



## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ Ст3

Академики НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ, В. И. МАХНЕНКО,**  
**Н. А. ПАЩИН**, канд. техн. наук, **В. П. ЛОГИНОВ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние обработки импульсами тока образцов основного металла и сварных соединений стали Ст3 на формирование в них пластических деформаций при одноосном растяжении. Разработана экспериментальная методика, с помощью которой изучен механизм формирования полос Чернова–Людерса при одноосном растяжении в условиях электродинамического воздействия. Установлено, что при электродинамической обработке сварных соединений стали Ст3 имеет место характерное совместное формирование пластической деформации, зависимое собственно от сварочного процесса и токового воздействия.

*Ключевые слова:* электродинамическая обработка, пластические деформации, низкоуглеродистая сталь, полосы Чернова–Людерса, одноосное растяжение, остаточное сварочное напряжение, стыковое соединение, плоский образец лопаточного типа

Развитие современной техники вызывает необходимость поиска перспективных подходов к продлению ресурса металлических конструкций. Одним из новых направлений в этой области является создание способов обработки конструкционных материалов и их сварных соединений, базирующихся на воздействии электромагнитного поля на токопроводящие материалы [1], таковой, в частности, является электродинамическая обработка (ЭДО). Путем преобразования электрической энергии импульсов тока в энергию электромагнитного поля, инициирующего в металле деформационные процессы, можно воздействовать на механические свойства конструкционных материалов. При взаимодействии электродинамических сил с внешними нагрузками, приложенными к сварным соединениям обрабатываемого изделия, в швах и околошовной зоне (ОШЗ) могут возникать пластические деформации, влияющие на механические свойства конструкционных материалов.

Одним из факторов, снижающих работоспособность металлических конструкций, является наличие сварочных остаточных напряжений (ОН), которые негативно влияют на прочность и сопротивление усталости сварных соединений. С помощью ЭДО материалов [2] и их сварных соединений [3] в них можно инициировать процессы, которые могут снизить общий уровень напряженного состояния металлических конструкций.

Представленные в работе [3] результаты исследований свидетельствуют, что при воздей-

ствии импульсами тока в металлах и их сварных соединениях возникают местные деформации, значения которых достигают предела текучести материала  $\sigma_T$ . Полученные данные основывались на измерениях относительных деформаций при различных параметрах электроимпульсного воздействия и внешнего нагружения. Экспериментальные методики, реализованные в работах [3, 4], не позволяют визуально исследовать характер протекания процессов пластического деформирования при электродинамическом воздействии. Эффективный способ визуальной оценки распределения полей пластических деформаций в низкоуглеродистых сталях основывается на изучении картин распределения полос Чернова–Людерса (ПЧЛ), формирование которых обусловлено развитием местной текучести, а именно ПЧЛ возникают, когда металл имеет четко выраженный предел текучести, что характерно для низкоуглеродистых сталей. При этом концентрация напряжений способствует появлению и развитию ПЧЛ [5]. Изучение их формирования при ЭДО низкоуглеродистых сталей позволяет выявить закономерности протекания пластического деформирования материала при воздействии импульсами тока.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей формирования полей пластических деформаций в сварных соединениях низкоуглеродистых сталей при ЭДО на основе изучения картин распределения ПЧЛ.

Для оценки влияния ЭДО на распределение ПЧЛ использовали образцы лопаточного типа из низкоуглеродистой стали Ст3 толщиной 4 мм, имеющие размер рабочей части 110×30 мм. Предварительно образцы подвергали механической шлифовке. ЭДО осуществляли сериями оди-



ночных импульсов на лабораторной установке, работающих на основе батарей конденсаторов [2]. Разряд батарей передавали посредством касания медным электродом обрабатываемой поверхности, а контактный провод закрепляли у края рабочей части образца. После завершения ЭДО проводили полировку и термообработку поверхности металла, что позволяет получать четкую картину ПЧЛ.

В настоящей работе исследовали распределение ПЧЛ в образцах из низкоуглеродистой стали Ст3 при ЭДО в условиях их продольного растяжения. Из работы [3] известно, что при обработке разрядами тока предварительно растянутых образцов в металле дискретно снижается сопротивление деформированию, которое проявляется в виде характерных сбросов нагружения на диаграмме растяжения  $\sigma$ - $\varepsilon$  (здесь  $\sigma$  — растяжение;  $\varepsilon$  — относительная деформация).

Испытания выполняли на разрывной машине ЦДМ-10 с усилием растяжения до 100 кН при скорости деформирования 6 мм/мин. В течение всего цикла нагружения проводили непрерывную запись изменения растягивающего усилия до момента достижения образцом предела текучести (образования «шейки») или его разрушения. На различных этапах нагружения и обработки импульсами тока фиксировали картины распределения ПЧЛ на поверхности металла. С этой целью образец закрепляли в захватах испытательной машины, растягивали до заданной длины и проводили ЭДО серией импульсов тока с записью изменения деформирующего усилия и картин ПЧЛ. При импульсной обработке образцов стали Ст3 применяли следующие параметры режима ЭДО: максимальное напряжение на электроде  $U_3 = 480$  В; максимальный ток на электроде  $I_3 = 2500 \dots 3200$  А; длительность импульса  $t_{имп} = 0,00065 \dots 0,00084$  с; емкость батареи конденсаторов  $C = 4400$  мкФ.

Параметры режима ЭДО рассчитывали исходя из необходимости создания в заданном объеме материала с пределом текучести  $\sigma_T$  заметных пластических деформаций за счет преобразования электрической энергии в механическую. Так, энергетический разряд конденсаторной батареи мощностью около 1000 Дж создает в образце из низкоуглеродистой стали толщиной 3...4 мм пластические деформации, о наличии которых свидетельствует образование ПЧЛ. Это вполне допустимо с учетом того, что на создание в объеме стали 1 мм<sup>3</sup> с пределом текучести  $\sigma_T$  деформации, равной  $\sigma \sim K\sigma_T/E$ , необходимо, чтобы ее потенциальная энергия составляла [4]

$$A = \frac{\sigma_T^2 \xi^2}{E}, \quad (1)$$

где  $K \cong 3 \dots 5$  и  $\xi > 1$  — коэффициенты, учитывающие скорости деформирования материала до значений  $\sigma_T$ ;  $E$  — модуль упругости материала. Приняв  $\sigma_T = 280$  МПа,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $K = 5$ ,  $\xi = 2$ , получим  $A = 7,84 \cdot 10^{-3}$  Дж/мм<sup>3</sup>. Соответственно при энергетических затратах в 1000 Дж с учетом коэффициента потерь  $\eta$  при преобразовании электрической энергии в механическую объем  $V$  пластического деформирования составляет

$$V = \frac{1000\eta}{A} = 1,27 \cdot 10^3 \eta \text{ [мм}^3\text{]}. \quad (2)$$

При толщине исследуемых образцов  $\delta = 4$  мм площадь зон пластического деформирования равна

$$S = \frac{V}{\delta} = 3,2 \cdot 10^4 \eta \text{ [мм}^2\text{]}, \quad (3)$$

а линейные размеры поля пластического деформирования

$$\sqrt{S} = 180\sqrt{\eta} \text{ [мм]}, \quad (4)$$

что при разумных значениях  $\eta$  близко к данным, полученным нами экспериментальным путем.

Формирование картин ПЧЛ исследовали в основном металле и стыковых сварных соединениях. Сварные швы выполняли вручную с использованием покрытых электродов диаметром 4 мм марки АНО-4 на следующем режиме наплавки: напряжение на дуге  $U_d = 70$  В; сварочный ток  $I_{св} = 150$  А; скорость сварки  $v_{св} = 5$  м/ч.

На начальном этапе исследования сопоставляли картины ПЧЛ при механическом и электродинамическом воздействии на низкоуглеродистую сталь. Для этого полированные образцы одной серии подвергали статическому нагружению посредством вдавливания шарика (проба Эриксона) [5], а другой — электродинамическому воздействию одиночным разрядом тока на указанном выше режиме (рис. 1). Для обоих видов нагружения характерно локальное приложение нагрузки, т. е. точечный контакт рабочего инструмента (шарика или электрода) с обрабатываемой поверхностью. Кроме того, в обоих случаях имеет место высокая интенсивность импульсного воздействия (механического или электрического), благодаря чему в месте контакта могут возникать зоны местной текучести, т. е. локальные зоны пластических деформаций с высоким градиентом, которые расположены вблизи места контакта рабочего инструмента с поверхностью образца.

Анализируя картины ПЧЛ, представленные на рис. 1, можно видеть, что геометрические характеристики полос при точечном механическом воздействии отличаются от наблюдаемых при ЭДО. ПЧЛ при вдавливании шарика приобретают фор-

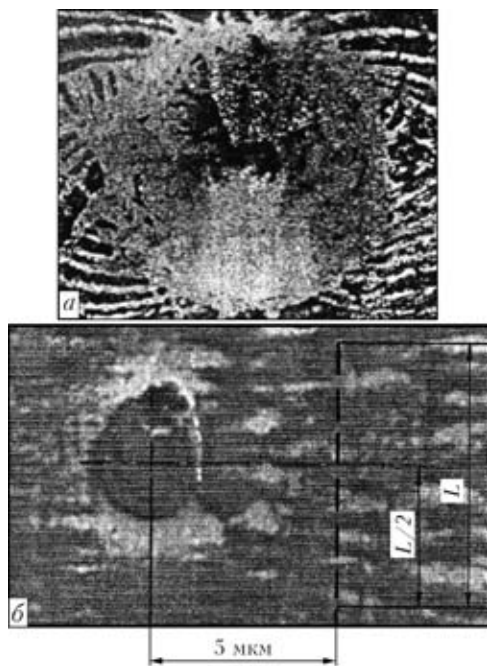


Рис. 1. Картины ПЧЛ, полученных при механическом (проба Эриксона) (а) и электродинамическом (б) воздействиях: штриховая — линия измерения профилограмм полос

му эллипсоида (рис. 1, а), диаметр которого сравним с диаметром отпечатка, что свидетельствует о высокой концентрации зон местной текучести при точечном механическом нагружении низкоуглеродистой стали.

Иная картина распределения полос наблюдается при одиночном импульсном разряде тока (рис. 1, б). В этом случае ПЧЛ представляют собой систему взаимно параллельных полос, расходящихся по обе стороны от контактного пятна. Если при надавливании шарика ПЧЛ концентрируются в зоне отпечатка, то при ЭДО они пересекают все поперечное сечение образца. Различные системы ПЧЛ, образующиеся при сварке и остывании низкоуглеродистой стали, изучены в работах [6, 7], в которых полосы, подобные представленным на рис. 1, б, классифицируются как поперечные. Нами проведены исследования по снятию профилограмм вдоль продольной оси об-

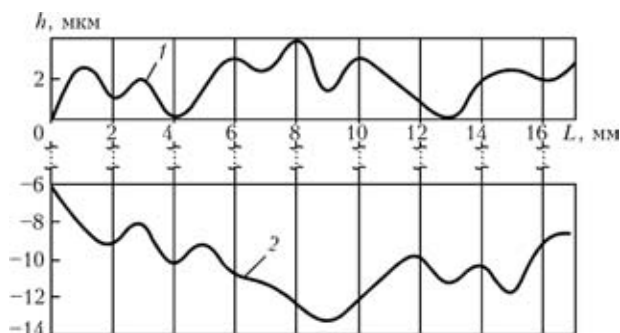


Рис. 2. Профилограммы лицевой (1) и обратной (2) поверхностей образца при ЭДО

разца на его лицевой и обратной поверхностях в зоне импульсного воздействия (контакта электрода). Измерения выполняли до и после ЭДО с использованием специализированной линейки, оснащенной индикаторной головкой с ценой деления 1 мкм. Профилограммы поверхностей образца, являющиеся разностью значений высоты полос  $h$ , полученные по показаниям прибора при ЭДО, представлены на рис. 2. Измерения показали, что остаточное формоизменение поверхностей образца в зоне обработки длиной  $L$  (рис. 1, б) приобретает характер волн. Волнообразная форма профилограмм обеих сторон образца свидетельствует о том, что осуществляли проработку импульсами тока всего поперечного сечения, а не только поверхности металла.

На первом этапе исследований особенностей формирования полей пластических деформаций при ЭДО плоские шлифованные образцы лопаточного типа из стали Ст3 ступенчато нагружали одноосным растяжением  $\sigma$  (рис. 3). Растяжение образцов до заданной длины выполняли поэтапно с выдержкой 12...15 мин. При этом визуально осматривали полированную поверхность металла и фиксировали появление ПЧЛ. Сопоставив картину ПЧЛ с соответствующим уровнем нагружения, можно заключить, что процесс образования ПЧЛ начинается при  $\sigma = 280$  МПа (рис. 3, а) в зонах концентраторов у краев рабочей части образца. Полосы сориентированы под углом  $45^\circ$  к линии

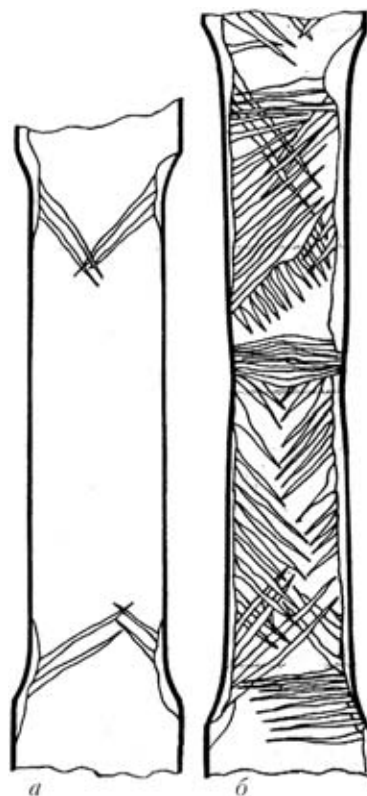


Рис. 3. Типичные картины ПЧЛ, сформировавшихся на образцах из стали Ст3 при одноосном растяжении: а —  $\sigma = 290$ ; б — 320 МПа

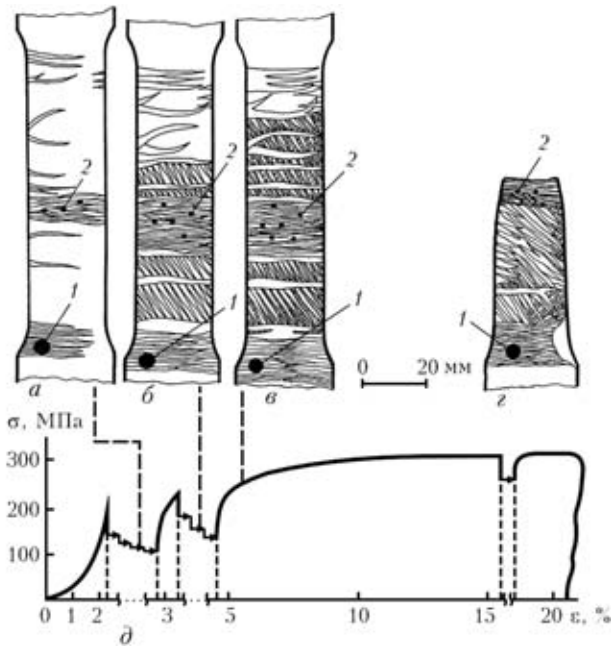


Рис. 4. Картины ПЧЛ, сформировавшихся на образцах из стали Ст3 при ЭДО в условиях одноосного растяжения: *a* — до  $\sigma = 190$  МПа после трех импульсов тока; *b* —  $\sigma = 230$  МПа после двух импульсов тока; *c* — до  $\sigma = 250$  МПа после единичного токового воздействия; *d* — диаграмма  $\sigma$ - $\varepsilon$  растяжения образцов из стали Ст3 при сопутствующей ЭДО; 1 — место крепления контактного провода; 2 — зона контакта электрода с образцом при ЭДО

нагрузки. После растяжения до  $\sigma > 300$  МПа (образование «шейки») и остановки нагружения (рис. 3, б) происходит активное пластическое течение металла по всей рабочей части образца, что характеризуется развитой системой ПЧЛ, ориентированных под различными углами к линии нагрузки. Сопоставив картину ПЧЛ у «шейки» образца, т. е. в зоне активного пластического течения металла, соответствующего предразрушению, с полученными при ЭДО (см. рис. 1, б), можно видеть подобие их геометрических характеристик.

При нагружении образцов основного металла с сопутствующей ЭДО процессы формирования полей пластических деформаций начинались при более низких уровнях растяжения по сравнению с вариантом, представленным на рис. 3. Так, при растяжении образца до 190 МПа с последующей ЭДО после трех импульсов тока значения  $\sigma$  уменьшились до 110 МПа, а на полированной поверхности металла образовались поперечные ПЧЛ (рис. 4, а). При этом в зонах импульсного воздействия и крепления на образце контактного провода имело место сгущение полос, что свидетельствует об интенсивном пластическом течении металла, локализованном в зонах электрического контакта. Следует отметить, что процесс образования пластических деформаций на образцах из Ст3 без ЭДО начинается при растягивающих нагрузках, в 2 раза больших, чем при обработке импульсами

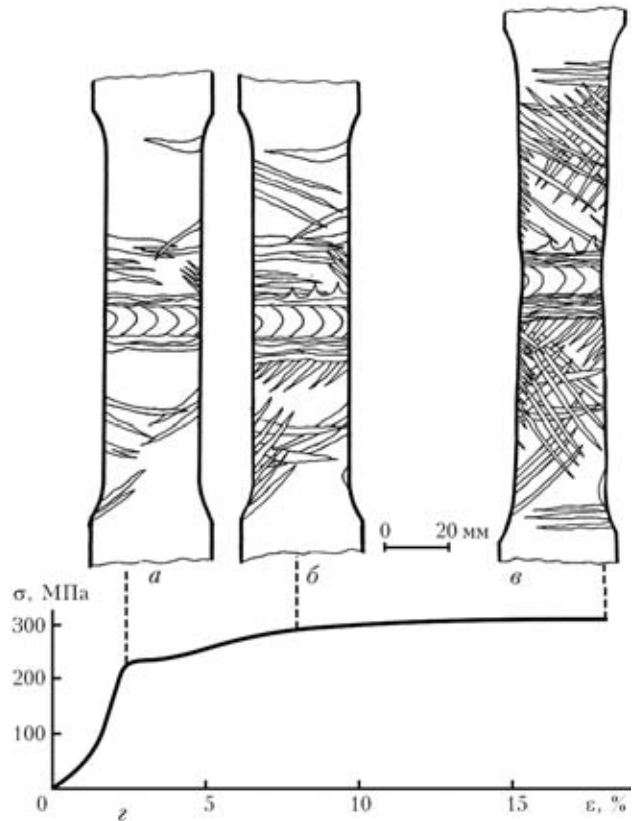


Рис. 5. Типичные картины ПЧЛ, сформировавшихся на поверхности образцов сварных соединений стали Ст3 при одноосном растяжении: *a* —  $\sigma = 230$ ; *b* —  $\sigma = 280$  МПа; *c* — область предразрушения (образование «шейки»); *d* — диаграмма  $\sigma$ - $\varepsilon$  при растяжении образцов из стали Ст3

тока. При повторном нагружении образца до  $\sigma = 230$  МПа с последующей ЭДО имеет место падение значений  $\sigma$  до 140 МПа, что сопровождается развитием поперечных ПЧЛ, их сгущением у зоны контакта и появлением наклонных полос, ориентированных под углом  $45^\circ$  к линии нагрузки (рис. 4, б). После ЭДО и растяжения образца до  $\sigma = 250$  МПа концентрация ПЧЛ увеличивается. При этом наблюдается появление полос с различной ориентацией (рис. 4, в). Сравнив ПЧЛ, полученные при  $\sigma = 250$  МПа (рис. 4, в) с сопутствующей ЭДО и представленные на рис. 3, а ( $\sigma = 290$  МПа), можно увидеть отличие в их формировании. Если при нагружении без ЭДО до 290 МПа имеет место начальная стадия процесса образования локальных пластических деформаций (рис. 3, а), то в случае применения ЭДО уже при  $\sigma = 200$  МПа (рис. 4, в) происходит развитое пластическое деформирование рабочей части образца, близкое к наблюдаемому при разрушении материала (рис. 4, з). Диаграмма растяжения образца  $\sigma$ - $\varepsilon$  из стали Ст3 при ЭДО представлена на рис. 4, д.

Локальное пластическое течение металла при одноосном растяжении образцов сварных соединений (рис. 5, а) начинается при  $\sigma = 230$  МПа,

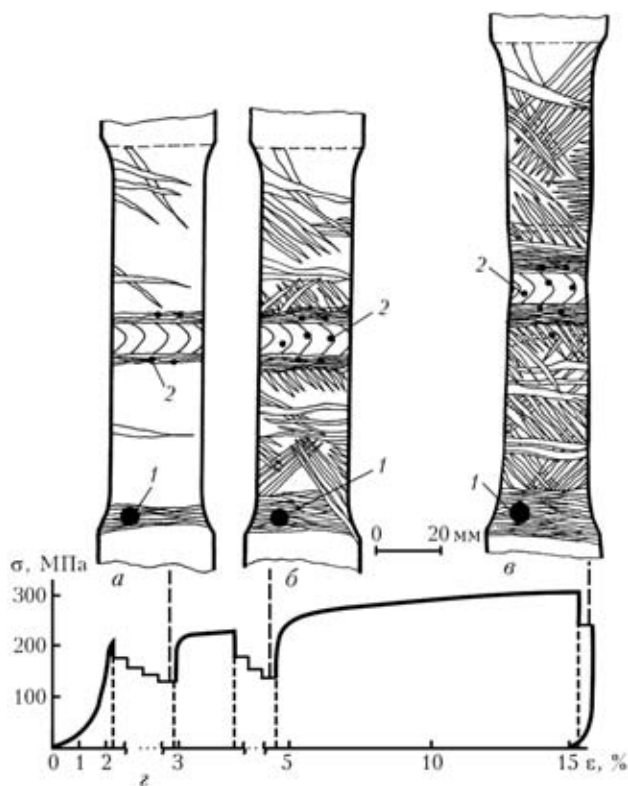


Рис. 6. Картины ПЧЛ, сформировавшихся на образцах сварных соединений стали Ст3 при ЭДО в условиях одноосного растяжения: *a* —  $\sigma = 200$  МПа после четырех импульсов тока; *b* —  $\sigma = 240$  МПа после трех импульсов тока; *v* — перед разрушением после одиночного импульса тока; *z* — диаграмма  $\sigma$ - $\epsilon$  растяжения сварных соединений стали Ст3 при сопутствующей ЭДО; 1, 2 — то же, что и на рис. 4

что на 20 % ниже, чем при нагружении основного металла (см. рис. 3, *a*). При этом процесс формирования ПЧЛ имел более интенсивный характер, а полосы — различную ориентацию по отношению к линии нагрузки. При увеличении значений  $\sigma$  до 270...280 МПа проходило дальнейшее развитие ПЧЛ (рис. 5, *b*), их интенсивность возрастала пропорционально росту нагрузки до образования «шейки» (рис. 5, *v*). При этом характер формирования пластических деформаций близок к имеющему место в образцах основного металла (см. рис. 3, *b*). При воздействии импульсами тока

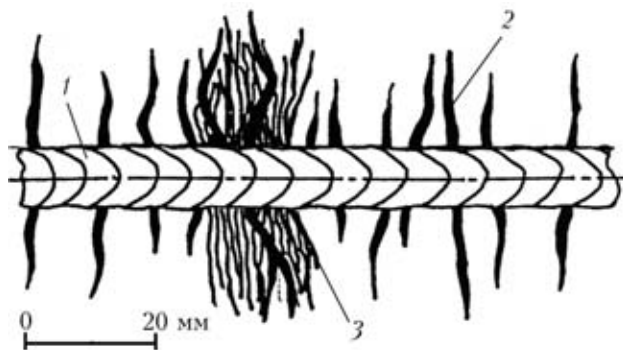


Рис. 7. Картины ПЧЛ, полученных на образцах стыкового соединения стали Ст3: 1 — шов; 2 — прилегающая к шву зона после сварки; 3 — то же + ЭДО

в образцах сварного соединения, в отличие от процессов, отображенных на рис. 5, *a*, начало пластического течения происходило при растяжении образцов в упругой области до 200 МПа и уменьшении нагрузки до 120 МПа после четырех импульсов тока (рис. 6, *a*). При повторном растяжении до 240 МПа и после трех импульсов тока (рис. 6, *b*) интенсивность формирования ПЧЛ намного выше, чем при тех же уровнях нагрузки, но без ЭДО (см. рис. 5, *b*). При растяжении образца до образования «шейки» и воздействии последующим одиночным импульсом тока насыщенность разнонаправленных полос на поверхности образца при ЭДО выше, чем при растяжении без обработки (соответственно рис. 6, *v* и 5, *v*).

В целом, сопоставив ПЧЛ образцов основного металла и сварных соединений стали Ст3 при ЭДО и без нее, можно выявить ряд особенностей исследуемых вариантов нагружения образцов. Так, образование ПЧЛ при растяжении без ЭДО начинается за пределом упругости стали Ст3, а при воздействии импульсами тока — в упругой области нагружения. При равных значениях  $\sigma$  для вариантов нагружения с применением ЭДО и без нее в случае воздействия импульсами тока интенсивность пластического течения (частота полос) выше. Это видно при сопоставлении рис. 5, *b* и 6, *b*. На стадии предразрушения, т. е. образования «шейки», при ЭДО наблюдается более интенсивное развитие ранее образовавшихся полос по сравнению с растяжением образца без воздействия током (рис. 5, *v* и 6, *v*). Таким образом, получено визуальное подтверждение того факта, что импульсы тока вызывают в сварных соединениях низкоуглеродистой стали образование зон пластического течения. Сочетание пластических деформаций, возникающих в результате ЭДО, с пластическими деформациями от сварки определяет напряженно-деформированное состояние конструкции в целом.

Для подтверждения влияния электродинамического эффекта на изменение напряженного состояния тонколистовых сварных соединений осуществляли ЭДО пластин размером 500×500×3 мм с расположенным по центру продольным стыковым швом. Для выявления ПЧЛ перед сваркой выполняли шлифование поверхности собираемых кромок образца. Ширина шлифованного слоя составляла 40 мм, что соответствует полуширине зоны пластических деформаций стыкового сварного шва.

Наличие продольных ОН определяли неразрушающим ультразвуковым методом, основанным на зависимости скорости распространения ультразвуковых волн от напряжений в металле [7]. Этот способ позволяет анализировать напряженное состояние объекта без нарушения его целостности. Продольные ОН  $\sigma_x$  в пластине определяли



сначала после сварки, затем после ЭДО. Измерения проводили в центральном поперечном сечении образца, а ЭДО выполняли на режиме, описанном выше.

Пластина в момент ЭДО находилась в свободном состоянии, т. е. без приложения статических нагрузок. ЭДО выполняли точечными воздействиями на металл шва по направлению от его середины к краям с шагом 90...100 мм.

На картине ПЧЛ, сформировавшихся после сварки пластины, наблюдали типичное для стыкового шва распределение полос различных систем, в том числе поперечных (рис. 7), развитие которых связано с образованием напряжений, превышающих предел текучести стали Ст3 [6]. После точечного воздействия ЭДО в зоне контакта с поверхностью металла в шве и ОШЗ сформировались локальные области развитых поперечных полос. При этом, если ПЧЛ от сварки равномерно распределены по всей длине шва, то полосы от ЭДО сконцентрированы в местах приложения воздействия импульсов тока.

Результаты измерений продольных ОН  $\sigma_x$  после сварки и последующей ЭДО, представленные в работе [8], свидетельствуют о том, что воздействие импульсами тока вызывает в сварных соединениях стали Ст3 снижение  $\sigma_x$  более чем на 50 %.

Приведенные в настоящей работе данные позволяют заключить, что при ЭДО сварных соединений низкоуглеродистой стали происходит образование локальных зон пластических деформаций высокой интенсивности, влияющих на напряженное состояние тонколистовых металлических конструкций.

## Выводы

1. Разработана экспериментальная методика оценки влияния ЭДО на образование пластических деформаций в сварных соединениях стали Ст3 на основе картин ПЧЛ.

2. Установлено, что обработка последовательными импульсами тока при одноосном растя-

жении плоских образцов основного металла и сварных соединений стали Ст3 вызывает в материале падение деформирующего усилия в упругой и пластической областях нагружения, что сопровождается формированием характерных ПЧЛ.

3. Установлено, что при ЭДО в момент разряда батареи конденсаторов в образцах из стали Ст3 происходит быстротекущее преобразование электрической энергии в механическую, вызывающее в материале формирование полей пластических деформаций. Если в низкоуглеродистой стали возникают ОН, то при ЭДО происходит их взаимодействие с напряжениями от обработки по законам механики деформирования сплошных сред.

4. На полномасштабных образцах стыковых сварных соединений стали Ст3 ЭДО шва вызывает в металле шва и ОШЗ формирование местных пластических деформаций в виде поперечных ПЧЛ.

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. *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. *Изменение напряженно-деформированного состояния после электродинамической обработки сварных соединений алюминиевого сплава АМг6* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов, В. Н. Смиленко // Там же. — 2007. — № 6. — С. 11–13.
4. *Биргер И. А., Мавлютов Р. Р.* Сопrotивление материалов. — М.: Наука, 1986. — 560 с.
5. *Бернштейн М. Л., Зеймовский В. А.* Механические свойства металлов. — М.: Металлургия, 1978. — 495 с.
6. *Касаткин Б. С., Царюк А. К., Гедрович А. И.* Полосы текучести в сварном соединении // Автомат. сварка. — 1973. — № 6. — С. 1–4.
7. *Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах* / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. Н. Гуца и др. — Киев: Наук. думка, 1974. — 108 с.
8. *Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений стали Ст3* / Л. М. Лобанов, Н. А. Пашин, В. П. Логинов и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 7. — С. 10–12.

The effect by treatment of specimens of the St3 steel base metal and welded joints with pulses of the electric current on peculiarities of formation of macroplastic strains in the joints subjected to uniaxial tension has been studied. An experimental procedure used to investigate the mechanism of formation of Luders lines in uniaxial tension under the electrodynamic effect conditions has been developed. It is established that the characteristic formation of plastic strains induced by welding and current effect takes place in electrodynamic treatment of welded joints on steel St3.

Поступила в редакцию 14.02.2007