

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №11 (173). С.41-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №11 (173). P.41-48.

Научная статья
УДК 621.791/621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-41-48

Прогнозирование параметров субструктур поверхностей деталей машин на основе учета механизма технологической наследственности

Анатолий Васильевич Тотай¹, д.т.н.
Максим Николаевич Нагоркин², д.т.н.
Сергей Геннадьевич Бишутин³, д.т.н.
Виталий Сергеевич Селифонов⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ totai_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>

² nagorkin_mn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

³ nad-bisch@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9430-2936>

⁴ vitalerg82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8660-2915>

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы технологического обеспечения физико-механических параметров состояния поверхностного слоя (ПСПС) деталей машин, определяющих надежность и ресурс изделий машиностроения. Теоретически установлена связь формируемых параметров от пластических свойств обрабатываемых конструкционных материалов, характеризующихся фактическими значениями предела текучести при выполнении конкретной технологической операции. Установлено влияние технологической наследственности на такие ПСПС, как микротвердость поверхностного слоя, глубина наклепа и размер зерна материала. Методика оценки размеров зёрен регламентируется ГОСТ 5639-82. Для прогнозирования такой важнейшей эксплуатационной характеристики, как сопротивление усталости, необходима информация о плотности дислокаций в субструктуре металла поверхностного слоя. В статье этот параметр определяется по ранее полученным экспериментальным данным. Экспериментальные исследования влияния технологической наследственности на формирование физико-механических ПСПС проводились на этапах чистовой и финишной обработки наружных цилиндрических поверхностей образцов из стали и высокопрочного чугуна с использованием минералокерамических и алмазных инструментов. На финишном этапе применялись методы токарной обработки резцами с минералокерамическими пластинами марки ВОК-60, абразивной обработки шлифовальными кругами с синтетическими алмазами марки АСК и АСВ, алмазного выглаживания инструментом упругого действия с индентором АСПК (алмаз синтетический поликристаллический). Представлены экспериментальные данные по влиянию значений поверхностной микротвердости и среднего размера зерна поверхностного слоя, полученных на предварительных этапах обработки изделий, на значения аналогичных параметров, полученных после различных финишных методов обработки. Установлена практическая возможность использования теоретических зависимостей для прогнозирования исследованных ПСПС с учётом технологической наследственности.

Ключевые слова: предел текучести, поверхностная микротвердость, глубина наклепа, характеристика зернистости, технологическая наследственность

Для цитирования: Тотай А.В., Нагоркин М.Н., Бишутин С.Г., Селифонов В.С. Прогнозирование параметров субструктур поверхностей деталей машин на основе учета механизма технологической наследственности // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 11 (173). С. 41–48. doi:10.30987/2223-4608-2025-11-41-48

Forecasting effort for substructures parameters of machine parts surfaces taking into account technological heredity mechanism

Anatoly V. Totay¹, D. Eng.
Maxim N. Nagorkin², D. Eng.
Sergey G. Bishutin³, D. Eng.
Vitaly S. Selifonov⁴, PhD. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ totai_av@mail.ru

² nagorkin_mn@mail.ru

³ nad-bisch@yandex.ru

⁴ vitalerg82@mail.ru

Abstract. The article discusses the issues of technological support of the physical and mechanical parameters of the state of a machine parts surface layer, which can influence the reliability and service life of mechanical engineering products. Conceptually, the relationship between the formed parameters and the plastic properties of the machined structural materials, characterized by the actual values of the yield strength during a specific technological operation, has been found. The influence of technological heredity on such states of a machine parts surface layer as the microhardness of the surface layer, the depth of the riveting and the grain size of the material has been proved. The method of grain size estimation is regulated by the State Standard (GOST) 5639-82. To predict such an important operational characteristic as fatigue resistance, data on the density of dislocations in the substructure of the metal of the surface layer is needed. In the article, this parameter is determined through previously obtained experimental data. Experimental studies of technological heredity influence on the formation of physical and mechanical states of machine parts surface layers were carried out at the stages of finishing and smoothing of the outer cylindrical surfaces of steel and high-strength cast iron samples using mineral-ceramic and diamond tools. At the final stage, the methods of turning by cutters having mineral ceramic plates of the WOK-60 brand, abrasive processing with grinding wheels with synthetic diamonds of the ASC and ASV brands, and diamond smoothing with a tool of elastic action having an ASPC indenter (synthetic polycrystalline diamond) were used. Experimental data on the effect of the values of surface microhardness and the average grain size of the surface layer obtained at the preliminary stages of product machining on the values of similar parameters obtained after various finishing operation methods are presented. The practical possibility of using theoretical dependencies to predict the studied states of machine parts surface layers, taking into account technological heredity, has been found.

Keywords: yield strength, surface microhardness, riveting depth, grain characteristics, technological heredity

For citation: Totay A.V., Nagorkin M.N., Bishutin S.G., Selifonov V.S. Forecasting effort for substructures parameters of machine parts surfaces taking into account technological heredity mechanism / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 11 (173). P. 41–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-11-41-48

Введение

Перед современным машиностроением стоит ответственная проблема выпуска продукции, отвечающей требованиям надежности выполнения своих функциональных задач при безусловном обеспечении требуемого ресурса эксплуатации.

Любое изделие обрабатывающей промышленности имеет в своем составе детали (или деталь), которые при эксплуатации испытывают наибольшие нагрузки и, следовательно, могут определять долговечность всего изделия в целом. Эти детали называют

лимитирующими, и они являются предметом особого внимания в процессе конструкторско-технологической подготовки производства продукции. Конструктор, в отличие от технолога, четко представляет себе условия эксплуатации лимитирующих деталей и назначает соответствующие требования к применяемым материалам, условиям термообработки, к точности исполнительных размеров и шероховатости функциональных поверхностей, а также оговаривая ряд специфических технических требований.

Кроме указанных выше обычных процедур запуск в серию новых видов продукции

неизбежно предполагает проведение как стендовых, так и натурных испытаний, что часто приводит к необходимости поиска резервов в технологическом переделе для гарантированного обеспечения заложенных в техническое задание функциональных задач данного изделия.

Заданная точность размеров изделия, твердость и шероховатость поверхностей в условиях современного производства обеспечивается сравнительно несложно и, следовательно, резервом в увеличении ресурса остается оптимизация параметров субструктур рабочих поверхностей. Причем технологическое обеспечение так называемой «равновесной» шероховатости поверхностей, работающих в условиях трения скольжения, не приводят к увеличению ресурса изделия.

В подобных ситуациях неизбежным остается глубокое исследование субструктур поверхностных слоев деталей и выработке технологических условий обработки, обеспечивающих требуемые параметры состояния поверхностного слоя (ПСПС), продиктованные конкретными условиями эксплуатации.

Многочисленные попытки решить подобную задачу на последней операции технологического процесса, как правило, редко приводят к положительному результату, что неизбежно требует учета последовательного воздействия операций (или технологических переходов) на конкретную поверхность, то есть учета явления технологической наследственности.

Как показывает практика многочисленных экспериментальных исследований, механизм технологической наследственности особенно проявляется при формировании физико-механических параметров ПСПС деталей машин [1].

Теоретическая часть

Из теории пластической деформации металлов известно, что твердость деформируемого материала пропорциональна интенсивности напряжений, действующих в очаге деформации. Для различных технологических методов обработки металлов, как резанием, так и поверхностным пластическим деформированием, установлены закономерности

увеличения глубины и степени наклёпа при обработке поверхностей изделий с упрочненной субструктурой. Подобная закономерность математически представлена в виде зависимости

$$H' = H \left[1 - e^{n_T(\theta_d - \theta_{пл})} \right], \quad (1)$$

где H и H' – микротвёрдость поверхностного слоя до и после обработки, соответственно; n_0 – константа; θ_a – температура в зоне обрабатываемого материала; θ_{ic} – температура плавления обрабатываемого материала [2].

Твёрдость поверхностного слоя до технологического воздействия также будет отличаться от твёрдости поверхности, например, отожженной стали, так как на эту поверхность оказала свое влияние предыдущая технологическая операция. Как показывает практика изготовления лимитирующих деталей, влияние технологической наследственности желательно учитывать на чистовых и финишных этапах технологического процесса, следующих после термической операции, так как глубина резания на каждой последующей операции соизмерима с глубиной субструктуры поверхности, сформированной на предыдущей операции.

Таким образом, отношение какого-либо ПСПС после i -той операции к рассматриваемому параметру, полученному на предыдущей операции, называют коэффициентом технологической наследственности k_n :

$$k_n = H_i / H_{i-1}. \quad (2)$$

Учитывая тесную функциональную связь между твёрдостью материала и пределом текучести, справедливым будет выражение:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_T \left[1 - e^{n_T(\theta_i - \theta_{пл})} \right], \quad (3)$$

где σ_{Ti} – значение предела текучести при температуре θ_i ; σ_T – предел текучести при стандартных испытаниях.

Фактическое значение предела текучести зависит от размера зерна металлической структуры и определяется по формуле Холла-Петча:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_T + cd^{-0,5}, \quad (4)$$

где d – средний размер зерна в структуре поверхностного слоя; c – постоянная Холла-Петча.

Совместное решение выражений (3) и (4) позволяет получить следующую зависимость:

$$d = \left(\frac{c}{\sigma_T \left[\left(1 - e^{n_T(\theta_i - \theta_{пл})} \right) - 1 \right]} \right)^2. \quad (5)$$

Количественная оценка параметра d регламентируется ГОСТ 5639-82, ГОСТ Р 643-2015. В стандартах диапазон размеров зёрен делится на 18 ступеней, каждой из которой присвоен номер от – 3 до 14. Номер зерна – соответствует среднему диаметру d в 1 мм, а номер 14 – среднему диаметру в 0,0027 мм. Чем меньше размер зерна, тем выше порядковый номер.

Экспериментальные исследования динамики изменения величины размера зерна в субструктуре поверхностного слоя подтверждает его информативность для различных эксплуатационных условий. Особенно это касается решения задач прогнозирования интенсивности изнашивания. Установлено, что стабилизация темпов износа поверхности детали наступает после стабилизации размеров зёрен, адаптировавшихся к конкретным условиям эксплуатации. А равновесная шероховатость может сформироваться только после стабилизации размеров зёрен [3 – 5].

Другим информативным параметром физико-механических свойств поверхностного слоя, объясняющим во многих случаях эксплуатации деталей машин величину ресурса, является плотность дислокаций металла [6 – 8].

Плотность дислокаций так же, как и размер зерна, влияют на величину предела текучести металла, что следует из следующего соотношения [8]:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_T + \alpha_p Gb \sqrt{\rho}, \quad (6)$$

где α_p – коэффициент, зависящий от кристаллической решетки и структуры металла; G – модуль

сдвига; b – вектор Бюргера; ρ – плотность дислокаций.

Сравнение зависимостей (4) и (6) позволяет установить обратную пропорциональность параметров d и ρ :

$$\rho = \omega/d, \quad (7)$$

где ω – комплексный коэффициент, характеризующий конкретный конструкционный материал, определяемый по зависимости:

$$\omega = \left(\frac{c}{\alpha_p Gb} \right)^2. \quad (8)$$

Плотность дислокаций является важным параметром, применяемым для оценки предела выносливости (усталости) деталей машин без конструктивных концентраторов напряжений. Например, критическую плотность дислокаций для цилиндрических поверхностей деталей, работающих в условиях циклических нагрузений, можно рассчитать по зависимости:

$$\rho_{кр} = \left(\frac{2\pi k_p \sigma_B}{Gb} \right)^2, \quad (9)$$

где σ_B – предел прочности материала; $k_p = 0,5 - 0,7$.

Результаты экспериментов

Оценивалось влияние технологической наследственности на физико-механические ПСПС деталей после операций токарной обработки, круглого шлифования и алмазного выглаживания. В качестве исследуемых параметров были приняты микротвёрдость, глубина наклёпа и номер зерна.

Предварительная обработка цилиндрических образцов (операция i-1) осуществлялась методом чистового точения резцами с минералокерамическими пластинами марки ВОК-60 с геометрическими параметрами $r = 1,2$ мм; $\gamma = -7^\circ$; $\varphi = 45^\circ$. Режимы обработки – глубина

резания $t = 0,4; 0,8; 1,2$ мм; подача $S = 0,2$ мм/об; скорость резания $v = 200$ м/мин.

На финишном этапе осуществлялись токарная обработка образцов резцами с пластинами марки ВОК-60, абразивная обработка шлифовальными кругами с синтетическими алмазами марки АСК и АСВ, алмазное выглаживание инструментом упругого действия с индентором АСПК (алмаз синтетический поликристаллический) [9].

Варьирование значений глубины резания позволило изготовить образцы, отличающиеся по исходным физическим параметрам поверхностного слоя. Для получения одной экспериментальной точки оценивались не менее пяти образцов с близкими значениями исходных характеристик.

Режимы и условия проведения экспериментов представлены в табл 1.

1. Экспериментальные условия обработки образцов для исследования влияния технологической наследственности на параметры свойств поверхностного слоя

1. Experimental conditions of sample machining for influence research of process history on the properties of the surface layer

Материал образцов	Метод обработки	Материал инструмента	Условия обработки
Сталь 45 нормализованная	Точение	ВОК-60	$t = 0,1$ мм; $S = 0,2$ мм/об; $v = 220$ м/мин
	Круглое шлифование	АСТ	$t = 0,004$ мм; $S = 600$ мм/мин; $v = 30$ м/с; СОТС – 3 % СОЖ
	Алмазное выглаживание	АСПК	$P = 150$ Н; $S = 0,05$ мм/об; $v = 120$ м/мин; $r = 1,5$ мм; СОТС – масло И-20А
Сталь 45 закаленная	Точение	ВОК-60	$t = 0,1$ мм; $S = 0,16$ мм/об; $v = 180$ м/мин
	Круглое шлифование	АСТ	$t = 0,002$ мм; $S = 600$ мм/мин; $v = 30$ м/с; СОТС – 3 % СОЖ
	Алмазное выглаживание	АСПК	$P = 200$ Н; $S = 0,05$ мм/об; $v = 120$ м/мин; $r = 1,5$ мм; СОТС – масло И-20А
Высокопрочный чугун	Точение	ВОК-60	$t = 0,1$ мм; $S = 0,2$ мм/об; $v = 280$ м/мин
	Круглое шлифование	АСВ	$t = 0,005$ мм; $S = 700$ мм/мин; $v = 40$ м/с; СОТС – 1 % триэтанолamina, 0,3 % нитрата натрия
	Алмазное выглаживание	АСПК	$P = 150$ Н; $S = 0,05$ мм/об; $v = 120$ м/мин; $r = 1,5$ мм; СОТС – масло И-20А

Результаты исследований влияния исходной микротвёрдости поверхностей на её значение после окончательной обработки, а также на глубину наклёпа представлены на рис. 1.

Анализ полученных зависимостей

позволяет сделать вывод, что с увеличением исходной микротвёрдости при всех рассматриваемых методах окончательной обработки значения микротвёрдости поверхностей образцов из нормализованной стали 45 возрастает более

интенсивно, чем у закалённой стали.

Так, для образцов из нормализованной стали 45 при увеличении исходной микротвёрдости (после предварительной токарной обработки) с $H_{i-1} = 315...320$ кгс/мм² до $H_{i-1} =$

450...490 кгс/мм², то есть в среднем в 1,53 раза, увеличивает значение микротвёрдости H_i после токарной обработки в 1,36 раз, после шлифования в 1,33 раза, после алмазного выглаживания в 1,46 раза (рис. 1).

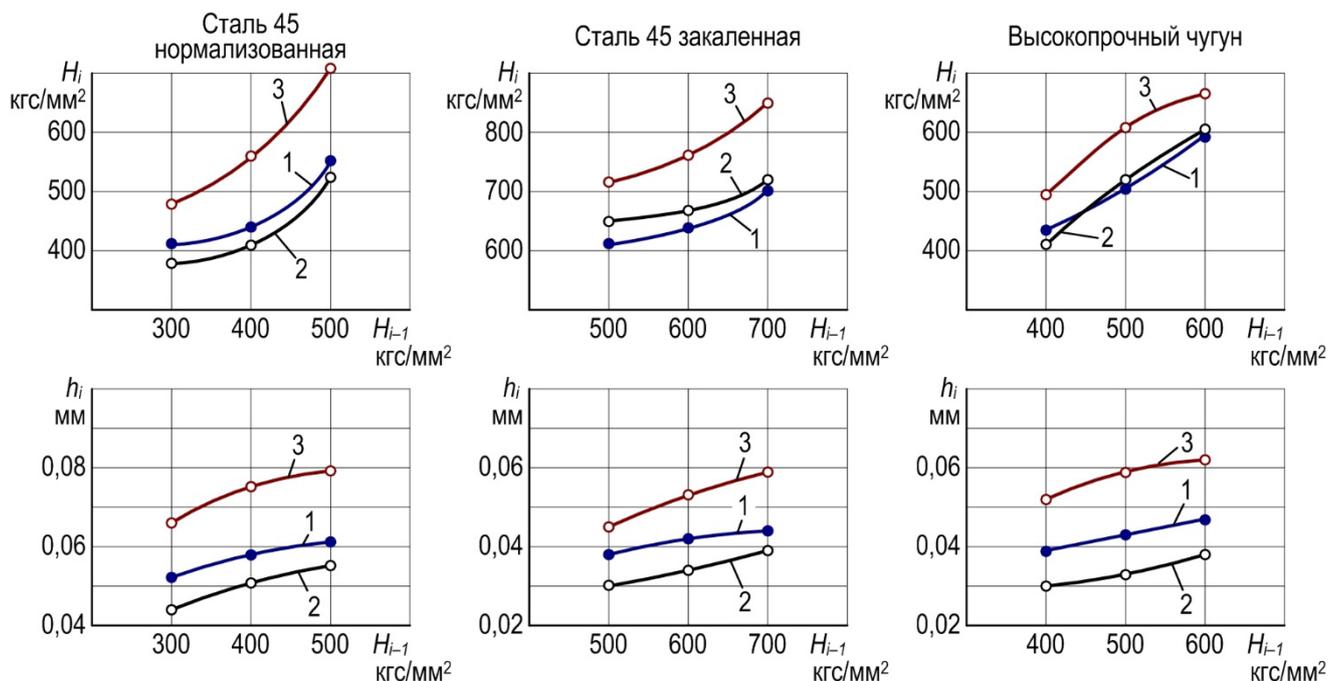


Рис. 1. Влияние исходной поверхностной микротвёрдости H_{i-1} на значения микротвёрдости H_i и глубины наклёпа h_i , полученных после различных методов обработки:

1 – токарная обработка; 2 – круглое шлифование; 3 – алмазное выглаживание

Fig. 1. The effect of the initial surface microhardness H_{i-1} on the values of the microhardness H_i and the depth of the rivet h_i obtained after various processing methods:

1 – turning; 2 – round grinding; 3 – diamond smoothing

Увеличение исходной микротвёрдости закалённых образцов из стали 45 в 1,4 раза с $H_{i-1} = 500$ до $H_{i-1} = 700$ кгс/мм² позволяет увеличить микротвёрдость H_i поверхности после токарной обработки в 1,12 раз, после шлифования в 1,09 раз, после алмазного выглаживания в 1,2 раза (рис. 1). Эти данные однозначно говорят о том, что большим резервом для пластической деформации, безусловно, обладают материалы с меньшим пределом текучести. Общая же тенденция увеличения поверхностной микротвёрдости с увеличением исходной микротвёрдости прослеживается для всех трёх материалов.

Глубина наклёпа h_i поверхностного слоя увеличивается с ростом исходной микротвёрдости H_{i-1} , что можно объяснить более интенсивным возрастанием деформационного

фактора по сравнению с тепловым при обработке образцов с более высоким значением предела текучести σ_T .

Практический интерес представляет характер влияния исходного размера зерна поверхностного слоя на его величину после окончательной обработки. Для наглядности на рис. 2 представлены графики, характеризующие влияние номера зерна структуры поверхности образца после операции предварительной токарной обработки на номер зерна, сформированного после i -ой операций точения, шлифования и алмазного выглаживания.

Графики на рис. 2 показывают, что с ростом номера зерна (уменьшением его среднего размера) после предварительной обработки возрастает и номер зерна после последнего технологического воздействия на поверхность.



Рис. 2. Влияние номера N_{i-1} зерна поверхностного слоя образца после предварительной токарной обработки на номер N_i зерна материала поверхности, обработанной технологическими методами:

1 – токарная обработка; 2 – круглое шлифование; 3 – алмазное выглаживание

Fig. 2. The effect of the N_{i-1} grain number of the surface layer of the sample after preliminary turning on the N_i grain number of the surface material processed by technological methods:

1 – turning; 2 – round grinding; 3 – diamond smoothing

При анализе поверхностей нормализованных стальных образцов видно, что в имевшемся исходном диапазоне размеров зёрен точение и шлифование увеличивает номер зерна на 3 единицы, а алмазное выглаживание – на 2. Это объясняется тем, что при методах обработки, связанных со снятием слоя металла, происходит более интенсивное разрушение зёрен под задней поверхностью инструмента.

При методах поверхностно-пластического деформирования энергия процесса расходуется как на «дробление» исходных зёрен, так и в значительной степени на повышение плотности дислокаций в кристаллической структуре внутри зёрен. В закалённых сталях алмазное выглаживание, встречая со стороны обрабатываемого поверхностного слоя гораздо большее сопротивление деформированию, увеличивает номер зёрен примерно с той же интенсивностью, как лезвийная и абразивная обработка [10, 11].

Сравнение экспериментальных значений поверхностной микротвёрдости $H_{\text{эксп}}$ и номера зерна $N_{\text{эксп}}$ с расчётными значениями микротвёрдости $H_{\text{расч}}$ и номера зерна $N_{\text{расч}}$, полученных по теоретическим зависимостям представлено на рис. 3. В исследованном диапазоне исходной микротвёрдости расхождение параметров, полученных экспериментально и рассчитанных по теоретическим зависимостям (1) и (5) не превышает 18 %.

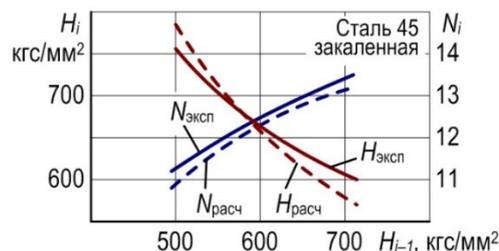


Рис. 3. Связь расчётных и экспериментальных зависимостей влияния технологической наследственности на микротвёрдость поверхностного слоя H и номер зерна N

Fig. 3. Relationship between calculated and experimental dependences of the technological heredity influence on the microhardness of the surface layer H and the grain number N

Заключение

На основе теории пластических деформаций конструкционных материалов установлены аналитические связи между условиями проведения технологических операций и пределом текучести, действующим в очаге деформации. Обусловлена необходимость, наряду с традиционными, исследования таких ПСПС, размер зерна поверхностного слоя и плотность дислокаций. Экспериментально установлено влияние механизма технологической наследственности на формирование физико-механических параметров поверхностного слоя и возможность их количественного прогнозирования. Экспериментально исследованы технологические маршруты обработки, наиболее часто встречающиеся на практике: чистовое точение, круглое шлифование и алмазное выглаживание. Установлен процент расхождения между расчётными и экспериментальными зависимостями (18 %).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Фундаментальные основы** технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / Под ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.
2. **Унксов Е.П., Джонсон У., Колмогоров В.Л.** Теория пластических деформаций металлов / Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.
3. **Чичинадзе А.В., Берлингер Э.М., Браун Э.Д.** Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / под общей ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
4. **Тотай А.В.** Технологическое обеспечение физических и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин // Трение и износ. 1997. Т. 18. № 3. С. 386–394.
5. **Тотай А.В., Нагоркин М.Н.** Влияние финишной обработки на интенсивность изнашивания в начальный период эксплуатации цилиндрических трибоповерхностей // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 12 (162). С. 39–45. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-39-45.
6. **Старков В.К.** Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 160 с.
7. **Герентьев В.Ф., Кораблева С.А.** Усталость металлов / отв. ред. В.М. Блинов. М.: Наука, 2015. 484 с.
8. **Попова Л.И., Болдырев Д.А.** Физика прочности и пластичности: учебное пособие. Тольятти. 2017. 74 с.
9. **Тотай А.В., Нагоркин М.Н., Федоров В.П.** Детали машин. Современные средства и прогрессивные методы обработки: учебник для вузов; под общей ред. А.В. Тотая. Москва. Юрайт. 2020. 288 с.
10. **Справочник** технолога / под общей ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
11. **Смелянский В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

REFERENCES

1. Fundamental principles of technological support and improvement of reliability of mechanical engineering products / Edited by A.G. Suslov. Moscow: Innovative Engineering. 2022. 552 p.
2. Unksov E.P., Johnson U., Kolmogorov V.L. Theory of plastic deformations of metals / Edited by E.P. Unksov, A.G. Ovchinnikov. Moscow: Mashinostroenie. 1983. 598 p.
3. Chichinadze A.V., Berlinger E.M., Brown E.D. Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnics) / under the general editorship of A.V. Chichinadze. Moscow: Mashinostroenie. 2003, 576 p.
4. Totai A.V. Technological support of physical and operational properties of surfaces of machine parts // Friction and wear. 1997. vol. 18. no. 3, pp. 386–394.
5. Totai A.V., Nagorkin M.N. The effect of finishing on the intensity of wear during the initial period of operation of cylindrical tribosurfaces // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024. no. 12 (162). pp. 39–45. DOI: 10.30987/2223-4608-2024-39-45.
6. Starkov V.K. Dislocation concepts of metal cutting. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 160 p.
7. Terentyev V.F., Korableva S.A. Metal fatigue / ed. by V.M. Blinov. Moscow: Nauka. 2015. 484 p.
8. Popova L.I., Boldyrev D.A. Physics of strength and plasticity: training manual. Togliatti. 2017. 74 p.
9. Totai A.V., Nagorkin M.N., Fedorov V.P. Machine parts. Modern tools and progressive processing methods: a textbook for universities; under the general editorship of A.V. Totai. Moscow. Yurait. 2020. 288 p.
10. Technologist's Reference Book / under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovative Engineering. 2019. 800 p.
11. Smelyansky V. M. Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie. 2002. 300 p.

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 06.05.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 14.07.2025.

The article was submitted 06.05.2025; approved after reviewing 24.06.2025; assepted for publication 14.07.2025.