

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ С ОТПУСКОМ

Рассматривается технология комбинированной электромеханической обработки деталей машин с электромеханическим отпуском поверхностей в основе, которой электромеханическая обработка в два прохода с различными значениями технологических факторов позволяющая получить модифицированный поверхностный слой, имеющий многослойную структуру, верхний тонкий разупрочненный слой, далее «белый» слой, затем обычный упрочненный слой и под ним основной металл. Полученная градиентная структура, обеспечивает требуемые эксплуатационные качества у модифицированной поверхности, прежде всего по параметрам износостойкости, определяемой процессом приработки трибосоприжения.

Ключевые слова: модифицирование поверхностного слоя, электромеханическая обработка, микротвердость, плотность электрического тока, износостойкость.

Введение. В настоящее время актуальной проблемой современного производства многоцелевых гусеничных и колесных машин является существенное увеличение эксплуатационных параметров качества поверхностных слоев деталей, образующих трибоузлы [1]. Одним из направлений решения данной проблемы является использование способов поверхностного модифицирования деталей трибосистем, их совершенствование, а также разработка новых комбинированных способов, использующих комбинации концентрированных потоков различных видов энергии (лазерной, деформационной, плазменной, электромеханической и др.) [2, 3].

Комплексное высокоскоростное температурно-силовое воздействие позволяет формировать высокопрочные износостойчивые наноразмерные структуры на поверхностном слое деталей многоцелевых гусеничных и колесных машин (МГиКМ) с образованием так называемого «белого» слоя, или гарденита [4, 5].

При упрочнении поверхностных слоев деталей МГиКМ «классическими» способами, например, объемной термической обработкой, возникает ряд сложностей, которые заключаются в неудовлетворительном процессе приработки поверхностей трения, что связано с высокими физико-механическими свойствами и, соответственно, малой пластичностью упрочненного поверхностного слоя. Электромеханическая обработка в первоначальном варианте ее осуществления позволяет получить обрабатываемый поверхностный слой с образованием

высокопрочного «белого» слоя, что так же наряду с положительными качествами отрицательно сказывается на процессе приработки детали в трибосоприжении, особенно на начальном периоде [4–6].

Исходя из вышесказанного, разработка нового комбинированного способа поверхностного упрочнения деталей МГиКМ, позволяющего повысить параметры работоспособности деталей трибосоприжений, работающих в сложных условиях трения, изнашивания, высоких знакопеременных динамических нагрузок, является актуальной научной и технологической задачей.

Методика исследований. При проведении электромеханической обработки в качестве инструмента использовались твердосплавные пластины (из сплава Т15К6, с радиусом $R = 30$ мм и радиусом $r = 15$ мм), которые закреплялись неподвижно, и твердосплавные ролики (из сплава ВК-4М диаметром 40 мм с радиусом профиля 6 мм) с возможностью вращения в процессе обработки.

Для исследований изготавливались образцы из конструкционных сталей 38ХС, 40Х ГОСТ 4543-2016, данные стали широко используются в современном производстве деталей для МГиКМ [1, 6]. Образцы представляли собой плоские цилиндрические диски диаметром 50 мм, изготовленные из стали в нормализованном состоянии.

ЭМО выполнялась на установке, в основе которой использовался токарно-винторезный станок модели ИТ-1М. Модифицированию подвергались цилиндрические образцы, предварительно установ-

ленные в оправке. На основе анализа работ [7–9] осуществлялся выбор значений и границ изменения основных технологических факторов ЭМО (плотность электрического тока, скорость обработки, усилие деформации).

По результатам комбинированной ЭМО исследовали микротвердость поверхностного слоя. Исследования производили с использованием прибора ПМТ-3 с оценкой значения микротвердости по полученным отпечаткам индентора. Полученные значения микротвердости позволили построить зависимость микротвердости от глубины поверхностного слоя.

Микроструктура изучалась с использованием прибора МИМ-8М при различных значениях увеличения.

Результаты исследований. Исследованию подвергался способ комбинированной электрохимической обработки с отпуском (ЭМОО), в основе которого лежит способ электрохимической обработки (ЭМО), характеризующийся воздействием на элементарные объемы поверхностного слоя электрического тока (большой силы тока и незначительного напряжения) и поверхностной пластической деформации, в результате чего выделяется значительное количество джоулева тепла и тепла от деформации и трения с интенсивным нагревом поверхности до температур в 1000–1300 °С [4–6].

Впоследствии происходит высокоскоростное охлаждение поверхности отводом тепла в основную массу металла детали. При таком высокоэнергетическом и высокоскоростном воздействии на малые объемы металла поверхности детали происходят структурные и фазовые превращения с образованием высокопрочных структур на основе мелкодисперсного мартенсита, в верхних слоях поверхностного слоя который представляет собой «белый» слой с особыми свойствами и, прежде всего, высокими физико-механическими и триботехническими свойствами [10–12].

ЭМОО, как и ЭМО поверхностных слоев деталей МГиКМ, включает пластическую поверхностную деформацию (ППД), осуществляемую рабочим инструментом при прохождении через очаг деформации электрического тока высокой плотности, при этом ППД в процессе ЭМОО осуществляют на заданную глубину δ [7–9]. Глубина пластической деформации должна соответствовать половине величины допуска на предельный износ детали в процессе эксплуатации. На первом этапе ЭМОО величина плотности электрического тока устанавливается

равной I_1 и определяется из эмпирического выражения [7–9]:

$$I_1 = 17,8 \sqrt{\frac{\delta V^{0,65}}{C}}, \quad (1)$$

где V — скорость обработки (м/с); δ — глубина упрочнения; C — содержание углерода в стали.

На втором этапе обработки осуществляется разупрочнение поверхностного слоя детали на толщину приработки, определяемой из условий и опыта эксплуатации, повторной ЭМО поверхности, при этом величина плотности электрического тока I_2 устанавливается исходя из эмпирического выражения [7–9]:

$$I_2 = (0,1 - 0,2) \cdot I_1 < I_{min}, \quad (2)$$

где I_{min} — минимальная плотность тока, при которой происходит формирование упрочненного поверхностного слоя.

Величина $I_2 = (0,1 - 0,2) \cdot I_1 < I_{min}$ обусловлена тем, что при значениях $I_2 > I_{min}$ высока вероятность образования в верхних слоях поверхностного слоя «белого» слоя с соответствующими свойствами, процесс управляемого разупрочнения не осуществлен. В случае, если $I_2 = (0,1 - 0,2) \cdot I_1$, высока вероятность частичного управляемого разупрочнения поверхностного слоя на глубину меньше толщины приработки поверхностного слоя детали в процессе эксплуатации.

Технологический процесс ЭМОО включает в себя для заданного допуска на максимальный линейный износ δ детали расчет плотности тока I_1 для первого этапа обработки по формуле (1), которая зависит от содержания углерода (C) в металле обрабатываемой детали и выбранной скорости обработки (V), зависящей, в свою очередь, от возможностей имеющихся средств технологического оснащения. Далее осуществляется электрохимическая обработка поверхностного слоя детали с плотностью электрического тока, равной I_1 , что позволяет сформировать на поверхности упрочненный поверхностный слой толщиной δ (рис. 1) в верхней части которого находится «белый» слой. Расчеты плотности тока I_1 для различных скоростей обработки и толщины упрочненного слоя для сталей 38ХС и через дробь сталь 40Х приведены в табл. 1.

Далее определяется для обрабатываемых сталей плотность тока I_2 из условия (2). Результаты расчета для плотности тока I_2 для исследуемых сталей 38ХС и через дробь сталь 40Х представлены в табл. 2.

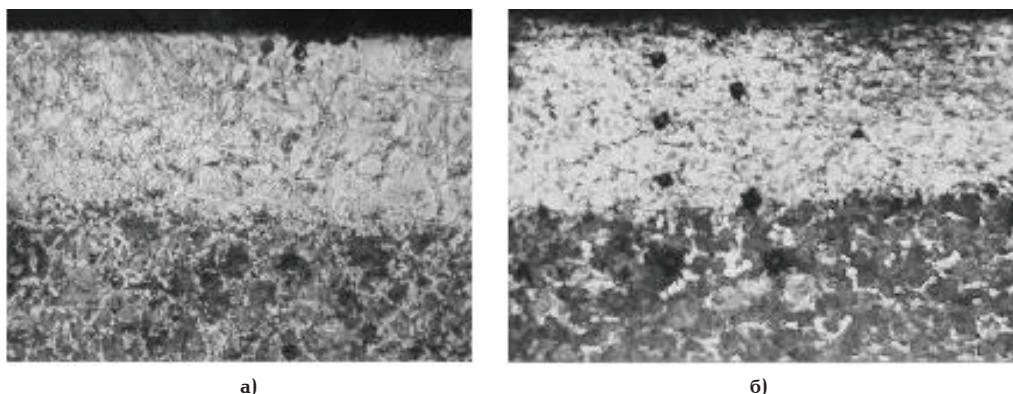


Рис. 1. Микроструктура упрочненного слоя: а) стали 40Х; б) стали 38ХС (×280)

Расчеты плотности тока I_1 для сталей 38ХС/40Х

Толщина упрочненного поверхностного слоя δ , $\text{м} \cdot 10^{-6}$	Скорость обработки V , м/мин			
	5	10	15	20
	Расчетная плотность тока I_1 , А/мм ²			
50	344/335	431/420	492/479	540/526
100	487/474	610//594	696//678	764/745
150	596/581	721/728	852/831	936/912
200	688/671	862/841	984/959	1081/1053
250	770/750	964/940	1100/1072	1208/1178
300	843/822	1056/1030	1205/1175	1324/1290

Таблица 2

Расчеты плотности тока I_2 для сталей 38ХС/ 0Х

Толщина упрочненного поверхностного слоя δ , $\text{м} \cdot 10^{-6}$	Скорость обработки V , м/мин			
	5	10	15	20
	Расчетная плотность тока I_2 , А/мм ²			
10	34-68/33-66	43-86/42-84	49-98/47-94	54-108/52-104
20	48-96/47-94	61-122//59-118	69-138/67-134	76-152/74-148
30	59-118/58-116	72-144/72-144	85-170/83-166	93-186/91-182
40	68-136/67-134	86-172/84-168	98-196/95-190	108-216/105-210

ЭМО с плотностью электрического тока в зоне контакта рабочего инструмента с поверхностью I_2 , расчетные значения которой приведены в табл. 2, приводит к управляемому разупрочнению ранее упрочненного на 1-м этапе поверхностного слоя на толщину приработки — половине величины допуска на предельный износ детали в процессе эксплуатации (рис. 2).

Комбинированная ЭМОО поверхностей деталей МГиКМ, в основе которой электромеханическая обработка в два прохода с различными значениями технологических факторов, позволяет получать модифицированный поверхностный слой, имеющий многослойную структуру, верхний разупрочненный слой, далее «белый» слой, затем упрочненный слой и под ним основной металл.

Полученная градиентная структура обеспечивает требуемые эксплуатационные качества у модифицированной поверхности, прежде всего по параметрам износостойкости, определяемой процессом приработки при трении разупрочненной поверхности в трибосопрежении, а также высокими физико-механическими свойствами нижележащего «белого» и упрочненного слоев.

Исследование распределения средних значений микротвердости по глубине модифицированного поверхностного слоя после электромеханической обработки (1-го этапа обработки) поверхности детали с плотностью тока I_1 представлено на рис. 3.

Анализ полученных зависимостей показывает, что максимальное значение твердости модифицированного поверхностного слоя, при упрочнении

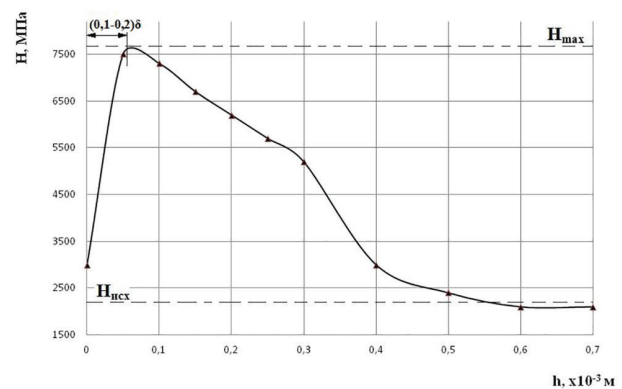


Рис. 2. Распределение средних значений микротвердости по глубине упрочненного поверхностного слоя после электромеханической обработки с значениями силы тока I_2 (2-й этап ЭМОО)

на режимах, позволяющих получить плотность тока I_1 (1 этап ЭМОО), находится на глубине до 250 мкм с последующим постепенным снижением микротвердости до значений основного (не упрочненного) металла на глубине 300–350 мкм.

График распределения микротвердости по глубине модифицированного поверхностного слоя после электромеханической обработки со значениями силы тока I_2 (2-й этап ЭМОО), способствующему разупрочнению ранее упрочненного с плотностью силы тока I_1 поверхностного слоя представлены на рис. 3. Модифицирование поверхностного слоя

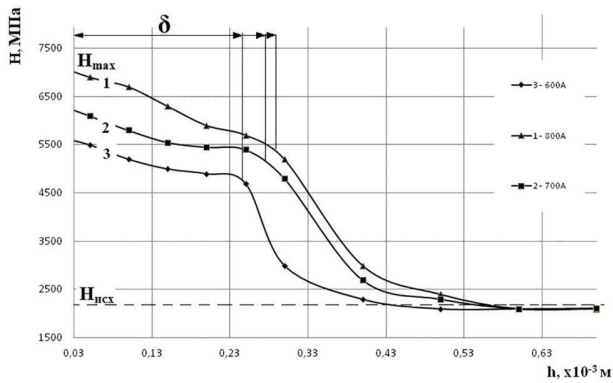


Рис. 3. Распределение средних значений микротвердости по глубине упрочненного поверхностного слоя после электрохимической обработки поверхности детали с плотностью тока I_1 (1-й этап ЭМОО)

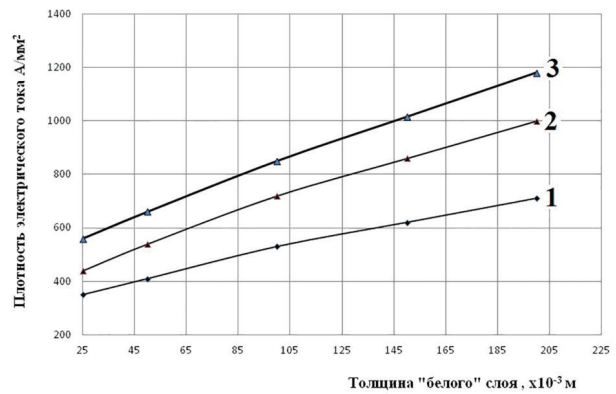


Рис. 4. Зависимость толщины сформированного «белого» слоя для стали 40X от величины плотности тока при скоростях обработки от 5 до 25 м/мин: 1–5 м/мин, 2–15 м/мин, 3–25 м/мин

с плотностью тока I_2 позволяет получить особенный упрочненный поверхностный слой, где микротвердость слоя глубиной до 50 мкм имеет относительно низкие значения с последующим плавным увеличением до максимальных значений на глубине от 50 мкм и до 250 мкм и дальнейшим снижением ее значений от 300 мкм до значений основного металла далее.

Зависимость толщины сформированного «белого» слоя в общем упрочненном (разупрочненном) слое для стали 40X от величины плотности тока при различных скоростях обработки представлены на рис. 4.

В результате комбинированного упрочнения способом ЭМОО на поверхности стальных образцов (сталь 40X и 38XC) формируется градиентная структура (рис. 1), состоящая из многослойного модифицированного поверхностного слоя, общая толщина которого составляет примерно 250–350 мкм, при этом верхняя часть представляет собой «белый» слой с микротвердостью в пределах 7500 МПа с частично разупрочненной поверхностью на глубину до 50 мкм и микротвердостью от 3500 до 7500 МПа.

Для электрохимической обработки с отпуском характерно не только высокотемпературное воздействие на поверхностный слой за счет прохождения на первом этапе тока с плотностью I_1 и на втором этапе тока с плотностью I_2 , но и деформационное воздействие поверхностным пластическим деформированием, объединенное в одном технологическом процессе с вышеуказанным воздействием, причем ППД осуществляется на глубину δ , равную половине величины допуска на предельный износ детали в процессе эксплуатации, а также создание на поверхности разупрочненного слоя, равного величине слоя истираемого в процессе приработки деталей трибоузла с нижележащим «белым» слоем, который обеспечивает высокую износостойкость в дальнейшей эксплуатации трибоузла.

Выводы. Таким образом, исследованный комбинированный способ ЭМОО позволяет уменьшить время, необходимое на приработку деталей трибоузлов за счет наличия разупрочненного слоя и последующее повышение износостойкости за счет наличия высокопрочного «белого» слоя.

Лабораторные триботехнические испытания образцов (сталь 38XC), упрочненных ЭМОО, показали снижение общей интенсивности изнашивания примерно в 2 раза в условиях граничного трения,

в сравнении с образцами, обработанными по «классической» технологии ЭМО. При этом время приработки образцов, обработанных по «классической» технологии ЭМО, оказалось больше примерно в 1,5 раза.

Библиографический список

1. Эдигаров В. Р., Килунин И. Ю. Повышение эксплуатационных свойств деталей многоцелевых гусеничных машин технологическими методами // Вестник академии военных наук. 2011. № 2 (35). С. 333–339.
2. Хейфец М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. 272 с. ISBN 5-217-03171-9.
3. Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Лазуткин А. Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с. ISBN 5-217-03245-6.
4. Белый А. В., Карпенко Г. Д., Мышкин Н. К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1991. 208 с. ISBN 5-217-01411-3.
5. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей электрохимической обработкой. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
6. Эдигаров В. Р., Малый В. В. Повышение износостойкости деталей ходовой части многоцелевых гусеничных машин комбинированными методами электрохимической обработки // Вестник СибАДИ. 2014. № 4 (38). С. 57–64.
7. Пат. 2439172 Российская Федерация, МПК С 21 D 7/13. Способ комбинированного упрочнения поверхностей деталей / Багмутов В. П., Паршев С. Н., Захаров И. Н. [и др.]. № 2010135492/02; заявл. 24.08.10; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1.
8. Горленко А. О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электрохимической обработке // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 3. С. 4–8.
9. Горленко А. О. Электрохимические методы обработки // Энциклопедия. В 40 т. Т. III-3. Технология изготовления деталей машин / под общ. ред. А. Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2000. С. 356–361.
10. Багмутов В. П., Паршев С. Н., Дурхина Н. Г. [и др.]. Электрохимическая обработка. Новосибирск: Наука, 2003. 318 с.
11. Сулов А. Г., Горленко А. О., Сухарев С. О. Электрохимическая обработка деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. 1998. № 1 (10). С. 15–18.
12. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Эдигаров В. Р. Повышение износостойкости трибосоприжения фрикционно-электрическим модифицированием поверхностей трения поверхност-

но-активными модификаторами // Омский научный вестник. 2006. № 2 (35). С. 73–75.

ЭДИГАРОВ Вячеслав Робертович, кандидат технических наук, доцент (Россия), начальник кафедры двигателей.

SPIN-код: 7037-1707

AuthorID (РИНЦ): 722161

Адрес для переписки: edigarovs@mail.ru

АЛИМБАЕВА Ботагоз Шайдуловна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры технологии производства.

SPIN-код: 5553-2107

AuthorID (РИНЦ): 766754

Адрес для переписки: botagoz.alimbaeva@mail.ru

АНОХИН Сергей Юрьевич, курсант гр. А 253.

Для цитирования

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. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-10-14.

Статья поступила в редакцию 10.02.2020 г.

© В. Р. Эдигаров, Б. Ш. Алимбаева, С. Ю. Анохин