



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №6 (180). С. 31-39.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №6 (180). P. 31-39.

Научная статья
УДК 621.81.004.1
doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-31-39

Технологическое обеспечение и повышение надежности изделий машиностроения

**Анатолий Григорьевич Суслов¹, д.т.н.
Олег Николаевич Федонин², д.т.н.
Дмитрий Иванович Петрешин³, д.т.н.**

^{1, 2, 3} *Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия*

¹ *naukatm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>*

² *fedonin@tu-bryansk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3511-699X>*

³ *dipetreshin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9472-2167>*

***Аннотация.** В статье изложены научные направления, развиваемые Брянскими научными школами технологического машиностроителей и станочников, по решению актуальной проблемы «технологическое обеспечение и повышение надежности изделий машиностроения». Первое направление – двухступенчатое конструкторско-технологическое решение данной проблемы. На стадии проектирования изделий машиностроения определяются численные значения параметров качества рабочих поверхностей деталей машин, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства. На стадии проектирования технологических процессов осуществляется выбор методов и режимов обработки рабочих поверхностей деталей машин, обеспечивающих требуемые параметры их качества. Второе направление – одноступенчатое технологическое обеспечение непосредственно эксплуатационных свойств деталей машин. Для этого получены теоретические и эмпирические уравнения взаимосвязи эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин с режимами обработки различными технологическими методами (лезвийная, абразивная, отделочно-упрочняющая обработка ППД, электроэрозионная, электромеханическая). Для получения эмпирических зависимостей разработаны автоматизированные системы научных исследований эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин. Третье направление – для гарантированного обеспечения требуемых параметров качества и эксплуатационных свойств рабочих поверхностей ответственных деталей машин разработаны адаптивные системы управления процессом обработки на станках. Четвертое направление – для обеспечения требуемого качества и эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей из нетрадиционных материалов, по которым нет справочных данных, целесообразно разрабатывать самообучающиеся станки с адаптивным управлением. Пятое направление – для повышения надежности изделий машиностроения разрабатываются наукоемкие функционально-ориентированные технологии, базирующиеся на научных достижениях их эксплуатационных свойств.*

Ключевые слова: качество, эксплуатационные свойства, надежность, технологическое обеспечение, наукоемкие технологии

Для цитирования: Суслов А.Г., Федонин О.Н., Петрешин Д.И. Технологическое обеспечение и повышение надежности изделий машиностроения // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 6 (180). С. 31–39. doi:10.30987/2223-4608-2026-6-31-39

Engineering support and improvement of reliability of mechanical engineering products

Anatoly G. Suslov¹, D. Eng.

Oleg N. Fedonin², D. Eng.

Dmitry I. Petreshin³, D. Eng.

^{1, 2, 3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ naukاتم@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>

² fedonin@tu-bryansk.ru

³ dipetreshin@yandex.ru

Abstract. The article outlines some scientific directions developed by the Bryansk scientific schools of machine-building technologists and machine operators to solve the urgent problem of «engineering support and reliability improvement of machine-building products». The first direction is a two-stage design and technological solution to this problem. At the design stage of mechanical engineering products, numerical values of the quality parameters of machine parts working space are found, providing the required operational properties. At the design stage of technological processes, methods and modes of machine parts working space treatment are selected to ensure the required quality parameters. The second direction is single-stage engineering support of the direct operational properties of machine parts. For this purpose, theoretical and empirical equations have been obtained for the relationship of the operational properties of machine parts working space with operating modes for various production methods (blade, abrasive, surface plastic deformation SPD, electroerosion, electromechanical operation). Automated systems for scientific research of the working space operational properties for machine parts have been developed to obtain empirical dependencies. The third direction is to ensure the required quality parameters and operational properties of the working space of critical machine parts, adaptive control systems for the machining process have been developed. The fifth direction is to improve the reliability of machine-building products by developing high-tech, functionally oriented technologies based on scientific achievements of their operational properties.

Keywords: quality, operational properties, reliability, engineering support, high-tech technologies

For citation: Suslov A.G., Fedonin O.N., Petreshin D.I. Engineering support and improvement of reliability of mechanical engineering products / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 6 (180). P. 31–39. doi: 10.30987/2223-4608-2026-6-31-39

Решение актуальной научной проблемы «технологическое обеспечение и повышение надежности изделий машиностроения» базируется на научных основах технологии машиностроения.

Технология машиностроения как наука призвана разрабатывать, развивать и совершенствовать теорию и научно обоснованные технические решения по технологическому обеспечению и повышению качества, производительности и снижению себестоимости изготавливаемых изделий машиностроения [1]. Одним из основных свойств качества изделий машиностроения, особенно авиакосмической отрасли, транспорта, энергетики и вооруженной техники, является их надежность. Надежность – это совокупное свойство изделий, включающее в себя долговечность, безотказность и ремонтпригодность.

Долговечность и безотказность изделий машиностроения определяется эксплуатационными свойствами деталей машин и их

соединений: износостойкостью, статической усталостной прочностью, контактной жесткостью и прочностью, коррозионной стойкостью, герметичностью, прочностью посадок. Все эти эксплуатационные свойства зависят от физико-механических свойств материалов деталей, точности их размеров, качества рабочих поверхностей и условий эксплуатации.

В Брянских научных школах технологов-машиностроителей и трибологов проведены теоретические и экспериментальные исследования по контактной жесткости, износостойкости, усталостной прочности, коррозионной стойкости и герметичности. Так, по одному из основных эксплуатационных свойств – износостойкости [2], оказывающему основное влияние на долговечность и безотказность изделий разработана молекулярно-механическая теория изнашивания и получено теоретическое уравнение для расчета интенсивности изнашивания поверхностей трения.

$$I_h = \frac{1,2\pi}{n \lambda t_m^{3/2} H_{\mu 0}^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1 - \mu^2)^2 (2 Ra W_z H_{\max})^{1/3}}{S_m E}}, \quad (1)$$

где n – число циклов до разрушения материала при резании; t_m – относительная длина опорной линии профиля шероховатости на уровне средней линии; $H_{\mu 0}$ – микротвердость поверхностного слоя; μ – коэффициент Пуассона; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; W_z – средняя высота волн; H_{\max} – максимальная величина макроотклонений; S_m – средний шаг неровностей профиля; E – приведенный модуль упругости. Данные параметры – это параметры качества равновесного состояния поверхностного слоя при установившемся нормальном изнашивании.

Наряду с теоретическим уравнением для деталей машин из различных материалов, получены эмпирические уравнения взаимосвязи износостойкости с параметрами качества поверхности трения. Аналогичные теоретические и экспериментальные уравнения получены и по другим эксплуатационным свойствам рабочих поверхностей деталей машин: контактной жесткости, усталостной прочности, коррозионной стойкости, герметичности, прочности посадок. Результаты этих исследований позволили установить параметры качества рабочих поверхностей, оказывающих влияние на их эксплуатационные свойства (табл. 1).

1. Параметры качества поверхностного слоя деталей машин, оказывающие влияние на их эксплуатационные свойства

1. 1. Quality parameters of machine parts surface layer that affect their operational properties

Эксплуатационные свойства	Параметры качества поверхностного слоя деталей машин
Контактная жесткость	$Ra (Rz), t_p (Rp), S_m, W_z, H_{\max}, H_{\mu}$
Износостойкость	$Ra, t_p (Rp), S_m, s, W, H_{\max}, H_{\mu}$
Усталостная прочность	$R_{\max}, S_m, H_{\mu}, h_{\mu}, \sigma_{ост}$
Коррозионная стойкость	$Ra, S_m, s, H_{\mu}, \sigma_{ост}$
Герметичность соединений	$Ra, S_m, s, t_p (Rp), W_z, H_{\max}, H_{\mu}$
Прочность посадок	$Ra, t_p (Rp), W_z, H_{\max}, H_{\mu}$
<p><i>Примечания:</i> Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости; Rz – средняя высота неровностей профиля шероховатости по 10-ти точкам; R_{\max} – максимальная высота профиля шероховатости; S_m – средний шаг неровности профиля шероховатости; s – шаг неровности профиля шероховатости по вершинам локальных выступов; t_p – относительная длина опорной линии профиля шероховатости на уровне p; Rp – расстояние от линии выступов до средней линии профиля шероховатости; W_z – средняя высота волн; H_{\max} – максимальная величина макроотклонения; H_{μ} – поверхностная микротвердость; h_{μ} – глубина упроченного слоя; $\sigma_{ост}$ – поверхностное остаточное напряжение.</p>	

Обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин, гарантирующих их оптимальную долговечность, сводится к определению численных значений параметров

качества их рабочих поверхностей. Эти значения параметров качества рабочих поверхностей деталей машин вычисляют, применяя полученные теоретические или эмпирические

уравнения. Таким образом, на этапе проектирования изделий машиностроения определяются значения параметров качества рабочих поверхностей деталей машин.

При технологической подготовке производства необходимо, чтобы разработанный технологический процесс обеспечивал требуемые параметры качества рабочих поверхностей деталей машин с наибольшей производительностью или с наименьшей себестоимостью. При этом используются теоретические или эмпирические уравнения взаимосвязи параметров качества поверхностного слоя деталей с режимами их обработки при различных

технологических методах. Для теоретического описания такой взаимосвязи разработаны физические картины формирования параметров качества поверхностного слоя деталей при лезвийной, абразивной, отделочно-упрочняющей ППД, электроэрозионной и электромеханической обработке.

Получены теоретические уравнения, описывающие взаимосвязь параметров качества поверхностного слоя деталей при указанных методах их обработки. Так, теоретические уравнения для параметра шероховатости Rz при лезвийной обработке имеет следующий вид:

При $\varphi \leq \arcsin \frac{s}{2r}$, $\varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r}$

$$Rz = \frac{r(1-\cos\varphi)}{\cos\gamma} + \frac{\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\varphi_1 [s-r(\sin\varphi+\sin\varphi_1)] - 2\operatorname{tg}\varphi(\cos\varphi_1-\cos\varphi)}{\cos\gamma(\operatorname{tg}\varphi+\operatorname{tg}\varphi_1)} + \frac{c_y s^{y_p} v^{z_p} [\operatorname{HB}_{\max}^n t^{x_p} - \operatorname{HB}_{\min}^n (t-Rz_{\text{исх}})^{x_p}]}{\operatorname{HB}_{\text{сп}}^n j_T} + \frac{0,5\rho \left(1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T}\right)}{\frac{1}{\operatorname{tg}\varphi} + \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi_1}} + Rz_p. \quad (2)$$

При $\varphi > \arcsin \frac{s}{2r}$, $\varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r}$

$$Rz = \frac{2r - \sqrt{4r^2 - s^2}}{2\cos\gamma} + \frac{c_y s^{y_p} v^{z_p} [\operatorname{HB}_{\max}^n t^{x_p} - \operatorname{HB}_{\min}^n (t-Rz_{\text{исх}})^{x_p}]}{\operatorname{HB}_{\text{сп}}^n j_T} + \frac{0,3\rho \left(1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T}\right) \left(2s + 1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T}\right)}{32r} + Rz_p. \quad (3)$$

При $\varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r}$, $\varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r}$

$$Rz = \frac{r(1-\cos\varphi) + \sin\varphi_1 [\cos\varphi_1 + \sqrt{\sin\varphi_1(2r - \sin\varphi_1)}]}{\cos\gamma} + \frac{c_y s^{y_p} v^{z_p} [\operatorname{HB}_{\max}^n t^{x_p} - \operatorname{HB}_{\min}^n (t-Rz_{\text{исх}})^{x_p}]}{\operatorname{HB}_{\text{сп}}^n j_T} + \frac{0,5\rho \left(1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T}\right)}{\frac{1}{\operatorname{tg}\varphi} + \frac{2r}{s}} + Rz_p, \quad (4)$$

где s – подача инструмента; r – радиус при вершине инструмента; φ , φ_1 – главный и вспомогательный углы в плане; γ – передний угол; v – скорость резания; $\operatorname{HB}_{\text{сп}}$ – твердость обрабатываемой поверхности; HB_{\min} , HB_{\max} – минимальное и максимальное значения твердости обрабатываемой поверхности; t – глубина резания;

ρ – радиус скругления режущей кромки; $Rz_{\text{исх}}$ – высота исходной шероховатости поверхности; j_T – жесткость технологической системы; c_y , n , x_p , y_p , z_p – экспериментальные коэффициенты; σ_T – предел текучести материала обрабатываемой детали; Rz_p – высота шероховатости

вершины режущего лезвия; τ_0 – адгезионное взаимодействие инструмента и заготовки.

В начале 2000 гг. Брянская научно-технологическая школа стала разрабатывать новое научное направление по технологическому обеспечению непосредственно эксплуатационных свойств деталей машин. Это направление развивается на основе подстановки теоретических уравнений взаимосвязи параметров качества поверхностного слоя деталей с режимами их обработки в уравнение взаимосвязи

эксплуатационных свойств с параметрами качества рабочих поверхностей деталей машин. Более перспективным является использование энергетического подхода как к эксплуатационному свойству, так и технологическому методу чистовой обработки рабочей поверхности детали. Так, для обеспечения коррозионной стойкости поверхности детали при электроэрозионной обработке, уравнение взаимосвязи скорости коррозии с режимами обработки имеет следующий вид

$$v_k = \frac{494b_0v_{k0}}{\sqrt[3]{\frac{UI\eta_i\tau}{T_{пл}\rho_d c_d}}} \cdot \left(\frac{\sigma_B(1+0,01\psi_k)}{\sigma_T} - 1 \right) \cdot \left(\exp \left(-1.5 \cdot 10^{-3} (A \exp(B)) \right) \right)^{b_1} \cdot K_T K_c K_\Theta K_{pH}, \quad (5)$$

$$A = T_0 + \frac{UI\eta_i\tau}{\rho_d c_d (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau})^3},$$

$$B = - \frac{\left(y - \sqrt{4 \cdot a \cdot \tau \cdot \ln \left(\frac{(T_{пл} - T_0)\rho_d c_d (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot \tau})^3}{UI\eta_i\tau} \right)} \right)^2}{4 \cdot a \cdot \tau},$$

где b_0 и b_1 – коэффициенты, зависящие от марки и состояния материала; v_{k0} – скорость коррозии образца сравнения (эталонного образца), изготовленного из того же материала, что и рассматриваемое изделие, но без механической обработки, в определенных стандартных (эталонных) условиях (в дистиллированной воде); K_T – коэффициент, учитывающий влияние толщины пленки влаги на поверхности детали; K_c – коэффициент, учитывающий агрессивность коррозионной среды; K_Θ – коэффициент, учитывающий влияние температуры коррозионной среды на скорость коррозии детали; K_{pH} – коэффициент, учитывающий влияние концентрации ионов H^+ на скорость коррозии детали; I – технологический ток; U – технологическое напряжение; τ – длительность импульса тока; c_d – удельная теплоемкость обрабатываемого материала; ρ_d – плотность обрабатываемого материала; $T_{пл}$ – температура плавления обрабатываемого материала; η_i – коэффициент полезного использования энергии импульса; a – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала; T_0 – начальная температура обработки; y – пространственное удаление между точкой генерации тепла и

целевой точкой анализа температурного режима; σ_B – предел прочности обрабатываемого материала, σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, ψ_k – относительное сужение поперечного сечения образца из обрабатываемого материала перед его разрывом при испытаниях на растяжение.

Для повышения качества и производительности проведения таких экспериментов разрабатываются автоматизированные системы научных исследований эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин. Такая автоматизированная система разработана для проведения экспериментов по получению эмпирических зависимостей контактной жесткости различных поверхностей от режимов при различных методах механической обработки. Составляется матрица планирования экспериментов с введением диапазона режимов чистовой обработки, оказывающих влияние на контактную жесткость. Это заносится в компьютер, подключенный к автоматизированной нормализованной установке испытаний на контактную жесткость. Образцы в порядковом номере их обработки помещаются в зону проведения экспериментальных исследований контактной жесткости (рабочий стол автоматизированного настольного прессы).

Устанавливается диапазон нагрузки. Автоматически включается десятикратная нагрузка и разгрузка нормализованного индентора с рабочей поверхностью образца. При этом с использованием тензодатчиков измеряется контактная деформация исследуемой поверхности при первом и повторном нагружениях. Эти результаты автоматически вносятся в матрицу планирования экспериментов в порядке их проведения. Осуществляется автоматическая обработка полученных результатов и выходит на печать эмпирическое уравнение взаимосвязи контактной жесткости с режимами обработки при первом и 10-м нагружениях.

Так, для плоской поверхности, обработанной чистовым фрезерованием, эмпирическое уравнение имеет следующий вид

$$j = k_0 \frac{v^{k_1} \cdot HB^{k_3}}{S_z^{k_2}}, \quad (6)$$

где v – скорость резания (40...120 м/мин); HB – твердость материала по Бринеллю (105...290); S – подача на зуб (0,02...0,1 мм/зуб).

Значения коэффициентов k_0, k_1, k_2, k_3 уравнения (6) для различных методов и видов нормализованного измерения контактной жесткости приведены в табл. 2.

2. Значения коэффициентов k_0, k_1, k_2, k_3 в зависимости от методов обработки и метода контроля контактной жесткости

2. Values of coefficients k_0, k_1, k_2, k_3 depending on machining methods and contact stiffness test code

Методы обработки	с учетом только шероховатости				с учетом шероховатости и волнистости			
	k_0	k_1	k_2	k_3	k_0	k_1	k_2	k_3
<i>Торцовое фрезерование:</i>								
Черновое	$\frac{8,1 \cdot 10^{-7}}{1,5 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,45}{0,68}$	$\frac{1,7}{1,6}$	$\frac{2,75}{2,65}$	$\frac{4,1 \cdot 10^{-7}}{1,8 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,65}{0,62}$	$\frac{1,75}{2,1}$	$\frac{2,65}{2,60}$
Получистовое	$\frac{3,2 \cdot 10^{-5}}{1,6 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0,35}{0,30}$	$\frac{0,75}{0,85}$	$\frac{2,1}{1,6}$	$\frac{1,85 \cdot 10^{-6}}{1,4 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{0,54}{0,56}$	$\frac{1,14}{1,17}$	$\frac{2,31}{2,1}$
Чистовое	$\frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,42}$	$\frac{0,26}{0,19}$	$\frac{0,44}{0,36}$	$\frac{1,1}{0,75}$	$\frac{4,2 \cdot 10^{-4}}{12 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0,32}{0,35}$	$\frac{0,50}{0,29}$	$\frac{2,65}{0,95}$
<i>Примечание.</i> В числителе приводятся значения коэффициентов для расчета контактной жесткости при первом погрузении, в знаменателе – при повторном.								

Практическая реализация изложенной методологии обеспечения качества и эксплуатационных свойств рабочих поверхностей реальных деталей машин показала, что значения отличаются от расчетных. Анализ показывает, что это отличие обусловлено изменением жесткости станка в процессе эксплуатации, износом режущего инструмента, колебанием припуска при чистовой обработке, обусловленное допуском на размер при получистовой обработке, колебанием твердости материала заготовки и поверхностной микротвердости

после получистовой обработки. Учитывая эти обстоятельства, для чистовой обработки рабочих поверхностей ответственных деталей машин разрабатываются адаптивные системы управления параметрами их качества и эксплуатационными свойствами.

Сущность адаптивного управления процессом механической обработки на токарной операции с ЧПУ заключается в поддержании требуемого параметра шероховатости Ra на заданном уровне независимо от изменений условий его протекания, например, независимо от

колебания припуска и твердости материала заготовки, затупления режущего инструмента и других факторов. С этой целью токарный станок с ЧПУ оснащается дополнительным внешним вычислительным устройством и специальным датчиком для контроля параметра шероховатости Ra . В качестве датчика используется лазерный оптический датчик. Задачей вычислительного устройства является обработка измерительной информации от датчика и реализация алгоритма управления – сравнение измеренной величины Ra с заданной и в случае их различия определяется знак и величина поправки, которую необходимо внести в ход процесса механической обработки с тем, чтобы указанное различие уменьшилось до допустимой величины.

Перед началом работы в вычислительное устройство вводятся исходные данные (геометрия режущей части инструмента, твердость обрабатываемой заготовки, физико-механические свойства материала обрабатываемой заготовки, жесткость технологического оборудования и т.д.) и требуемое значение параметра шероховатости Ra . На основе этих данных вычислительное устройство рассчитывает начальное значение величины продольной подачи, обеспечивающее заданный уровень параметра шероховатости Ra , и устанавливает его на станке.

Для функционирования адаптивной системы управления требуется математическое обеспечение, связывающее параметр шероховатости Ra с исходными данными и условиями обработки. В качестве математического обеспечения для адаптивного управления используются теоретические зависимости (2), (3), (4) для описания количественной связи между шероховатостью поверхности и условиями обработки. Однако следует отметить, что данные модели не могут учесть такие факторы как колебание режущего инструмента, колебание твердости обрабатываемого материала, состояние технологического оборудования и шероховатость режущей кромки, что приводит к погрешности предсказания параметра шероховатости. Использование же при адаптивном управлении обратной связи по параметру шероховатости повышает точность обеспечения заданного параметра шероховатости при механической обработке.

Для реализации адаптивного управления процессом механической обработки при обеспечении заданного параметра шероховатости для вычислительного устройства разработано специальное программное обеспечение.

Система адаптивного управления предназначена для управления параметром шероховатости Ra , обрабатываемой детали с обратной связью по его текущему значению путем изменения величины продольной подачи. Система адаптивного управления предназначена для использования на станках токарной группы с ЧПУ при обработке деталей типа вал из труднообрабатываемых сталей и сплавов. К ним относятся коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы.

При изготовлении деталей из новых материалов или материалов, по которым нет справочных данных, разрабатываются самообучающиеся станки с адаптивным управлением.

Суть метода самообучения технологической системы заключается в планировании и проведении активного эксперимента непосредственно на рабочем месте, получении и обработке результатов эксперимента, определении параметров математической модели, связывающей условия обработки и параметры качества поверхностного слоя (ПКПС) обработанной поверхности и использовании полученной модели для обеспечения заданных ПКПС деталей машин.

Для описания ПКПС деталей машин в зависимости от режимов обработки используются стохастические мультипликативные модели вида

$$ПК = C_0 t^x s^y v^z, \quad (7)$$

где ПК – параметр качества поверхностного слоя деталей машин, управляемый выходной параметр процесса механической обработки; t , s , v – глубина резания, подача и скорость резания соответственно, входные управляющие воздействия процесса механической обработки; C_0 , x , y , z – коэффициенты модели.

Связь между параметром шероховатости Ra и величиной продольной подачи s и скоростью резания v может быть выражена математической моделью вида

$$Ra = C_r s^{x_r} v^{y_r}, \quad (8)$$

где x_r , y_r , C_r – коэффициенты модели; s – подача, мм/об; v – скорость резания м/мин.

На формирование поверхностной микротвердости и поверхностных остаточных напряжений поверхностного слоя детали значительное влияние оказывают температурное и силовое поле в зоне резания [3, 5]. Их нестабильность во время обработки из-за колебания припуска, твердости материала заготовки, износа инструмента и других факторов, приводит к постоянному изменению силового и температурного режимов обработки. Поэтому в качестве математической модели, связывающей физико-механический параметр (FMP) и переменные состояния процесса резания Pz и T используется математическая модель вида

$$FMP_c = C_f \cdot Pz^{x_f} \cdot T^{y_f}, \quad (9)$$

где FMP_c – вычисленное значение физико-механического параметра поверхностного слоя; Pz – главная составляющая силы резания, Н; T – температура в зоне резания; °С; C_f , x_f , y_f – коэффициенты модели.

Математическая модель (3) используется для косвенного определения текущего значения физико-механического параметра обработанной поверхности на основе измеренных Pz и T во время механической обработки при адаптивном управлении.

Для адаптивного управления физико-механическим параметром используется модель, связывающая FMP с управляющими переменными s , v и t процесса резания, вида

$$FMP_c = C_u \cdot s^{x_u} \cdot v^{y_u} \cdot t^{z_u}, \quad (10)$$

где s , v , t – подача, скорость резания и глубина резания соответственно; C_u , x_u , y_u , z_u – коэффициенты модели.

При одновременном обеспечении параметров шероховатости Ra , поверхностной микротвердости и поверхностных касательных остаточных напряжений используется комплексный параметр качества поверхности Sx [3, 5]. Комплексный параметр Sx , используемый для оценки качества поверхности трения, включает в себя параметры шероховатости,

волнистости, макроотклонения и физико-механические параметры поверхностного слоя.

В качестве математической модели, связывающей комплексный параметр Sx и режимы обработки, используется модель вида (4), а для косвенного определения параметра Sx во время механической обработки при адаптивном управлении используется математическая модель вида (3).

В самообучающейся технологической системе [6] предусмотрены два режима работы «Самообучение» и «Работа». Режим «Самообучение» предназначен для параметрической идентификации математической модели в самообучающейся технологической системе проводится активный эксперимент непосредственно на рабочем месте и сохранения результата самообучения в базе данных системы. Исходными данными для самообучения системы являются: геометрия режущей части инструмента, материал режущей части инструмента, материал обрабатываемой заготовки и его твердость, обеспечиваемый параметр качества поверхностного слоя, величина допуска на обеспечиваемый параметр качества.

Разработанная самообучающаяся технологическая система предназначена для обеспечения заданных параметров шероховатости Ra , поверхностных остаточных напряжений, поверхностной микротвердости и комплексного параметра качества поверхности трения Sx [6].

Последние годы все большее развитие получают наукоемкие технологии в машиностроении [3]. Это технологии, базирующиеся на современных достижениях науки и техники. Анализ показывает возможность их применения для повышения надежности изделий машиностроения. Очевидно, что в данном случае разработка таких технологий должна базироваться на научных основах эксплуатационных свойств (износостойкости, усталостной прочности, коррозионной стойкости и т.д.) рабочих поверхностей деталей машин. Методология разработки наукоемких триботехнологий, т.е. технологий, базирующихся на достижениях трибологической науки, приведена в работе [4].

Значительный интерес представляет научное направление по организационно-технологическому обеспечению оптимальной

долговечности изделий машиностроения [5]. Это направление позволяет повысить конкурентоспособность изделий машиностроения за счет снижения суммарных затрат на их приобретение, эксплуатацию и ремонт.

Заключение

Приведенный в данной статье материал подтверждает, что технология машиностроения как наука обладает несколькими направлениями решения актуальной проблемы технологического обеспечения и повышения надежности механических систем изделий машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Научные** основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
2. **Крагельский И.В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1966. 480 с.
3. **Научные** технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
4. **Суслов А.Г., Горленко А.О., Шалыгин М.Г., Шохийн А.Н.** Научные основы создания наукоемких триботехнологий // Научные технологии в

машиностроении. 2025. №6 (168). С. 3–10.

5. **Фундаментальные** основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.

6. **Петрешин Д.И.** Автоматизированное обеспечение качества поверхности и контактной жесткости деталей машин // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 10 (88). С. 14–19.

REFERENCES

1. Scientific foundations of mechanical engineering technology / A.G. Suslov, A.M. Dalsky. Moscow: Mashinostroenie, 2002. 684 p.
2. Kragelsky I.V. Friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1966. 480 p.
3. Science-intensive technologies in mechanical engineering / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezylazny et al.; edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2012. 528 p.
4. Suslov A.G., Gorlenko A.O., Shalygin M.G., Shohien A.N. Scientific foundations of the creation of high-tech tribotechnologies // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2025. No. 6 (168). pp. 3–10.
5. Fundamental principles of technological support and improvement of reliability of mechanical engineering products / Edited by A.G. Suslov. Moscow: Innovative Engineering, 2022. 552 p.
6. Petreshin D.I. Automated quality support of surface and contact rigidity in machinery // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2018. No. 10 (88). pp. 14–19

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 19.04.2026; одобрена после рецензирования 21.04.2026; принята к публикации 12.05.2026.

The article was submitted 19.04.2026; approved after reviewing 21.04.2026; assepted for publication 12.05.2026.