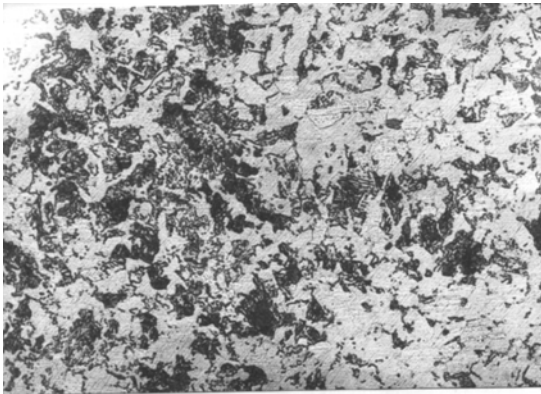


Рис. 10. Микроструктура стали Ст20 в исходном состоянии

Для сопоставления результатов влияния ЭДО изучали микроструктуру малоуглеродистой стали в исходном состоянии. Анализ показал, что она неоднородна с величиной зерна, соответствующей баллу № 9 шкалы 1 по ГОСТ5639-82, имеет

неметаллические включения — сульфиды, вытянутые вдоль проката (рис. 10). В целом, микроструктура так же ориентирована вдоль проката; средние значения микротвердости HV 0,01 для феррита и перлита приведены в таблице.

Таблица 1

Значения HV 0,01 для стали Ст20 для различных схем контактного воздействия при ЭДО

№	Схема контактного воздействия при ЭДО	HV 0,01, кг/мм ²		
		“ядро”	Феррит в зоне ЭДО/за зоной	Перлит в зоне ЭДО/за зоной
1	Исходный металл без ЭДО	–	149	219
2	Свободное опирание	626	144/154	191/255
3	Жесткое закрепление	–	135/145	190/168

ЭДО образцов стали Ст20 проводили при двух различных схемах контактных взаимодействий электрода с обрабатываемой поверхностью. При первой схеме ЭДО выполняли в условиях свободной опоры сферического торца электрода на плоскость образца. При второй схеме ЭДО осуществляли в условиях жесткого закрепления торца на обрабатываемом металле.

При визуальном осмотре на лицевой поверхности обработанных образцов в зоне электродинамического воздействия наблюдали контактные зоны

диаметром 3,5–4,0 мм с конфигурацией внутренней поверхности двух типов, определяемых условиями закрепления торца.

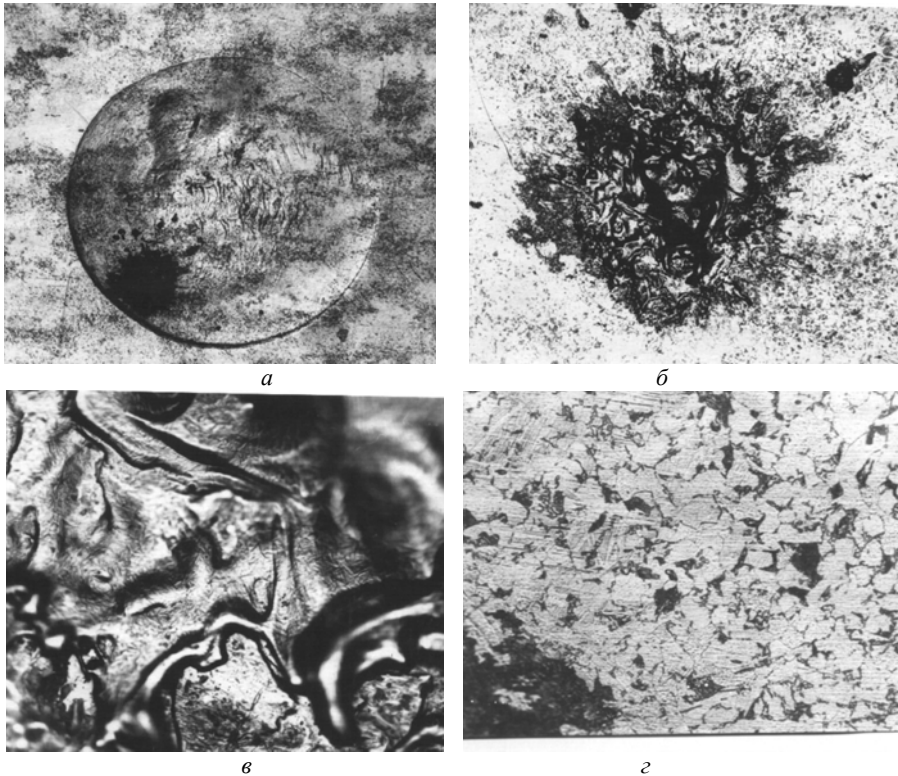


Рис. 11. Структура стали Ст20 после ЭДО при свободном опирании торца электрода: *a* — общий вид контактной зоны ($\times 25$); *б* — микроструктура в зоне “ядра” ($\times 100$); *в* — микроструктура в центре “ядра” ($\times 500$); *г* — микроструктура у края “ядра” ($\times 500$)

После ЭДО стали Ст20 при свободной опоре полусферического торца (рис. 11) внутренняя поверхность зоны состоит из “ядра” темного цвета и участка термического влияния в форме круга (рис. 11, *a*), ограничивающего системы полос различной ориентации, предположительно линий скольжения. На поверхности “ядра” наблюдали оплавленные “древовидные” участки с максимальным линейным размером до 0,3 мм, а также светлотравленные участки с игольчатой мартенситной структурой (рис. 11, *б*, *в*). Наличие “ядра” можно объяснить локальным оплавлением металла в зоне ЭДО электродуговым разрядом, возникающего при упругом отскоке торца электрода при электродинамическом воздействии. Микроструктура основного металла за границей контактной зоны — упорядоченная ферритно-перлитная, аналогична структуре исходного материала, представленной на рис. 10. При этом в металле, ограниченном контактной зоной, вблизи “ядра” наблюдали системы линий различной ориентации (рис. 11, *г*), определяемые как линии скольжения, что свидетельствует о наличии локальной пластической деформации в зоне ЭДО, возникающей в металле при электродинамическом давлении торца электрода. Значения микротвердости представлены в таблице.

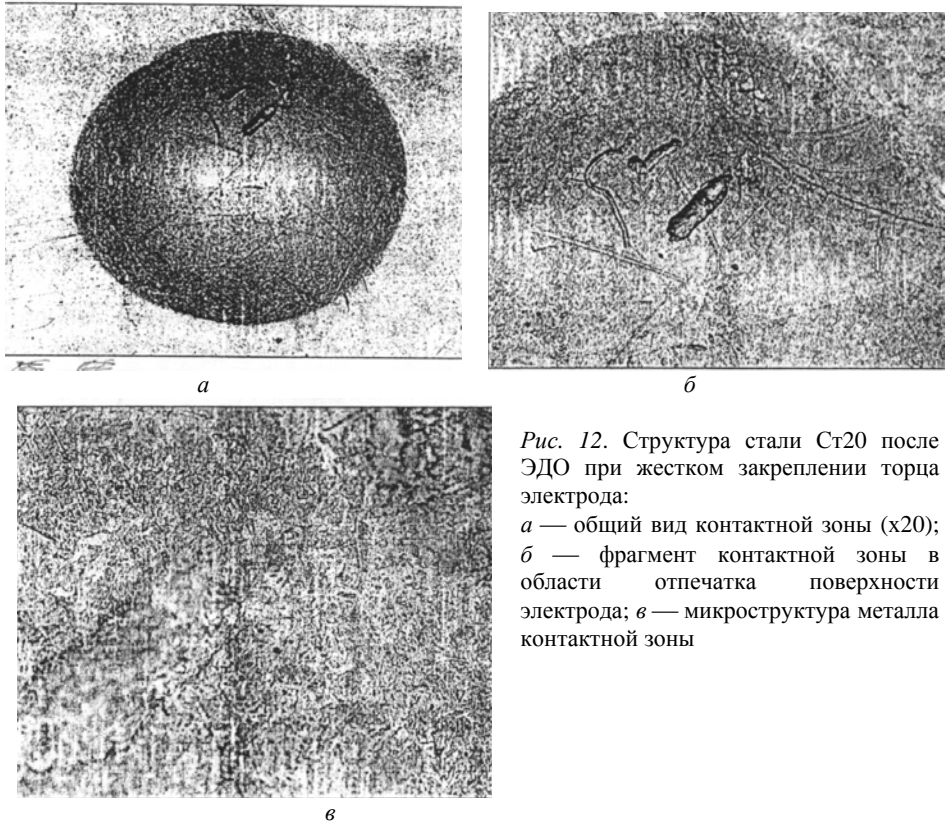


Рис. 12. Структура стали Ст20 после ЭДО при жестком закреплении торца электрода:
а — общий вид контактной зоны (x20);
б — фрагмент контактной зоны в области отпечатка поверхности электрода; в — микроструктура металла контактной зоны

На контактной поверхности при ЭДО в условиях жесткого закрепления электрода наблюдали четкий отпечаток индентирования сферического торца на поверхности металла (рис. 12). При изучении структуры внутри границы контакта электрода “ядра” и выплесков металл не обнаружен (рис. 12, а). При этом в зоне индентирования отмечали механические отпечатки сферической части электрода в месте его касания поверхности металла (рис. 12, б). Это свидетельствует о том, что в момент действия разряда тока металл находился в пластическом состоянии, а не в состоянии расплава. Изучение структуры при большем увеличении (рис. 12, в) показало отсутствие локального подплавления зерен. Однородная микроструктура зоны состоит из мелкодисперсного феррита и перлита, а закалочных структур, как при ЭДО по первой схеме, обнаружено не было. Микроструктура металла за зоной контакта так же феррито-перлитная. Значения микротвердости представлены в табл. 1. Внутри контактной зоны наблюдали полосы различной кривизны, природа которых до конца не выявлена. Предположительно это линии скольжения, искаженные полусферическим отпечатком, или это отпечаток рельефа электрода, сформированный на образце в момент действия разряда тока.

Приведенные в настоящей работе данные показывают, что при ЭДО малоуглеродистой стали и ее сварных соединений имеет место образование локальных зон пластических деформаций высокой интенсивности, что должно повлиять на служебные характеристики тонколистовых металлических конструкций.

Выводы

Установлено, что ЭДО при одноосном растяжении образцов основного металла и сварных соединений стали Ст3 вызывает в материале падение деформирующего усилия в упругой и пластической областях нагружения, сопровождаемое развитием характерных полос Чернова-Людерса.

Установлено, что ЭДО инициирует в малоуглеродистой стали Ст 3 процессы образования местных пластических деформаций (полос Чернова-Людерса) в упругой и упругопластической областях растяжения материала.

Металлографический анализ образцов стали Ст20 после ЭДО показал, что в зоне электроимпульсного воздействия имеет место изменение феррито-перлитной структуры с формированием линий скольжения.

Исследовано влияние ЭДО на особенности формирования макропластических деформаций при одноосном растяжении основного металла и сварных соединений малоуглеродистой стали Ст3. Изучен механизм формирования полос Чернова-Людерса при одноосном растяжении образцов стали Ст3 в условиях электродинамического воздействия. Металлографический анализ образцов стали Ст20 показал, что при ЭДО имеет место эволюция ферритно-перлитной структуры с сопутствующим формированием линий скольжения в зоне обработки.

Ключевые слова: электродинамическая обработка, макропластические деформации, малоуглеродистая сталь, полосы Чернова-Людерса, одноосное растяжение, феррито-перлитная структура, микротвердость.

The effect of specimens of St3 steel base metal and welded joints with pulses of electric current on peculiarities of formation of macroplastic deformation in the joints subjected to uniaxial tension has been studied. An experimental procedure has been developed, which is used to investigate the mechanism of formation of Luders lines in uniaxial tension under the electrodynamic impact conditions. It is established that the characteristic simultaneous formation of plastic deformations inducted by welding and current impact takes place in electrodynamic treatment of welded joints on steel St3. After research of specimens of low-carbon steel St20 was determined, that the line of slip take place after electrodynamic treatments.

Keywords: electrodynamic treatment, macroplastic deformation, low-carbon steel, Luders lines, uniaxial tension, flat blade-shaped specimen, ferrite and perlite structure, line of slip, microhardness.

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. *Лобанов Л. М. Влияние электродинамической обработки на напряженно-деформированное состояние теплоустойчивых сталей / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. Ю. Скульский и др. // Автомат.сварка. – 2006. – № 5. – С. 28–32.*
3. *Лобанов Л. М. Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов и др. // Автоматическая сварка. – 2007. – № 6. – С. 11–13.*

II. Результати наукових досліджень

4. *Семашко Н. А.* Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов / Н. А. Семашко, Р. Ф. Крупский, А. В. Купов и др. // *Материаловедение*. – 2004. – № 7 (Спецвыпуск). – С. 29–33.
5. *Механические свойства металлов* / М. Л. Бернштейн, В. А. Зеймовский. – М.: Металлургия, 1978. – 495 с.
6. *Головин Ю. И.* Образование кратера в вершине трещины под действием мощного локального электромагнитного поля / Ю. И. Головин, В. М. Финкель, А. А. Слетков // *Физика и химия обработки материалов*. – 1977. – № 3. – С. 18–23.
7. *Гудченко В. М.* Структурные изменения поверхностных слоев стали ШХ-15 в условиях пульсирующего контактного нагружения / В. М. Гудченко, В. Г. Лютцау // *Высокоскоростная деформация*. – М.: Наука, 1971. – С. 92–95.