

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №1 (139). С. 31-37.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №1 (139). P. 31-37.

Научная статья
УДК 662.24
doi:10.30987/2223-4608-2023-1-31-37

Повышение износостойкости цилиндрических пар трения методом комбинированной обработки

Анна Петровна Яковлева¹, к.т.н.,
Али Юсупович Албагачиев², д.т.н.,
Олег Игоревич Кулаков³, аспирант
¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
^{2,3}ИМАШ РАН им. А.А. Благодирова, Москва, Россия
¹yakovleva525@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Авторами описан метод комбинированной обработки для получения модифицированных поверхностей. Представлены теоретическое и экспериментальное исследования шероховатости поверхности. Сравнительные испытания на износ показали преимущества предложенной технологии по сравнению с традиционными методами упрочнения – закалкой ТВЧ и электрохимической обработкой.

Ключевые слова: комбинированная обработка, износ, пары трения, упрочнение концентрированными потоками энергии, модифицированные поверхности

Благодарности: авторы выражают благодарность д.т.н., проф. Суслову Анатолию Григорьевичу за помощь и профессиональные советы, а так же д.т.н., проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана Федорову Сергею Константиновичу за помощь в подготовке экспериментов.

Для цитирования: Яковлева А.П., Албагачиев А.Ю., Кулаков О.И. Повышение износостойкости цилиндрических пар трения методом комбинированной обработки // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2023. – №1 (139). – С. 31-37. doi: 10.30987/2223-4608-2023-1-31-37.

Original article

Increasing wear resistance of cylindrical friction pairs by combined process work

Anna P. Yakovleva¹, Can.Sc.Tech.,
Ali Y. Albagachiev², Doc.Sc.Tech.,
Oleg I. Kulakov³, graduate student
¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
^{2,3}Institute of Machines Science RAS named after A.A. Blagonravov, Moscow, Russia
¹yakovleva525@mail.ru

Abstract. The authors have developed a combined processing method for obtaining modified surfaces. A theoretical and experimental study of surface undulation is presented. Comparative wear tests have shown the advantages of the proposed technology in comparison with traditional hardening methods - HFC hardening and electromechanical processing.

Keywords: combined processing, wear, friction pairs, hardening by concentrated energy flows, modified surfaces

Acknowledgments: the authors acknowledge Doctor of Technical Sciences, Prof. Suslov Anatoly Grigoryevich for his assistance and a word of advice, as well as Doctor of Technical Sciences, Professor of Bauman Moscow State Technical University, Sergey Fedorov for his assistance in preparing experiments.

For citation: Yakovleva A. P., Albagachiev A. Y., Kulakov O. I. Increasing wear resistance of cylindrical friction pairs by combined process work. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2023, no. 1 (139), pp. 31-37. doi: 10.30987/2223-4608-2023-1-31-37.

Повышение долговечности машин лимитируется, главным образом, долговечностью узлов и элементов трения [1 – 5].

Пары трения играют важную роль в машинах и механизмах (штоки, поршни, пробки, седла, золотники, пальцы, валки для размалывания неметаллических материалов). Это детали двигателей, насосов, прядильных машин (направляющие ролики, нитепроводники, натяжные устройства), культиваторов и др., которые применяют в строительной, автомобильной технике, сельхозтехнике и др. Большинство из них – цилиндрические, изготовленные из качественных углеродистых и легированных сталей с обязательным применением термической или химико-термической обработки.

Из-за низкой эксплуатационной надежности цилиндрических пар трения велик расход запасных частей [1, 3]. По данным центральных заводских лабораторий ОАО «КАДВИ», ОАО «РемПутьМаш», ОАО «Пермские моторы», ОАО «Калужский турбинный завод» и др. при проведении плановых ремонтных работ 80 % деталей имели повышенный износ. Также установлено, что наибольшее число отказов (до 80 %) обусловлено процессами изнашивания или комплексными причинами, где износ играет доминирующую роль [1, 6]. Анализ работ [3, 7] позволяет утверждать, что в основном это усталостный или абразивный износ.

Поэтому работы, направленные на повышение износостойкости пар трения всегда актуальны.

В последнее время интерес специалистов направлен на разработку и исследование методов комбинированного воздействия на поверхностный слой. За счет принципа суперпозиции расширяются возможности и области применения каждого отдельного метода и создается резерв для повышения эксплуатационных показателей.

В последние годы большое внимание специалистов уделяется методам обработки концентрированными потоками энергии. Эффективность этих методов доказана в трудах большого количества ученых – Андрияхина В.М., Головки Л.Ф., Григорьянца А.Г., Суслова А.Г., Губенко С.И., Коваленко В.С., Горленко О.А., Меркулова Г.В., Соколова А.А., Сафонова А.П., Гаврилова Г.Н., Матвеева Ю.И., Белашова И.С., Дьюли У., Мэйтленда А., Данна М., Хирда Г., Аскинази Б.М., Шиганова И.Н., Тарасовой Т.В. и др.

Методы упрочнения концентрированными потоками энергии исследовались достаточно подробно, однако, сочетание этих методов с

другими, например ППД, изучено недостаточно полно. Не исследовано влияние синергетического эффекта на износостойкость, влияние режимов обработки на получаемые свойства и качество модифицированных поверхностных слоев. Поэтому данная работа посвящена разработке и исследованию метода комбинированной обработки и влиянию режимов и конструктивных особенностей устройств на износостойкость цилиндрических пар трения.

Авторами разработан метод комбинированной обработки, который заключается в последовательном выполнении упрочняющей технологии и метода ППД [8]. После упрочнения одним из методов обработки концентрированным потоком энергии, например лазерной закалкой или электромеханической обработкой (ЭМО), на поверхности образуется упрочненный слой с благоприятными сжимающими остаточными напряжениями [9]. Затем алмазный выглаживатель, проходя по упрочненной поверхности, сглаживает неровности и снижает шероховатость поверхности. Получение благоприятного микрорельефа необходимо для пар трения, которые работают при высоких скоростях и интенсивных нагрузках [2].

В работе установлена взаимосвязь режимов и методов обработки и шероховатостью поверхности. Были выделены наиболее значимые факторы, которые оказывают влияние на изменение шероховатости поверхности при комбинированной обработке (ЭМО и алмазное выглаживание).

Обобщенные значения исследуемых факторов в действительных значениях, полный план матрицы планирования эксперимента выбирались на основании расчетов, возможностей используемого оборудования, предварительных опытов и опубликованных данных о проведенных ранее исследованиях. Обработка экспериментальных данных дала возможность оценить зависимость среднеарифметического отклонения профиля от режимов комбинированной обработки в виде регрессионной модели:

$$Ra = f(Ra_{исх}, I, P_1, v, S, l, P_2, r), \quad (1)$$

где $Ra_{исх}$ – исходная шероховатость после механической обработки; I – сила тока при упрочнении ЭМО; P_1 – сила прижима ролика-электрода при ЭМО; v – скорость обработки; S – подача; l – длина ролика-электрода; P_2 – сила прижима алмазного выглаживателя; r – радиус алмазного выглаживателя.

В ряде работ [2, 4, 5] шероховатость поверхности после теплового воздействия рекомендовано рассматривать как функцию:

$$Ra = f(Ra_{исх}, I, P_1, v, f, S_{кон}, \sin \varphi),$$

где $S_{кон}$ – площадь контакта теплового источника с поверхностью детали; $\sin \varphi$ – угол наклона теплового источника к обрабатываемой поверхности; f – коэффициент трения.

Используя рекомендации [4, 5] запишем:

$$Ra_{исх1} = 0,006 Ra_{исх}^{1,03} I^{1,03} P_1^{-0,4} v^{0,37} S^{0,35} h^{0,35} (\operatorname{tg} \varphi)^{0,68} [5]. \quad (3)$$

Для удобства расчетов обозначим (3) как C .

При комбинированной обработке (КО) на поверхность будут воздействовать последовательно два инструмента: при упрочняющей и отделочной технологиях. Поэтому, используя (1) шероховатость после КО можно представить:

$$Ra = K Ra_{исх}^a I^b P_1^c v^d S^e \sin \varphi^i, \quad (4)$$

где K – коэффициент, зависящий от материала детали и способов упрочнения поверхностного слоя; a, b, c, d, e – степени параметров комбинированной обработки.

Задача сводится к нахождению степеней a, b, c, d, e . Для решения этой задачи запишем:

$$\ln Ra = \ln C + x \ln P_2 + x \ln P_2^2 + y \ln r + y \ln r^2$$

$$\ln Ra = \ln C + x \ln P_i + y \ln r_j$$

$$\sum_{ik=1}^k \sum_{n=1}^{n_{ij}} (\ln Ra_{ik} - \ln C - x \ln P_i - y \ln r_j)^2 \rightarrow \min$$

Или упростим:

$$\sum_{m=1}^n (C_m - x a_m - y b_m)^2 \rightarrow \min.$$

Найдя производную, получим:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^n 2(C_m - x a_m - y b_m)(-a_m) = 0 \\ \sum_{m=1}^n 2(C_m - x a_m - y b_m)(-b_m) = 0 \end{cases}$$

$$Ra = 0,006 Ra_{исх}^{1,03} I^{0,03} P_1^{-0,4} v^{0,37} S^{0,35} l^{0,3} P_2^{-0,7} r^{0,12}, \quad (5)$$

где $Ra_{исх}$ – шероховатость поверхности до комбинированной обработки (после точения); I – сила тока; P_1 – сила прижима ролика-электрода; v – скорость вращения детали; S – подача; l – ширина ролика-электрода; P_2 – сила прижима алмазного выглаживателя; r – радиус сферы алмазного выглаживателя.

Для удобства расчетов была разработана компьютерная программа для вычисления параметра шероховатости по формуле (5) на языке Visual studio 2017 C#. Все данные заносятся в таблицу и на выходе получается значение параметра шероховатости в зависимости от режимов комбинированной обработки (рис. 1).

$$Ra = Ra_{исх1} (P_2^x r^y), \quad (2)$$

где $Ra_{исх1}$ – шероховатость после обработки концентрированными потоками энергии; P_2 – сила прижима алмазного выглаживателя к поверхности образца, r – радиус алмазного выглаживателя, x, y – значение степеней.

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^n a_m^2 + a_m b_m y - C_m a_m = 0 \\ \sum_{m=1}^n a_m b_m x + b_m y - C_m b_m = 0 \end{cases}$$

Проведем замену:

$$\begin{cases} Ax + Ly = U \\ Lx + By = V \end{cases}$$

Выразим из (14) A, B и L :

$$A = \sum a_m^2, B = \sum b_m^2, L = \sum a_m b_m.$$

Подставив полученные сокращения, получим значения x и y :

$$y(L^2 - AB) = LU - VA$$

$$y = \frac{LU - VA}{L^2 - AB}, \quad x = \frac{LV - BU}{L^2 - AB}.$$

Проведя обратную замену, получим искомые значения степеней для выражения (2).

Окончательная формула расчета шероховатости поверхности после КО для случая применения ЭМО и алмазного выглаживания:

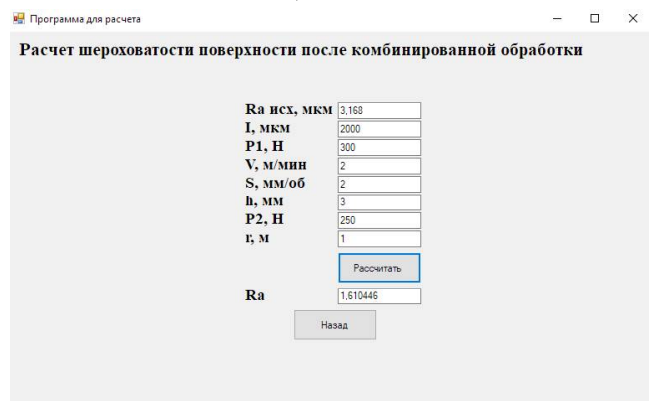


Рис. 1. Пример расчета шероховатости по разработанной программе

Для проверки адекватности представленной зависимости (5) были проведены экспериментальные исследования. Для этого были изготовлены образцы из сталей марок 45, 40Х, 20Х3МВФ, 40ХН2МА (рис. 2, а). Опытным путем найдены оптимальные режимы КО.

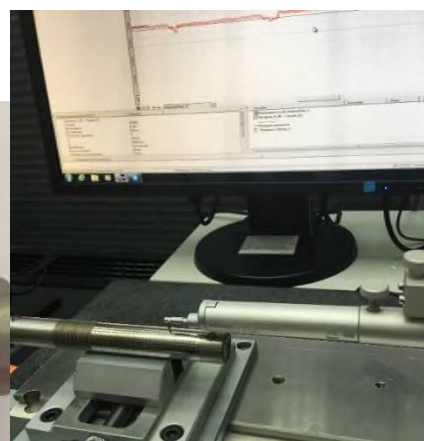
Режимы ЭМО: сила тока $I = 1000 \dots 3200$ А; напряжение $U = 2 \dots 6$ В; скорость вращения детали $v = 1,1 \dots 3,2$ м/мин; подача ролика-

электрода $S = 0,6 \dots 3,5$ мм/об.; ширина ролика-электрода $l = 2 \dots 4$ мм; сила прижима ролика-электрода $P = 200 \dots 350$ Н.

Режимы алмазного выглаживания: сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200 \dots 250$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02 \dots 0,04$ мм/об; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1$ мм; скорость вращения детали $v = 45$ м/мин.



а)



б)

Рис. 2. Исследование шероховатости поверхности после КО:

а – образцы для исследования; б – профилометр модели Tesa Rugosurf 90G

Исследование шероховатости поверхности проводили с использованием профилографа

Tesa Rugosurf 90G (рис. 2, б). Результаты исследований представлены в табл. 1.

1. Зависимость шероховатости поверхности от режимов КО

Материал образца	Режимы электромеханической обработки	Режимы алмазного выглаживания	Шероховатость поверхности; Ra , мкм
Сталь 45	$I = 2500$ А; $v = 1,2$ м/мин; $S = 1,5$ мм/об	$P = 250$ Н; $S = 0,02$ мм/об; $r = 1$ мм; $v = 45$ м/мин	0,402
40Х	$I = 2500$ А; $v = 1,2$ м/мин; $S = 1,5$ мм/об	$P = 200$ Н; $S = 0,04$ мм/об; $r = 1$ мм; $v = 45$ м/мин	0,793
40ХН2МА	$I = 2000$ А; $v = 2,1$ м/мин; $S = 2$ мм/об	$P = 220$ Н; $S = 0,02$ мм/об; $r = 1$ мм; $v = 45$ м/мин	1,522
20Х3МВФ	$I = 2800$ А; $v = 1,1$ м/мин; $S = 1,0$ мм/об	$P = 200$ Н; $S = 0,03$ мм/об; $r = 1$ мм; $v = 45$ м/мин	0,793

На рис. 3 представлены скриншоты с профилографов при измерении шероховатости

поверхности после комбинированной обработки.



Рис. 3. Результаты измерения образцов после КО (скриншоты с экранов профилографа)

Полученные результаты шероховатости позволяют предположить, что КО создаст резерв для повышения износостойкости. Для проверки этого предположения проведен ряд экспериментов. Исследование на износостой-

кость проводили на машине трения (рис. 4, а). Для исследования были изготовлены образцы из сталей марок 45 и 40Х и обработаны по нескольким вариантам (рис. 4, б). Методика проведения эксперимента описана в работе [10].

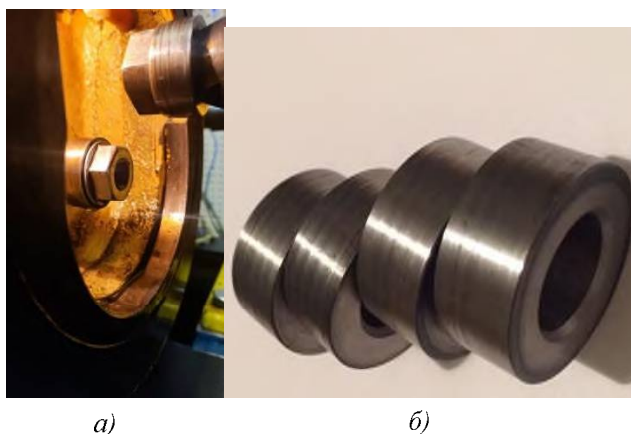


Рис. 4. Исследование износостойкости: а – машина трения; б – образцы для исследования

Результаты исследования представлены на рис. 5, 6. На рис. 5 представлены результаты линейного износа, а на рис. 6 результаты были

получены весовым методом, путем взвешивания образцов на аналитических весах (значение износа U в мг).

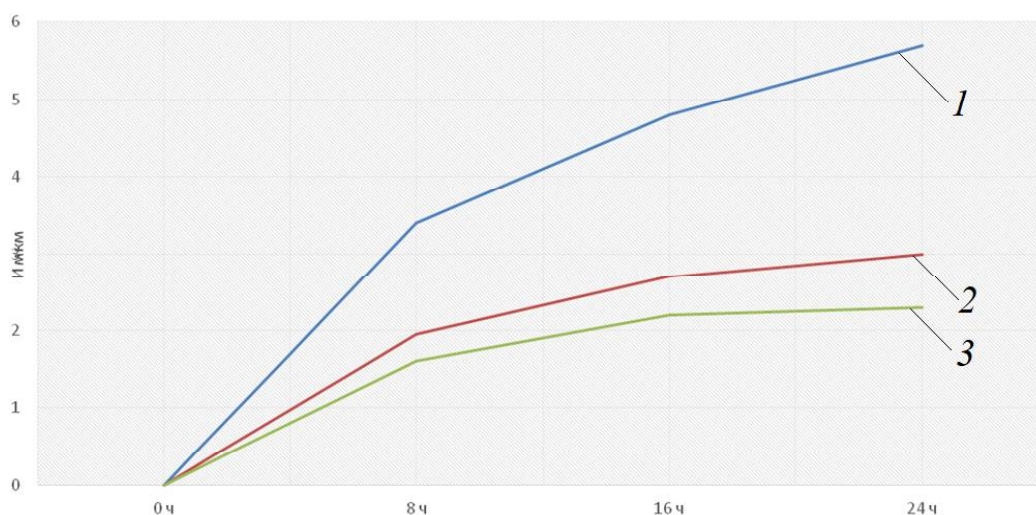


Рис. 5. Результаты исследования износа у образцов (сталь 45), обработанных разными методами: 1 – механическая обработка, ТВЧ, шлифование; 2 – механическая обработка, ЭМО; 3 – механическая обработка, КО

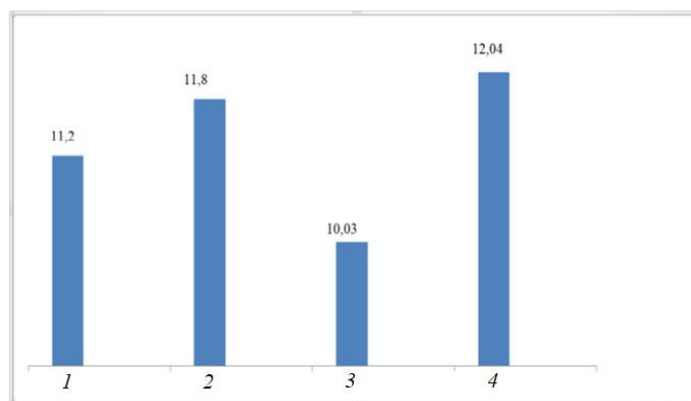


Рис. 6. Результаты исследования износа образцов, мг, (сталь 40Х), обработанных КО:

1 – электрохимическая обработка: $I=1400$ А; $U=4$ В; $P=300$ Н; $v=1,2$ м/мин; $S=3$ мм/об; алмазное выглаживание: $P=200$ Н; $S=0,02$ мм/об; $i=2$;
2 – электрохимическая обработка: $I=1600$ А; $U=4$ В; $P=300$ Н; $v=1,8$ м/мин; $S=3,5$ мм/об; алмазное выглаживание: $P=200$ Н; $S=0,02$ мм/об; $i=1$;
3 – электрохимическая обработка: $I=1400$ А; $U=4$ В; $P=300$ Н; $v=2$ м/мин; $S=2,8$ мм/об; алмазное выглаживание: давление – 200 Н; подача – 0,02 мм/об, число проходов алмазного инструмента – 1;
4 – электрохимическая обработка: $I=1000$ А; $U=4$ В; $P=300$ Н; $v=3,2$ м/мин; $S=2,8$ мм/об; алмазное выглаживание: $P=100$ Н; $S=0,02$ мм/об, $i=1$.

Экспериментальное исследование износостойкости показало преимущества разработанного метода комбинированной обработки. Износ образцов, обработанных по предлагаемой технологии меньше в 3 раза по сравнению с образцами, обработанными закалкой ТВЧ и в 1,5 раз меньше по сравнению с образцами, обработанными ЭМО.

Анализ испытаний показал, что оптимальная сила тока при ЭМО больше 1000 А, применение силы тока меньше этого значения не целесообразно.

Таким образом, с единых теоретических позиций впервые разработан метод получения модифицированных поверхностей последовательным воздействием на поверхностный слой концентрированными потоками энергии и алмазным выглаживанием; на основе проведения многофакторного эксперимента выведена экспериментальная зависимость шероховатости от режимов КО; для инженерных расчетов разработана компьютерная программа. Экспериментальные исследования показали, что значение шероховатости поверхности после КО значительно ниже, чем после ЭМО. В результате экспериментальных исследований были установлены оптимальные режимы обработки и введены ограничения их значений рациональными диапазонами. Разработанный метод КО можно использовать для изготовления пар трения, работающих в условиях повышенного износа.

Данная статья будет полезна инженерам и научным работникам, которые занимаются вопросами повышения эксплуатационных показате-

телей машин и механизмов, содержащих цилиндрические пары трения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Власов, В.М., Нечаев, Л.М. Работоспособность высокопрочных термодиффузионных покрытий в узлах трения машин. – Тула: Приокск. кн. изд-во, – 1994. – 235 с.
2. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под редакцией А. Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение – 2022. – 552 с.
3. Сулима, А.М., Шудов, В.А., Ягодкин, Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, – 1988. – 237 С.
4. Суслов, А.Г. Комплексные исследования качества поверхностного слоя деталей машин // Технологическое управление качеством поверхности деталей: Сб. науч. тр. – Киев. – 1998. – С. 21-27.
5. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, – 1987. – 208 с.
6. Фадеев, Л.Л., Албагачиев, А.Ю. Повышение надежности деталей машин. М.: Машиностроение, – 1993. – 95 с.
7. Grigor'yants, A.G., Shiganov, I.N. Development of Domestic Equipment for Laser Additive Technologies by Melting Metallic Powders. Russian Metallurgy (Metally), 2020, 2020(6), P. 649 – 653
8. Fedorov, S., Albagachiev, A., Isaenkova, M., Yakovleva, A., Zaripov, V., Minushkin, R. The effect of combined processing schedules on the value and nature of residual stresses in the surface layer of cylindrical friction pairs. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. electronic edition. 2019. С. 012032.
9. Yakovleva, A., Dubov, A., Sobranin, A., Karпович, E., Marchenkov, A. Technological heredity effect on fatigue strength of hydropower plant parts after combined processing. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference «Hydraulics».

Bauman Moscow State Technical University. 2020. С. 012029.

10. Fedorov, S.K., Yakovleva, A.P., Perepelkin, Y. K. Controlling the properties of the surface layers of parts by forming regular micro-reliefs. Materials Science Forum. 2020. Т. 989. С. 182-186.

REFERENCES

1. Vlasov, V.M., Nechaev, L.M. Operability of high-strength thermodiffusion coatings in the friction units of machines, Tula: Priokskoe izdatel'stvo, 1994, 235 p. (in Russian).

2. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of machine-building products / A. G. Suslov, V. P. Fedorov, O. A. Gorlenko [et al.]; edited by A. G. Suslov, 2022, 552 p.

3. Sulima, A.M., Shutov, V.A., Yagodkin, Yu.D. Surface layer and operational properties of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 237p.

4. Suslov, A.G. Complex studies of the surface layer quality in machine parts. Technological quality management of the surface of parts: Proceedings, Kiev, 1998, pp. 21-27.

5. Suslov, A.G. Technological support of machinery surface layer state parameters.-Moscow: Mashinostroenie,

1987, 208 p.

6. Fadeev, L.L., Albagachiev, A.Yu. Improving the reliability of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 95 p.

7. Grigor'yants, A.G., Shiganov, I.N. Development of Domestic Equipment for Laser Additive Technologies by Melting Metallic Powders. Russian Metallurgy (Metally), 2020, 2020(6), pp. 649 – 653

8. Fedorov, S., Albagachiev, A., Isaenkova, M., Yakovleva, A., Zaripov, V., Minushkin, R. The effect of combined processing schedules on the value and nature of residual stresses in the surface layer of cylindrical friction pairs. Proceedings: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. electronic edition. 2019. p. 012032.

9. Yakovleva, A., Dubov, A., Sobranin, A., Karpo-vich, E., Marchenkov, A. Technological heredity effect on fatigue strength of hydropower plant parts after combined processing. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference «Hydraulics». Bauman Moscow State Technical University. 2020. p.012029.

10. Fedorov, S.K., Yakovleva, A.P., Perepelkin, Yu.K. Controlling the properties of the surface layers of parts by forming regular micro-reliefs. Materials Science Forum. 2020. Vol. 989. pp.182-186

Вклад авторов: Яковлева Анна Петровна – идея, сбор материала, написание статьи; Албагачиев Али Юсупович – обработка материала, научное редактирование текста; Кулаков Олег Игоревич – проведение эксперимента. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: Yakovleva Anna Petrovna – idea, collection of material, writing an article; Albagachiev Ali Yusupovich – material processing, scientific text editing; Kulakov Oleg Igorevich – conducting an experiment. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.11.2022; одобрена после рецензирования 22.11.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 15.11.2022; approved after reviewing 22.11.2022; assepted for publication 25.11.2022

