

under hydrostatic pressure]. Bishkek: Kyrgyzstan, 2000. – 153 p.

8. Author's certificate 655783 (USSR), IPC E 02 F 3/92. The stand for underwater cutting of soils / I.A.Nedorezov, V.I.Balovnev, A.B.Ermilov, J.J.Turgumbaev, E.A.Maloyan; The Moscow automobile road Institute and the all-Union scientific research Institute of transport construction (SU); No. 2510106/29-03; stated. 19.07.1977; publ. 05.04.1979. Bull. no 13 – 3 p.

Тургумбаев Санжарбек Дженишбекович (Бишкек, Кыргызстан) – старший научный сотрудник НИИ физико-технических проблем при КГТУ им. И.Раззакова (720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова, 66, e-mail: sanjar2000@mail.ru).

Кабашев Рахимжан Абылкасымович (Алматы, Казахстан) – доктор технических наук, профессор, ректор Казахской автомобильно-дорожной академии им. Л.Б.Гончарова (e-mail: kazadi@kazadi.kz).

Turgumbaev Sanzharbek Jenishbekovich (Bishkek, Kyrgyzstan) – Senior Researcher, Research Institute of Physical and Technical Problems under the KSTU named after I.Razzakov (720044, Bishkek, Ch.Aitmatov ave. 66, e-mail: sanjar2000@mail.ru).

Kabashev Rakhimzhan Abylkasymovich (Almaty, Kazakhstan) – doctor of technical Sciences, Professor, rector of the Kazakh automobile and highway Academy named after L.B.Goncharov (e-mail: kazadi@kazadi.kz).



УДК 621.785

КОМБИНИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНОУЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В.Р. Эдигаров, Б.Ш. Алимбаева, П.С. Перков
Омский автобронетанковый инженерный институт, Россия, г. Омск

***Аннотация.** Представлены результаты исследования комбинированной электромеханоультразвуковой обработки (ЭМУЗО), сочетающей термомеханическое воздействие электромеханической обработки и поверхностное пластическое деформирование ультразвуковой обработки. Приведены результаты исследования микротвердости и микрогеометрии поверхностного слоя образцов из различных марок стали, а также влияние некоторых технологических параметров на основные свойства стальной поверхности. Исследуемая технология комбинированной электромеханоультразвуковой обработки позволяет значительно повысить качество обработанной поверхности, увеличить твердость и снизить параметры шероховатости, сформировав тем самым благоприятный для трущихся пар микро- и макро рельеф.*

Ключевые слова: комбинированная обработка, электромеханическая обработка, ультразвуковая обработка, поверхностный слой, поверхностное пластическое деформирование, термомеханическое влияние, высокоскоростное упрочнение.

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к деталям машин таковы, что традиционные методы обработки часто не позволяют эффективно получать необходимые параметры качества поверхностного слоя деталей в процессе обработки.

Большими потенциальными возможностями обладают комбинированные методы термомеханической, электрофизической, ионно-лучевой и других видов обработки, в основу которых положено использование высокопроизводительных режущих и деформирующих

инструментов, а также плазменных, электродуговых, электронных, ионных и других источников концентрированной энергии [1].

Одним из эффективных методов поверхностного упрочнения деталей машин является электромеханическая обработка (ЭМО), основанная на совместном электротермическом и деформационном воздействии [2]. В настоящее время разработано большое количество разновидностей электромеханической обработки (ЭМО), представляющих собой комбинацию различных высокоэнергетических воздействий на поверхность обрабатываемой

детали [3, 4]. Комбинация потоков энергии и вещества в процессе обработки обеспечивает условия, ведущие к стабилизации неравновесных процессов, основой которых является поверхностное пластическое деформирование в условиях трения скольжения при одновременном пропускании электрического тока через зону контакта детали и инструмента.

В работе приведены результаты исследований (металлографических, физико-механических свойств и шероховатости поверхности) образцов обработанных электромеханолульразвуковой обработкой (ЭМУзО), являющейся комбинацией электромеханической (ЭМО) и ультразвуковой обработки (УзО).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Комбинированными методами обработки необходимо считать методы, в которых процесс преобразования, нанесения или удаления обрабатываемого материала происходит в результате двух и более воздействий, осуществляемых по своему механизму, параллельно, последовательно или параллельно-последовательно [5, 6]. При ЭМУзО обработка осуществляется последовательным проведением операций ЭМО и УзО, совмещенных в одной технологической схеме.

ЭМО осуществляется при термомеханическом воздействии на поверхность обрабатываемой детали с усилиями прижатия рабочего инструмента к поверхности до 1500 Н и прохождением через зону контакта электрического тока большой величины до 2000 А и низкого напряжения до 6 В. При этом термическая обработка осуществляется на сверхвысоких скоростях нагрева и охлаждения до 10^5 °С/с. В качестве рабочего инструмента использовались пластины, закрепленные неподвижно, а также вращающиеся ролики из твердого сплава Т15К6.

УзО осуществлялась магнитостриктором с частотой колебаний 22 кГц, прижимаемым к обрабатываемой поверхности с усилием до 1000Н.

В качестве объекта исследования были выбраны стали 38ХС, 40Х ГОСТ 4543-71 и сталь 45 ГОСТ 1050-88 – стали с высокой прочностью, но умеренной вязкостью, предназначенные для изготовления деталей, к которым предъявляются требования высокой прочности, упругости и износостойкости. Выбор этих сталей в качестве объекта исследования объясняется их широким использованием в тяжелом машиностроении и в частности в узлах многоцелевых гусеничных машин, к которым

предъявляются жесткие требования по надежности, прочности и износостойкости. Образцы изготавливались из стали в нормализованном состоянии в виде плоских цилиндрических дисков диаметром 50 мм. Для ЭМУзО была создана специальная установка на базе токарного станка модели ИТ-1М. На установке обрабатывалась наружная цилиндрическая поверхность образца, закрепленного в оправке. Выбор и варьирование основных технологических факторов ЭМО и УзО (сила тока I , скорость обработки V , подача S , усилие прижатия рабочего инструмента P – для ЭМО; амплитуда колебания индентора, величина силы прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности $P_{ст}$, величина динамического воздействия P , форма и радиус рабочей части инструмента, подача S и др. – для УзО) осуществлялись на основании априорной информации.

Влияние комбинированной ЭМУзО на механические свойства оценивали по изменению микротвердости поверхности образца. Для получения данных о характере изменения механических свойств по глубине зондируемого слоя, делали срез поверхности образца. В последующем производили внедрение индентора прибора ПМТ-3 по схеме через равные расстояния. По диагоналям полученных отпечатков рассчитывали микротвердость на определенной глубине. По полученным значениям микротвердости строили зависимость микротвердости по глубине поверхностного слоя.

Параметры шероховатости определялись с использованием профилографа-профилометра мод. 252.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ЭМО сопровождается высокоскоростной закалкой поверхностного слоя стальных образцов (на глубину до 0,2-0,3 мм) с образованием бесструктурного мартенсита – гарденина, отличающегося повышенной твердостью и низкой травимостью (белый слой). Последующее поверхностное пластическое деформирование (ППД) поверхности увеличивает ее твердость, способствует образованию сжимающих напряжений, снижению шероховатости, что благоприятно влияет на ресурс деталей [9, 11].

ППД ультразвуковым инструментом, вследствие своих особенностей (высокой частоты, силы ударов, значительной скорости деформации) ведет к дальнейшему, хоть и незначительному, изменению микроструктуры по-

верхностного слоя [1,10]. При последующем динамическом воздействии на поверхностный слой улучшаются его механические свойства: увеличивается усталостная прочность, пределы текучести и прочности, износостойкость, твердость, увеличивается коррозионная стойкость, а также снижается параметр шероховатости R_a [7, 8].

Анализ полученных зависимостей изменения средних значений микротвердости поверхностного слоя стальных образцов после УзО, ЭМО и комбинированной ЭМУзО показывает (рис. 1), что ЭМО приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя на глубине 0,1 мм до 5200 МПа, что примерно на 20% превышает микротвердость, полученную после УзО на этой же глубине, и примерно в три раза превышает исходную микротвердость образцов. Комбинированная ЭМУзО способствует дальнейшему повышению микротвердости до 5400 МПа (примерно до 5-7% больше чем после ЭМО). Это связано с формированием электромеханической обработкой высокопрочного поверхностного слоя, практически не поддающегося поверхностному пластическому деформированию в результате последующих нагружений.

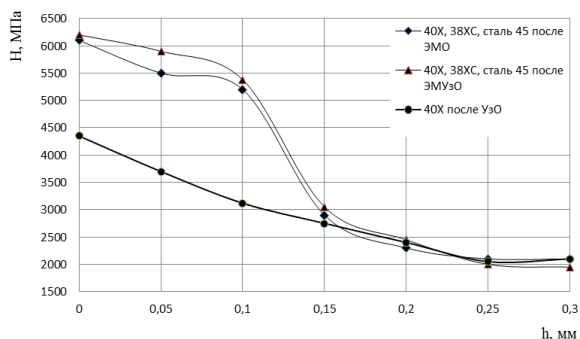


Рисунок 1 – Зависимость средних значений микротвердости поверхностного слоя стальных образцов после ультразвуковой (УзО), электромеханической (ЭМО) и комбинированной (ЭМУзО) обработок

Анализ полученных зависимостей среднего отклонения профиля R_a показывает, что после УзО наблюдается его снижение, по сравнению с исходной поверхностью, примерно в 4 – 4,5 раза, высота неровностей R_z при этом также уменьшается почти в 4 – 4,5 раза, а наибольшая высота профиля R_{max} в 3,5 – 4 раза.

В процессе электромеханической обработки на поверхности образуется полоса упрочнения, в форме винтовой канавки, с различной степенью как твердости [9, 11], так и шеро-

ховатости. Более высокие пики неровностей расположены по границам полос упрочнения, представляющее собой вторичную (остаточную) шероховатость, эти же области полос упрочнения имеют и минимум твердости, которые, как правило, в процессе приработки наиболее сильно изнашиваются. Чередование неровностей и канавок, образовавшихся при деформационном воздействии рабочего инструмента на поверхность, приводит к снижению шероховатости в сравнении с исходной поверхностью. Шероховатость может изменяться в достаточно широких пределах, вплоть до образования более высоких пиков – вторичной шероховатости, в зависимости от технологических режимов обработки и геометрических параметров рабочего инструмента.

Комбинированная ЭМУзО позволяет снизить параметр шероховатости R_a , в том числе за счет воздействия на пики неровностей расположенных на границах упрочненных полос, а более низкая твердость этих зон, в сравнении с центральной частью полос упрочнения, способствует их сглаживанию и получению более качественной поверхности. Таким образом, параметр шероховатости R_a после комбинированной обработки снижается почти в 3-6 раз, R_z в 1,5-2 раза, максимальная высота неровностей R_{max} снижается на 10-15 %.

Анализ профилограмм поверхности образцов из стали 45, обработанных различными способами: после УзО, после ЭМО, после комбинированной ЭМУзО, показывает, что профиль поверхности имеет периодический характер канавок и пиков макронеровностей. Полученный в процессе ЭМО, при термомеханическом воздействии рабочим инструментом на обрабатываемую поверхность с образованием винтовой канавки, макрорельеф претерпевает незначительные изменения после ультразвуковой обработки. При этом шаг канавки равен величине подачи инструмента в процессе ЭМО, а глубина впадины изменяется периодически и достигает максимума через одинаковые промежутки, соответствующие смещению инструмента на расстояние, превышающее ширину ленты контакта. Однако необходимо отметить, что на характер поверхности (макрорельеф) после ЭМО, в значительной степени влияют режимы обработки. Неоспоримой является лишь положительная динамика изменения качества поверхности после комбинированной ЭМУзО.

Анализ зависимостей средних значений шероховатости R_a от технологических режимов обработки (силы тока I, А, как основного технологического фактора ЭМО) при комби-

нированной ЭМУзО (рис. 2) показывает, что комбинированная ЭМУзО позволяет снизить параметр шероховатости. В случае электро-механической обработки поверхностей образцов рабочим инструментом – пластиной из твердого сплава Т15К6, наблюдается снижение R_a при силе тока в 200 А примерно в два раза. Дальнейшее увеличение силы тока приводит к постепенному снижению R_a и при силе тока в 500 А наблюдается незначительный рост параметра шероховатости, связанный с образованием на поверхности, так называемой, вторичной шероховатости. Проведение ультразвуковой обработки в единой технологической системе с ЭМО, осуществленной неподвижной пластиной из твердого сплава, позволяет получить более качественную поверхность. Так при ЭМУзО при силе тока в 100 А получен более низкий параметр шероховатости примерно в 2 раза в сравнении с ЭМО, дальнейшее увеличение силы тока при ЭМУзО приводит к незначительному снижению R_a . Например, при $I = 500$ А, параметр шероховатости снижается лишь на 20-25%. Это связано с исчерпанием возможности деформационных механизмов упрочнения стали после ЭМО. Образующийся высокопрочный поверхностный слой состоящий из ультрадисперсного мартенсита практически не поддается пластическим деформациям и механическому упрочнению. Дальнейшее увеличение силы тока практически не меняет параметр шероховатости, и лишь после 800 А наблюдается незначительное его снижение, связанное с образованием зон вторичного термического влияния.

Несколько отличается формирование параметров поверхностного слоя при обработке твердосплавными роликами. Так, электро-механическая обработка твердосплавными роликами приводит к образованию высоких пиков неровностей на границах соседних полос упрочнения, чередующихся с канавками, выдавленными в зоне контакта рабочего инструмента с поверхностью в процессе термодеформационного воздействия. Увеличение силы тока в процессе обработки приводит к повышению пластичности материала, тем самым увеличивая параметр шероховатости, при силе тока, например, в 600-700 А, в три раза. Дальнейшее увеличение силы тока не приводит к значительному увеличению параметра шероховатости. Комбинированная ЭМУзО положительно влияет на качество поверхности. Так при силе тока в 300-400 А шероховатость снижается примерно в 3 раза, а при силе тока в 600-700 А – в 5-6 раз.

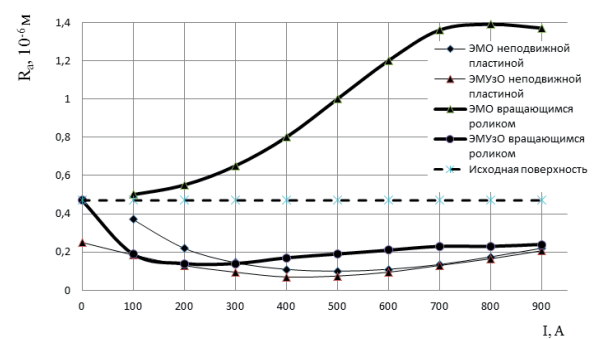


Рисунок 2 – Зависимость средних значений шероховатости R_a от технологических режимов обработки (силы тока I , А) при ЭМО и комбинированной ЭМУзО, выполненных твердосплавным рабочим инструментом: пластиной и роликом

В процессе электро-механоультразвуковой обработки поверхность образцов подвергается пластическому деформированию с образованием модифицированного слоя с большой концентрацией дислокаций, повышенной твердостью и невыраженной границей раздела с основным материалом, что позволяет замедлить формирование в поверхностном слое опасных концентраторов напряжений и усталостных трещин, блокируя развитие усталостных процессов в поверхностном слое, и повышая работоспособность детали.

ЭМУзО позволяет посредством измельчения структуры поверхностного слоя, формирования субструктуры в нижележащих слоях, значительного снижения шероховатости, повышения твердости поверхности, обеспечить высокие эксплуатационные свойства деталей трибузлов машин и механизмов.

ВЫВОДЫ

1. Комбинированный метод электро-механоультразвуковой обработки, сочетающий термомеханическое воздействие электро-механической обработки и поверхностное пластическое деформирование ультразвуковой обработки, позволяет формировать поверхностный слой стальных деталей с особыми свойствами: высокой прочностью, микротвердостью и низкими параметрами шероховатости. Экспериментальные исследования образцов, обработанных по данной технологии, позволили снизить шероховатость поверхности в 3-6 раз, увеличив при этом микротвердость поверхности в 2-4 раза.

2. Установлено, что значительное влияние на формирование микрогеометрии поверх-

ности при ЭМУзО оказывает, наряду с технологическими факторами, исходное качество поверхности, определяемое методами предшествующей обработки.

3. При ЭМУзО материал в зоне контакта пластически деформируется, происходит сглаживание вершин микронеровностей и упрочнение приповерхностного слоя с формированием сжимающих остаточных напряжений со значительным снижением шероховатости. Установлено, что при использовании в качестве рабочего инструмента для термомеханического воздействия на поверхностный слой неподвижной твердосплавной пластины достигается максимальная эффективность обработки в пределах значений силы тока в 500-700 А.

4. Повышение твердости поверхности стальных образцов обеспечивается высокоскоростной закалкой металла в ходе ЭМО с формированием в тонком поверхностном слое ультрадисперсной мартенситной структуры.

5. Комбинированная электромеханоультразвуковая обработка позволяет значительно повысить качество обработанной поверхности, увеличить твердость и снизить параметры шероховатости, сформировав тем самым благоприятный для трущихся пар микро- и макрорельеф.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белый, А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.

2. Аскинази, Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой / Б.М. Аскинази. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.

3. Эдигаров, В.Р. Классификация комбинированных методов обработки на основе электромеханического упрочнения / В.Р. Эдигаров, И.Ю. Килунин, В.В. Дегтярь // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – №3. – С. 32-36.

4. Эдигаров, В.Р. Технологии и оборудование комбинированных способов электромеханической обработки: монография / В.Р. Эдигаров. – Омск: ОАБИИ, 2014. – 280 с.

5. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: библиотека технолога / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

6. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

7. Косогоров, В.А. Комбинированное поверхностное упрочнение стальных сплавов на основе электромеханической и ультразвуковой обработок / В.А. Косогоров, В.П. Багмутов, И.Н. Захаров, Д.С. Денисевич, П.В. Косогорова // Известия ВолгГТУ. – 2014. – №1(128). – Т.7. – С. 10-14.

8. Багмутов, В.П. Комбинированное поверхностное упрочнение стальных и титановых сплавов на основе электромеханической и ультразвуковой обработок / В.П. Багмутов, И.Н. Захаров, А.П. Горунин, Е.Б. Захарова, Д.С. Денисевич, Л.В. Косогоров // Известия ВолгГТУ. – 2013. – №6(109). – Т.7. – С. 68-71.

9. Edigarov, V.R. The influence of process parameters of the electromechanical handling on its features. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2014. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005647 Publication Year: 2014, Page(s): 1-4 V.R. Edigarov, Litau E.V. Morgunov A.P.

10. Клименов, В.А. Ультразвуковое модифицирование поверхности и его влияние на свойства покрытий / В.А. Клименов, Ж.Г. Ковалевская, П.В. Уваркин [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7. – Специальный выпуск. – Ч. 2. – С. 157-160.

11. Эдигаров, В.Р. Комбинированная электромеханическая обработка с динамическим силовым воздействием / В.Р. Эдигаров, Е.В. Литая, В.В. Малый // Омский научный вестник. – 2015. – № 1(137). – С. 69-73.

COMBINED ELECTROMECHANOULTRASONIC PROCESSING OF SURFACE COATING OF MACHINERY

Vyacheslav R. Edigarov, Botagoz Sh. Alimbaeva, P S. Perkov

Abstract: Results of research of the combined electromechanoultrasonic processing (EMUsP) combining thermomechanical impact of electromechanical processing and superficial plastic deformation of ultrasonic processing are presented. Results of research of microhardness and microgeometry of a blanket of samples from various brands of steel, and also influence of some technological parameters on the main properties of a steel surface are given.

Keywords: *the combined processing, electromechanical processing, ultrasonic processing, a blanket, superficial plastic deformation, thermomechanical influence, high-speed hardening.*

Эдигаров Вячеслав Робертович (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры двигателей Омского автобронетанкового инженерного института (644098, Россия, г. Омск, 14-й военный городок, ОАБВИ, e-mail: edigarovs@mail.ru)

Алимбаева Ботагоз Шайдуловна (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии производства Омского автобронетанкового инженерного института (644098, Россия, г. Омск, 14-й военный городок, ОАБВИ, e-mail: botagoz.alimbaeva@mail.ru)

Перков Павел Сергеевич (Омск, Россия) – соискатель Омского автобронетанкового инженерного института (644098, Россия, г. Омск, 14-й военный городок, ОАБВИ, e-mail: perkovps1984@mail.ru)

Vyacheslav R. Edigarov (Omsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Engine Head of the Department Omsk Tank Automotive Engineering Institute (644098, 14 military City, OTAEI, Omsk, Russian Federation, e-mail: edigarovs@mail.ru)

Botagoz Sh. Alimbaeva (Omsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor Department of manufacturing technology Omsk Tank Automotive Engineering Institute (644098, 14 military City, OTAEI, Omsk, Russian Federation, e-mail: botagoz.alimbaeva@mail.ru)

P. S. Perkov (Omsk, Russian Federation) – Applicant at the Department of Omsk Tank Automotive Engineering Institute (644098, 14 military City, OTAEI, Omsk, Russian Federation, e-mail: perkovps1984@mail.ru)

