

**СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ / WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES**

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.36>

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН**

Научная статья

**Тимохова О.М.<sup>1,\*</sup>, Тимохов Р.С.<sup>2</sup>, Войнаш С.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0003-3179-6382;

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0002-1474-7610;

<sup>3</sup>ORCID : 0000-0001-5239-9883;

<sup>1,2</sup> Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Российская Федерация

<sup>3</sup> Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (chonochka[at]mail.ru)

**Аннотация**

В последнее время наблюдаются некоторые проблемы с поставкой комплектующих и запасных частей для различного вида технологических машин и специальной техники и, как следствие, остро стоит задача в организации и обеспечении импортозамещения отечественной и зарубежной лесной техники. Кроме того, необходимо обеспечить ремонтные производства современными технологиями восстановления изношенных деталей и упрочнения новых. В некоторых странах Европы на рынке запасных частей преобладают восстановленные детали, так как они в 1,5-2,5 раза дешевле новых, а по ресурсу, как правило, не уступают им. В статье представлены зависимости факторов, влияющих на параметры технологического процесса восстановления, и представлены в виде регрессионных уравнений. Определенные параметры распределения факторов прочности и износостойкости, позволили определить разные диапазоны, в которых эти факторы меняются, что в дальнейших исследованиях создает возможность для последующего анализа результатов восстановления.

**Ключевые слова:** восстановление, ремонт, износ, газотермическое напыление, прочность сцепления, качество, оптимизация.

**AN EVALUATION OF THE OPPORTUNITY TO OPTIMISE TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THE RESTORATION AND HARDENING OF FOREST MACHINE PARTS**

Research article

**Timokhova O.M.<sup>1,\*</sup>, Timokhov R.S.<sup>2</sup>, Voinash S.A.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0003-3179-6382;

<sup>2</sup>ORCID : 0000-0002-1474-7610;

<sup>3</sup>ORCID : 0000-0001-5239-9883;

<sup>1,2</sup> Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation

<sup>3</sup> Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

\* Corresponding author (chonochka[at]mail.ru)

**Abstract**

In recent times, there have been some problems with the supply of components and spare parts for various types of technological machinery and special equipment and, as a consequence, there is an urgent need to organize and ensure import substitution of domestic and foreign forestry machinery. In addition, it is essential to provide repair plants with modern technologies for restoring worn parts and strengthening new ones. In some European countries restored parts prevail on the market of spare parts, as they are 1.5-2.5 times cheaper than new ones, and as a rule, are as good in their service life. The article presents the dependencies of factors influencing parameters of the technological process of restoration and is presented in the form of regression equations. Determined parameters of the distribution of strength and wear resistance factors, allowed to determine different ranges in which these factors change, which in further research creates the possibility for subsequent analysis of the results of restoration.

**Keywords:** restoration, repair, wear, gas thermal spraying, adhesion strength, quality, optimization.

**Введение**

Согласно созданному Минпромторгом проекту стратегии развития отечественной промышленности на период до 2035 года, остро стоит необходимость в увеличении до 75% доли отечественных компонентов в продукции 10 ключевых отраслей производства, среди которых следует отметить тяжелое и транспортное машиностроение.

Последние годы показали, что в стране серьезные проблемы с поставкой комплектующих и запасных частей для различных технологических машин, а, следовательно, остро стоит задача в обеспечении импортозамещения отечественной и зарубежной лесной техники, а также обеспечения современными технологиями восстановления изношенных деталей и упрочнения новых. В экономически развитых странах на рынке запасных частей восстановленные детали преобладают, они в 1,5-2,5 раза дешевле новых, а по ресурсу, как правило, не уступают им [1], [2], [3].

Экономическая целесообразность восстановления деталей машин подтверждается тем, что около 45% деталей, вышедших из строя из-за допустимого износа, могут быть использованы повторно, около 50% деталей эксплуатируются после восстановления [1], [5].

Существует значительное множество различных технологий восстановления деталей лесных машин, которые по своему эффективны и важны: сварка и наплавка, пластическое деформирование, слесарно-механическая обработка, гальванические покрытия, газотермическое напыление [3], [4].

Главной задачей для сокращения расходов является качественное восстановление деталей лесных машин, которое возможно достичь путем учета всех факторов, влияющих на процесс восстановления, и оптимизации технологических процессов.

### Методика исследований

Для организации технологического процесса восстановления необходимо учитывать следующие факторы [2], [6], [7]:

- воздействующие на технологический процесс;
- управляемые или неуправляемые;
- основные или второстепенные;
- влияние на качество восстановления;
- как они взаимодействуют между собой.

Установим математическую зависимость между физико-механическими параметрами и факторами, влияющими на технологический процесс восстановления. Исследованы следующие технологические процессы восстановления: электролитический способ, поверхностное пластическое деформирование, газотермическое напыление.

### Результаты исследований

Зависимость факторов, влияющих на параметры технологического процесса восстановления, представим в виде регрессионных уравнений. Результаты экспериментальных исследований, на основании которых построены регрессионные зависимости представлены в таблицах 1 – 5.

Регрессионное уравнение процесса восстановления электролитическим способом представлено следующим образом:

$$\hat{y} = 6,519 + 0,087x_1 + 3,825x_2 + 0,429x_3 - 0,648x_4 \quad (1)$$

Выходной параметр  $\hat{y}$  – скорость изнашивания поверхности за время (t), мкм/тыс.ч.

Входные параметры:

- химический состав электролита,  $x_1$ , г/л;
- кислотность (HCl),  $x_2$ , pH;
- плотность тока,  $x_3$ , А/дм<sup>2</sup>;
- температура электролита,  $x_4$ , °С.

Таблица 1 - Результаты экспериментальных исследований восстановления электролитическим способом

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.36.1>

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	Y
100	0,6	16	37	0,5
101	0,61	17	36	1,6
102	0,62	13	34	1,11
103	0,7	17	35	2,6
104	0,73	20	37	3
105	0,74	18	36	2,8
106	0,65	15	33	3,1
107	0,66	12	31	3,5
108	0,71	15	37	1,02
104	0,73	20	37	3
105	0,74	18	36	2,8
106	0,65	15	33	3,1
107	0,66	12	31	3,5
108	0,71	15	37	1,02
103	0,7	17	35	2,6
104	0,73	20	37	3
105	0,74	18	36	2,8
106	0,65	15	33	3,1
107	0,66	12	31	3,5

108	0,71	15	37	1,02
-----	------	----	----	------

Выражение (1) показывает связь между параметром износостойкости и факторами самого технологического процесса, причём данные факторы строго необходимо контролировать, так как управлять ими невозможно.

Уравнение для оптимизации процесса поверхностного пластического деформирования применительно к упрочнению наплавленных деталей, можно представить в следующем виде:

$$\hat{y} = 76,794 - 14,865p - 9,619S - 6,679r_n \quad (2)$$

где  $\hat{y}$  – промежуточный критерий качества (микротвердость, шероховатость, глубина проплавленного слоя).

В представленном случае,  $y$  – твердость, HRC;

$p$  – давление упрочняющего инструмента в месте контакта с обрабатываемой деталью, МПа;

$S$  – продольная подача упрочняющего инструмента, мм/об;

$r_n$  – радиус контактной площадки упрочняющего инструмента, мм.

Таблица 2 - Результаты экспериментальных исследований процесса поверхностного пластического деформирования

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.36.2>

$p$	$S$	$r_n$	$Y$
0,6	0,3	2	50
0,6	0,3	2	52
0,6	0,3	1,9	53
0,5	0,3	1,7	55
0,6	0,1	1,6	60
0,4	0,3	1,8	57
0,5	0,2	1,7	56
0,6	0,2	1,1	60
0,6	0,2	1,7	54
0,4	0,3	1,3	60
0,5	0,3	1,4	57
0,6	0,3	1,5	56
0,4	0,1	1,4	60
0,5	0,3	1,2	58
0,3	0,1	1,8	60
0,6	0,3	2	52
0,6	0,1	1,9	53
0,5	0,3	1,7	55
0,3	0,1	1,8	60
0,5	0,1	1,2	58

Оптимизация технологических процессов и других методов, связанных с наплавкой, механической обработкой и упрочнением, проводится по уравнению (2).

Проанализировав параметры, которые включены в равенства (1) и (2), для каждого из способов нанесения покрытий, упрочнения поверхностей, механической обработки или испытания предельно разные, и их может быть бесчисленное множество вариантов.

При применении в качестве технологического процесса восстановления газотермическое напыление, выходным параметром стоит принять параметр прочности сцепления покрытия с основой [8], [9].

На основании экспериментальных исследований технологического процесса восстановления газотермическим напылением получено уравнение регрессии:

$$\hat{y} = 105,9664 - 0,25669x_1 - 0,04898x_2 + 0,33248x_3 - 0,34066x_4 \quad (3)$$

Выходным параметром данной модели является прочность сцепления покрытия с основой, МПа.

Входные параметры:

– фракционный состав порошка,  $x_1$ , мкм;

– сила тока,  $x_2$ , А;

– мощность дуги,  $x_3$ , кВт;

– дистанция напыления,  $x_4$ , мм.

Таблица 3 - Результаты экспериментальных исследований технологического процесса восстановления газотермическим напылением

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.36.3>

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y
60	128	45	120	58
58	128	43	115	61
54	130	31	108	60
55	140	44	82	72
56	158	42	98	64
48	141	36	80	72
49	146	43	88	68
52	158	45	87	70
62	187	34	88	63
68	184	37	96	56
65	200	41	90	61
64	188	43	91	68
47	187	45	92	67
46	198	38	93	69
45	188	34	90	66
47	180	35	95	65
42	199	36	96	64
41	200	33	100	61
66	186	31	87	60
65	172	30	85	62

С помощью математического пакета Statistica проведен анализ представленных регрессионных зависимостей, который показал, что коэффициенты детерминации статистически значимы и все регрессионные уравнения статистически надежные.

Определим взаимосвязь величины износа с параметрическими факторами, которые определяют износостойкость у восстановленных поверхностей деталей лесных машин с помощью степенной регрессионной модели:

$$\hat{y} = \beta_0 \cdot (x_1)^{\beta_1} \cdot (x_2)^{\beta_2} \cdot (x_3)^{\beta_3} \cdot \dots \cdot (x_n)^{\beta_n} \quad (4)$$

Например, по данным исследований процесса испытания цилиндрических поверхностей «вал – колодка» установлено, что формула зависимости между параметром износа (мм) данных поверхностей трения и поверхностными факторами будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{y} = 0,249R_{\alpha}^{-0,374} \cdot \nu^{0,462} \cdot b^{1,02} \cdot S_n^{3,345} \cdot W_{max}^{-0,504} \cdot H_{\mu}^{-0,035} \quad (5)$$

где  $R_{\alpha}$  – значение профиля с возможным среднеарифметическим отклонением, мкм;

$b$  – рассеивание ресурса поверхности, моточас;

$\nu$  – коэффициент вариации ресурса поверхности;

$S_n$  – площадь поверхности, мм<sup>2</sup>;

$W_{max}$  – максимальная высота микронеровностей волнистости, мкм;

$H_{\mu}$  – поверхностная микротвёрдость поверхности, HV.

Таблица 4 - Результаты экспериментальных исследований зависимости параметра износа от поверхностных параметров

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.36.4>

R	$\nu$	b	S	W	H	Y
0,63	0,553	2543,2	0,23	2	460	2,78
0,63	0,433	3541,1	0,21	2,1	480	2,501
0,63	0,438	3712,1	0,21	2,2	626	2,554
0,63	0,553	3845,2	0,212	2,3	610	2,978
0,63	0,338	3912,5	0,22	2,1	594	2,864

0,2	0,339	2698,2	0,23	3	549	2,931
0,2	0,334	2591,2	0,211	2,2	563	2,445
0,2	0,333	3548,8	0,2	2	542	2,956

Таким образом, полученная зависимость описывает связь между показателем износа и характеристиками качества контролируемой поверхности.

Показатели, которые включаются в формулу (5), являются ограниченными и представляют собой параметры качества данных поверхностей. Кроме того, для сопряжений и совокупности рассматриваемых деталей дополнительно включаются параметры взаимного расположения данных поверхностей: допуск отклонения от перпендикулярности, допуск соосности шеек и допуск параллельности осей.

### Заключение

Таким образом, установлено, что для повышения качества и оптимизации технологического процесса и упрочнения деталей лесных машин необходимо учитывать параметрические факторы, влияющие на функциональные и эксплуатационные показатели. Определенные математические зависимости между физико-механическими параметрами и факторами позволяют выбрать оптимальные режимы для восстановления деталей лесных машин с учетом технологических и эксплуатационных критериев.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Ельцов В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин / В.В. Ельцов. — Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. — 335 с.
2. Черноиванов В.И. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев. — М.: Росинформагротех, 2010. — 376 с.
3. Создание композиционных износостойких покрытий, изучение влияния входящих в состав материалов и параметров плазменного напыления на их свойства / М.О. Федорова, Л.Х. Балдаев, Т.А. Ильинкова [и др.] // Четвертый междисциплинарный научный форум с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии", Москва, 27—30 ноября 2018 года. — Москва: Буки Веди, 2018. — Т. II. — С. 689-692.
4. Bi Q. High Temperature Self-lubricating Materials / Q. Bi, S. Zhu, W. Liu // Tribology in Engineering. — 2013. — P. 109-134.
5. Евельсон Л.И. Оптимизация узлов трения машин с учетом неопределенности информации в исходных данных / Л.И. Евельсон, Е.А. Памфилов // Трение и износ. — 2006. — Т. 27. — № 2. — С. 191-195.
6. Шевелева Е.В. Основы повышения работоспособности лесозаготовительных машин / Е.В. Шевелева, Е.А. Памфилов, В.В. Капустин [и др.] // Актуальные проблемы лесного комплекса. — 2022. — № 61. — С. 179-182.
7. Памфилов Е.А. Повышение работоспособности рабочих органов и трибосистем технологического оборудования харвестеров / Е.А. Памфилов, В.В. Капустин, Г.А. Пилюшина [и др.] // Лесной журнал. — 2021. — № 6(384). — С. 135-149.
8. Памфилов Е.А. Возможности и перспективные пути повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина // Лесной журнал. — 2013. — № 5(335). — С. 129-141.
9. Коваленко Н.В. Импортозамещение в отечественном сельхозмашиностроении как фактор повышения конкурентоспособности отрасли / Н.В. Коваленко, А.С. Чекунов // Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление. — 2019. — № 3(91). — С. 67-88.
10. Котомчин А.Н. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин / А.Н. Котомчин, А.Ф. Синельников, Н.И. Корнейчук // Вестник СибАДИ. — 2020. — № 17(1). — С. 84-97.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Eltsov V.V. Vosstanovlenie i uprochnenie detalej mashin [Restoration and Hardening of Machine Parts] / V.V. Etsov. — Tolyatti: Publishing House of TSU, 2015. — 335 p. [in Russian]
2. Chernoiivanov V.I. Vosstanovlenie detalej mashin (Sostojanie i perspektivy) [Restoration of Machine Parts (State and Prospects)] / V.I. Chernoiivanov, I.G. Golubev. — M.: Rosinformagroteh, 2010. — 376 p. [in Russian]
3. Sozdanie kompozicionnyh iznosostojkih pokrytij, izuchenie vlijaniya vkhodjashhih v sostav materialov i parametrov plazmennogo napylenija na ih svojstva [Creation of Composite Wear-resistant Coatings, Study of the Influence of the Materials Included in the Composition and Parameters of Plasma Spraying on Their Properties] / M.O. Fedorova, L.H. Baldaev, T.A. Il'inkova [et al.] // Chetvertyj mezhdisciplinarnyj nauchnyj forum s mezhdunarodnym uchastiem "Novye materialy i perspektivnye tehnologii" [Fourth Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation "New Materials and Advanced Technologies"]. — Moscow: Buki Vedi, 2018. — Vol. II. — P. 689-692. [in Russian]

4. Bi Q. High Temperature Self-lubricating Materials / Q. Bi, S. Zhu, W. Liu // Tribology in Engineering. — 2013. — P. 109-134.
5. Evel'son L.I. Optimizacija uzlov trenija mashin s uchetom neopredelennosti informacii v ishodnyh dannyh [Optimization of Friction Units of Machines Taking into Account the Uncertainty of Information in the Initial Data] / L.I. Evel'son, E.A. Pamfilov // Trenie i iznos [Friction and Wear]. — 2006. — Vol. 27. — № 2. — P. 191-195. [in Russian]
6. Sheveleva E.V. Osnovy povyshenija rabotosposobnosti lesozagotovitel'nyh mashin [Fundamentals of Improving the Performance of Logging Machines] / E.V. Sheveleva, E.A. Pamfilov, V.V. Kapustin [et al.] // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual Problems of the Forest Complex]. — 2022. — № 61. — P. 179-182. [in Russian]
7. Pamfilov E.A. Povyshenie rabotosposobnosti rabochih organov i tribosistem tehnologicheskogo oborudovanija harvesterov [Improving the Efficiency of Working Bodies and Tribosystems of Harvesters' Technological Equipment] / E.A. Pamfilov, V.V. Kapustin, G.A. Piljushina [et al.] // Lesnoj zhurnal [Forest Magazine]. — 2021. — № 6(384). — P. 135-149. [in Russian]
8. Pamfilov E.A. Vozmozhnosti i perspektivnye puti povyshenija rabotosposobnosti mashin i oborudovanija lesnogo kompleksa [Possibilities and Promising Ways to Improve the Performance of Machines and Equipment of the Forest Complex] / E.A. Pamfilov, G.A. Piljushina // Lesnoj zhurnal [Forest Magazine]. — 2013. — № 5(335). — P. 129-141. [in Russian]
9. Kovalenko N.V. Importozameshhenie v otechestvennom sel'hozmashinostroenii kak faktor povyshenija konkurentosposobnosti otrasli [Import Substitution in Domestic Agricultural Engineering as a Factor in Increasing the Competitiveness of the Industry] / N.V. Kovalenko, A.S. Chekunov // Izvestija Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. Jekonomika i upravlenie [Bulletin of the Far Eastern Federal University. Economics and Management]. — 2019. — № 3(91). — P. 67-88. [in Russian]
10. Kotomchin A.N. K voprosu vybora sposoba vosstanovlenija detalej mashin [On the Issue of Choosing a Method for Restoring Machine Parts] / A.N. Kotomchin, A.F. Sinel'nikov, N.I. Kornejchuk // Vestnik SibADI [Bulletin of SibADI]. — 2020. — № 17(1). — P. 84-97. [in Russian]