

УДК: 621.787

DOI: 10.53816/23061456\_2022\_3-4\_136

**ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА И ИСХОДНОЙ СТРУКТУРЫ СТАЛИ НА  
МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
ПРИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

**EFFECT OF CARBON AND INITIAL STRUCTURE OF STEEL ON MICROHARDNESS  
OF SURFACE LAYER DURING ELECTROMECHANICAL TREATMENT**

*Канд. техн. наук В.Р. Эдигаров*

*Ph.D. V.R. Edigarov*

*Омский автобронетанковый инженерный институт*

В статье приведены результаты исследования влияния углерода и исходной структуры стали на микротвердость поверхностных слоев деталей многоцелевых гусеничных и колесных машин при их упрочнении комбинированными способами электро-механической обработки (ЭМО). Установлено, что увеличение количества проходов при ЭМО способствует увеличению глубины упрочненного слоя и его микротвердости, ввиду повышенного электрического сопротивления полученных ранее закаленных структур и увеличения зоны высокотемпературного воздействия с последующими мартенситными превращениями.

Предварительная термическая обработка позволяет повысить эффективность электро-механической обработки, получить более высокую степень упрочнения поверхностного слоя при увеличении производительности. Более высокая степень упрочнения после ЭМО наблюдается у сталей с большим содержанием углерода, у высокоуглеродистых сталей образуется ярко выраженный светлый слой, что объясняется мелко-дисперсной структурой этих сталей, большим содержанием углерода, а также более высоким электрическим сопротивлением и меньшей теплопроводностью.

**Ключевые слова:** поверхностное упрочнение, электро-механическая обработка, микротвердость, закалочные структуры.

The article presents the results of a study of the effect of carbon and the initial structure of steel on the microhardness of the surface layers of parts of multi-purpose tracked and wheeled vehicles during their hardening by combined methods of electromechanical processing. It has been established that an increase in the number of passes during EMT contributes to an increase in the depth of the hardened layer and its microhardness, due to the increased electrical resistance of the previously hardened structures obtained and the increase in the high-temperature impact zone with subsequent martensitic transformations. Preliminary heat treatment makes it possible to increase the efficiency of electromechanical processing, to obtain a higher degree of hardening of the surface layer with an increase in productivity. A higher degree of hardening after EMT is observed in steels with a high carbon content, in high-carbon steels a pronounced light layer is formed, which is explained by the fine structure of these steels, a high carbon content, as well as higher electrical resistance and lower thermal conductivity.

**Keywords:** surface hardening, electromechanical processing, microhardness, quenching structures.

Анализ характерных дефектов многоцелевых гусеничных и колесных машин (МГКМ) свидетельствует о недостаточном уровне качества изготавливаемых деталей, прежде всего, по критериям износостойкости и прочности наиболее нагруженных поверхностей.

Надежность работы деталей, входящих в состав трибоузлов МГКМ, непосредственно связана с качеством поверхностного слоя, которое характеризуется: 1) геометрическими (параметры волнистости: высота волнистости ( $W_v$ ), средняя высота волнистости ( $W$ ), максимальная высота волнистости ( $W_{\max}$ ), средний шаг волнистости ( $A_w$ ) и др.), параметрами шероховатости (полная высота профиля ( $R_{\max}$ ), средний шаг неровностей ( $S_m$ ), среднеарифметическое отклонение профиля ( $R_a$ ), наибольшая высота профиля ( $R_z$ ) и др.); 2) физикохимическими свойствами (структура: плотность дислокаций ( $\rho_d$ ), размер (форма) блоков ( $l_o$ ), размер области когерентного рассеяния ( $D$ ) и др., фазовый состав: тип кристаллической структуры фаз (MS), параметры решетки фаз ( $a, b, c$ ) и др., химический состав, деформация (наклеп), остаточные напряжения и др.); 3) механическими параметрами [1].

Результатами многочисленных исследований [1, 2] доказано, что от качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений (износостойкость, коэффициент трения, прочность посадок, усталостная прочность, коррозионная стойкость, контактная жесткость, термостойкость поверхностного слоя, герметичность соединений и др.), которые в свою очередь характеризуются комплексными параметрами качества поверхностного слоя. Эти свойства определяют в целом долговечность, безотказность и надежность изделия в целом и зависят от материалов деталей, условий эксплуатации, качества поверхностного слоя, точности размеров.

Для эксплуатации МГКМ характерна постоянно возрастающая интенсификация эксплуатационных процессов, увеличение скоростей, количества факторов, негативно воздействующих на объект, повышение эксплуатационных температур, частое и значительное превышение максимальных значений давлений и т.д. В этой связи возрастает значение обеспечения качества поверхностных слоев деталей.

Основным резервом повышения показателей качества деталей (их работоспособности и

надежности) является изменение параметров и свойств их поверхностного слоя разнообразными способами упрочнения, и прежде всего комбинированными.

Традиционные методы окончательной обработки (тонкое точение, шлифование, хонингование, доводка и др.) позволяют создавать требуемую форму детали с установленной технической документацией точностью, однако они не всегда обеспечивают требуемые параметры качества поверхностного слоя. Исходя из вышесказанного, задача разработки эффективных технологических процессов, позволяющих повысить качество поверхностного слоя деталей и производительность труда, является актуальной в современном производстве МГКМ. Одним из путей решения данной проблемы на современных предприятиях промышленного комплекса является более широкое применение комбинированных методов модифицирования поверхностных слоев деталей, основанных на интенсивном воздействии на материал концентрированными потоками энергии при различных способах электроэрозионной, ионно-лучевой, лазерной, плазменной и других видов обработки, в том числе их комбинации в едином технологическом процессе.

Электромеханическая обработка (ЭМО) является высокоэффективным способом поверхностного упрочнения, позволяющим дополнить или полностью заменить операции чистовой обработки деталей машин, при этом повысить эксплуатационные свойства полученного поверхностного слоя [3, 4]. ЭМО представляет собой относительно простой, энерго- и материалозкономичный способ комплексного термомеханического воздействия на обрабатываемую поверхность детали.

ЭМО может вестись на низких режимах (отделочный режим обработки), когда основным фактором воздействия на поверхностный слой является пластическая деформация, при этом упрочнение достигается в основном за счет наклепа, влияние же электрического тока лишь способствует механическому воздействию на локальный микрообъем. Данный режим обеспечивает снижение шероховатости обрабатываемой поверхности детали, что позволяет в условиях производства МГКМ исключить операции чистовой механической обработки, например

шлифование, обеспечив при этом повышение производительности в 2–3 раза.

Средний упрочняющий режим обработки обеспечивает получение в поверхностном слое закалочных структур, а также снижение параметров шероховатости, создав при этом остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое, в разы повысив его твердость и износостойкость.

Объединение в единой технологической цепочке операций чистовой обработки и упрочнения, исключив операции специальной термообработки, позволяет увеличить производительность.

В современном ремонтном производстве вооружения и военной техники (ВВТ) (например, танкоремонтное производство) для которого характерно большое разнообразие деталей различных типоразмеров, применение ЭМО позволит существенно повысить эффективность производства, особенно для деталей, имеющих цилиндрические поверхности, например торсионных валов, балансиров, кронштейнов, кривошипов и т.д.

В качестве исследуемых материалов использовались стали: сталь 15 (количество углерода 0,12–0,19%), 20 (количество углерода 0,17–0,24%), 25 (количество углерода 0,22–0,3%), 40X (количество углерода 0,36–0,44%), 45 (количество углерода 0,42–0,5%), 50 (количество углерода 0,47–0,55%), У10 (количество углерода 0,95–1,09%), У11 (количество углерода 1,06–1,13%), У12 (количество углерода 1,1–1,29%), ХВГ (количество углерода 0,9–1,05%), 9ХВГ (количество углерода 0,85–0,95%), 65Г (количество углерода 0,62–0,7%), У8А (количество углерода 0,75–0,84%), в различных структурных состояниях, определяемых режимами предварительной термической обработки. Выбор данных марок стали обусловлен достаточно широким их использованием в производстве деталей МГКМ.

Образцы для испытаний, изготовлены в соответствии с ГОСТ 23026–78 «Металлы. Метод испытания на многоцикловую и малоцикловую усталость» с диаметром рабочей части 50 мм, перед испытанием все образцы подвергались нормализации с оптимальным режимом для данной марки стали [5]. Технологические режимы комбинированной ЭМО выбирались на основании предварительно проведенных экспериментов, а также по результатам ранее проведенных исследований [3, 4]. Таким режимам соответство-

вала плотность тока 210–260 А/мм<sup>2</sup> при скорости обработки 0,1–0,2 м/с и контактном давлении порядка 30–80 МПа.

Затем проводился металлографический анализ структуры упрочненной поверхности образцов с измерением микротвердости по глубине поверхностного слоя на косых металлографических шлифах.

Электромеханическая обработка позволяет формировать в локальном микрообъеме обрабатываемого материала упрочненный «белый слой», представляющий собой мартенситную структуру, обладающую высокой прочностью и износостойкостью. Прохождение электрического тока через зону контакта рабочего инструмента и обрабатываемой поверхности способствует высокоскоростному нагреву при одновременном пластическом деформировании локального микрообъема, с последующим быстрым отводом тепла во внутренний объем металла.

Как показывают рентгенографические исследования, светлый поверхностный слой, так называемый «белый слой», образующийся при ЭМО, представляет собой бесструктурный мартенсит, для которого характерны более высокие, чем у мартенсита, закалки, физико-механические и эксплуатационные свойства и значительно более высокая твердость [3, 6].

Исследованиями [3, 7–10] установлено: эффективность ЭМО напрямую зависит от исходного состояния структуры стали, из которой изготовлены обрабатываемые детали, которая в свою очередь зависит от предварительной термической обработки, ее отсутствия или количества проходов непосредственно при ЭМО.

Предшествующая ЭМО термическая обработка стали способствует различному расположению цементитных частиц в ферритной матрице, и тем самым улучшает или затрудняет образование аустенита при сверхбыстром нагреве и охлаждении, характерном для ЭМО.

Варьирование параметрами исходной структуры (дисперсностью), химическим составом обрабатываемой стали, а также технологическими факторами при ЭМО (параметрами нагрева и охлаждения) является одним из направлений повышения эффективности ЭМО и эксплуатационных свойств обрабатываемой поверхности.

Обеспечение мелкозернистой структуры, которая обладает большей суммарной поверх-

ностью раздела и соответственно является менее электропроводной, снижает эффективность электрического нагрева локального микрообъема металла. Отдельные структурные составляющие поликристаллов, например перлит, феррит или цементит, также обладают различным сопротивлением прохождению электрического тока. Наибольшая температура возникает, как правило, по границам включений или пор, этот фактор является решающим при ЭМО поверхностных слоев, полученных, например, наплавкой, металлизацией и т.д.

В обычных условиях объемной закалки увеличение температуры выше точки  $A_{c3}$  может привести к получению крупнозернистого аустенита после охлаждения.

Кратковременность циклов нагрева, выдержки и охлаждения при ЭМО снижает эффект перегрева. Данному эффекту способствует механическая составляющая термомеханического воздействия, обеспечивающая измельчение структуры поверхностного слоя и однородность аустенита.

Однако в случае обработки крупнозернистой доэвтектоидной стали на определенной глубине в поверхностном слое могут находиться нерастворимые зерна феррита, это связано напрямую с значениями температуры в этой области в процессе обработки, которая не превышает  $A_{c3}$ , низкими значениями давлений и соответственно деформаций.

Проведенными металлографическими исследованиями упрочненного слоя установле-

но, что для нормализованной стали характерен резкий переход белого слоя в структуру исходного материала на определенной глубине. Для закаленной стали характерно наличие приповерхностной зоны повышенной травимости, представляющей собой область разупрочнения материала, что подтверждается результатами измерения микротвердости по глубине поверхностного слоя образцов [10, 11].

Распределение средних значений микротвердости по толщине упрочненного ЭМО поверхностного слоя стали У8А показано на рис. 1. Поверхностная микротвердость нормализованной стали У8А (кривая 2) превышает значения для аналогичных участков поверхности стали У8А после отжига (кривая 1). Данному явлению способствует более высокая степень дисперсности карбидов у стали после нормализации, что приводит к более полному их растворению в образующемся при ЭМО аустените, а в последующем образующийся в закаленном слое мартенсит имеет более высокие свойства. В интервалах глубин от  $150$  до  $300 \times 10^{-6}$  м для отожженной стали и от  $250$  до  $400 \times 10^{-6}$  м для нормализованной стали образуется переходный слой от твердого упрочненного до исходного неупрочненного.

Зависимость средних значений микротвердости  $H$  от глубины упрочненного слоя стали 40Х после ЭМО при различном количестве проходов показана на рис. 2. ЭМО производилась с дополнительным охлаждением. Повторные

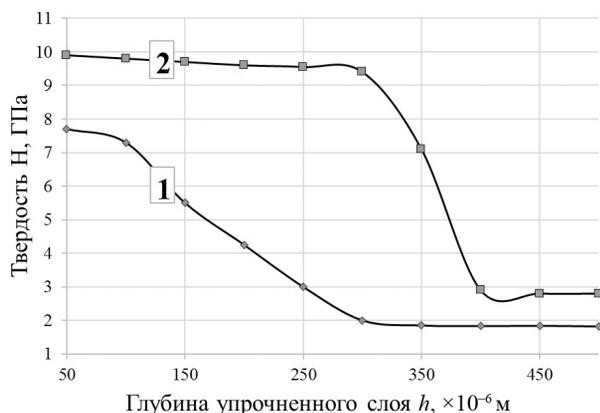


Рис. 1. Зависимость средних значений микротвердости  $H$  от глубины упрочненного слоя стали после ЭМО: 1 — сталь У8А (в отожженном состоянии); 2 — сталь У8А (в нормализованном состоянии)

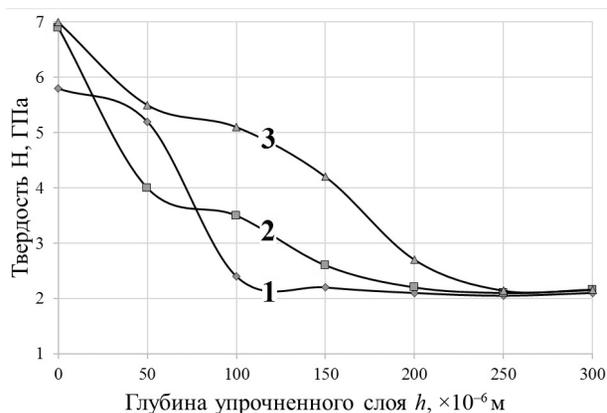


Рис. 2. Зависимость средних значений микротвердости  $H$  от глубины упрочненного слоя стали 40Х после ЭМО: 1 — в один проход; 2 — в два прохода; 3 — в три прохода

проходы в зоне низких скоростей способствуют увеличению глубины упрочненного слоя, данный факт можно объяснить наследственностью. Возможность повышения твердости по глубине до 0,15–0,20 мм и получения при этом мелкодисперсной структуры во многих случаях позволяет заменить специальные операции термической обработки операциями ЭМО.

Увеличение количества проходов при ЭМО способствует распространению микротвердости в глубину поверхностного слоя. Многократное термомеханическое воздействие в процессе ЭМО обеспечивает получение мелкой, однородной и плотной структуры. Последующие проходы производятся по ранее обработанной закаленной структуре, которая ввиду особенностей ЭМО обладает повышенным электрическим сопротивлением. Данное обстоятельство объясняет увеличение зоны высокотемпературного влияния, а следовательно, и глубины аустенитного и мартенситного превращения. При ЭМО создается мелкодисперсный аустенит, что усиливает активизацию мартенситного превращения.

Для сталей 15, 20 и 25 основным фактором ведущим к повышению твердости до НВ 480 ГПа, выступает более тонкая структура стали при повторных ходах ЭМО, а также частичное мартенситное превращение псевдоэвтектоида, которому способствуют сверхвысокие температуры охлаждения, достигающие 10 000 °С в секунду.

Зависимости изменения твердости закаленной стали от содержания углерода представлены в работе [12], до 0,6 % содержания углерода в стали способствует увеличению твердости закаленной стали, дальнейшее увеличение количества углерода не приводит к существенному изменению твердости, при этом отмечено, что легирование практически не оказывает влияния на твердость стали [3].

На рис. 3 видно, что одинаковое термодинамическое воздействие приводит к образованию более твердого поверхностного слоя у сталей с более высоким содержанием углерода. Это объясняется увеличенным электрическим сопротивлением, например для сталей типа У10, У11, У12.

Относительное увеличение твердости по сравнению с исходными значениями при ЭМО для сталей 15, 20, 25 возрастает в 2,0–2,1 раза, для сталей 40Х, 45, 50 в 2,5–2,7 раза (рис. 4), для сталей У10, У11, У12 в 3,5–3,85 раза (рис. 3).

Таким образом, более высокая степень упрочнения после ЭМО наблюдается у сталей с большим содержанием углерода.

Резко выраженный светлый слой у высокоуглеродистых сталей, а также в среднеуглеродистых сталях объясняется мелкодисперсной структурой этих сталей и большим содержанием углерода, что способствует лучшей растворимости мелкой структуры при высоком нагреве, а также большим электрическим сопротивлением и меньшей теплопроводностью в связи с увеличением поверхности раздела фаз.

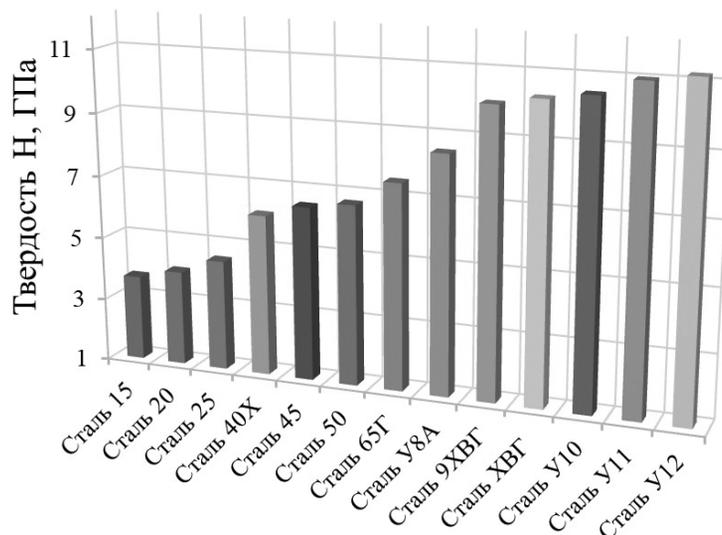


Рис. 3. Средние значения максимальной поверхностной твердости после ЭМО для сталей

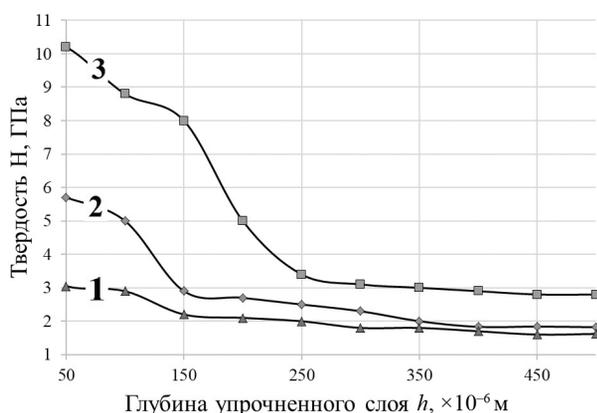


Рис. 4. Зависимость средней микротвердости  $H$  от глубины упрочненного слоя стали после ЭМО для сталей: 1 — сталь 20; 2 — сталь 45; 3 — сталь У8А

### Выводы

Предварительная термическая обработка и соответственно полученная при этом структура стали является существенным фактором, оказывающим влияние на процесс аустенизации при нагреве, данное превращение будет протекать в существенно меньший промежуток времени в сталях с достаточной степенью дисперсности феррито-карбидной смеси.

Проведенными исследованиями установлено, что измельчение карбидных частиц приводит к распространению процесса аустенизации перлита на большую глубину, а также более полному растворению карбидов в аустените, что в итоге приведет к увеличению толщины упрочненного поверхностного слоя и его микротвердости.

Предварительная термическая обработка, позволяющая получить структуры, не содержащие избыточного феррита, представляющие собой ферритно-карбидную смесь с равномерным распространением карбидной фазы, позволяет получить полную закалку поверхностного слоя дозвтектоидной стали при ЭМО.

Увеличение количества проходов при ЭМО позволяет получить упрочненный поверхностный слой с более высокими значениями микротвердости по глубине. Многократное термомеханическое воздействие в процессе ЭМО обеспечивает получение мелкой, однородной и плотной структуры.

Более высокая степень упрочнения после ЭМО наблюдается у сталей с большим содержанием углерода.

### Литература

1. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. — М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
2. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. — М.: Машиностроение, 1987. 207 с.
3. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. 3-е изд. — М.: Машиностроение, 1989. 200 с.
4. Akhtulov A.L., Edigarov V.R., Dadayan S.E. Assessment of the influence of the surface modification process on the wear intensity in the operation of internal combustion engines loaded // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019. ICMTME 2019. 2020. P. 044031.
5. Берштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т. 1 и 2. — М.: Металлургия, 1968. Т. 1 — 596 с.; Т. 2 — 1171 с.
6. Эдигаров В.Р., Килунин И.Ю. Рентгенографическое исследование стали 38ХС, подвергнутой фрикционно-электрическому модифицированию // Металлообработка. 2011. № 4 (64). С. 23–29.
7. Тарасов В.В., Малышко С.Б. Исследование влияния исходной структуры стали на результаты электромеханической обработки // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. № 1. С. 182–185.
8. Малышко С.Б., Тарасов В.В. Особенности влияния исходной структуры стали на результаты электромеханической обработки // Вестник Морского государственного университета. Сер. Судостроение и судоремонт. — Владивосток: Мор. гос. ун-т. 2008. Вып. 18. С. 50–54.
9. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Притыченко В.Ю. Влияние структурного состояния углеродистых сталей на усталостную прочность при электромеханическом упрочнении // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. № 9 (47). С. 5–7.
10. Дудкина Н.Г., Захаров И.Н. Исследование микротвердости поверхностного слоя угле-

родистых сталей после электромеханической обработки // *Металлы*. 2004. № 4. С. 64–70.

11. Эдигаров В.Р., Алимбаева Б.Ш., Анохин С.Ю. Повышение износостойкости поверхностного слоя деталей комбинированной электромеханической обработкой с отпуском // *Омский научный вестник*. 2020. № 2 (170). С. 10–14.

12. Гуляев А.П. Структурные изменения при термической обработке стали и их влияние на механические свойства. «МиТом». 1965. № 11. С. 9–17.

### References

1. Part Surface Engineering / Call. auth.; edited by A.G. Suslova. — М.: Engineering. 2008. 320 p.

2. Suslov A.G. Technological support of parameters of surface layer state of parts. — М.: Engineering. 1987. 207 p.

3. Askinazi B.M. Hardening and restoration of parts by electromechanical machining. 3-Eizd. М.: Mechanical Engineering. 1989. 200 p.

4. Akhtulov A.L., Edigarov V.R., Dadayan S.E. Assessment of the influence of the surface modification process on the wear intensity in the operation of internal combustion engines loaded // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019/ ICMTME 2019*. 2020. P. 044031.

5. Berstein M.L. Thermomechanical treatment of metals and alloys. T. 1 and 2. — М.: Metallurgy. 1968. T. 1. — 596 p.; T. 2 — 1171 p.

6. Edigarov V.R., Kilunin I.Yu. Radiographic examination of steel 38KhS subjected to friction-electric modification // *Metalworking*. 2011. № 4 (64). Pp. 23–29.

7. Tarasov V.V., Malyshko S.B. Study of the influence of the initial structure of steel on the results of electromechanical processing // *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2008. № 1. Pp. 182–185.

8. Malyshko S. B., Tarasov V.V. The peculiarities of the influence of the initial structure became on the results of electromechanical processing // *Bulletin of the Maritime State University. Ser. Shipbuilding and ship repair*. — Vladivostok: More. state. Un-t, 2008. Out. 18. Page 50–54.

9. Bagmutov V.P., Parshev S.N., Pritychenko V.Yu. The impact of the structural state of carbonaceous steels on fatigue strength during electromechanical hardening // *Izvestia of Volgograd State Technical University*. 2008. № 9 (47). Pp. 5–7.

10. Dudkina N.G., Zakharov I.N. Study of the micro hardness of the surface layer of carbonaceous steels after electromechanical treatment // *Metals*. 2004. No. 4. Pp. 64–70.

11. Edigarov V.R., Alimbaeva B.Sh., Anokhin S.Yu. Increasing the wear resistance of the surface layer of parts with combined electromechanical processing with release // *Omsk Scientific Journal*. 2020. № 2 (170). Pp. 10–14.

12. Gulyaev A.P. Structural changes during heat treatment of steel and their effect on mechanical properties. «МиТом». 1965. No. 11. Pp. 9–17.