



Оригинальная статья

УДК 621.787:621.9.048

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-259-265



## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 40X, ПОДВЕРГНУТОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ С ДИНАМИЧЕСКИМ СИЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Н. Г. Дудкина, В. Н. Арисова

■ Волгоградский государственный технический университет (Россия, 400005, Волгоград, просп. им. Ленина, 28)

**Аннотация.** Приведены результаты комплексных исследований специфических особенностей структуры, микротвердости и глубины упрочненного поверхностного слоя стали 40X, сформированного в результате электромеханической обработки с динамическим приложением деформирующего усилия (ЭМО с ударом). Исследования проведены методами оптической микроскопии, рентгеноструктурного анализа, определена микротвердость. Способ электромеханической обработки с динамическим силовым воздействием заключался в одновременном пропускании через зону контакта инструмента с деталью импульсов электрического тока и деформирующего усилия. В результате ударно-термического воздействия и тока плотностью 100, 300 и 600 А/мм<sup>2</sup> на поверхности стали в поперечном сечении формируются сегменты закаленного слоя разных размеров и с разным составом структур. Анализ структурных и фазовых превращений в поверхностном слое стали 40X, подвергнутой динамической электромеханической обработке, свидетельствует о формировании специфической структуры белого слоя. Структура и свойства этого слоя близки к аморфному состоянию металла с максимальной твердостью HV 8,0 – 8,5 ГПа. По мере удаления от поверхности (за белым слоем) формируется переходная зона со структурой, не имеющей характерного для мартенсита игольчатого строения. Установлено, что с повышением плотности тока в ходе ударной электромеханической обработки увеличивается глубина упрочнения в 4 – 5 раз и одновременно повышается неоднородность прочностных свойств, микронапряжения увеличиваются на 25 %. Электромеханическое упрочнение с динамическим (ударным) приложением деформирующего усилия вызывает более глубокие превращения в структуре стали по сравнению с традиционной статической электромеханической обработкой с динамическим приложением деформирующего усилия. При электромеханической обработке с ударом увеличивается интенсивность температурно-силового воздействия на поверхностный слой стали, что позволяет управлять процессом формирования структуры и фазовых состояний стали 40X.

**Ключевые слова:** электромеханическая обработка с ударом, плотность тока, сталь, структура, микротвердость, глубина упрочнения

**Для цитирования:** Дудкина Н.Г., Арисова В.Н. Структура и свойства поверхностного слоя стали 40X, подвергнутой электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 259–265.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-259-265>

Original article

## SURFACE LAYER OF 40KH STEEL AFTER ELECTROMECHANICAL TREATMENT WITH DYNAMIC FORCE IMPACT

N. G. Dudkina, V. N. Arisova

■ Volgograd State Technical University (28 Lenina Ave., Volgograd 400005, Russian Federation)

**Abstract.** The paper presents the results of complex studies of the structure, microhardness and depth of the hardened surface layer of 40Kh steel formed as a result of electromechanical treatment with dynamic application of a deforming force (EMT with impact). The research was carried out using optical microscopy, X-ray diffraction analysis, and microhardness methods. The method of electromechanical treatment with dynamic force impact consisted in simultaneous transmission of electric current pulses and deforming force through the contact zone of the tool with the part. As a result of shock-thermal effects with different current densities ( $j = 100 \text{ A/mm}^2$ ;  $300 \text{ A/mm}^2$ ;  $600 \text{ A/mm}^2$ ), segments of the hardened layer of different sizes and structure composition are formed on the steel surface in cross-section. Analysis of structural and phase transformations in the surface layer of 40Kh steel subjected to dynamic electromechanical treatment indicates the formation of a specific structure of the white layer, the structure and properties close to the amorphous state of the metal with a maximum hardness HV = 8.0 – 8.5 GPa. As you move away from the surface, a transition zone is formed behind the segment of the white layer with a structure that does not have the characteristic needle structure of martensite. It was found that with an increase in the current density during shock electromechanical treatment, the depth of hardening increases by 4 – 5 times with a simultaneous increase in the heterogeneity of strength properties; the level of micro-stresses increases by 25 %. Experimental data on the structural state, microhardness and depth of the surface layer of 40Kh steel show that electromechanical treatment with dynamic (shock) application of the deforming force causes deeper transformations in the steel structure compared to traditional static EMT.

The results obtained show that as a result of electro-mechanical processing with impact, the intensity of the temperature-force effect on the steel surface layer increases, which allows you to open the internal reserves of 40Kh steel and control the process of forming its structure and phase states.

**Keywords:** electromechanical treatment with impact, current density, steel, structure, microhardness, hardening depth

**For citation:** Dudkina N.G., Arisova V.N. Surface layer of 40Kh steel after electromechanical treatment with dynamic force impact. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 259–265. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-259-265>

## ВВЕДЕНИЕ

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что решение проблемы увеличения ресурса работы деталей машин связано с разработкой и внедрением технологических процессов, базирующихся на использовании концентрированных потоков энергии [1 – 7]. В высокоэнергетических методах поверхностного упрочнения используется импульсное приложение высокой удельной энергии на относительно малые объемы металла, что приводит к формированию специфических слоев, характеризующихся благоприятным сочетанием структуры, остаточных напряжений и физико-механических свойств [8 – 12]. На основе анализа и обобщения имеющихся в литературе исследований можно заключить о значительном влиянии высокопрочных структур на физико-механические и эксплуатационные характеристики упрочненных металлов [1 – 5, 13 – 15], несмотря на различия механизмов их возникновения.

Одним из эффективных технологических процессов формирования в поверхностных слоях сталей структуры специфических свойств (белый слой) является электромеханическая обработка с динамическим (ударным) деформированием (ЭМО с ударом). Такая обработка позволяет раскрыть потенциальные возможности широко распространенных средне- и высокоуглеродистых сталей к дополнительному упрочнению (росту твердости и глубины упрочнения) [16 – 18]. Комплекс высоких показателей механических свойств в поверхностных слоях, полученный импульсной ЭМО, обусловлен технологическими особенностями процесса: создание импульса высококонцентрированной энергии (тепла и деформации), связанные с этим тепловые эффекты в поверхностных слоях. Изменение способа подвода энергии в зону обработки сопровождается существенным повышением скорости тепловых и деформационных процессов по сравнению с известной традиционной статической ЭМО [4, 5]. Влияние скорости деформации резко сказывается на структуре и свойствах поверхностного слоя сталей при переходе от статического электромеханического поверхностного упрочнения к динамическому [18, 19].

Для традиционной статической ЭМО особенности структуры и твердости поверхностно упрочненного слоя исследованы достаточно полно, в области ЭМО с динамическим приложением усилия деформирования до сих пор ощущается нехватка научных работ, в которых подробно излагаются результаты исследования

тонкой структуры упрочненного поверхностного слоя. В связи с этим представляет интерес расширить как область исследований (металлографический, рентгеноструктурный и электронно-микроскопический анализы, оценка микротвердости и др.), так и круг исследуемых металлов.

Целью настоящей работы является исследование влияния плотности тока электромеханической обработки с динамическим силовым воздействием (ЭМО с ударом) на специфические особенности структуры, микротвердость и глубину упрочненного поверхностного слоя стали 40X.

## МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили на образцах круглого сечения diam. 25 мм толщиной 10 – 15 мм из стали 40X после нормализации (феррито-перлитная структура). Образцы подвергали электромеханической обработке с высокоскоростным деформированием. Способ электромеханической обработки с динамическим силовым воздействием заключался в одновременном пропускании через зону контакта инструмента с деталью импульса электрического тока и импульса деформирующего усилия [16]. Ударное (импульсное) нагружение осуществляли на установке точечной сварки с регулятором цикла сварки РЦС-403У4. Величина усилия ударного деформирования  $P$  составляла 1500 Н без разрыва точки контакта электрод-инструмента с образцом. Плотность тока  $j$  варьировали по режимам 1 – 3: 100, 300 и 600 А/мм<sup>2</sup>. Длительность импульса электрического тока устанавливали равной длительности ударного импульса:  $\tau = 10^{-4}$  с. Обработка обеспечивает такое состояние, когда скорость подвода энергии превышает скорость ее распространения вследствие теплопроводности. Одновременное пропускание через зону контакта инструмента с деталью импульса тока и ударного силового импульса сопровождалось существенным повышением скорости тепловых и деформационных процессов по сравнению с традиционной электромеханической обработкой (обкаткой роликом). В результате ударной электромеханической обработки на поверхности материала формировалась специфическая структура «белый слой».

После обработки образцы разрезали, изготавливали поперечные микрошлифы для изучения микроструктуры, измерения микротвердости и проведения рентгеноструктурного анализа (РСА).

Металлографические исследования проводили с помощью оптической микроскопии («Olympus BX-61», № 2 M1 0681) с программным обеспечением AnalySis GmbH. Микроструктуру фотографировали при увеличении 50, 100, 200, 500 крат.

Рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ECO. Для анализа дифрактограмм и расшифровки фазового состава применяли 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) проводили по методу аппроксимации [20], регистрировали отражения (110) и (220)  $\alpha$ -фазы стали.

Измерения микротвердости по локальным объемам поверхностного слоя проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,5 и 1 Н. Расстояние между отпечатками составляло 30 мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изображения микроструктур в поверхностном слое стали 40X, подвергнутой импульсной ЭМО с плотностью тока 100, 300, 600 А/мм<sup>2</sup>, представлены на рис. 1. Условия возникновения и свойства рассматриваемых структур имеют общность механизма их образования: возникают при одновременном сверхбыстром нагреве и деформировании. Интенсивность нагрева стали за счет тепла трансформирующейся электрической энергии определяется плотностью тока в зоне контакта электрод-инструмента с образцом. Metallographic analysis showed that after the pulse action at all studied regimes of current density  $j$  on the surface of steel in the cross-section segments with parabolic profile of the hardened zone, typical for EMT. Due to plastic deformation of the heated surface layer of the sample, segments of the hardened layer of different sizes and composition are formed. When moving from the surface into the metal, the hardened zone, transition zone and original structure are successively located.

Установлено, что все исследованные образцы в поверхности имеют мелкозернистую неоднородную по толщине сегмента мартенситную структуру. Исследование структурного состояния и характеристик присутствующих фаз образцов, обработанных по режиму с плотностью тока 100 А/мм<sup>2</sup> (рис. 1, а, б), показало отсутствие белого слоя в поверхности (в редких случаях наблюдается формирование белого слоя чрезвычайно малой толщины). Это, видимо, объясняется тем, что не преодолен энергетический барьер образования белого слоя [1] при данном режиме (несмотря на то, что легирование стали хромом благоприятно влияет на фор-

мирование белых слоев). Структура сегмента состоит из мартенсита, не имеющего характерного игольчатого строения, без сохранения внутризеренной текстуры нормализованной стали 40X и рисунка ферритной сетки по границам зерен. Сегмент имеет деформированные зоны, вытянутые в направлении удара. В небольшой переходной зоне от упрочненного слоя к исходной структуре (рис. 1, б) наблюдается частичное сохранение характерного рисунка перлитных и ферритных участков, а также рисунка ферритной сетки по границам зерен. Максимальная микротвердость HV в сегменте составляет 6,0 ГПа. Оценка неоднородности микротвердости ( $\Delta HV = HV_{\max} - HV_{\min}$ ) в упрочненном фрагменте показала разброс твердости порядка  $\Delta HV = 1,5$  ГПа.

Анализ структурных и фазовых превращений в поверхностном слое стали 40X, подвергнутой динамической ЭМО с плотностью тока 300 А/мм<sup>2</sup> (рис. 1, в), свидетельствует о формировании белого слоя, который выглядит как сплошное, однородное светлое поле (по структуре и свойствам приближается, скорее, к аморфному состоянию металла) с максимальной твердостью HV 8,0 – 8,5 ГПа. По мере удаления от поверхности за сегментом белого слоя формируется переходная зона (рис. 1, з) со структурой, не имеющей характерного для мартенсита игольчатого строения с твердостью HV

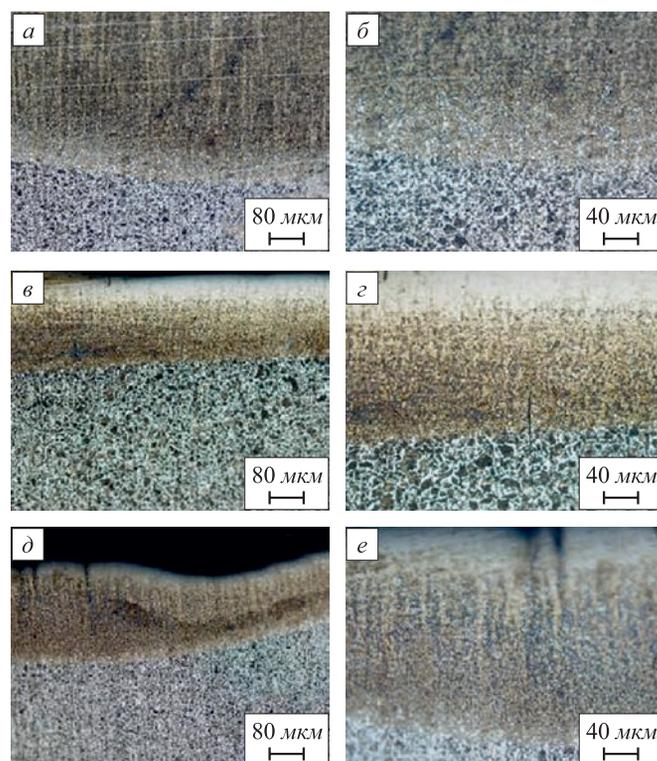


Рис. 1. Структура поверхностного слоя стали 40X, упрочненной ЭМО с импульсным приложением деформирующего усилия: а, б –  $j = 100$  А/мм<sup>2</sup>; в, з –  $j = 300$  А/мм<sup>2</sup>; д, е –  $j = 600$  А/мм<sup>2</sup>

Fig. 1. Structure of the surface layer of 40Kh steel, hardened by EMT with a pulse application of the deforming force: а, б –  $j = 100$  А/мм<sup>2</sup>; в, з –  $j = 300$  А/мм<sup>2</sup>; д, е –  $j = 600$  А/мм<sup>2</sup>

5,5 – 6,5 ГПа, и последующей зоной, в которой наблюдается резкое измельчение зерен по сравнению с исходной нормализованной сталью 40X, с менее выраженной деформацией в направлении удара, чем по режиму 1. Неоднородность микротвердости в переходной зоне сегмента достигает  $\Delta HV = 1,0$  ГПа.

На рис. 1, *d* представлена структура фрагмента упрочненного слоя после импульсной обработки с плотностью 600 А/мм<sup>2</sup>. Структура сегмента сочетает в себе структуры, полученные по режимам 1 и 2: формируется зона белого слоя с твердостью HV 7,0 – 8,0 ГПа, за которым наблюдается зона повышенной твердости HV 4,0 – 6,5 ГПа с перекристаллизованными зернами, представляющими мартенсит со значительными следами деформации. Картина структуры (рис. 1, *e*) свидетельствует о большой концентрационной неоднородности мартенсита, о чем свидетельствует и разброс твердости в упрочненном сегменте ( $\Delta HV = 2,5$  ГПа).

Неоднородность твердости в сегменте, очевидно, связана, с одной стороны, с большой неоднородностью мартенсита, образовавшегося из неоднородного аустенита сверхбыстрой закалки, с другой стороны, – с неравномерной пластической деформацией мартенсита, вызванной высокоскоростной деформацией металла при динамическом ударе.

Металлографические исследования показали, что, несмотря на общность механизма образования структур (все возникают при сверхбыстром нагреве и деформировании), свойства рассматриваемых структур имеют существенные различия. В упрочненных при разных режимах нагрева поверхностных слоях стали происходит множество процессов термомеханического и диффузионного характера, которые обуславливают различия в протекании процессов фазовых и структурных изменений. После импульсного воздействия с различной тепловой энергией с повышением тепловыделения и усилением явлений последствия теплового источника увеличивается размер отпечатка, форма сегмента и изменяется состав его структур. Таким образом, тип структуры, формируемой в процессе высокоскоростной деформации ЭМО с ударом, определяется взаимодействием и соотношением температуры нагрева (в том числе температурой деформации) и величиной динамической нагрузки.

На рис. 2 представлено изменение толщины упрочненного сегмента (белый слой и переходная зона) от изменения плотности тока импульсной обработки. С увеличением плотности тока глубина упрочненного слоя возрастает. Так, при  $j = 100$  А/мм<sup>2</sup> толщина упрочненного слоя  $h$  составляет 0,33 – 0,38 мм; при плотности тока 300 и 600 А/мм<sup>2</sup> толщина упрочненного слоя составляет 0,48 – 0,54 и 1,2 – 1,4 мм соответственно, а в некоторых случаях достигает 2 мм.

С целью установления природы возникающей в зоне упрочнения структуры стали проводили рентгенографический анализ структуры поверхностного слоя стали

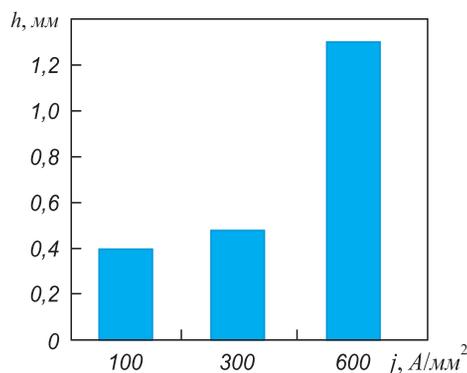


Рис. 2. Изменение толщины упрочненного сегмента (белый слой и переходная зона) от плотности тока импульсной электромеханической обработки

Fig. 2. Change in thickness of the hardened segment (white layer and transition zone) from the current density  $j$  of pulse electromechanical processing

40X, упрочненной импульсной ЭМО. В качестве эталона использовали образец в отожженном состоянии. Вид дифрактограмм и отражений 110 и 220  $\alpha$ -фазы при исследованных режимах электромеханической обработки с динамическим силовым воздействием представлен на рис. 3. Результаты сравнительного рентгеноструктурного анализа образцов стали 40X (где  $D$  – размер ОКР;  $\Delta a/a$  – относительная деформация решетки;  $\sigma_{II}$  – напряжения второго рода) приведены в таблице.

Как следует из таблицы ОКР, блоки мозаики очень мелкие и с увеличением плотности тока при ЭМО происходит их измельчение от 304 до 224 Å, при этом уровень микронапряжений увеличивается от 238 МПа (режим 1) до 377 МПа (режим 3).

Проведенный рентгенофазовый анализ структуры упрочненного поверхностного слоя стали 40X показывает, что при режимах 1, 2 все линии дифрактограммы принадлежат  $\alpha$ -фазе мартенсита. А при обработке по режиму 3 кроме  $\alpha$ -фазы присутствует около 20 % аустенита, количество которого определяли сравнением интегральных интенсивностей интерференционных линий, принадлежащих аустенитной и мартенситной фазам (по методу градуировочной кривой) [20]. Аустенит может образоваться в результате неравновесной кристаллизации, которую обеспечивают быстро протекающие процессы при деформации с высоким вложением энергии при высокой плотности тока ЭМО. Напряжения второго рода при этом режиме достигают 377 МПа (см. таблицу).

Таким образом, импульсный нагрев, создающий высокий температурный градиент и значительное удельное давление, вызывающее деформирование с большими скоростями и градиентами напряжений, приводят к мелкозернистости и неоднородности структуры и, как следствие, к получению более высоких показателей механических свойств в поверхностных слоях. Повышение скорости деформации сокращает время действия

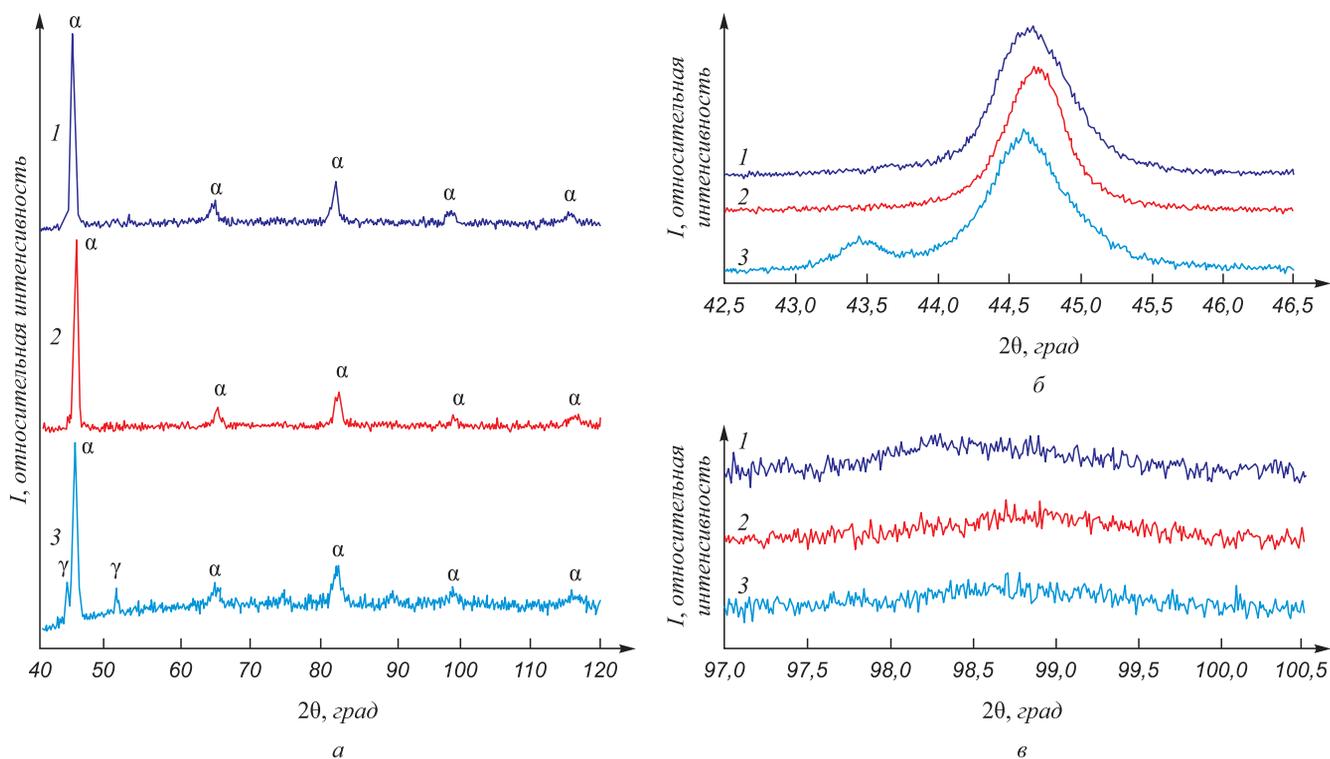


Рис. 3. Диффрактограммы исследуемых образцов:  
 а – общий вид; б, в – отражения 110 и 220  $\alpha$ -фазы; 1 – 3 – плотность тока 100, 300 и 600 А/мм<sup>2</sup>

Fig. 3. Diffractograms of the studied samples:  
 а – general view; б, в – reflections of 110 and 220  $\alpha$ -phases, respectively; 1 – 3 – current density of 100, 300, and 600 A/mm<sup>2</sup>, respectively

### Размер ОКР и величина микронапряжений в исследуемых образцах

#### Size of the coherent-scattering region and magnitude of microstresses in the studied samples

Режим	$D, \text{Å}$	$\Delta a/a$	$\sigma_{II}, \text{МПа}$
1	304	0,0012	238
2	224	0,0014	283
3	228	0,0019	377

деформирующих напряжений и приводит при неизменном давлении к повышению величины деформирующих напряжений и увеличению интенсивности развития дефектов кристаллического строения, что вызывает дополнительное упрочнение поверхностного слоя. Деформируемое и напряженное состояние металла после ударно-термической обработки определяется не только внешними (контактное давление электрод-инструмента на обрабатываемый образец), но и внутренними (термоупругие, структурные, фазовые напряжения и дефор-

мации) факторами, что влияет на аустенитно-мартенситное превращение и необычное изменение свойств в поверхностном слое стали.

### Выводы

Тип структуры, формируемой на стали 40Х в процессе ударной электромеханической обработки, определяется взаимодействием и соотношением температуры нагрева и величины динамической нагрузки обработки.

Увеличение плотности тока при ЭМО с динамическим силовым воздействием приводит к значительному увеличению глубины упрочнения (1,5 – 2,0 мм) и повышению максимальной твердости в микроробьемах до 8,0 – 8,5 ГПа в поверхностном слое стали 40Х.

Полученные результаты показывают, что динамическая электромеханическая обработка обладает высокими потенциальными возможностями в управлении основными структурными изменениями в поверхностном слое стали при формировании физико-механических свойств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### REFERENCES

1. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. Киев: Наукова думка, 1988. 238 с.
2. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 301 с.
1. Babei Yu.I. *Physical Foundations of Pulsed Hardening of Steel and Cast Iron*. Kiev: Naukova dumka, 1988, 238 p. (In Russ.).
2. Grigor'yants A.G. *Fundamentals of Materials Laser Processing*. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 301 p. (In Russ.).

3. Gnanamuthu D.S. Laser surface treatment // *Optical Engineering*. 1980. Vol. 19. No. 5. P. 783–792. <http://doi.org/10.1117/12.7972604>
4. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.
5. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Дудкина Н.Г., Захаров И.Н. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация. Новосибирск: Наука, 2003. 318 с.
6. Bathula S., Anandani R.C., Dhar A., Srivastava A.K. Microstructural features and mechanical properties of Al 5083/SiCp metal matrix nanocomposites produced by high energy ball milling and spark plasma sintering // *Material Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 545. P. 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.095>
7. Janicki D. Microstructural evolution during laser surface alloying of ductile cast iron with titanium // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017. Vol. 62. No. 4. P. 2425–2431. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0357>
8. Lesyk D.A., Martinez S., Mordiyuk B.N., Dzhemelinskiy V.V., Lamikiz A., Prokopenko G.I. Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045 // *Optics and Laser Technology*. 2019. Vol. 111. P. 424–438. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.09.030>
9. Бровер А.В., Бровер Г.И. Влияние постоянного магнитного поля на структурообразование в сталях при скоростной лазерной обработке // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 8. С. 638–643. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-638-643>
10. Ivannikov A.Yu., Kalita V.I., Komlev D.I., Radyuk A.A., Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Parshev S.N. The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma sprayed Ni-20Cr coating // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 655. P. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.125>
11. Gill A.S., Telang A., Ye C., Mannava S.R., Qian D., Vasudevan V.K. Localized plastic deformation and hardening in laser shock peened Inconel alloy 718 SPF // *Materials Characterization*. 2018. Vol. 142. P. 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.010>
12. Fogagnolo J.B., Rodrigues A.V., Sallica-Leva E., Lima M.S.-L., Caram R. Surface stiffness gradient in Ti parts obtained by laser surface alloying with Cu and Nb // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 297. P. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.04.025>
13. Biswas A., Li L., Chatterjee U.K., Manna I., Pabi S.K., Majumdar J.D. Mechanical and electrochemical properties of laser surface nitrided Ti-6Al-4V // *Scripta Materialia*. 2008. Vol. 59. No. 2. P. 239–242. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.03.020>
14. Guo W., Dong S., Guo W., Francis J.A., Li L. Microstructure and mechanical characteristics of a laser welded joint in SA508 nuclear pressure vessel steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 625. P. 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.056>
15. Zou J.X., Zhang K.M., Hao S.Z., Dong C., Grosdidier T. Mechanisms of hardening, wear and corrosion improvement of 316 L stainless steel by low energy high current pulsed electron beam surface treatment // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 519. No. 4. P. 1404–1415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2010.09.022>
16. Пат. 2168552 РФ. Способ обработки деталей поверхностным пластическим деформированием / Дудкина Н.Г., Федоров А.В., Свитачев С.Ю.; заявл. 10.01.2000; опубл. 10.06.2001. Бюл. № 16.
17. Эдигаров В.Р., Литав Е.В., Малый В.В. Комбинированная электромеханическая обработка с динамическим силовым воздействием // *Омский научный вестник*. 2015. № 1 (137). С. 69–73.
18. Матлин М.М., Дудкина Н.Г., Дудкин А.Д. Особенности формирования упрочненного слоя при электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007. № 6 (30). С. 39–40.
19. Дудкина Н.Г. Исследование поверхностного слоя стали У10, подвергнутой электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием // *Известия ВолгГТУ*. 2017. № 6 (201). С. 148–153.
20. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 2002. 360 с.
3. Gnanamuthu D.S. Laser surface treatment. *Optical Engineering*. 1980, vol. 19, no. 5, pp. 783–792. <http://doi.org/10.1117/12.7972604>
4. Askinazi B.M. *Hardening and Restoration of Machine Parts by Electromechanical Processing*. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 200 p. (In Russ.).
5. Bagmutov V.P., Parshev S.N., Dudkina N.G., Zakharov I.N. *Electromechanical Processing: Technological and Physical Foundations, Properties, Implementation*. Novosibirsk: Nauka, 2003, 318 p. (In Russ.).
6. Bathula S., Anandani R.C., Dhar A., Srivastava A.K. Microstructural features and mechanical properties of Al 5083/SiCp metal matrix nanocomposites produced by high energy ball milling and spark plasma sintering. *Material Science and Engineering: A*. 2012, vol. 545, pp. 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.095>
7. Janicki D. Microstructural evolution during laser surface alloying of ductile cast iron with titanium. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017, vol. 62, no. 4, pp. 2425–2431. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0357>
8. Lesyk D.A., Martinez S., Mordiyuk B.N., Dzhemelinskiy V.V., Lamikiz A., Prokopenko G.I. Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045. *Optics and Laser Technology*. 2019, vol. 111, pp. 424–438. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.09.030>
9. Brover A.V., Brover G.I. Influence of constant magnetic field on structure formation in steels at high-speed laser processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 8, pp. 638–643. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-638-643>
10. Ivannikov A.Yu., Kalita V.I., Komlev D.I., Radyuk A.A., Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Parshev S.N. The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma sprayed Ni-20Cr coating. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016, vol. 655, pp. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.125>
11. Gill A.S., Telang A., Ye C., Mannava S.R., Qian D., Vasudevan V.K. Localized plastic deformation and hardening in laser shock peened Inconel alloy 718 SPF. *Materials Characterization*. 2018, vol. 142, pp. 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.010>
12. Fogagnolo J.B., Rodrigues A.V., Sallica-Leva E., Lima M.S.-L., Caram R. Surface stiffness gradient in Ti parts obtained by laser surface alloying with Cu and Nb. *Surface and Coatings Technology*. 2016, vol. 297, pp. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.04.025>
13. Biswas A., Li L., Chatterjee U.K., Manna I., Pabi S.K., Majumdar J.D. Mechanical and electrochemical properties of laser surface nitrided Ti-6Al-4V. *Scripta Materialia*. 2008, vol. 59, no. 2, pp. 239–242. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.03.020>
14. Guo W., Dong S., Guo W., Francis J.A., Li L. Microstructure and mechanical characteristics of a laser welded joint in SA508 nuclear pressure vessel steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2015, vol. 625, pp. 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.056>
15. Zou J.X., Zhang K.M., Hao S.Z., Dong C., Grosdidier T. Mechanisms of hardening, wear and corrosion improvement of 316 L stainless steel by low energy high current pulsed electron beam surface treatment. *Thin Solid Films*. 2010, vol. 519, no. 4, pp. 1404–1415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2010.09.022>
16. Dudkina N.G., Fedorov A.V., Svitachev S.Yu. *The method of parts processing by surface plastic deformation*. Patent RF no. 2168552. *Bulleten' izobretenii*. 2001, no. 16. (In Russ.).
17. Edigarov V.R., Litau E.V., Malyi V.V. Combined electromechanical processing with dynamic impact. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2015, no. 1 (137), pp. 69–73. (In Russ.).
18. Matlin M.M., Dudkina N.G., Dudkin A.D. Hardened layer formation during electromechanical processing with dynamic impact. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2007, no. 6 (30), pp. 39–40. (In Russ.).
19. Dudkina N.G. Surface layer of U10 steel after electromechanical processing with dynamic force impact. *Izvestiya VolgGTU*. 2017, no. 6 (201), pp. 148–153. (In Russ.).
20. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *X-ray and Electron Optical Analysis*. Moscow: MISIS, 2002, 360 p. (In Russ.).

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Наталья Геннадьевна Дудкина**, к.т.н., доцент кафедры «Детали машин и подъемно-транспортные устройства», Волгоградский государственный технический университет

**ORCID:** 0000-0002-1502-7025

**E-mail:** 4dng@mail.ru

**Вера Николаевна Арисова**, к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение и композиционные материалы», Волгоградский государственный технический университет

**ORCID:** 0000-0001-6787-6689

**E-mail:** Arisova1954@mail.ru

**Natal'ya G. Dudkina**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Machine Parts and Lifting-Transport Machines", Volgograd State Technical University

**ORCID:** 0000-0002-1502-7025

**E-mail:** 4dng@mail.ru

**Vera N. Arisova**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials Science and Composite Materials", Volgograd State Technical University

**ORCID:** 0000-0001-6787-6689

**E-mail:** Arisova1954@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020

После доработки 10.04.2020

Принята к публикации 13.04.2020

Received 06.03.2020

Revised 10.04.2020

Accepted 13.04.2020