

УДК 621.787:621.9.048

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ, УПРОЧНЕННЫХ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ\*

*Багмутов В.П., д.т.н., профессор кафедры «Сопротивление материалов» (sopromat@vstu.ru)*

*Дудкина Н.Г., к.т.н., доцент кафедры «Детали машин и подъемно-транспортные устройства»*

*Захаров И.Н., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Сопротивление материалов»*

*Романенко М.Д., магистрант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»*

*Чекунов В.В., магистрант кафедры «Техническая эксплуатация и ремонт автомобилей»*

Волгоградский государственный технический университет

(400005, Россия, Волгоград, пр. им. Ленина, 28)

**Аннотация.** На примере закаленных углеродистых сталей марок 45 и У8 рассмотрены особенности влияния комбинации различных технологий (с использованием электромеханической обработки, поверхностного пластического деформирования и безабразивной ультразвуковой финишной обработки и их комбинации) поверхностного упрочнения на изменения структурного состояния и микротвердости поверхности, циклической долговечности упрочненных образцов, а также механизмов усталостного разрушения. Исследования проведены с использованием методов оптической и растровой электронной микроскопии, микротвердости, усталостных испытаний. Показано, что для исследуемых сталей в закаленном состоянии высокоскоростное импульсное термодформационное воздействие в ходе электромеханической обработки сопровождается повышением (более чем на 50 %) микротвердости поверхности и снижением (на 20 – 30 %) предела выносливости. Такое изменение свойств связано с образованием в поверхностном слое существенно неравновесных, неоднородных по химическому составу ультрадисперсных фаз, обладающих повышенной твердостью. При этом в приповерхностных объемах металла протекают процессы отпуска закаленной структуры с образованием зон разупрочнения и формированием растягивающих остаточных напряжений, что сопровождается снижением микротвердости в этих зонах и предела выносливости образцов. Подобные эффекты снижения некоторых эксплуатационных характеристик материалов в ходе поверхностного упрочнения различных материалов, равно как и способы повышения свойств таких изделий за счет дополнительных технологических операций, требуют более глубокого изучения. Комбинированное поверхностное упрочнение (на основе электромеханической обработки, поверхностного пластического деформирования и безабразивной ультразвуковой финишной обработки) углеродистых сталей позволяет за счет вариации интенсивности температурного и деформационного воздействий целенаправленно изменять структурно-фазовый состав и напряженно-деформированное состояние поверхностных и приповерхностных слоев металла. В результате этого появляется возможность в зависимости от предварительной термической обработки стали формировать сбалансированный комплекс прочностных и усталостных характеристик образцов. Операции поверхностного пластического деформирования и безабразивной ультразвуковой финишной обработки, проведенные после электромеханического упрочнения, за счет интенсивной пластической деформации обеспечивают выглаживание поверхности, залечивание приповерхностных дефектов и позволяют корректировать напряженно-деформированное состояние обрабатываемого металла. Это обеспечивает повышение микротвердости в зоне отпуска на 20 – 25 % и предела выносливости образцов на 25 – 30 %.

**Ключевые слова:** электромеханическая обработка, поверхностное пластическое деформирование, безабразивная ультразвуковая финишная обработка, микротвердость, усталостная прочность, микроструктура.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-6-438-445

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных резервов повышения эксплуатационных свойств конструкционных металлических сплавов является создание в их поверхностном слое ультрадисперсных структур, обладающих комплексом уникальных физико-механических свойств, необходимых в экстремальных условиях эксплуатации изделий ответственного назначения. При решении подобных задач широко используют комбинированные способы обработки материалов высокоэнергетическими тем-

пературными и силовыми полями, позволяющими эффективно формировать желаемый комплекс свойств изделия. Например, такие технологии реализуются при сочетании химико-термических методов [1, 2], лазерной [2, 3], плазменной [4], ударной [5, 6], ультразвуковой [3, 7], электронно-лучевой [8], электронно-пучковой обработок [9], электровзрывного легирования [10, 11] и их комбинации [12, 13].

Комбинированные методы на основе поверхностно-упрочняющей электромеханической обработки [14] в сочетании с поверхностным пластическим деформированием [15, 16], ударной обработкой [17], фрикционным упрочнением [18, 19], алмазным выгла-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-01742 а; проект № 18-48-340010 р\_а).

живанием [20], ультразвуковой обработкой [21], плазменным напылением [22 – 24] и др. применяются для обработки широкого круга конструкционных материалов – сталей разных марок в различном структурном состоянии [15 – 21], титановых и алюминиевых сплавов [25 – 27], покрытий [22 – 24] и др.

Основное внимание уделяли исследованиям структуры [15, 17, 19, 25, 26], глубины, твердости и других параметров упрочненного слоя [15 – 18, 21, 23 – 25], а также эксплуатационных характеристик (износостойкости [18, 22], усталостной прочности [15, 26]) упрочненных образцов.

Следует отметить, что создание на поверхности образцов упрочненного слоя с повышенной твердостью может сопровождаться его охрупчиванием, формированием неблагоприятной эпюры остаточных напряжений, склонностью к растрескиванию, как следствие – снижением усталостной прочности, падением стойкости к неабразивному, кавитационному, эрозионному износу и т.д., например, при упрочнении титановых сплавов, плазменных покрытий, закаленных сталей. При этом мало описанными остаются как механизмы снижения некоторых эксплуатационных характеристик материалов в ходе поверхностного упрочнения, так и способы коррекции свойств изделия за счет дополнительных технологических операций.

В этой связи актуальной является задача разработки и исследования технологий поверхностного упрочнения для получения сбалансированного комплекса повышенных служебных характеристик (по твердости, износостойкости, прочности и выносливости) обработанного изделия.

В настоящей работе исследовали влияние комбинации поверхностной обработки, состоящей из различных сочетаний технологий поверхностного упрочнения электрохимической обработкой (ЭМО), поверхностного пластического деформирования (ППД) и безабразивной ультразвуковой финишной обработки (БУФО) [28] на усталостную прочность закаленных углеродистых сталей.

#### **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Сравнительные исследования проводили на среднеуглеродистой конструкционной стали марки 45 и углеродистой инструментальной стали марки У8 после закалки и низкого отпуска.

Из указанных сталей изготавливали цилиндрические образцы по ГОСТ 25502 – 79 (тип I) с диаметром рабочей части 7,5 мм, которые подвергали поверхностному упрочнению различными методами (ЭМО, ЭМО + ППД, ЭМО + БУФО).

ЭМО заключалась в воздействии на материал переменного электрического тока плотностью  $j = 400 \text{ А/мм}^2$ , напряжением  $U = 4 \div 5 \text{ В}$ , пропускаемого через локальную зону контакта инструмента (твердосплавного

ролика) с поверхностью образца. Скорости обработки  $V = 0,31 \text{ м/мин}$  и подачи  $S = 0,4 - 0,8 \text{ мм/об}$ ; усилие на инструмент  $F = 200 \div 1000 \text{ Н}$ .

Обработку ППД проводили обкаткой роликом при нагрузке  $F = 400 \div 1200 \text{ Н}$ ; скоростях обработки  $V = 0,31 \text{ м/мин}$  и подачи  $S = 0,25 \text{ мм/об}$ ; число проходов  $n = 1$  (диаметр обкатного ролика 36 мм, радиус закругления 4 мм).

Для БУФО использовали следующий режим: частота колебаний инструмента – 22 кГц; скорости обработки  $V = 4,71 \text{ м/мин}$  и подачи инструмента – 0,07 мм/об; усилие прижима  $F = 100 \text{ Н}$ ; материал инструмента – твердый сплав.

Измерения микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке на индентор 50 г. Микроструктурные исследования проводили с использованием оптического микроскопа МЕТАМ ЛВ-32, растрового электронного микроскопа Versa 3D.

Циклические нагружения осуществляли на машине для усталостных испытаний НУ-3000 по схеме чистого изгиба с вращением со следующим режимом: частота нагружения – 50 Гц, цикл – симметричный, базовое число  $N$  циклов –  $20 \cdot 10^6$ .

#### **СТРУКТУРА НОРМАЛИЗОВАННЫХ И ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЭМО**

На рис. 1 приведены фотографии микроструктуры упрочненных ЭМО поверхностных слоев образцов из сталей марок 45 и У8 в предварительно нормализованном (рис. 1, а, б) и закаленном (рис. 1, в, г) исходном состоянии.

На поверхности всех указанных образцов после ЭМО наблюдается характерный «белый» слой, представляющий собой ультрадисперсную мартенситную структуру повышенной твердости. Структура «белого» слоя не имеет игольчатого либо иного характерного кристаллического строения и выглядит как сплошное, светлое поле (рис. 1).

Упрочненный слой на поверхности исходно нормализованных сталей (рис. 1, а, б) отличается большей неоднородностью структуры по сравнению с закаленными образцами (рис. 1, в, г). При достаточно грубом исходном строении металла (с феррито-перлитной или перлитной структурами) образующийся на месте перлита ультрадисперсный мартенсит может наследовать внутризеренную текстуру, сохраняя рисунок цементитных и ферритных участков, а также ферритной сетки по границам зерен (рис. 1, а, б). При этом для среднеуглеродистой стали марки 45 (рис. 1, а) с исходной феррито-перлитной структурой указанная неоднородность поверхностного слоя более выражена, чем для стали марки У8 со структурой перлита (рис. 1, б).

Для предварительно закаленных низкоотпущенных сталей исходная структура (мартенсит отпуска) обладает большей степенью однородности, что отражается

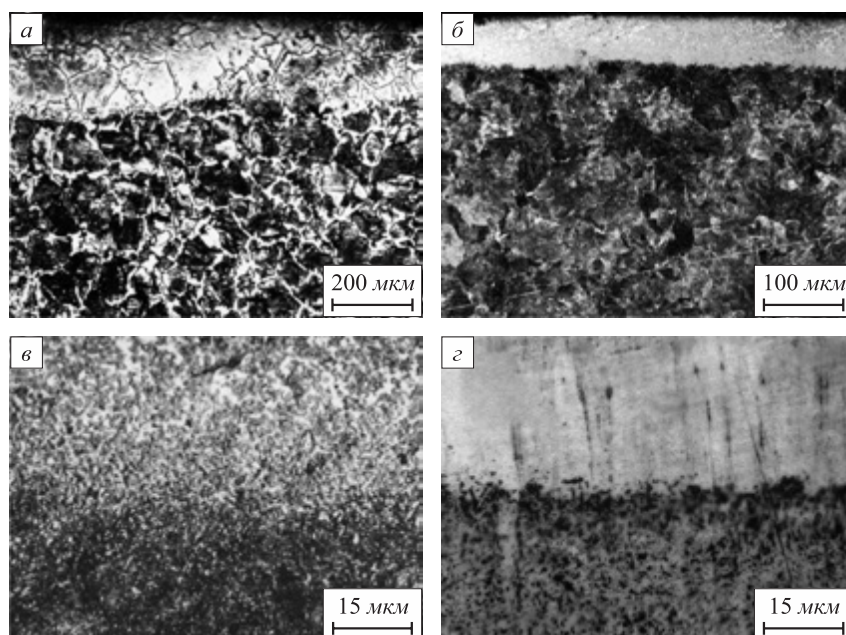


Рис. 1. Микроструктура упрочненного ЭМО слоя в образцах из сталей марок 45 и У8: а и б – сталь 45 и У8 нормализованная; в и г – сталь 45 и У8 закаленная

Fig. 1. Microstructure of EDM hardened layer of 45 steel and U8 hardened steel samples: а and б – 45 steel and normalized U8 steel; в and г – hardened U8 steel

и на структуре упрочненной поверхности (рис. 1, в, г). Повышение содержания углерода в стали также способствует росту однородности «белого» слоя (рис. 1, а, б и в, г).

На определенной глубине за структурой «белого» слоя на закаленных сталях выявляется зона повышенной травимости, имеющая вид темной окантовки вокруг упрочненного фрагмента (рис. 1, в, г) и представляющая собой зону разупрочнения (отпуска) материала. Размеры такой области в исходном материале зависят от его предшествующей термической обработки. На закаленных низкоотпущенных сталях глубина зоны повышенной травимости максимальна и достигает 0,25 – 0,35 мм.

Данные электронно-микроскопического анализа предварительно закаленных сталей марок 45 и У8 свидетельствуют о том, что после упрочнения ЭМО микроструктура металла в указанных характерных зонах поверхностного слоя существенно различается (рис. 2).

В упрочненном слое микроструктура металла при увеличении 12 000 – 30 000 крат имеет характерное для высокоскоростной закалки строение бесструктурного (безиглочатого, скрытокристаллического) мартенсита с мелкими включениями карбидов и остаточного аустенита (рис. 2, а, б).

В зоне повышенной травимости, расположенной под упрочненным «белым» слоем на глубине от 150 до 400 – 500 мкм, наблюдаются различные структуры, являющиеся продуктами распада мартенсита (рис. 2, в, г). Они распределяются по объему указанной зоны в зависимости от температур и ее пространственных и вре-

менных градиентов. Так, в областях, прилегающих к границе упрочненного слоя, где температуры при ЭМО существенны, но скорости охлаждения недостаточны для закалки этих объемов, наблюдается высокотемпературный отпуск исходной мартенситной структуры с образованием сорбита. По мере удаления в глубь от упрочненного слоя температура в зоне термического влияния снижается и на некоторой глубине (около 300 – 400 мкм) наряду с сорбитом появляются области со структурой троостита отпуска. При этом с понижением температуры по глубине зоны отпуска содержание объемов металла, отпущенных на троостит, увеличивается.

На глубине около 500 – 600 мкм выявляются объемы металла с небольшим количеством отпущенного мартенсита. На границе зоны отпуска с исходной структурой в основном наблюдается мартенсит отпуска с плавным переходом к структуре исходного материала. На глубине свыше 500 – 600 мкм от поверхности образца наблюдается исходная структура закаленной стали с характерным строением мелко- и среднеиглочатого мартенсита (рис. 2, д, е).

#### МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОСЛЕ ЭМО И ЭМО + ППД

На рис. 3 представлены результаты измерения микротвердости поверхностного слоя закаленных сталей марок 45 (поз. а) и У8 (поз. б) после упрочнения ЭМО (кривая 1) и ЭМО + ППД (кривая 2).

Зона «белого» слоя глубиной около 120 – 180 мкм характеризуется повышенной средней микротвердостью со значениями 7,5 – 8,0 ГПа для стали 45 и 8,5 – 9,0 ГПа

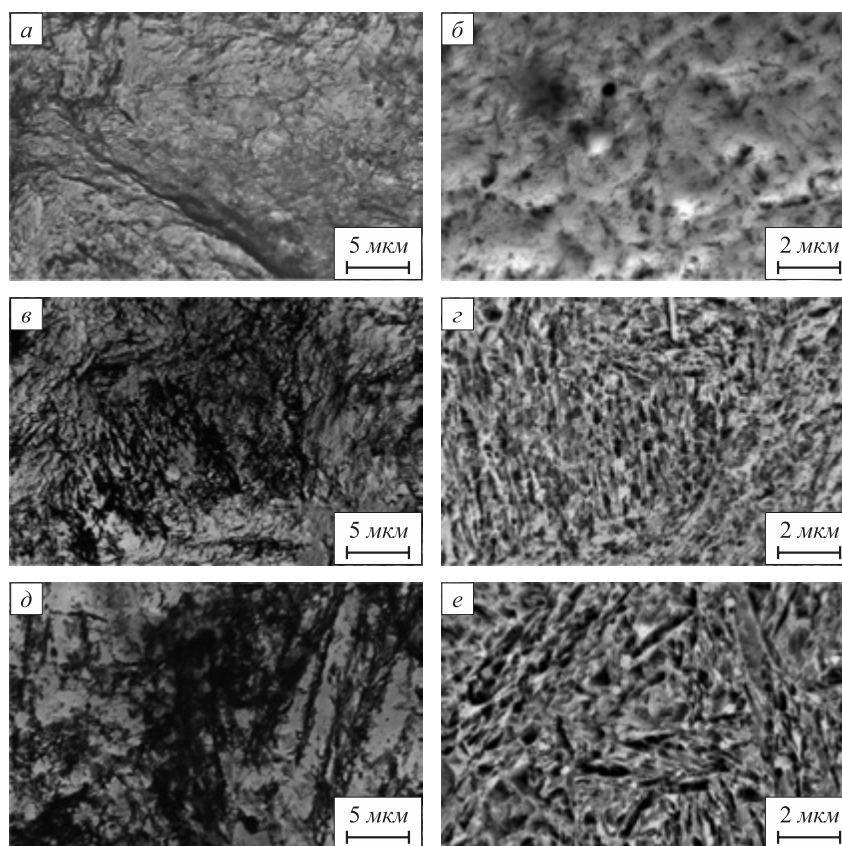


Рис. 2. Микроструктура в различных областях по глубине поверхностного слоя закаленных сталей марок 45 (а, в, д) и У8 (б, г, е) после упрочнения ЭМО:  
а, б – зона упрочнения; в, г – зона отпуска; д, е – исходная структура

Fig. 2. Microstructure in various areas along the depth of the surface layer of hardened steels 45 (a, в, д) and U8 (б, г, е) after EDM hardening:  
а, б – hardening zone; в, г – tempering zone; д, е – initial structure

для стали У8, т.е. в 1,5 раза выше твердости в исходном состоянии (закалка + низкий отпуск). С увеличением содержания углерода в стали микротвердость и глубина упрочненного ЭМО слоя возрастают (рис. 3, а, б), что связано с повышением дисперсности исходной структуры металла и выделением карбидной фазы [29].

Граница раздела упрочненного и разупрочненного металла в случае закаленной стали характеризуется резким перепадом от твердости (7,5 – 9,0 ГПа) «белого» слоя к твердости (3,5 – 4,5 ГПа) приповерхностной зоны термического влияния (рис. 3). Глубина рассматриваемой зоны составляет около 300 – 350 мкм. Падение микротвердости в этой области обусловлено образованием продуктов распада мартенсита при отпуске. При этом плавное изменение микротвердости зоны термического влияния (до исходного уровня в 6,0 – 6,5 ГПа) связано с постепенным переходом указанных структур в структуру закаленной сердцевины (рис. 3).

Поверхностное пластическое деформирование, проведенное после ЭМО, практически не влияет на микротвердость «белого» слоя, но приводит к повышению твердости в приповерхностной зоне вторичного отпуска (рис. 3, а, б, кривая 2). Прирост микротвердости до-

стигается за счет механического упрочнения (наклепа) отпущенного металла, при этом степень упрочнения тем выше, чем меньше его исходная твердость. Минимальная микротвердость в зоне вторичного отпуска после ЭМО + ППД повышается на 25 – 30 % (около

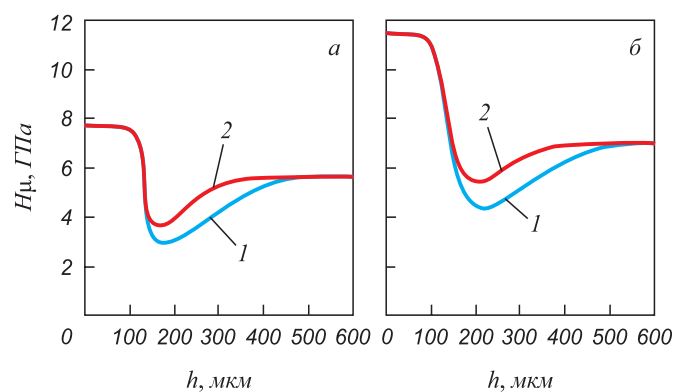


Рис. 3. Изменение микротвердости  $H\mu$  по глубине  $h$  поверхностного слоя закаленных сталей марок 45 (а) и У8 (б):  
1 – упрочнение ЭМО; 2 – упрочнение ЭМО + ППД

Fig. 3. Change in microhardness  $H\mu$  over the depth  $h$  of the surface layer of hardened steels 45 (a) and U8 (б):  
1 – EDM hardening; 2 – EDM + SPD hardening

1 ГПа) и постепенно увеличивается до уровня твердости закаленной сердцевины. Ширина зоны разупрочненного металла при этом уменьшается на 100 – 150 мкм (рис. 3, а, б, кривая 2).

### УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ НОРМАЛИЗОВАННЫХ И ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЭМО И ЭМО + ППД

Известно [15], что наличие на поверхности образцов из нормализованной стали высокопрочных треков «белого» слоя ведет к заметному увеличению усталостной прочности. Например, для нормализованной стали марки 45 после ЭМО предел выносливости увеличивается с 370 до 450 МПа, т.е. более чем на 20 %, а долговечность в пределах ограниченной выносливости увеличивается более чем в пять раз [15].

Для закаленных низкоотпущенных сталей (в настоящей работе на примере сталей марок 45 и У8) после ЭМО может наблюдаться снижение усталостных характеристик при циклических нагрузках (рис. 4, а, б, кривая 2). Предел выносливости закаленной стали 45 снижается с 650 МПа для исходно закаленного металла до 530 МПа после ЭМО, т.е. на 20 % (рис. 4, а), для стали У8 – с 930 до 650 МПа, т.е. на 30 % (рис. 4, б).

Дополнительные операции поверхностного пластического деформирования, проведенные после ЭМО (ЭМО + ППД, ЭМО + БУФО), приводят к росту усталостных характеристик исследуемых сталей.

Как видно из рис. 4, а, предел выносливости закаленной стали 45 после комбинированной обработки ЭМО + ППД повышается на 35 % (с 520 до 690 МПа; кривые 2 и 3) по сравнению с образцами после ЭМО и на 7 % (с 650 МПа) – по сравнению с исходными (закалка) образцами (кривая 1). При этом долговечность в области ограниченной выносливости для образцов, упрочненных ЭМО + ППД, увеличивается почти в шесть раз (от исходного состояния) (рис. 4, а).

В случае закаленной стали У8 комбинированные обработки ЭМО + ППД и ЭМО + БУФО также приводят к повышению предела выносливости относительно ЭМО (рис. 4, б): после ЭМО + БУФО – на 26 % (с 650 до 822 МПа); после ЭМО + ППД – на 31 % (до 856 МПа). Однако достигаемый при этом уровень усталостной прочности остается ниже значений (930 МПа), полученных на исходных закаленных образцах.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

К особенностям поверхностного упрочнения сталей ЭМО относятся большие скорости нагрева ( $10^5 - 10^6$  °C/c) и охлаждения ( $10^4 - 10^5$  °C/c) [30] металла при одновременной его пластической деформации. В таких условиях появляется возможность получения структур со специфическими свойствами, которые сложно реализовать при обычной термической или термомеханической обработке.

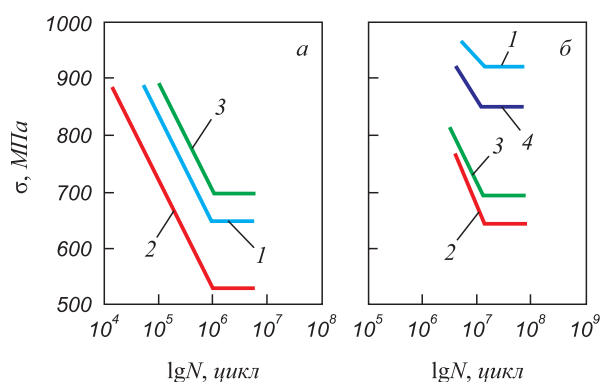


Рис. 4. Кривые усталости закаленной низкоотпущенной стали 45 (а) (1 – исходное состояние (закалка +  $T_{от} = 300$  °C); 2 – упрочнение ЭМО; 3 – упрочнение ЭМО + ППД) и низкоотпущенной инструментальной стали У8 (б) (1 – исходное состояние; 2 – упрочнение ЭМО; 3 – упрочнение ЭМО + ППД; 4 – упрочнение ЭМО + БУФО)

Fig. 4. Fatigue curves for hardened low tempered 45 steel (a) (1 – initial state (quenching +  $T_{temp} = 300$  °C); 2 – EDM hardening; 3 – EDM + SPD hardening) and for low-tempered tool steel U8 (b) (1 – initial state; 2 – EDM hardening; 3 – EDM + SPD hardening; 4 – EDM + NAUSFP hardening)

В поверхностном слое рассматриваемых сталей после ЭМО формируется упрочненная структура ультрамелкодисперсного мартенсита, отличающаяся небольшой размерной дилатацией фрагментов, квазиоднородностью механических свойств, высокой коррозионной стойкостью. Такая структура на металлографическом шлифе проявляется в виде практически сплошного «белого» слоя с повышенной твердостью.

Наряду с процессами высокоскоростной закалки в приповерхностных объемах металла под действием мгновенных высоких температур в ходе ЭМО протекают процессы скоростного отпуска исходной структуры (в случае предварительно закаленной стали) и «самоотпуска» только что образовавшейся упрочненной структуры. В результате в поверхностном слое закаленных сталей после ЭМО может возникать широкая гамма структурных состояний, обладающих пониженной твердостью (по сравнению с упрочненным слоем). Микротвердость в такой зоне разупрочнения изменяется от минимальной (в области, прилегающей к упрочненному слою, где температура отпуска наибольшая) до исходной твердости закаленного металла (по мере снижения температуры по глубине поверхности).

Формирование на поверхности образцов высокопрочной структуры «белого» слоя способствует торможению процессов зарождения и развития усталостных трещин, снижению доли несплошностей и микроочагов концентрации напряжений в поверхностном слое металла, что в случае ЭМО нормализованных сталей ведет к увеличению циклической прочности.

Появление разупрочненной зоны после ЭМО закаленных сталей приводит к смене механизма влияния поверхностной обработки на усталостную прочность

образцов [15]. Распад структуры мартенсита в рассматриваемой зоне сопровождается снижением механических характеристик металла. Кроме того, согласно результатам математического моделирования [30] в указанной зоне структурные превращения протекают с образованием остаточных напряжений растяжения. Эти обстоятельства при усталостных испытаниях по принятой схеме циклического изгиба с вращением, когда приповерхностный разупрочненный слой находится вблизи области действия максимальных активных напряжений, способствуют интенсивному накоплению усталостных повреждений в зоне термического влияния и развитию усталостного разрушения металла.

Влияние поверхностно-деформирующих обработок на предел выносливости закаленных сталей, упрочненных ЭМО, связано в первую очередь с механическим упрочнением металла в приповерхностных слоях, затрудняющим зарождение и развитие усталостных дефектов. При ППД и БУФО стальных закаленных образцов с упрочненным ЭМО поверхностным слоем наибольшая интенсивность деформаций наблюдается в окрестности упрочненного трека и в зоне термического влияния вокруг него [30]. Это приводит к смене знака остаточных напряжений в этой области с растягивающих на сжимающие, что становится дополнительным препятствием для формирования и роста усталостных трещин и благоприятно сказывается на выносливости образцов.

## Выводы

Показано, что для исследуемых сталей в закаленном состоянии высокоскоростное импульсное термомеханическое воздействие в ходе ЭМО сопровождается повышением (более чем на 50 %) микротвердости поверхности и снижением (на 20 – 30 %) предела выносливости. Такое изменение свойств связано с протекающими в приповерхностных объемах металла процессами отпуска закаленной структуры с образованием зоны разупрочнения и формированием растягивающих остаточных напряжений.

Операции ППД и БУФО, проведенные после ЭМО, за счет интенсивной пластической деформации обеспечивают выглаживание поверхности, залечивание приповерхностных дефектов и позволяют корректировать напряженно-деформированное состояние обрабатываемого металла. Это приводит к повышению микротвердости в зоне отпуска (на 20 – 25 %) и предела выносливости образцов (на 25 – 30 %).

Комбинированное поверхностное упрочнение (на основе ЭМО, ППД и БУФО) углеродистых сталей позволяет за счет вариации интенсивности температурного и деформационного воздействий целенаправленно изменять структурно-фазовый состав и напряженно-деформированное состояние поверхностных и приповерхностных слоев металла. В результате этого появ-

ляется возможность в зависимости от предварительной термической обработки стали формировать сбалансированный комплекс прочностных и усталостных характеристик образцов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Garcia-Giron A., Romano J.M., Liang Y., Dashtbozorg B. etc. Combined surface hardening and laser patterning approach for functionalising stainless steel surfaces // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 439. P. 516 – 524.
2. Lu J., Huang T., Liu Zh., Zhang X., Xiao R. Long-term wettability of titanium surfaces by combined femtosecond laser micro/nano structuring and chemical treatments // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 459. P. 257 – 262.
3. Lesyk D.A., Martinez S., Mordiyuk B.N., Dzhemelinskiy V.V. etc. 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.
4. Tsuji N., Tanaka S., Takasugi T. Effect of combined plasma-carburizing and deep-rolling on notch fatigue property of Ti-6Al-4V alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2009. Vol. 499. No. 1-2. P. 482 – 488.
5. Gill A.S., Telang A., Chang Y. Localized plastic deformation and hardening in laser shock peened // *Materials Characterization*. 2018. Vol. 142. P. 15 – 26.
6. Borko K., Hadzima B., Jacková M.N. Corrosion Resistance of Domex 700 Steel After Combined Surface Treatment in Chloride Environment // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 58 – 63.
7. Chenakin S.P., Mordiyuk B.N., Khripta N.I. Surface characterization of a ZrTiNb alloy: Effect of ultrasonic impact treatment // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 470. P. 44 – 55.
8. Zenker R. Electron meets nitrogen: combination of electron beam hardening and nitriding // *International Heat Treatment & Surface Engineering*. 2009. Vol. 3. No. 4. P. 141 – 146.
9. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V., Zagulyaev D.V., Petrikova E.A., Semin A.P. Modification of structure and surface properties of hypoeutectic silumin by intense pulse electron beams // *Progress in Physics of Metals*. 2018. Vol. 19. No. 2. P. 197 – 222.
10. Romanov D.A., Sosnin K.V., Gromov V.E., Bataev V.A., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Sundeev R.V. Titanium – zirconium coatings formed on the titanium implant surface by the electroexplosive method // *Materials Letters*. 2019. Vol. 242. P. 79 – 82.
11. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Соскова Н.А., Денисова Ю.А., Тересов А.Д., Петрикова Е.А., Будовских Е.А. Электронно-пучковая обработка поверхности сплавов на основе титана, модифицированных плазмой электрического взрыва проводящего материала // *Известия РАН. Серия Физическая*. 2012. Т. 76. № 11. С. 1393 – 1399.
12. Башенко Л.П., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А. Модификация структуры поверхностных слоев титана VT1-0 при электровзрывном карбоборировании и электронно-пучковой обработке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 3. С. 68 – 70.
13. Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А., Громов В.Е., Башенко Л.П., Соскова Н.А., Райков С.В. Формирование нанокompозитных слоев на поверхности титана VT1-0 при электровзрывном науглероживании и электронно-пучковой обработке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2012. № 6. С. 67 – 70.
14. Эдигаров В.Р. Технологии и оборудование комбинированных способов электрохимической обработки. – Омск: ОАБИИ, 2014. – 280 с.
15. Дудкина Н.Г. Оценка усталостной прочности термообработанной среднеуглеродистой конструкционной стали после комбинированного упрочнения (ЭМО + ППД) // *Mechanika (Lietuva)*. 1998. № 4. С. 28 – 32.

16. Эдигаров В.Р., Литая Е.В. Исследование некоторых технологических аспектов нового комбинированного способа поверхностной обработки ЭМОТ + ППД закаленных сталей // Национальные приоритеты России. Серия 1: Наука и военная безопасность. 2015. Т. 3. № 3. С. 125 – 130.
17. 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. С. 39, 40.
18. Яковлев С.А. Результаты исследований износостойкости деталей после антифрикционной электромеханической обработки // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 3. С. 116 – 120.
19. Эдигаров В.Р., Килунин И.Ю. Рентгенографическое исследование стали 38ХС, подвергнутой фрикционно-электрическому модифицированию // Металлообработка. 2011. № 4. С. 24 – 29.
20. Яковлева А.П., Омельченко И.С. Повышение нагрузочной способности стальных деталей методом комбинированной обработки // Авиационная промышленность. 2013. № 2. С. 62 – 64.
21. Эдигаров В.Р., Алимбаева Б.Ш., Перков П.С. Комбинированная электромеханоультразвуковая обработка поверхностных слоев деталей машин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2017. Т. 54. № 2. С. 42 – 47.
22. Ivannikov A.Yu., Kalita V.I., Komlev D.I. etc. The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma sprayed Fe – 6W – 5Mo – 4Cr – 2V – C coating // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 335. P. 327 – 333.
23. Wang Y., Zhu Sh., Gu W., Qi X. Electric Contact Strengthening to Improve the Bonding Between WC – Co Coating and 45# Steel Substrate // Journal of Thermal Spray Technology. 2010. Vol. 19. No. 5. P. 1142 – 1146.
24. Xu M., Zhu Sh., Ding H. Electrical contact strengthening of induction-clad Ni – 40 % WC composite coatings on 40Cr substrates // Surface and Coatings Technology. 2015. Vol. 279. P. 32 – 38.
25. Яковлев С.А., Замальдинов М.М., Тагаров Л.Г. Влияние электромеханической обработки на структуру и твердость титанового сплава BT22 // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 10 (154). С. 464 – 467.
26. Bagmutov V.P., Vodop'yanov V.I., Zakharov I.N., Denisevich D.S. Relation between the fracture laws and the fatigue life of a surface-hardened pseudo- $\alpha$  titanium alloy // Russian Metallurgy (Metally). 2016. Vol. 2016. No. 7. P. 663 – 668.
27. Stachowiak G.W., Batchelor A.W. Surface Hardening and Deposition of Coatings on Metals by a Mobile Source of Localized Electrical Resistive Heating // Journal of Materials Processing Technology. 1996. No. 57. P. 288 – 297.
28. Холопов Ю.В., Зинченко А.Г., Савиных А.А. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов. – Л.: ЛДНТП, 1988. – 18 с.
29. Паршин А.М., Кириллов Н.В. Физические и структурные аспекты обработки сплавов концентрированными источниками энергии // Металлы. 1995. № 3. С. 122 – 127.
30. Багмутов В.П., Захаров И.Н., Денисевич Д.С. Особенности решения технологических задач механики неоднородных металлических тел со структурой, трансформирующейся в ходе термосилового нагружения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 1. С. 5 – 25.

Поступила в редакцию 11 февраля 2018 г.  
 После доработки 11 марта 2018 г.  
 Принята к публикации 21 марта 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 6, PP. 438–445.

## INFLUENCE OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF SURFACE LAYER ON FATIGUE DURABILITY OF HARDENED STEELS STRENGTHENED BY COMBINED ELECTROMECHANICAL TREATMENT

*V.P. Bagmutov, N.G. Dudkina, I.N. Zakharov, M.D. Romanenko, V.V. Chekunov*

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

**Abstract.** Using the example of hardened carbon steels (steel 45, U8), the effect of combination of various surface hardening technologies is considered (using electromechanical processing, surface plastic deformation, non-abrasive ultrasonic finishing and their combination) on changes in structural state and surface microhardness, cyclic durability of hardened specimens and fatigue failure mechanisms. The studies were carried out by the methods of optical and scanning electron microscopy and by microhardness and fatigue tests. It is shown that for the investigated steels in quenched state, a high-speed pulsed thermo-deformation effect during electromechanical processing is accompanied by an increase in the surface microhardness (by more than 50 %) and decrease in the fatigue limit (by 20 – 30 %). Such a change in properties is associated with formation in the surface layer of substantially non-equilibrium, inhomogeneous in chemical composition, ultradispersed phases with increased hardness. At the same time, in the near-surface metal volumes tempering processes of the hardened structure proceed with the formation of softening zones and tensile residual stresses, accompanied by a decrease in the microhardness in these zones and the fatigue limit of the specimens. Such effects reduce some of the materials performance characteristics during surface hardening. The ways to improve the properties of such products due to additional technological operations require further studies. Combined surface hardening (based on electromechanical processing, surface plastic

deformation and non-abrasive ultrasonic finishing) of carbon steels allows, due to variations in the intensity of temperature and deformation effects, to purposefully change the structural-phase composition and stress-strain state of the surface and near-surface metal layers. As a result, it becomes possible to form a balanced complex of strength and fatigue characteristics of the samples, depending on the preliminary heat treatment of steel. The operations of surface plastic deformation and non-abrasive ultrasonic finishing after electromechanical hardening, due to intensive plastic deformation provide smoothing of the surface and healing of near-surface defects and allow correction of stress-strain state of the processed metal. It provides an increase in microhardness in the tempering zone by 20 – 25 % and the fatigue limit of the samples by 25 – 30 %.

**Keywords:** electromechanical treatment, surface plastic deformation, non-abrasive ultrasonic finishing, microhardness, fatigue strength, microstructure.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-6-438-445

### REFERENCES

1. Garcia-Giron A., Romano J.M., Liang Y., Dashtbozorg B. etc. Combined surface hardening and laser patterning approach for functionalising stainless steel surfaces. *Applied Surface Science*. 2018, vol. 439, pp. 516–524.
2. Lu J., Huang T., Liu Zh., Zhang X., Xiao R. Long-term wettability of titanium surfaces by combined femtosecond laser micro/nano structuring and chemical treatments. *Applied Surface Science*. 2018, vol. 459, pp. 257–262.

3. Lesyk D.A., Martinez S., Mordyuk B.N., Dzhemelinskiy V.V. etc. 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.
4. Tsuji N., Tanaka S., Takasugi T. Effect of combined plasma-carburizing and deep-rolling on notch fatigue property of Ti–6Al–4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2009, vol. 499, no. 1–2, pp. 482–488.
5. Gill A.S., Telang A., Chang Y. Localized plastic deformation and hardening in laser shock peened. *Materials Characterization*. 2018, vol. 142, pp. 15–26.
6. Borko K., Hadzima B., Jacková M.N. Corrosion resistance of Domex 700 steel after combined surface treatment in chloride environment. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 192, pp. 58–63.
7. Chenakin S.P., Mordyuk B.N., Khripta N.I. Surface characterization of a ZrTiNb alloy: Effect of ultrasonic impact treatment. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 470, pp. 44–55.
8. Zenker R. Electron meets nitrogen: combination of electron beam hardening and nitriding. *International Heat Treatment & Surface Engineering*. 2009, vol. 3, no. 4, pp. 141–146.
9. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V., Zagulyaev D.V., Petrikova E.A., Semin A.P. Modification of structure and surface properties of hypoeutectic silumil by intense pulse electron beams. *Progress in Physics of Metals*. 2018, vol. 19, no. 2, pp. 197–222.
10. Romanov D.A., Sosnin K.V., Gromov V.E., Bataev V.A., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Sundeev R.V. Titanium – zirconium coatings formed on the titanium implant surface by the electroexplosive method. *Materials Letters*. 2019, vol. 242, pp. 79–82.
11. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Soskova N.A., Denisova Yu.A., Teresov A.D., Petrikova E.A., Budovskikh E.A. Electron-beam surface treatment of alloys based on titanium, modified by plasma from an electrical explosion of conducting material. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2012, vol. 76, no. 11, pp. 1246–1252.
12. Bashchenko L.P., Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A. Modification of the titanium VT1-0 surface layers structure after electroexplosive carboborizing and electron-beam treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 3, pp. 68–70. (In Russ.).
13. Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Bashchenko L.P., Soskova N.A., Raikov S.V. Formation of nanocomposite layers on the surface of VT1-0 titanium at electroexplosive carburization and electron-beam treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 6, pp. 67–70.
14. Edigarov V.R. *Tekhnologii i oborudovanie kombinirovannykh sposobov elektromekhanicheskoi obrabotki* [Technologies and equipment of combined methods of electromechanical processing]. Omsk: OABII, 2014, 280 p. (In Russ.). (In Russ.).
15. Dudkina N.G. Evaluation of fatigue strength of heat-treated medium-carbon structural steel after combined hardening (EDM + SPD). *Mechanika (Lietuva)*. 1998, no. 4, pp. 28–32. (In Russ.).
16. Edigarov V.R., Litau E.V. Study of some technological aspects of the new combined method of EDMt + SPD surface treatment of hardened steels. *Natsional'nye priority Rossii. Seriya 1: Nauka i voennaya bezopasnost'*. 2015, vol. 3, no. 3, pp. 125–130. (In Russ.).
17. Matlin M.M., Dudkina N.G., Dudkin A.D. Features of formation of hardened layer under electromechanical processing with dynamic force impact. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2007, no. 6, pp. 39, 40. (In Russ.).
18. Yakovlev S.A. Wear resistance of machine parts after antifriction electromechanical processing. *Vestnik Ul'yanovskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2011, no. 3, pp. 116–120. (In Russ.).
19. Edigarov V.R., Kilunin I.Yu. Radiographic study of 38KhS steel, subjected to frictional-electric modification. *Metalloobrabotka*. 2011, no. 4, pp. 24–29. (In Russ.).
20. Yakovleva A.P., Omel'chenko I.S. Increase of load capacity of steel parts by combined processing. *Aviatsionnaya promyshlennost'*. 2013, no. 2, pp. 62–64. (In Russ.).
21. Edigarov V.R., Alimbaeva B.Sh., Perkov P.S. Combined electro-mechanical ultrasonic treatment of surface layers of machine parts. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii*. 2017, vol. 54, no. 2, pp. 42–47. (In Russ.).
22. Ivannikov A.Yu., Kalita V.I., Komlev D.I. etc. The effect of electro-mechanical treatment on structure and properties of plasma sprayed Fe – 6W – 5Mo – 4Cr – 2V – C coating. *Surface and Coatings Technology*. 2018, vol. 335, pp. 327–333.
23. Wang Y., Zhu Sh., Gu W., Qi X. Electric contact strengthening to improve the bonding between WC – Co coating and 45# steel substrate. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2010, vol. 19, no. 5, pp. 1142–1146.
24. Xu M., Zhu Sh., Ding H. Electrical contact strengthening of induction-clad Ni – 40 % WC composite coatings on 40Cr substrates. *Surface and Coatings Technology*. 2015, vol. 279, pp. 32–38.
25. Yakovlev S.A., Zamal'dinov M.M., Tatarov L.G. Influence of electromechanical processing on structure and hardness of VT22 titanium alloy. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2017, vol. 13, no. 10 (154), pp. 464–467. (In Russ.).
26. Bagmutov V.P., Vodop'yanov V.I., Zakharov I.N., Denisevich D.S. Relation between the fracture laws and the fatigue life of a surface-hardened pseudo- $\alpha$  titanium alloy. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016, vol. 2016, no. 7, pp. 663–668.
27. Stachowiak G.W., Batchelor A.W. Surface hardening and deposition of coatings on metals by a mobile source of localized electrical resistive heating. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, no. 57, pp. 288–297.
28. Kholopov Yu.V., Zinchenko A.G., Savinykh A.A. *Bezabrazivnaya ul'trazvukovaya finisnaya obrabotka metallov* [Non-abrasive ultrasonic finishing treatment of metals]. Leningrad: LDNTP, 1988, 18 p. (In Russ.).
29. Parshin A.M., Kirillov N.V. Physical and structural aspects of alloys processing by concentrated energy sources. *Metally*. 1995, no. 3, pp. 122–127. (In Russ.).
30. Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Denisevich D.S. Solution of technological problems of inhomogeneous metallic bodies mechanics with the structure transformed under thermal force loading. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2016, no. 1, pp. 5–25. (In Russ.).

**Funding.** The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 17-08-01742 a; project No. 18-48-340010 p\_a).

#### Information about the authors:

**V.P. Bagmutov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Strength of Materials” (sopromat@vstu.ru)

**N.G. Dudkina**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Machine Parts, and Lifting-Transport Machines

**I.N. Zakharov**, Dr. Sci. Eng., Assist. Professor, Head of the Chair “Strength of Materials”

**M.D. Romanenko**, MA Student of the Chair “Processes and Units of Chemical and Food Production”

**V.V. Chekunov**, MA Student of the Chair “Maintenance and Repair of Cars”

Received February 11, 2018

Revised March 11, 2018

Accepted March 21, 2018