

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 621.9.047/048-114

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ В СТАЛИ 45,  
ПОДВЕРГНУТОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ  
И ПОВЕРХНОСТНОМУ ПЛАСТИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ**

© 2020 г. Н. Г. Дудкина

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия  
e-mail: detmash@vstu.ru*

Поступила в редакцию 04.06.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2019 г.

Исследуется влияние комбинированного поверхностного упрочнения: электрохимическая обработка и поверхностное пластическое деформирование на процессы неупругих деформаций в стали 45. Приведены результаты испытаний на растяжения и анализ петель механического гистерезиса образцов из стали 45, подвергнутых комбинированному поверхностному упрочнению. Рассматриваются характерные особенности неупругих свойств и микронеоднородной деформации стальных образцов в зависимости от регулярно-неоднородной структуры упрочненного поверхностного слоя.

*Ключевые слова:* комбинированное упрочнение, электрохимическая обработка, поверхностное пластическое деформирование, поверхностный слой, диаграмма растяжения, неупругая деформация, микронеоднородная деформация

**DOI:** 10.31857/S0235711920020078

Многочисленные фундаментальные исследования свидетельствуют об особой роли и специфическом влиянии поверхностно-упрочненных слоев на широкий комплекс прочностных и пластических свойств металлов [1–4]. Исследования направлены на получение такой структуры и свойств поверхности, которые обеспечили бы заданную статическую и циклическую прочность, износостойкость, коррозионную стойкость и т.д. деталей машин. В высшей степени это характерно для структур повышенной твердости и специфических свойств (“белые слои”), сформированных при воздействии на поверхностный слой материала высококонцентрированных потоков энергии [5–7]. Отмечено существенное влияние таких специфических структур на неупругие свойства сталей, характеризующие их демпфирующую способность, повышение которой приводит к снижению динамической напряженности деталей [8–10]. Авторами отмечается высокая чувствительность характеристик рассеяния энергии к структурно-напряженному состоянию поверхностного слоя металла.

Однако в исследованиях неупругого поведения материалов обнаруживаются противоречия, связанные с различной технологией формирования специфических высокопрочных структур в поверхностно упрочненных слоях. Вопросы интенсивности развития неупругих деформаций в сопоставлении с изменением прочностных характеристик исследуемых поверхностно-упрочненных материалов изучены недостаточно, в то время как упрочнению подвергаются тонкие поверхностные слои. Практически отсутствуют сведения, объясняющие закономерность необратимого рассеяния энергии (протекания неупругих процессов) в поверхностно-упрочненных стальных образцах.

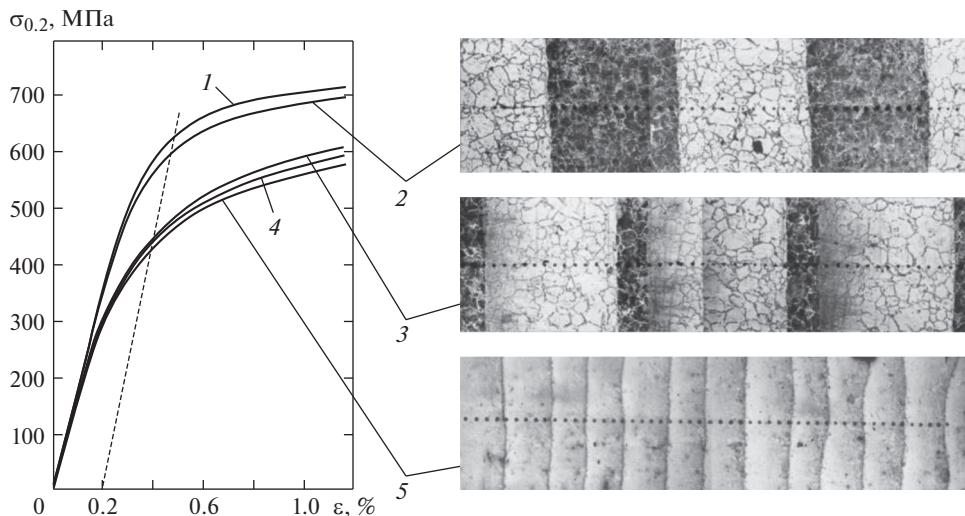
В настоящей статье рассмотрено влияние регулярной структуры поверхностно-упрочненного слоя, полученного комбинированным способом, электромеханической обработкой и последующим поверхностным пластическим деформированием (ЭМО + ППД), на закономерность изменения неупругих и микронеоднородных деформаций в стали 45 при статическом растяжении.

**Материалы и методика эксперимента.** Исследованию подвергались цилиндрические образцы диаметром 10 мм, длиной 100 мм из нормализованной стали 45 в исходном (неупрочненном) и упрочненном ЭМО + ППД состояниях. Электромеханическая обработка (ЭМО) заключалась в одновременном воздействии на вращающийся образец импульсного электрического тока плотности  $j = 400 \text{ А/мм}^2$  и механического усилия  $P = 300 \text{ Н}$  с использованием перемещающегося вдоль образца твердосплавного ролика. Локальный нагрев, сопровождающийся действием значительных давлений; короткий термический цикл (нагрев, выдержка и охлаждение), измеряемый долями секунды; высокая скорость охлаждения, определяемая интенсивным отводом теплоты вглубь материала образца, обуславливают получение специфической структуры мелкоугольчатого мартенсита (белого слоя) с твердостью  $H_{\mu} = 8.5 \text{ ГПа}$  и глубиной до 200 мкм. За счет продольной подачи на поверхности цилиндрического образца формировалась регулярная макроструктура в виде спиралеобразных непрерывных полос (треков) упрочненного металла, разделенных зонами металла в исходном состоянии. Варьируя величину шага треков:  $S = 1.0; 1.25; 2.0; 3.0 \text{ мм}$  получали различную степень их перекрытия на поверхности упрочненного образца. Данную структурную неоднородность оценивали коэффициентом перекрытия  $\alpha$ ;  $\alpha = (S - a)/a$ , где  $a$  – ширина трека,  $S$  – шаг обработки.

Финишное поверхностное пластическое деформирование (ППД) проводилось с рабочей нагрузкой на инструмент  $P = 600 \text{ Н}$ ; подачей  $S = 0.25 \text{ мм/об}$ ; скоростью вращения шпинделя 100 мм/об; числом проходов  $n = 1$ .

Для оценки влияния комбинированного упрочнения на неупругие свойства нормализованной стали 45 были проведены статические испытания на растяжение цилиндрических образцов (ГОСТ 1497–84). Образцы, находящиеся в исходном состоянии и обработанные ЭМО + ППД, подвергались осевому растяжению. Нагружение образцов осуществлялось с постоянной скоростью перемещения захвата, равной  $v = 0.5 \text{ мм/мин}$ , на машине УМЭ-10ТМ с прецизионной записью начальных участков диаграмм деформирования с одновременной записью петель механического гистерезиса. Использование специальных тензометров (с тензодатчиками омического сопротивления), позволило измерить неупругие деформации величиной  $10^{-5}$  относительных единиц. Величина неупругой деформации за цикл  $\Delta \epsilon$  оценивалась шириной петли механического гистерезиса. Метод статической петли гистерезиса заключается в оценке петли механического гистерезиса (наличие которой свидетельствует о необратимом поглощении части работы внешних сил), построенной в координатах  $\sigma - \epsilon$  при монотонном изменении нагрузки. Петли гистерезиса снимались при разных уровнях напряжений и при одном и том же виде деформации.

**Результаты и их обсуждение.** Металлографический анализ и оценка микротвердости поверхности образцов после комбинированного упрочнения ЭМО + ППД показали, что регулярная неоднородная структура, сформированная при электромеханической обработке, и характер распределения микротвердости “наследуются” финишной операцией поверхностного пластического деформирования. В работах [11, 12] отмечалось существенное влияние состояния поверхностного слоя после ЭМО + ППД на закономерность макропластического деформирования. Установлено, что наличие высокопрочной структуры белого слоя в поверхности ведет к существенному увеличению механических характеристик. Условный предел текучести образцов после проведения финишной операции поверхностного пластического деформирования увеличивался в 1.5 по сравнению с образцами, подвергнутыми электромеханической обработке без

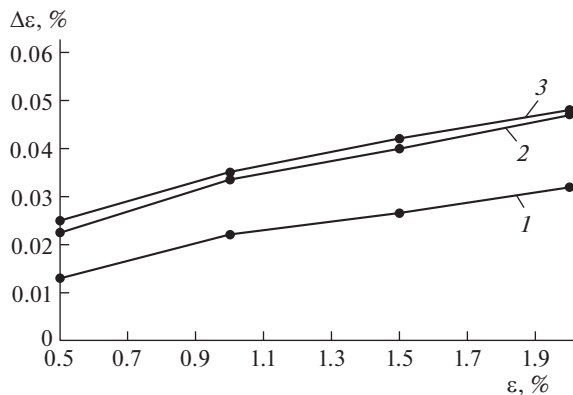


**Рис. 1.** Начальные участки диаграмм деформирования и структура образцов из стали 45, упрочненных комбинированной обработкой ЭМО + ППД с различным перекрытием треков на поверхности: 1 –  $S = 3.0$  мм,  $\alpha = 2.75$ ; 2 –  $S = 2.0$  мм,  $\alpha = 1.5$ ; 3 –  $S = 1.25$  мм,  $\alpha = -0.56$ ; 4 –  $S = 1.0$  мм,  $\alpha = 0.25$ ; 5 –  $S = 0.8$  мм,  $\alpha = 0$  [11].

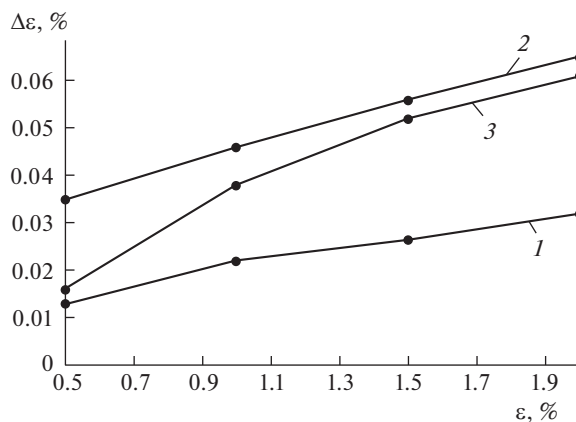
ППД и в 1.8 по сравнению с образцами в исходном состоянии. Причем с увеличением мягкой прослойки между треками (уменьшением “сплошности” белого слоя) условный предел текучести увеличивался, достигая максимального значения при шаге обработки ЭМО  $S = 3.0$  мм;  $\sigma_{0.2} = 630$  МПа (рис. 1).

Проведен анализ неупругих свойств материала в связи с изменением структурного состояния поверхностного слоя стали 45 после ЭМО + ППД в сравнении с исходным состоянием и упрочненной традиционной электромеханической обработкой. Графики изменения ширины петли гистерезиса  $\Delta\epsilon$ , характеризующие неупругие свойства материала, от степени общей деформации образцов с коэффициентом перекрытия треков белого слоя  $\alpha = 1.5$  и  $\alpha = 0.25$  приведены на рис. 2, 3 соответственно. Из анализа следует, что нарастание общих пластических деформаций во всех случаях приводит к увеличению ширины петли гистерезиса. Интенсивность неупругих деформаций после комбинированной обработки ЭМО + ППД увеличивается для всех испытуемых образцов по сравнению с исходным состоянием. По мере сближения треков белого слоя (т.е. с увеличением доли высокопрочной структуры в поверхностном слое), при общей деформации  $\epsilon = 0.5\%$ , ширина петли механического гистерезиса упрочненных ЭМО + ППД образцов с коэффициентом перекрытия треков белого слоя  $\alpha = 0.25$  на 23%, с перекрытием  $\alpha = 1.5$  – на 55% больше, чем в исходном состоянии.

Повышение механического гистерезиса связано с макроструктурной неоднородностью поверхностного слоя в осевом направлении (определяемой степенью перекрытия треков). Ширина петли образцов с коэффициентом перекрытия треков  $\alpha = 0.25$  составляет  $\Delta\epsilon = 0.016\%$ , с  $\alpha = 1.5$ ,  $\Delta\epsilon = 0.025\%$ . При дальнейшем повышении общей деформации ( $\epsilon = 1.5\%$ ) картина развития неупругих деформаций принципиально меняется: с увеличением доли высокопрочной структуры в поверхностном слое интенсивность неупругих деформаций возрастает. Ширина петли механического гистерезиса упрочненных ЭМО + ППД образцов с коэффициентом перекрытия  $\alpha = 0.25$  составляет  $\Delta\epsilon = 0.052\%$ , с  $\alpha = 1.5$ ,  $\Delta\epsilon = 0.042\%$ .



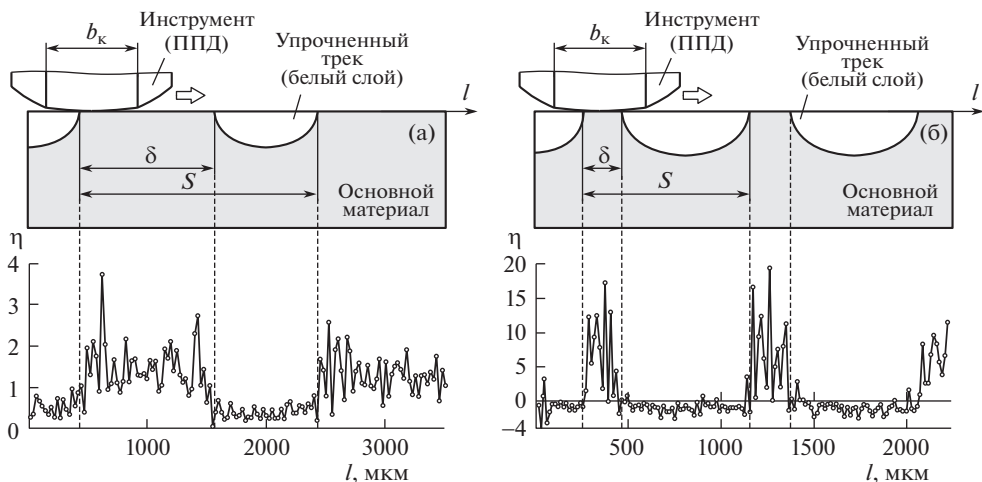
**Рис. 2.** Изменение ширины петли гистерезиса  $\Delta\epsilon$  в функции общей деформации  $\epsilon$ , % образцов с коэффициентом перекрытия треков белого слоя  $\alpha = 1.5$  (шаг  $S = 2.0$  мм): 1 – исходное состояние; 2 – упрочнение ЭМО; 3 – упрочнение ЭМО + ППД.



**Рис. 3.** Изменение ширины петли гистерезиса  $\Delta\epsilon$  в функции общей деформации  $\epsilon$ , % образцов с коэффициентом перекрытия треков белого слоя  $\alpha = 0.25$  (шаг  $S = 1.0$  мм): 1 – исходное состояние; 2 – упрочнение ЭМО; 3 – упрочнение ЭМО + ППД.

Сравнительный анализ упрочненных ЭМО + ППД образцов с образцами, упрочненными традиционной ЭМО [10], показал, что неупругие свойства также зависят от регулярности треков белого слоя на поверхности. После проведения финишной операции ППД при общей пластической деформации  $\epsilon = 0.5\%$ , уровень энергетических потерь у поверхностно упрочненных ЭМО + ППД образцов с перекрытием треков  $\alpha = 0.25$  снизился в два раза (рис. 3), а с  $\alpha = 1.5$  практически не изменился (рис. 2) по сравнению с ЭМО.

Повышение механического гистерезиса после проведения традиционной ЭМО имеет структурную обусловленность: микроискажение кристаллической решетки белого слоя, наличие нестабильной фазы в поверхности (высокоуглеродистого мартенсита), макроструктурная неоднородность поверхностного слоя в осевом направлении. Однако после проведения финишной операции поверхностного пластического де-



**Рис. 4.** Распределение относительной микронеоднородной деформации стали 45, упрочненной ЭМО + ППД с различной степенью перекрытия треков белого слоя: (а) –  $\alpha = 1.5$ ; (б) –  $\alpha = 0.25$  (общая деформация  $\epsilon = 2.0\%$ ).

формирования эти факторы оставались неизменными, а интенсивность протекания неупругих процессов в металле изменялась.

Выяснения закономерностей необратимого рассеяния энергии в стали, подвергнутой комбинированной обработке (ЭМО + ППД), необходимо рассматривать в связи с неоднородностью свойств упрочненных и неупрочненных микрообъемов стальных образцов. Одновременное изучение с развитием микронеоднородной деформации изменения неупругих свойств металла, показало, что развитие неупругих свойств является отражением развития микропластических деформаций в материале [6, 13]. Наличие в поверхностном слое образца чередующихся твердых полос (треков) белого слоя и мягких прослоек основного металла приводит к резкому изменению кинетики сдвигообразования по сравнению с образцами в исходном состоянии и упрочненными традиционной ЭМО. Как показывают эксперименты, уровень локальных всплесков микродеформаций при ЭМО + ППД увеличивается в 4–5 раз по всем структурным составляющим поверхности по сравнению с традиционной электрохимической обработкой и в 10–14 раз по сравнению с образцами в исходном состоянии. При шаге  $S = 1.0$  мм интенсивность микродеформаций в “мягких” прослойках достигает значений  $\eta = 15.0\text{--}12.0$  ( $\eta = \epsilon_i/\epsilon_{\text{ср}}$ , где  $\epsilon_i$  – относительная деформация  $i$ -го участка;  $\epsilon_{\text{ср}}$  – относительная средняя деформация), в то время как локальная неоднородность в белом слое  $\eta = -1.5\text{--}(-4.8)$ , т.е. в процессе растяжения образца на упрочненных участках наблюдается явление сжатия, а интенсивность пластического течения приходится на “мягкие” прослойки (рис. 4б). С увеличением доли “мягкой” прослойки, наблюдается уменьшение уровня локальных всплесков микродеформаций в неупрочненном металле  $\eta = 5.0\text{--}5.5$ , а локальная неоднородность в белом слое принимает значение  $\eta = 1.4\text{--}1.5$  (рис. 4а).

Проведенное исследование указывает на наличие нового механизма деформирования стальных образцов, упрочненных ЭМО + ППД и свидетельствует об интенсификации неупругих процессов, происходящих в металле под нагрузкой.

Объяснение повышению прочностных свойств и изменению неупругих свойств после обработки ЭМО + ППД по сравнению с традиционным электрохимическим

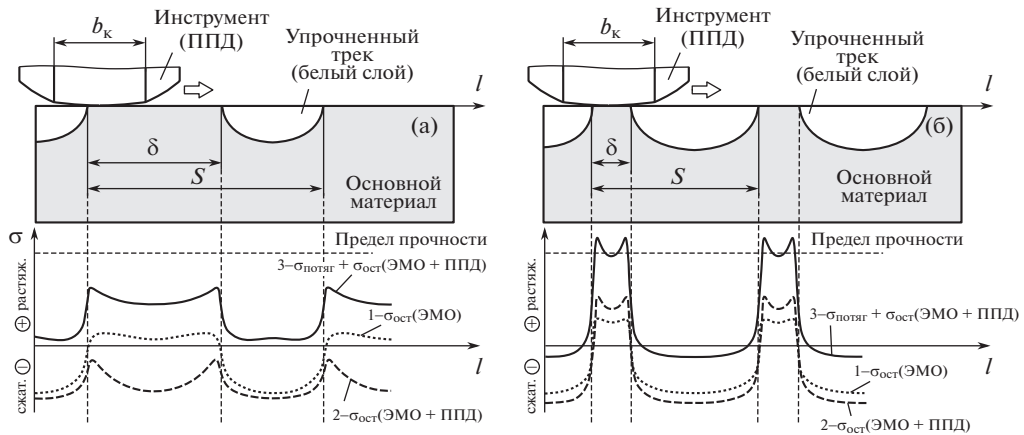


Рис. 5. Распределение напряжений стали 45, упрочненной ЭМО + ППД с различной степенью перекрытия треков белого слоя: (а) –  $\alpha = 1.5$  ( $S = 2.0$  мм); (б) –  $\alpha = 0.25$  ( $S = 1.0$  мм).

упрочнением и исходным состоянием следует искать в сложном и неравномерном распределении остаточных напряжений по макроструктурным составляющим упрочненной поверхности. Картина напряженного состояния по элементам структуры складывается из остаточных напряжений в результате отдельных операций комбинированного упрочнения ЭМО и ППД, а также растягивающих напряжений при статическом деформировании. При приложении внешней нагрузки неизбежно возникает сложное напряженное состояние, вызванное совместной деформацией различных по своим свойствам элементов структуры, какими являются белый слой и исходный материал.

На рис. 5 представлена схема (идеализированная модель) формирования поля напряжений в области малых пластических деформаций, объясняющая специфику развития неупругой деформации образцов с различным взаимным расположением упрочненных треков на поверхности после ЭМО + ППД. Под влиянием термических процессов при ЭМО формируется сложное структурно-фазовое и напряженно-деформированное состояние материала в поверхности упрочненной стали, с преобладающими растягивающими напряжениями [14]. При упрочнении ЭМО + ППД с шагом  $S = 2.0\text{--}3.0$  мм,  $\delta/b > 1$ , где  $\delta$  – ширина мягкой прослойки;  $b$  – ширина контакта инструмента с образцом, расстояние между треками больше чем ширина контакта инструмента с образцом мягкая прослойка упрочняется, наводятся благоприятные сжимающие напряжения от финишного поверхностного пластического деформирования (рис. 5а), что приводит к значительному повышению прочностных характеристик стали 45, и практически не снижает неупругие свойства по сравнению с образцами, упрочненными традиционной ЭМО.

В случае, когда расстояние между треками меньше чем ширина контакта  $\delta/b < 1$  мягкая прослойка не подвергается обработке и к растягивающим напряжениям после ЭМО добавляются растягивающие напряжения после ППД (рис. 5б). По мере растяжения образца под действием суммарных напряжений происходит повышенная пластическая деформация, приводящая к разрушению “конструкции поверхностного слоя”. Белый слой сжимается (рис. 4б), что ведет к потере прочностных свойств, а интенсивность протекания в металле неупругих процессов снижается по сравнению с образцами, упрочненными ЭМО.

Предложенная схема формирования поля напряжений и деформаций (рис. 4, 5) в области малых пластических деформаций, раскрывает специфику пластической деформации и формирования неупругих свойств образцов от трансформации макроструктуры тонкого поверхностно-упрочненного ЭМО + ППД слоя.

Таким образом, проведенный анализ закономерностей напряженно-деформированного состояния и неупругих свойств стали с регулярно-неоднородным упрочненным поверхностным слоем показывает с одной стороны, большую сложность рассматриваемых явлений, с другой стороны, перспективность применения результатов исследования при изучении конструкционной прочности стали с учетом структурных изменений в тонком поверхностном слое. Количественная оценка напряжений по элементам структуры является задачей чрезвычайно сложной и требующей проведения дальнейших систематических исследований в этом направлении.

Интенсивность неупругих деформаций стальных образцов, подвергнутых комбинированному упрочнению электромеханической обработке и поверхностному пластическому деформированию (ЭМО + ППД) существенно увеличивается с одновременным повышением прочностных характеристик по сравнению с исходным состоянием нормализованной стали 45.

Повышение неупругих деформаций связано с макроструктурной неоднородностью поверхностного слоя в осевом направлении, определяемой степенью перекрытия треков. С увеличением доли высокопрочной структуры в поверхностном слое, ширина петли, упрочненных ЭМО + ППД образцов с коэффициентом перекрытия треков  $\alpha = 0.25$ , увеличивается на 23%, с перекрытием треков белого слоя  $\alpha = 1.5$  – на 55%, по сравнению с материалом нормализованной стали 45 (при общей деформации  $\epsilon = 0.5\%$ ).

Повышение деформационных характеристик и прочностных свойств стальных образцов, поверхностно-упрочненных ЭМО + ППД, объясняется особенностями микронеоднородной деформации и чрезвычайно сложной картиной напряженного состояния по элементам структуры, какими являются белый слой и исходный материал.

Результаты работы развивают теоретические представления о рассеянии механической энергии поверхностно-упрочненных материалов в условиях повторного нагружения при больших уровнях нагрузки и малых частотах нагружения, требующиеся в ряде отраслей техники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Папшев Д.Д.* Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 153 с.
2. *Одинцов Л.Г.* Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
3. Научно-технический прогресс в машиностроении / Под. ред. К.В. Фролова Москва: ИМАШ АН СССР. 1989. В. 9. 186 с.
4. *Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д.* Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 239 с.
5. *Бабей Ю.И.* Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. Киев: Наукова думка, 1988. 159 с.
6. Effects of laser heat treatment combined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045 / *D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk, V.V. Dzhemelinskiy et al.* // Optics & Laser Technology. 2019. V. 111. P. 424.
7. *Tsuji N.* Effect of combined plasma-carburizing and deep-rolling on notch fatigue property of Ti-6Al-4V alloy / *N. Tsuji, S. Tanaka, T. Takasugi* // Materials Science and Engineering: A. 2009. V. 499. № 1–2. P. 482.
8. *Троценко В.Т.* Усталость и неупругость металлов. Киев: Наукова думка, 1971. 268 с.
9. *Савкин А.Н., Багмутов В.П.* Прогнозирование усталостной долговечности высоконагруженных конструкций. Волгоград: ВГТУ, 2013. 363 с.

10. Федоров А.В., Дудкина Н.Г. Рассеяние механической энергии в конструкционных сталях, подвергнутых электромеханической обработке // МЕХАНИКА. 1998. № 2 (13). С. 15.
11. Матлин М.М., Дудкина Н.Г., Болдов А.Н. Особенности пластического деформирования стальных деталей, упрочненных комбинированной обработкой ЭМО + ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 8. С. 44.
12. Дудкина Н.Г., Садовин А.А. Исследование пластической деформации и прочности стальных деталей, упрочненных комбинированным методом ЭМО + ППД // Металлообработка. 2012. № 1. С. 37.
13. Дудкина Н.Г., Захаров И.Н. О закономерностях микронеоднородной деформации поверхностного слоя образцов углеродистых сталей после электромеханического упрочнения // Металлы. 2005. № 5. С. 85.
14. Нерубай М.С., Овчинников А.П. Формирование остаточных напряжений при комбинированном электромеханическом и ультразвуковом упрочнении // Материалы научно-технической конф. Поверхностное упрочнение деталей машин и инструментов. Куйбышев. 1976. С. 71.