УДК 621.9.047

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-10-245-72-77

*Н. Г. Дудкина, В. Н. Арисова, А. Е. Биришбаева***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СТАЛИ
НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С УДАРОМ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: detmash@vstu.ru

Приводятся экспериментальные данные металлографических и рентгеноструктурных исследований поверхностного слоя различных марок сталей, подвергнутых электромеханической обработке с динамическим приложением усилия деформирования (ЭМО с ударом). Рассматривается влияние содержания углерода в стали на формирование структуры, микротвердости и глубины упрочнения поверхностного слоя, полученного в области импульсного температурно-силового воздействия.

Ключевые слова: электромеханическая обработка с ударом, сталь, белый слой, структурное состояние, микротвердость, глубина упрочнения.

*N. G. Dudkina V. N. Arisova, A. E. Birshbaeva***STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CARBON CONTENT IN STEEL
ON THE STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF THE SURFACE
LAYER AFTER ELECTROMECHANICAL PROCESSING WITH IMPACT****Volgograd State Technical University**

Experimental data of metallographic and x-ray diffraction studies of the surface layer of various grades of steels subjected to electro-mechanical processing (EMO) with dynamic (shock) application of the deformation force are presented. The influence of the carbon content in steel on the formation of the structure, microhardness and depth of hardening of the surface layer obtained in the field of pulsed temperature-force action is considered.

Keywords: Electromechanical hardening with impact, steel, white layer, structural condition, microhardness, depth of hardening.

Введение

В настоящее время ведутся разработки в области интенсификации методов упрочнения поверхностного слоя металла, основанных на использовании концентрированных потоков энергии (КПЭ) [1–4]. Высокие скорости нагрева и охлаждения локального объема поверхности металла приводят к формированию в поверхностных слоях специфических высокопрочных, износ- и коррозионностойких структур [1, 5–7], что позволяет использовать конструкционные стали в качестве высокопрочных.

Одним из таких методов является электро-механическая обработка (ЭМО) с динамическим приложением усилия деформирования (ЭМО с ударом) [8]. Изменение способа подвода энергии в зону обработки сопровождается существенным повышением скорости тепловых и деформационных процессов по сравнению с известной традиционной статической ЭМО. Изменение скорости деформации резко сказывается на структуре и свойствах поверхностного слоя сталей при переходе от статического

электро-механического поверхностного упрочнения к динамическому [9]. Формирование структуры, микротвердости и толщины упрочненного слоя в углеродистых сталях при динамической электро-механической обработке зависит от взаимодействия тепловых и деформационных процессов в области контакта электрод-инструмента с материалом [10–12].

В соответствии с известными представлениями [5–7], варьируя содержание углерода и других легирующих элементов в стали, возможно при одинаковых режимах традиционного (статического) электро-механического воздействия достигать значительных различий в свойствах и структурно-фазовом составе обработанного поверхностного слоя. Известно, что с увеличением содержания углерода наблюдается рост как глубины, так и микротвердости слоя, упрочненного статической ЭМО. Следует отметить, что применительно к динамической ЭМО сталей, аналогичные исследования практически отсутствуют. В связи с этим данный вопрос требует дополнительного более глубокого изучения.

Целью данной работы является исследование структуры и свойств поверхностного слоя, подвергнутого электромеханической обработке с динамическим приложением усилия деформирования (ЭМО с ударом) в зависимости от содержания углерода в стали на основе металлографического и рентгеноструктурного анализа.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на образцах из углеродистых и малолегированных хромистых сталей марок 40X, 45, 50X и У10. Исходное состояние сталей 40X, 45 и 50X – нормализованное со структурой феррит + перлит, стали У10 – после сфероидизирующего отжига со структурой зернистого перлита. Образцы подвергались ударной электромеханической обработке. Ударное (динамическое) нагружение осуществляли на установке точечной сварки с регулятором цикла сварки РЦС-403У4 с автоматическим регулированием синхронного включения тока и ударного импульса. Динамическая электромеханическая обработка заключалась в одновременном пропускании через зону контакта инструмента с деталью электрического тока с дополнительным воздействием ударных силовых импульсов, синхронных с импульсами электрического тока, с длительностью и частотой равной длительности и частоте импульсов электрического тока $t=10^{-4}$ с [8]. Режимы обработки выбраны на основании рекомендаций исследований [10–12]: плотность тока $j=300$ А/мм²; усилие удара $P=1500$ Н (однократное воздействие совмещенных импульсов).

Измерение микротвердости по локальным объемам поверхностного слоя проводилось на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 1 Н. Расстояние между отпечатками составляло 30–50 мкм. Особое внимание уделялось подготовке поверхности шлифов. В специальной струбцине проводилось стачивание образца чуть меньше, чем на половину диаметра, после чего поверхность тщательно шлифовалась, полировалась и протравливалась в четырехпроцентном растворе азотной кислоты в этиловом спирте для выявления микроструктуры. Такая подготовка микрошлифа позволяла вести промеры микротвердости непосредственно у края поверхности, а также сопоставлять микротвердость металла с его структурой.

Металлографические исследования проводили с помощью оптического «Olympus BX-61» с программным обеспечением AnalySis GmbH. Микроструктуру фотографировали при увели-

чении 50, 100, 200, 500 крат.

Рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ECO. Для анализа дифрактограмм и расшифровки фазового состава использовали программное обеспечение к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1) с использованием лицензионной базы данных Powder Diffraction File-2 (The International Center for Diffraction Data).

Расчет величины микронапряжений и размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) проводился по методу аппроксимации [13], регистрировались отражения (110) и (220) α -фазы стали.

Результаты и их обсуждение

В результате анализа микроструктуры установлено, что на поверхности образцов всех марок стали (рис.1) после ударной ЭМО формируется белый слой. При движении от поверхности вглубь металла по мере удаления от белого слоя к исходной структуре сталей наблюдается значительная неоднородность структуры, зависящая от степени незавершенности фазовых превращений: за белым слоем последовательно располагаются переходная зона, состоящая из мартенсита и троосто-мартенсита, и исходная структура.

Увеличение содержания углерода в стали способствует фиксации высокопрочных структур на большей глубине поверхностного слоя. Белый слой во всех исследуемых образцах представляет собой однородное светлое поле. Как показали исследования [5, 6] среднеуглеродистые стали в нормализованном состоянии после статической ЭМО наследуют внутризерненную текстуру, сохраняя характерный рисунок цементитных и ферритных участков, а между белым слоем и исходной структурой не образуется переходная зона: граница перехода от белого слоя к исходному материалу резкая, в пределах одного зерна. В случае ударной ЭМО у исследованных сталей наблюдается четко выраженная неоднородность микроструктуры с образованием закалочных структур – мартенсит и мартенсит + троостит (рис. 1).

Данное обстоятельство указывает на различие протекания фазовых и структурных превращений при статической и динамической ЭМО. Удар, как известно, сопровождается повышением температуры в сжимаемом объеме. Роль теплового давления непрерывно увеличивается при повышении общего давления. Пластическая деформация поверхностных слоев создает допол-

нительное повышение температуры прилегающих зон и, очевидно, обуславливает различия в

протекании процессов фазовых и структурных изменений по сравнению с ЭМО без удара.

Рис. 1. Структура упрочненных поверхностных слоев сталей 40X (а), 45 (б), 50X (в) и У10 (г) после ЭМО с ударом ($j=300 \text{ A/mm}^2$). $\times 100$

Микроструктура высокоуглеродистой стали У10 (рис. 1, г) в зоне упрочнения в целом аналогична структуре упрочненного слоя доэвтектоидных сталей [11].

На рис. 2 показаны зависимости усредненной микротвердости белого слоя $H_{\text{б}}$ и изменение глубины упрочнения (белый слой+переходная зона) h от содержания углерода в стали после ударной ЭМО. Так, в поверхностных объемах образцов из стали 40X, микротвердость $H_{\text{б}}$ составляет 7697 МПа; стали 45 – 8869 МПа; стали 50X – 9462 МПа и У10 – 11576 МПа (рис. 2, кривая 1). Таким образом, у заэвтектоидной стали микротвердость увеличивается в 1,5 раза по сравнению с доэвтектоидными сталями. Максимальная микротвердость в отдельных локальных областях может достигать у стали У10 до 15 ГПа и у стали 45 – 12 ГПа.

Результаты исследования микротвердости по глубине упрочненного слоя после динамической ЭМО согласуются с результатами металлографических исследований, фиксируя неоднородность твердости в белом слое и переходной зоне, что обусловлено крайней неоднородностью мартенсита по содержанию углерода, полученного в результате увеличения скорости нагрева и сокращения, в связи с этим, продолжительности фазовых превращений неоднородного по углероду аустенита [6, 7, 9]. По мере удаления от границы белого слоя к исходной структуре стали микротвердость постепенно снижается, причем изменение носит плавный характер, отражая влияние импульсного поверхностного пластического деформирования.

Рис. 2. Влияние содержания углерода в стали на микротвердость $H\mu$ белого слоя (кривая 1) и толщину упрочненного слоя h (кривая 2) после ЭМО с ударом

Увеличение массовой доли углерода способствует фиксации указанных структур (белый слой+переходная зона) на большей глубине поверхностного слоя (рис. 2, кривая 2). Так глубина упрочнения в сталях: 40X – $h_{\text{ДИН}} = 480\text{--}540$ мкм; сталь 45 – $h_{\text{ДИН}} = 594\text{--}626$ мкм; сталь 50X $h_{\text{ДИН}} = 729\text{--}809$ мкм; У10 – $h_{\text{ДИН}} = 790\text{--}820$ мкм. Замечен рост глубины упрочнения с увеличением содержания углерода в доэвтектоидных сталях до 1,5–2 раз. При дальнейшем увеличении углерода в стали рост

толщины упрочненного слоя замедляется. Следует отметить, что степень увеличения глубины упрочнения меньше зависима от содержания углерода в стали, чем возрастание твердости белого слоя.

На рис. 3 приведена дифрактограмма, полученная со стороны упрочненного поверхностного слоя стали 50X. Дифрактограммы остальных сталей абсолютно идентичны приведенной. Все отражения принадлежат одной фазе – α -мартенситу.

Рис. 3. Дифрактограмма стали 50X со стороны упрочненной поверхности после ЭМО с ударом

В таблице приведены данные рентгеноструктурного анализа, с помощью которого определяли характеристики тонкой структуры по-

верхностного слоя обработанных сталей ЭМО с ударом.

Данные рентгеноструктурного анализа по определению размера блоков мозаики и напряжений второго рода на поверхности сталей с разным содержанием углерода после ЭМО с ударом

Сталь	Размер блоков мозаики (ОКР) D, Å	Относительная деформация решетки $\Delta a/a$	Напряжения второго рода σ_{II} , МПа
40X	304	0,00173	338
45	259	0,00202	403
50X	193	0,00259	516
У10	177	0,00266	531

Как следует из таблицы, для всех сталей упрочненная поверхность имеет сильно развитую тонкую структуру: блоки мозаики очень мелкие при высоком уровне микронапряжений. Прослеживается корреляция изменений размеров блоков мозаики и напряжений второго рода с содержанием углерода в исследуемых сталях: при увеличении содержания углерода происходит увеличение напряжений второго рода от 338 МПа в стали 40X до 531 МПа в стали У10 и уменьшение размеров блоков мозаики от 304 Å в стали 40X до 177 Å в стали У10.

Выводы

Анализ результатов металлографических, прочностных и рентгеноструктурных исследований поверхностного слоя сталей, подвергнутых электромеханической обработке с динамическим приложением контактной нагрузки, позволил сделать следующие выводы:

1. На поверхности материала образуется упрочненный слой, структура и микротвердость которого в значительной степени зависят от содержания углерода в стали.

2. С увеличением содержания углерода в стали от 0,4 до 1,0 % С микротвердость поверхностно упрочненного слоя возрастает в 1,5–2 раза, а толщина упрочненного слоя увеличивается на 37–40 %.

3. Рентгеноструктурный анализ показал развитую тонкую структуру в поверхностном белом слое с высоким уровнем микронапряжений до 340–530 МПа и малым размером блоков мозаики 170–300 Å.

4. Регулируя параметры высокоскоростной термомеханической обработки (температура, степень деформации, скорость охлаждения) ЭМО с ударом, можно достичь высокого комплекса прочностных свойств и глубины упроч-

нения деталей, что является перспективным с технологической и экономической точек зрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бабей, Ю. И.* Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна / Ю. И. Бабей. – Киев : Наукова думка, 1988. – 238 с.
2. Научно-технический прогресс в машиностроении / под ред. К. В. Фролова. – Москва : ИМАШ АН СССР, 1989, Вып. 9. – 186 с.
3. *A. S. Gill, A. Telang Y. Chang.* Localized plastic deformation and hardening in laser shock peened // *Materials Characterization*. 2018. Vol. 142. P. 15–26.
4. *D. A. Lesyk, S. Martinez, B. N. Morduk, V. V. Dzhe-melinskiy et al.* Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045 // *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 111. P. 424–438.
5. *Аскинази, Б. М.* Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой / Б. М. Аскинази. – М. : Машиностроение, 1989. – 200 с.
6. *Багмутов, В. П.* Электромеханическое упрочнение металлов и сплавов / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров, А. Н. Савкин, Д. С. Денисевич. – Волгоград : ВолгГТУ, 2016. – 460 с.
7. *Багмутов, В. П.* Исследование структуры поверхностного слоя среднеуглеродистой стали, упрочненной электромеханической обработкой / В. П. Багмутов, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров // *МиТОМ*. – 2002. – № 12. – С. 18–21.
8. *Дудкина Н. Г., Федоров А. В., Свистачев С. Ю.* Патент №2168552 Российская Федерация. C21D7/04, C21D8/00, B24B39/00. Способ обработки деталей поверхностным пластическим деформированием; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет; заявл. 10.01.2000 опубл. 10.06.2001. № 2000100553/02. (Бюл.№16).
9. *Кидин, И. Н.* Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов / И. Н. Кидин. – М. : Металлургия. – 1969. – 387 с.
10. *Матлин, М. М.* Особенности формирования упрочненного слоя при электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием / М. М. Матлин, Н. Г. Дудкина, А. Д. Дудкин // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2007. – № 6. – С. 39–40.

11. *Дудкина, Н. Г.* Исследование поверхностного слоя стали У10, подвергнутой электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием / Н. Г. Дудкина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (201) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – С. 148–153.

12. *Дудкина, Н. Г.* Исследование структуры поверхностного слоя среднеуглеродистой стали, упрочненной элект-

ромеханической обработкой / Н. Г. Дудкина // МиТОМ. – 2020. – № 4. – С. 17–21.

13. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учеб. пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд. доп. и перераб. – М. : МИСИС, 2002. – 360 с.