

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №3 (141). С.12-18.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 12-18.

Научная статья  
УДК 662.24  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-18

## Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в научноёмких технологиях

Али Юсупович Албагачиев<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Анна Петровна Яковлева<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> ИМАШ РАН им. А.А. Благодирова, Москва, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup> yakovleva525@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Представлена теоретическая зависимость остаточных напряжений от режимов комбинированной обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала при влиянии фактора наследственности. Адекватность зависимости подтверждена экспериментальным исследованием.

**Ключевые слова:** комбинированная обработка, упрочнение концентрированными потоками энергии, модифицированные поверхности, остаточные напряжения, технологическая наследственность

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность д.т.н., проф. Суслову А.Г., коллективу кафедры «Физические проблемы материаловедения» НИЯУ МИФИ и лично профессору Исаенковой М.Г. и аспиранту Минушкину Р.А. за помощь и добрые советы.

**Для цитирования:** Албагачиев А.Ю., Яковлева А.П. Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в научноёмких технологиях // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 3 (141). С.11–17. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-18

## Application of combined action methods for the surface layer of machine parts in science-intensive technologies

Ali Yu. Albagachiev<sup>1</sup>, D. Eng.,  
Anna P. Yakovleva<sup>2</sup>, Ph.D. Eng.

<sup>1</sup> IMS RAS named after A.A. Blagodarov, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> yakovleva525@mail.ru

**Abstract:** Residual potential theoretical dependence upon the modes of combined machining operations and physical and mechanical properties of the processed material under the influence of the inheritance factor is presented. Experimental evidence of dependence sufficiency is given.

**Keywords:** combined machining operation, hardening by concentrated flow of energy, mod-ified surfaces, residual potential, technological heredity

**Acknowledgments:** The authors acknowledge help of the Doctor of Technical Sciences, Professor Suslov A.G., the head of the Department of "Physical Problems of Materials Science" of the NNRU MPhI, enclose gratitude for Professor Isaenkova M.G. personally and graduate student Minushkin R.A. for their assistance and sound advice.

*For citation:* Albagachiev A.Y., Yakovleva A.P. Application of combined action methods for the surface layer of machine parts in science-intensive technologies. / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 3 (141). P. 11–17. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-18

Основным направлением исследований в области наукоемких технологий стало проектирование и создание комбинированных методов обработки. Анализ известных физических воздействий и их разновидностей дает основания утверждать, что при различных сочетаниях имеющихся способов можно спроектировать большое количество новых техпроцессов, имеющих высокие эксплуатационные показатели. Это направление следует рассматривать как новый этап развития технологии обработки [1 – 4].

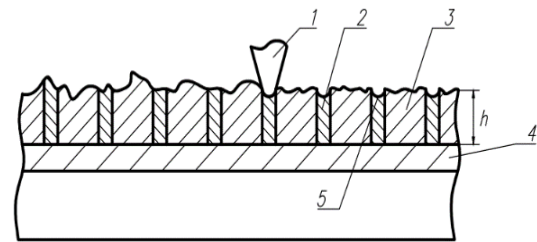
В настоящее время внимание специалистов уделяется методам обработки концентрированными потоками энергии. Эффективность этих методов доказана в трудах большого количества ученых [1, 3 – 6]. Большой вклад в развитие этого направления внесли Суслов А.Г., Горленко А.О., Григорьянц А.Г., Смоленцев В.П., Федоров С.К. и др. Методы обработки концентрированными потоками энергии изучены достаточно подробно. Однако сочетание с другими методами, на пример, поверхностной пластической деформацией (ППД), изучен недостаточно. Не исследовано влияние методов и режимов обработки на состояние поверхностного слоя, в том числе наследственное влияние режимов обработки на остаточные напряжения в поверхностном слое.

Поэтому данная статья посвящена исследованию остаточных напряжений и их распределению в поверхностном слое после упрочнения концентрированными потоками энергии и ППД.

Для решения поставленной задачи авторами был разработан метод комбинированной обработки (КО), который заключается в последовательном выполнении упрочнения одним из методов обработки концентрированными потоками энергии (на пример – лазерной закалкой или электромеханической обработкой) и методом ППД (на пример – алмазным выглаживанием) [7 – 9].

Теоретическими предпосылками для разработки представленного метода является анализ достоинств и недостатков методов упрочнения концентрированными потоками энергии. Особенностью этих методов является

наличие зон отпуска. В этих зонах наблюдается некоторое понижение твердости (рис. 1) [6]. Методы ППД благоприятно воздействуют на поверхностный слой, особенно после термического воздействия [7 – 9]. Поэтому было выдвинуто предположение, что наложение слоев позволит создать в поверхностном слое сжимающие остаточные напряжения. Моделирование процесса КО представлено на рис. 1.



**Рис. 1. Моделирование процесса КО**

1 – алмазный выглаживатель; 2 – зоны отпуска; 3 – упрочненный слой; 4 – основной металл; 5 – винтовые канавки после алмазного выглаживания;  $h$  – глубина упрочнения

После обработки концентрированными потоками энергии в поверхностном слое образуется упрочненный слой с незначительными сжимающими остаточными напряжениями. Алмазный выглаживатель проходя по поверхности образует новый слой и за счет увеличения плотности дислокаций может многократно увеличить значение сжимающих остаточных напряжений, а попадая в зону отпуска образует винтовые канавки. Так же необходимо учитывать и наследственное влияние режимов обработки на величину и знак остаточных напряжений.

В работе представлена теоретическая зависимость остаточных напряжений от режимов и физико-механических свойств материала. Авторы определяли напряжения первого рода, как наиболее значимые с точки зрения промышленного применения. Остаточные напряжения определяли для двух вариантов комбинированной обработки: первый вариант – ЭМО и алмазное выглаживание; второй вариант – лазерная закалка и алмазное выглаживание.

Остаточные напряжения будут складываться из нескольких составляющих:

температурная – на которую будет оказывать влияние режимы обработки концентрированными потоками энергии; структурно-фазовая – составляющая, которая будет зависеть от физико-механических свойств материала на всех этапах обработки; механическая – на которую будет оказывать влияние режимы алмазного выглаживания.

При теоретическом исследовании влияния режимов комбинированной обработки на величину и характер остаточных напряжений в поверхностном слое использовали зависимость:

$$\sigma_{ост} = \sigma_{темп} + \sigma_{\phi} + \sigma_{мех}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{темп}$  – температурные остаточные напряжения;  $\sigma_{\phi}$  – структурно-фазовые остаточные

напряжения;  $\sigma_{мех}$  – механические остаточные напряжения.

Для первого варианта комбинированной обработки с применением в качестве упрочняющей обработки ЭМО составляющие формулы (1) будут иметь вид:

$$\sigma_{темп}(z) = \alpha E \Delta\theta(z), \quad (2)$$

где  $z$  – текущая координата, определяющая глубину упрочненного поверхностного слоя;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала детали;  $\Delta\theta(z)$  – максимальная температура на глубине ( $z$ ), поверхностного слоя детали.

Максимальную температуру в зоне упрочнения можно представить:

$$\Delta\theta(z) = \alpha E \frac{(1-\alpha_T)(P_g v_p + N)}{\lambda_1 A \sqrt{\pi}} \left\{ \left(1 - \frac{t}{\Delta t}\right) t \left[ 2\sqrt{at} \cdot e^{\left(-\frac{z^2}{4at}\right)} - \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right] - \frac{1}{2a} \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{\Delta t}\right) \cdot \left[ \frac{(2\sqrt{at})^3 e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)}}{3} - \frac{4z^2 e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} \sqrt{at}}{3} + \frac{2}{3} z^3 \cdot \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right] - \frac{1}{80a^2 \Delta t} \left[ (2\sqrt{at})^5 e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} - \frac{2}{3} z^2 (2\sqrt{at})^3 \cdot e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} + \frac{4}{3} z^4 2\sqrt{at} \cdot e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} - \frac{4}{3} z^5 \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right] \right\}. \quad (3)$$

Формула (3) является сложной для расчетов и можно воспользоваться вариантом для приближительных расчетов:

$$\Delta\theta(z) = \alpha E \frac{2\alpha_T(P_g v_p + IU)}{\lambda_1 A \sqrt{\pi}} \left( \sqrt{at} e^{\left(-\frac{z^2}{4at}\right)} \right), \quad (4)$$

где  $z$  – текущая координата, м;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала детали;  $\alpha_T$  – коэффициент распределения тепловых потоков (коэффициент теплопоглощения Шарона);  $P_g$  – приведенная сила прижима инструмента при комбинированной обработке;  $v_p$  – скорость вращения детали;  $I$  – сила тока;  $U$  – напряжение;  $\lambda_1$  – теплопроводность материала детали;  $A = l \cdot B$ , где  $B$  – ширина упругого контакта ролика по Герцу;  $l$  – длина касания инструмента с обрабатываемой поверхностью (ширина ролика-электрода), м;  $a$  – температуропроводность материала детали, м<sup>2</sup>/с;  $t$  – время контакта, с;  $\operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)$  – значение функции ошибок.

Структурно-фазовые остаточные напряжения  $\sigma_{\phi}$  можно определить по формуле:

$$\sigma_{\phi} = -E \left(1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}}\right), \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости материала;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность материала до и после обработки соответственно.

Механические остаточные напряжения возникают за счет действия на материал детали усилия при алмазном выглаживании:

$$\sigma_{мех}(z) = -\frac{P_g}{\pi} \cdot \left[ \frac{3}{2(r^2 + z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln\left(\frac{z}{2r}\right) - \frac{3}{10r^2} \right], \quad (6)$$

где  $z$  – текущая координата;  $P_g$  – приведенная сила, которая рассчитывается по формуле:

$$P_g = \sum_{i=1}^n P_i,$$

где  $P_i$  – сила прижима электрода-инструмента и алмазного выглаживателя;  $r$  – радиус алмазного выглаживания.

Подставляя (2), (5) и (6) в (1) получим формулу для расчета остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое детали после комбинированной обработки:

$$\sigma_{\text{ост}} = \alpha E \frac{2\alpha_{\tau}(P_g v_p + IU)}{\lambda_1 l_{\text{инс}}^2 \sqrt{\pi}} \left( \sqrt{at} e^{\left(\frac{-z^2}{4at}\right)} \right) - \frac{P_g}{\pi} \cdot \left[ \frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln\left(\frac{z}{2l_{\text{инс}}}\right) - \frac{3}{10r^2} \right] + E \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right). \quad (7)$$

Для второго варианта комбинированной обработки с применением лазерной заковки в

качестве упрочняющей обработки формула (1) будет иметь вид:

$$\sigma_{\text{ост}} = \alpha E \frac{2(1-R)q}{\lambda} - \frac{P_g}{\pi} \cdot \left[ \frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln\left(\frac{z}{2r}\right) - \frac{3}{10r^2} \right] + E \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right), \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{темп}}(z) = \alpha E \Delta\theta(z),$$

$$\Delta\theta(z) = \frac{2(1-R)q}{\lambda} (\sqrt{at} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{at}}\right] - \sqrt{a(t-\tau)} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}}\right]),$$

где  $R$  – коэффициент отражения материала,  $q$  – плотность мощности лазерного излучения.

Для простоты расчета используем зависимость:

$$\sigma_{\text{темп}}(z) = \alpha E \frac{2(1-R)q}{\lambda}. \quad (9)$$

Структурно-фазовые остаточные напряжения рассчитаем по формуле (5). Механические остаточные напряжения будут зависеть от режимов алмазного выглаживания:

$$\sigma_{\text{мех}}(z) = -\frac{P}{\pi} \cdot \left[ \frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln\left(\frac{z}{2r}\right) - \frac{3}{10r^2} \right], \quad (10)$$

где  $P$  – сила прижима инструмента;  $r$  – радиус алмазного выглаживателя.

Для удобства расчетов была разработана компьютерная программа для вычисления параметра остаточных напряжения по формулам (7, 8) на языке Visual studio 2017 C# [8].

Проверку адекватности полученных теоретических зависимостей (7, 8) проводили на образцах, изготовленных из стали 45,

20Х3МВФ и 40Х (рис. 2) рентгеновским методом оценки, как наиболее точным. Методика исследования подробно изложена в [9]. В работе проведен рентгеноструктурный анализ поверхностных слоев после различных этапов комбинированной обработки – механической обработки, обработки концентрированными потоками энергии и алмазном выглаживании (табл. 1 – 3).

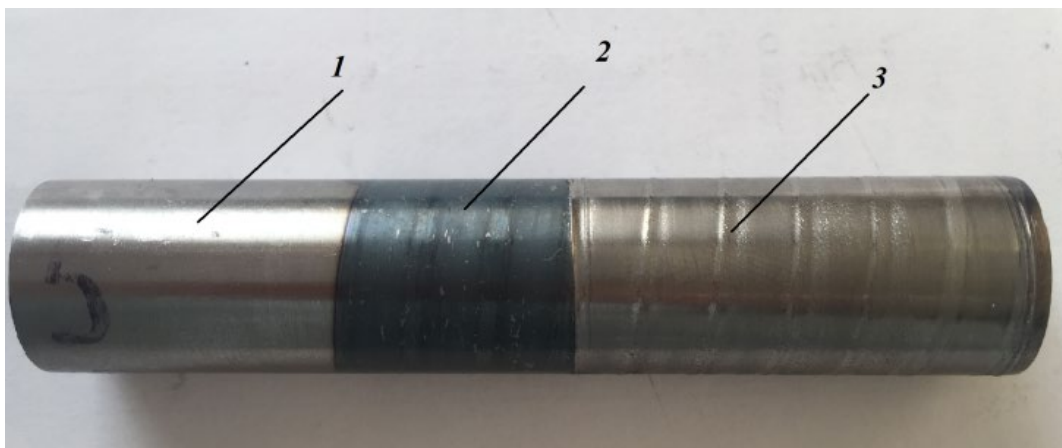


Рис. 2. Образцы для проверки адекватности теоретических зависимостей:

1 – область исследования после механической обработки; 2 – область исследования после обработки концентрированными потоками энергии; 3 – область после алмазного выглаживания

**1. Значения остаточных напряжений, межплоскостных расстояний и полуширины после каждого этапа обработки (сталь 45)**

№ образца	№ точки на образце	Обработка	Напряжения, МПа		a, А	FWHM, град.
			Осевые	Окружные		
1	1	МО	- 504 ± 54	- 524 ± 138	2,8717	1,2322
	2	ЭМО	- 554 ± 15	- 579 ± 406	2,8684	2,3448
	3	АВ	-1235 ± 119	- 1237 ± 293	2,8802	2,2039
	4	МО	- 214 ± 19	- 214 ± 74	2,8721	1,2063
	5	ЭМО	- 567 ± 128	- 436 ± 23	2,8694	1,6070
	6	АВ	- 1258 ± 96	- 1410 ± 31	2,8785	2,2343
3	1	МО	- 424 ± 23	- 230 ± 45	2,8708	1,4541
	2	ЭМО	- 488 ± 81	- 339 ± 238	2,8708	1,7255
	3	АВ	- 1178 ± 37	- 939 ± 176	2,8800	2,2848
	4	ЭМО	- 167 ± 100	- 94 ± 226	2,8697	1,6419
	5	МО	- 164 ± 18	94 ± 161	2,8692	1,4004
	6	АВ	- 1020 ± 300	- 949 ± 47	2,8789	2,2539
	7	ЭМО	- 300 ± 84	- 142 ± 79	2,8691	1,9071
	8	МО	- 287 ± 13	131 ± 123	2,8705	1,4248
5	1	МО	- 348 ± 46	- 405 ± 152	2,8710	1,3638
	2	АВ	- 1142 ± 72	- 1568 ± 354	2,8771	2,9638
	3	АВ	-1 370 ± 20	- 940 ± 173	2,8801	2,3827
	4	ЭМО	- 380 ± 89	191 ± 131	2,8689	1,6080
	5	МО	- 167 ± 26	52 ± 25	2,8698	1,4710

МО – механическая обработка; ЭМО – электрохимическая обработка; АВ – алмазное выглаживание

**2. Значения остаточных напряжений, межплоскостных расстояний и полуширины после каждого этапа обработки (сталь 20Х3МВФ)**

Обработка	Напряжения, МПа		a, А	FWHM, град.
	Осевые	Окружные		
Механическая обработка	- 125 ± 53	- 147 ± 44	2,8682	0,4110
Электрохимическая обработка	- 554 ± 15	- 479 ± 406	2,8684	2,3448
Алмазное выглаживание	- 1235 ± 119	- 1237 ± 293	2,8802	2,2039
Алмазное выглаживание	- 1142 ± 72	- 1568 ± 354	2,8771	2,9638
Электрохимическая обработка	- 180 ± 89	- 191 ± 131	2,8689	1,6080

3. Значения остаточных напряжений, межплоскостных расстояний и полуширины после каждого этапа обработки (сталь 40X)

Обработка	Напряжения, МПа		a, А	FWHM, град.
	Осевые	Окружные		
Механическая обработка	- 145 ± 33	52 ± 48	1,9682	0,4220
Электромеханическая обработка	- 572 ± 25	- 521 ± 426	2,8672	2,3548
КО (ЭМО и алмазное выглаживание)	- 1355 ± 121	- 1251 ± 203	2,8892	2,4039
КО (лазерная закалка и алмазное выглаживание)	- 1156 ± 52	- 1488 ± 314	2,8671	2,9634
Лазерная закалка	- 480 ± 89	- 691 ± 131	2,8579	2,6080

Таким образом, было установлено, что высказанное ранее предположение о положительном наследственном влиянии ППД на величину остаточных напряжений в поверхностном слое после комбинированной обработки оказалось верным. Анализ табл. 1 – 3 показал, что после механической обработки в поверхностном слое образуются растягивающие и сжимающие напряжения. После воздействия концентрированными потоками энергии в поверхностном слое происходят процессы наследственности и самоорганизации, которые способствуют образованию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. После алмазного выглаживания происходит деформация кристаллической решетки и увеличиваются плотности дислокаций, а значение сжимающих остаточных напряжений увеличивается в 2 – 3,3 раза. Структура и свойства сердцевины, при этом, не претерпевают каких-либо изменений.

Исследование показало, что комбинированием различных методов можно получать поверхности с новыми свойствами, при КО действует принцип суперпозиции – сочетание методов дает такой эффект, которого нельзя достигнуть каждым методом в отдельности. Это доказано при исследовании остаточных напряжений после каждого этапа обработки.

Следовательно, современный этап развития техники связан с разработкой инновационных технологий, получением поверхностей с

новыми свойствами и использованием комбинированных методов обработки.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общей ред. А.Г. Суслова. М: Машиностроение, 2006. 448 с.
2. Григорьев С.Н., Смоленцев Е.В., Волосова М.А. Технология обработки концентрированными потоками энергии. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 220 с.
3. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под редакцией А.Г. Суслова. 2022. 552 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. 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
7. 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. 012032.
8. Yakovleva A.P., Albagachiev A.Y. Theoretical Investigation of the Influence of Combined Machining Modes on the Value and Character of Residual Stresses in the Surface Layer of Cylindrical Friction Pairs // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49(3). P. 237–242

9. Yakovleva A., Isaenkova M., Minushkin R. The Effect of Combined Processing on Residual Stresses in the Surface Layer of Power Plant Parts // Materials. 2022. Vol. 15(2). 420.

#### REFERENCES

1. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A., et al. Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv detalei i ikh soedinenii [Technological Means of Ensuring Satisfactory Operational Properties of Machine Parts and Joints] under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 448 p. (in Russian).

2. Grigoriev S.N., Smolentsev E.V., Volosova M.A. Tekhnologiya obrabotki kontsentririvannymi potokami energii [Technology of processing by concentrated streams of energy]. Stary Oskol: TNT, 2009. 220 p. (in Russian).

3. Suslov A. G., Fedorov V. P., Gorlenko O. A. et al. Fundamentals of technological support and reliability improvement of mechanical engineering articles. Edited by A. G. Suslov. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2022. 552 p.

4. Suslov A.G. Kompleksnie issledovaniya kachestva poverhnostnogo sloya detaley [Complex studies of the quality of the surface layer of machine parts. Tehnologicheskoe upravlenie kachestvom poverhnostnogo sloya detalei: Sb. nauch. tr., Kiev, 1998. pp. 21–27. (in Russian).

5. Suslov A.G. Tehnologicheskoe obespechenie parametrov sostoyaniya poverhnostnogo sloya detaley [Technological support of the state parameters of the surface layer of parts], Moscow: Mashinostroenie, 1987, 208 p. (in Russian).

6. 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

7. 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 // The collection: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. electronic edition. 2019. 012032.

8. Yakovleva A.P., Albagachiev A.Y. Theoretical Investigation of the Influence of Combined Machining Modes on the Value and Character of Residual Stresses in the Surface Layer of Cylindrical Friction Pairs. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49(3). P. 237–242

9. Yakovleva A., Isaenkova M., Minushkin R. The Effect of Combined Processing on Residual Stresses in the Surface Layer of Power Plant Parts // Materials. 2022. Vol. 15(2). 420.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.01.2023; одобрена после рецензирования 09.02.2023; принята к публикации 13.02.2023.

The article was submitted 27.01.2023; approved after reviewing 09.02.2023; assepted for publication 13.02.2023.

