

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.7.011

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-87-93



ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО ПАРАМЕТРА ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ТОНКИХ ДЛИННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 08X15H5Д2Т ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОСРЕДСТВОМ ПОДБОРА ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Колодяжный Д.Ю., Черкашин С.О., Вороненко В.П.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматривается вопрос влияния наклепа на требуемый параметр точности формы (плоскостности) тонких длинных деталей из стали 08X15H5Д2Т при последовательной механической обработке. Плоскостность – это параметр точности формы, который характеризуется степенью отклонения поверхности от идеально плоского состояния относительно идеального тела (под идеальным телом подразумевается тело, которое имеет определенную степень точности формы, подтвержденную специальными методиками). На нее влияет механическая обработка и способность металла сохранять полученную энергию в виде напряжений. Режимы механической обработки при неправильном их подборе создают в поверхностных слоях изделия большую твердость по сравнению с твердостью, полученной после термической обработки. Данное явление называется наклепом (или перенаклепом). Термическая обработка тоже играет важную роль в получении требуемых величин точности. При рационально подобранном режиме термической обработки уменьшается величина наклепа при тех же режимах механической обработки, а также снижается вероятность перенаклепа. В статье приведены эксперименты на образцах из стали 08X15H5Д2Т и представлены используемые в производстве режимы резания на операциях торцевого фрезерования и плоского маятникового шлифования изготавливаемых деталей, а также их влияние на плоскостность при различных режимах предварительной термообработки. Сделаны выводы по полученным результатам.

Ключевые слова: последовательная обработка, наклеп, плоскостность, коррозионно-стойкая сталь

© Колодяжный Д.Ю., Черкашин С.О., Вороненко В.П., 2025

Для цитирования

Колодяжный Д.Ю., Черкашин С.О., Вороненко В.П. Получение требуемого параметра точности формы тонких длинных деталей из стали 08X15H5Д2Т при последовательной обработке посредством подбора параметров режимов резания и термической обработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 87-93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-87-93>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

OBTAINING THE REQUIRED SHAPE ACCURACY PARAMETER FOR THIN LONG PARTS MADE OF 08H15N5D2T STEEL DURING SEQUENTIAL PROCESSING BY SELECTING THE PARAMETERS OF CUTTING MODES AND HEAT TREATMENT

Kolodyazhny D.Yu., Cherkashin S.O., Voronenko V.P.

Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses the effect of riveting on the required shape accuracy (flatness) of thin long parts made of 08H15N5D2T steel during sequential machining. Flatness is a parameter of shape accuracy, which is characterized by the degree of deviation of the surface from a perfectly flat state relative to an ideal body (an ideal body means a body that has a certain degree of shape accuracy, confirmed by special techniques). It is affected by mechanical processing and the ability of the metal to store the received energy in the form of stresses. The machining modes, if selected incorrectly, introduce greater hardness into the product layers compared to the hardness obtained after heat treatment. This phenomenon is called riveting (or over-riveting). Heat treatment also plays an important role in obtaining the required accuracy values. With a rationally selected heat treatment mode, the amount of riveting decreases with the same machining modes, as well as the likelihood of over-riveting. The article conducts experiments on 08H15N5D2T steel samples and presents the cutting modes used in production for end milling and flat pendulum grinding of manufactured parts, as well as their effect on flatness under various pre-heat treatment modes. Conclusions are drawn based on the results obtained.

Keywords: sequential processing, riveting, flatness, corrosion-resistant steel

For citation

Kolodyazhny D.Yu., Cherkashin S.O., Voronenko V.P. Obtaining the Required Shape Accuracy Parameter for Thin Long Parts Made of 08H15N5D2T Steel During Sequential Processing by Selecting the Parameters of Cutting Modes and Heat Treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 87-93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-87-93>

Введение

Получение заданных параметров точности формы деталей можно добиться с помощью подбора режимов термической обработки и резания, а также определенной последовательностью операций технологического процесса изготовления.

В рассматриваемом случае состав обрабатываемой коррозионно-стойкой мартенситно-старееющей стали 08Х15Н5Д2Т, используемой при изготовлении деталей на производстве, оказывает значительное влияние на получение требуемых параметров точности. Он оказывает влияние на остаточные деформации путем накопления и последующего «освобождения» энергии, что осложняет надежную эксплуатацию изготовленных изделий. При большом количестве легирующих элементов механическая обработка становится трудоемкой ввиду снижения режимов резания при механической обработке, использования специального инструмента, большого количества промежуточного технологического контроля и специальных видов обработки материала [1–3].

Поэтапная обработка отличается тем, что заготовка проходит несколько этапов механической обработки для получения готовой детали. Также для этого процесса характерно внесение напряжений в заготовку после каждого этапа обработки, что в совокупно-

сти с дальнейшей обработкой может привести к увеличению твердости поверхностного слоя изделия, к перенаклепу и «раскрытию» остаточных деформаций, что не обеспечит требуемых характеристик деталей.

Методика проведения исследования

При последовательном процессе обработки изделия, состоящем из операций термической обработки, торцевого фрезерования и плоского маятникового шлифования, имеется проблема получения требуемого параметра точности формы, то есть величины плоскостности для деталей из стали 08Х15Н5Д2Т. Происходит превышение допустимой величины данного параметра для торцевого фрезерования более чем 0,1 мм, а для плоского шлифования более 0,03 мм. Процент брака на производстве: на торцевом фрезеровании – 5%, а на плоском маятниковом шлифовании – 12%.

Цель исследования состояла в обеспечении заданного параметра точности формы, а именно плоскостности [4], при экспериментально подобранных режимах термической обработки и режимах резания при последовательной механической обработке (сначала торцевое фрезерование, потом плоское маятниковое шлифование), а также снижении выхода допусчного значения требуемого параметра точности формы [5, 6], приводящего к увеличению брака на

производстве, путем анализа возможного влияния наклепа на точность формы деталей.

Основным критерием исследования выступал параметр точности формы (плоскостность), схема измерения плоскостности представлена на **рис. 1**.

Были изготовлены образцы из стали марки 08X15H5D2T по ТУ 14-1-2907-2019 [7], которая является труднообрабатываемой, так как имеет большое количество легирующих элементов: хрома (~15%), никеля (~5%), меди (~2%), титана (~0,2%).

В качестве контроля возникновения остаточных деформаций, вызванных разностью твердости поверхностных слоев, использовалось значение наклепа [8]. Исследование проводилось на приборе "WilsonInstrumentsRockwell 574" при усилии 150 кгс, каждый образец был исследован по схеме, представ-

ленной на **рис. 2**, после термической и механических обработок.

Эксперимент состоял из четырех этапов:

1. Определение твердости образцов после подбора режимов термической обработки.
2. Определение твердости и плоскостности образцов после фрезерной обработки.
3. Определение твердости и плоскостности образцов после шлифования.
4. Расчет наклепа для разных этапов механической обработки.

Для проведения эксперимента были подобраны режимы термической обработки (**табл. 1**), а также экспериментальные режимы резания и режущий инструмент (**табл. 2**).

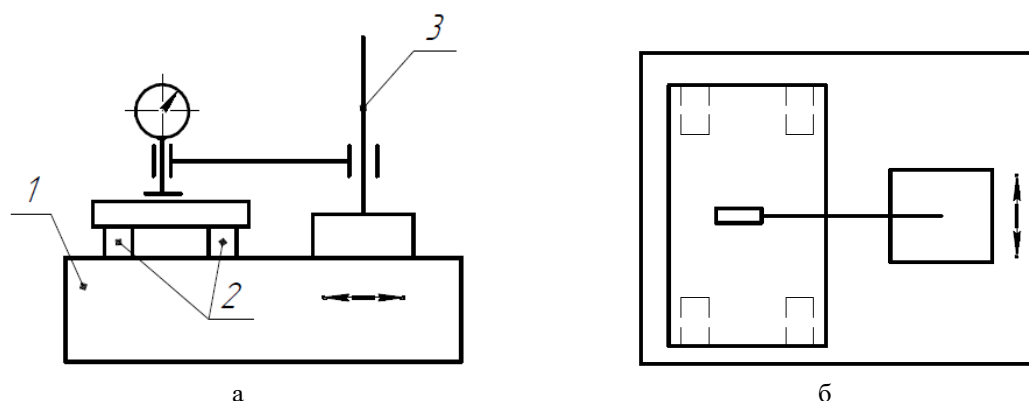
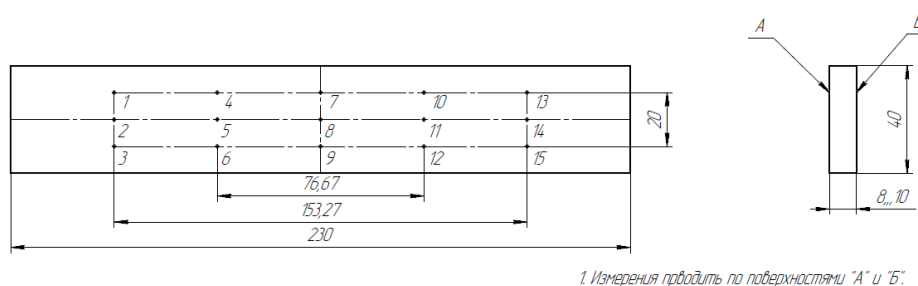


Рис. 1. Схема измерения плоскостности: а – вид спереди; б – вид сверху; 1 – поверочная плита (1-1-1000×630 ГОСТ 10905-86); 2 – подкладки (набор концевых мер КМД №1 кл.1 (1-н1) ЧИЗ); 3 – измерительный прибор (Приспособление «Вега-ПК-500» для фрезерования и Индикатор Vogel для проверки плоскостей и параллелей для шлифования)

Fig. 1. Flatness measurement scheme: а is front view; б is top view; 1 is calibration plate (1-1-1000×630 GOST 10905-86); 2 is backing strip (set of end measures KMD No. 1 cl.1 (1-h1) CHIZ); 3 is measuring instrument (Vega-PK-500 device for milling and Vogel indicator for checking planes and parallels for grinding)



1. Измерения проводить по поверхностям "А" и "Б".

Рис. 2. Схема для измерения твердости до и после на разных этапах обработки образцов
Fig. 2. Diagram for measuring hardness before and after at different stages of sample processing

Таблица 1. Подобранные режимы термической обработки для образцов из стали 08X15H5D2T
Table 1. Selected heat treatment modes for 08H15N5D2T steel samples

Режим для закалки (температура; время выдержки; среда охлаждения)	Режимы для старения (температура; время выдержки; среда охлаждения)
1000°C±10°C; 30 минут; вода	200°C±10°C; 150 минут; воздух
	400°C±10°C; 150 минут; воздух
	600°C±10°C; 150 минут; воздух

Таблица 2. Используемые режимы резания, режущий инструмент и СОЖ
Table 2. Cutting modes, cutting tools and coolant used

Параметры режима резания	Режимы резания	
	Исходные данные	Эксперимент
	Торцевое фрезерование	
Термическая обработка	Закалка: 1000°C±10°C; 30 мин; вода Старение: 500°C±10°C; 150 мин; воздух	Согласно табл. 1
Общий припуск, мм	1,5	1,5
Минутная подача, мм/мин	420	420
Припуск на одну сторону, мм	0,75	0,75
Количество проходов на сторону	1	1
Скорость резания, м/мин	250	220
Используемая СОЖ	-	NSK konentrat (водная)
Используемый корпус для сменных пластин	2214-0275	50A05R-S90AD16E-C
Используемые пластины	TP40AM PNEA-110408	ADMX160616PR-R PRAMET M9315
	Плоское шлифование	
	Исходные данные	Эксперимент
	Торцевое фрезерование	
Общий припуск, мм	0,50	0,50
Припуск на одну сторону, мм	0,25	0,25
Съем за один ход, мм	0,0625	0,004
Продольная подача, м/мин	25	8,5
Скорость вращения круга, м/с	14	5
Используемая СОЖ	NSK konentrat (водная)	NSK konentrat (водная)
Используемый шлифовальный круг	405×75×127×200×50 WA463111VBA5A	1A1 250×20×76×10 CBN30 B151 100NV 35

Режим закалки на основании проведенного исследования [10] не менялся, а менялся режим старения. Для более детального исследования влияния степени наклепа на параметр точности интервалы температуры были взяты больше. Закалка и старение проводились в электропечи ПКМ 3.6.2/11,5-ЭК.

Уменьшение диаметра корпуса для сменных пластин и скорости резания может быть обусловлено снижением возможных возникающих вибраций. Применение СОЖ в процессе фрезерования позволяет снизить тепловые воздействия на деталь и режущий инструмент [9].

При операции шлифования был уменьшен съем за один рабочий ход стола станка и продольная подача для минимизации вносимых тепловых и силовых напряжений в образцы.

Таблица 3. Величина плоскостности образцов из стали 08X15H5D2T при последовательной механической обработке
Table 3. The value of the flatness of samples made of 08H15N5D2T steel during sequential machining

Режимы резания	Величина плоскостности образцов			Получаемая плоскостность при действующем процессе изготовления, мм	Требуемая плоскостность, мм
	при стандартной закалке и старении: 200°C±10°C; 150 мин; воздух	при стандартной закалке и старении: 400°C±10°C; 150 мин; воздух	при стандартной закалке и старении: 600°C±10°C; 150 мин; воздух		
Торцевое фрезерование (после термической обработки)	0,05	0,09	0,06	0,1	0,1
Плоское шлифование (окончательно, после фрезерования)	0,017	0,022	0,027	0,028	0,03

Результаты эксперимента

Образцы подверглись механической обработке сначала торцевым фрезерованием, затем плоским маятниковым шлифованием с измерением твердости и плоскостности после каждого этапа обработки. Величина плоскостности образцов представлена в табл. 3.

Рассчитав величину степени наклепа по формуле (1) [8], получим значения, которые представлены в табл. 4.

$$N = \frac{HRC - HRC_0}{HRC_0}, \quad (1)$$

где N – степень наклепа; HRC – величина твердости после механической обработки; HRC_0 – величина твердости после термических операций и без механообработки.

Таблица 4. Величина наклепа при разных режимах термической обработки и последовательной механической обработке (сначала торцевым фрезерованием, потом плоским шлифованием)

Table 4. The amount of riveting under different modes of heat treatment and sequential machining (first by end milling, then by flat grinding)

Величина наклепа (степень наклепа)							
при текущей последовательной механической обработке		при стандартной закалке (см. табл. 3) и старении: 200°C±10°C; 150 мин; воздух		при стандартной закалке (см. табл. 3) и старении: 400°C±10°C; 150 мин; воздух		при стандартной закалке (см. табл. 3) и старении: 600°C±10°C; 150 мин; воздух	
Торцевое фрезерование (после термической обработки)							
Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б
0,160	0,050	0,050	0,090	0,007	0,011	0,029	0,040
Плоское шлифование (окончательно, после фрезерования)							
Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б
0,220	0,070	0,040	0,052	0,054	0,052	0,003	0,026

Согласно источнику [11], Безъязычный В.Ф. описывал, что режимы резания, которые определяют качество поверхностного слоя и точность обработки, определяются следующей математической моделью:

$$(t, s, v) = f \left(\begin{matrix} \sigma_{ост}, R_z, h_c, \beta_d, T_p, \sigma_T, E_d, \tau_p, \beta_1, \alpha_1, \\ \alpha_p, \mu, \lambda, \lambda_p, \lambda_{ст}, \theta_{пл}, \alpha, \gamma, \varphi, \varphi_1, r, \rho_1, \\ \delta, j_{сист}, B_1, H_1, H, L_p \end{matrix} \right), \quad (2)$$

где t – глубина резания; s – подача; v – скорость резания; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения; h_c – глубина наклепа; R_z – высота неровностей; σ_T , E_d , τ_p – предел текучести, модуль упругости и сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу соответственно; β_d – коэффициент температурного линейного расширения обрабатываемого материала; μ , α – коэффициенты Пуассона и температуропроводности обрабатываемого материала; λ и λ_p – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов; $\theta_{пл}$ – температура плавления обрабатываемого материала; α и γ – задний и передний углы резца; φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы в плане; r – радиус при вершине резца в плане; ρ_1 – радиус скругления режущей кромки; B_1 и H_1 – ширина и высота резца; L_p – длина выступающей части резца из суппорта; H – размер обрабатываемой детали; T_p – технологический допуск на размер обрабатываемой детали; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала державки резца; α_1 и α_p – коэффициенты теплоотдачи обрабатываемого материала и материала державки резца; δ – величина износа резца по задней поверхности; $j_{сист}$ – жесткость технологической системы СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь); f – функция.

Степень наклепа определяется по следующей формуле:

$$N = \frac{h_c}{1, 25(\sigma_{вз} / \sigma_{вз})^{0,8}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{вз}$ – предел прочности электротехнической стали, принятой за эталон.

Предполагая, что параметры точности зависят от режимов резания, можно также предположить, что параметр точности изделия имеет функцию от параметров системы СПИД. Получается, что параметр точности имеет зависимость через функцию от параметров СПИД, которые обозначены в формуле (2):

$$\Delta = u(t, s, v), \quad (4)$$

где Δ – получаемый параметр точности; u – функция.

Подробно раскрыв формулу (4) с учетом параметров, указанных в (2), получим

$$\Delta = u \left(f \left(\begin{matrix} \sigma_{ост}, R_z, h_c, \beta_d, T_p, \sigma_T, E_d, \tau_p, \beta_1, \\ \alpha_1, \alpha_p, \mu, \lambda, \lambda_p, \lambda_{ст}, \theta_{пл}, \alpha, \gamma, \varphi, \varphi_1, \\ r, \rho_1, \delta, j_{сист}, B_1, H_1, H, L_p \end{matrix} \right) \right). \quad (5)$$

Полученная зависимость справедлива для точения, и Сухой Д.С. в своей работе [13] формализовал ее с помощью метода подобия. В свою очередь, Семенов А.Н. в своей работе [14] раскрывал данные зависимости и обосновал, что точность формы детали, которая обрабатывается на плоскошлифовальном станке, определяется погрешностью, включающей в себя параметры системы СПИД, и выражается следующим образом:

$$\Delta_{\phi} = \Delta_c + \Delta_n + \Delta_{\text{и}} + \Delta_d, \quad (6)$$

где Δ_c – погрешности, вносимые станком; Δ_n – погрешности, вносимые приспособлением; $\Delta_{\text{и}}$ – погрешности, вносимые инструментом; Δ_d – погрешности, вызванные воздействием системы СПИД на деталь.

Зависимость получаемой точности формы изделий от наклепа не прямая и она «лежит» через двойную функцию. Для получения подробного и корректного результата требуется проводить дополнительные эксперименты и анализ их результатов.

Выводы

1. Заданное значение точности формы образцов (плоскостности) было обеспечено на всех экспериментальных режимах механической обработки, которой предшествовали операции закалки и старения, то есть данные режимы не приводят к недопустимому отклонению точности формы. Данные режимы резания рекомендуются к использованию на производстве для уменьшения количества брака.

2. Величина наклепа уменьшалась на образцах с режимом старения 200 и 600°C и возрастала при температуре старения 400°C. Это может говорить о том, что наклеп влияет на точность больше у образца с температурой старения 400°C и при этом минимально влияет на образец с температурой старения 600°C.

Из преобразований, базирующихся на работах Безязычного В.Ф., а также на основании работ Семенова А.Н. и Сухого Д.С., можно сказать, что наклеп имеет не прямое влияние на получаемую точность обработки, то есть через двойную функцию. Для подробного математического описания требуется провести дополнительные эксперименты.

Список источников

1. Диагностика технологической системы «станок-приспособление-инструмент-деталь»: учеб. пособие / сост.: А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. 144 с.
2. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки / под ред. проф. П.Г. Петрухи. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974. 616 с.
3. Технологичность конструкции изделия: справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; под общ. ред. Ю.Д. Амирова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.: ил.
4. ГОСТ 2.308-2011. Единая система конструкторской документации. Указания допусков формы и расположения поверхностей: дата введения 01.01.2011. М.: Стандартинформ, 2012. 27 с.
5. Исследование возможности обеспечения плоскостности для плоских деталей из стали 08X15H5D2T (ВНС-2) на операции торцевого фрезерования при разной термической обработке с учетом микроструктуры / Д.Ю. Колодяжный, С.О. Черкашин, С.Г. Ляпусов, В.П.

Вороненко // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2024. № 4 (71). С. 94-101.

6. Обеспечение требуемой точности формы длинных плоских деталей из стали ВНС-2 при плоском шлифовании за счет изменяемых параметров режимов резания и термической обработки / Д.Ю. Колодяжный, С.О. Черкашин, С.Г. Ляпусов, В.П. Вороненко // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2025. № 1 (72). С. 66-72.
7. ТУ 14-1-2907-2019. Сталь толстолистовая марки 08X15H5D2T (ЭП410), 08X15H5D2T-Ш (ЭП-410-Ш). Технические условия.
8. Виноградова Н.В. Определение параметров качества поверхностного слоя деталей после механической обработки с учетом дислокационных и структурно-фазовых превращений: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. ... канд. техн. наук / Виноградова Наталья Владимировна. Рыбинск, 2011. 261 с.
9. Безязычный В.Ф., Аверьянов И.Н., Кордюков А.В. Расчет режимов резания: учеб. пособие. Рыбинск: РГАТА, 2009. 185 с.
10. Внедрение технологичного коррозионно-стойкого материала взамен стали 07X16H6 для изготовления рабочих колес центробежных компрессоров / Е.Н. Поморцев, И.Г. Галиахметов, В.И. Чигарин [и др.]. // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 5. С. 44-47.
11. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В.Ф. Безязычный, Т.Д. Кожина, А.В. Константинов, В.В. Непомилуев, А.Н. Семенов, Т.В. Шарова, Ю.П. Чистяков. М.: Изд-во МАИ, 1993. 184 с.
12. Безязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. 2-е изд., испр. и доп. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 356 с.
13. Сухой Д.С. Расчетное определение погрешности обработки с учетом положений технологической наследственности при точении и фрезеровании: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. ... канд. техн. наук / Сухой Дмитрий Станиславович; ГОУ ВПО «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева». Рыбинск, 2009. 199 с.
14. Семенов А.Н. Исследование методов повышения точности формы детали при плоском шлифовании: специальность К212402: дис. ... канд. техн. наук / Семенов Анатолий Николаевич. Ленинград, 1978. 209 с.

References

1. Gavrilin A.N., Moizes B.B. *Diagnostika tekhnologicheskoy sistemy «stanok-prisposoblenie-instrument-detal»: uchebnoe posobie* [Diagnostics of the technological system "machine-device-tool-part": textbook]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2016, 144 p. (In Russ.)
2. Petrukha P.G. *Rezanie konstruktivnykh materialov, rezhushchie instrumenty i stanki* [Cutting of structural materials, cutting tools and machines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1974, 616 p. (In Russ.)
3. Amirov Yu.D., Alferova T.K., Volkov P.N. et al. *Tekhnologichnost konstruktivnykh izdeliya: spravochnik* [Manufactur-

- ability of the product design: a reference book]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990, 768 p. (In Russ.)
4. State standard GOST 2.308-2011. Unified system of design documentation. Representation of limits of forms and surface lay-out on drawings. Moscow : Standartinform, 2012, 27 p. (In Russ.)
5. Kolodyazhny D.Y., Cherkashin S.O., Lyapusov S.G., Voronenko V.P. Studying the possibility of providing flatness for flat parts made of 08X15N5D2T steel (VNS-2) for end milling operations with various heat treatments, taking into account the microstructure. *Vestnik MGTU «STANKIN»* [Bulletin of MSUT STANKIN]. 2024;(4(71)):94-101. (In Russ.) ISSN 2072-3172
6. Kolodyazhny D.Y., Cherkashin S.O., Lyapusov S.G., Voronenko V.P. Ensuring the required shape accuracy of long flat steel parts VNS-2 for flat grinding due to variable parameters of cutting and heat treatment modes. *Vestnik MGTU «STANKIN»* [Bulletin of MSUT STANKIN]. 2025;(1(72)):66-72. (In Russ.) ISSN 2072-3172
7. Technical specifications 14-1-2907-2019. Thick-sheet steel of 08X15N5D2T (EP410), 08X15N5D2T-Sh (EP-410-Sh) grades.
8. Vinogradova N.V. Opredelenie parametrov kachestva poverhnostnogo sloya detaley posle mekhanicheskoy obrabotki s uchetom dislokatsionnyh i strukturno-fazovyh prevrashcheniy: dis. ... kand. tekhn. nauk [Determination of the quality parameters of the surface layer of parts after machining, taking into account dislocation and structural-phase transformations. PhD dissertation]. Rybinsk, 2011. 261 p.
9. Bezzyazychny V.F., Averyanov I.N., Kordyukov A.V. *Raschet rezhimov rezaniya: ucheb. posobie* [Calculation of cutting modes: textbook]. Rybinsk: RGATA, 2009, 185 p. (In Russ.)
10. Pomortsev E.N., Galiakhmetov I.G., Chigarin V.I. et al. Introduction of technological corrosion-resistant material instead of steel 07X16H6 for the manufacture of impellers of centrifugal compressors. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressor technology and pneumatics]. 2013;(5):44-47. (In Russ.)
11. Bezzyazychny V.F., Kozhina T.D., Konstantinov A.V., Nepomiluyev V.V., Semenov A.N., Sharova T.V., Chistyakov Yu.P. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh usloviy mekhanicheskoy obrabotki detaley aviatsionnykh dvigateley* [Optimization of technological conditions of mechanical processing of aircraft engine parts]. Moscow: Publishing House of MAI, 1993, 184 p. (In Russ.)
12. Bezzyazychny V.F. *Metod podobiya v tekhnologii mashinostroyeniya: monografiya* [Method of similarity in mechanical engineering technology: monograph]. Moscow; Vologda : Infra-Engineering, 2021, 356 p. (In Russ.) ISBN 978-5-9729-0766-3
13. Sukhoi D.S. Raschetnoe opredelenie pogreshnosti obrabotki s uchetom polozheniy tekhnologicheskoy nasledstvennosti pri tochenii i frezerovanii: dis. ... kand. tekhn. nauk [Computational determination of processing error, taking into account the provisions of technological heredity in turning and milling. PhD Dissertation]. Rybinsk, 2009. 199 p.
14. Semenov A.N. *Issledovanie metodov povysheniya tochnosti formy detali pri ploskom shlifovanii : dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research of methods for improving the accuracy of the shape of a part in flat molding. PhD dissertation]. Leningrad, 1978. 209 p.

Поступила 22.08.2025; принята к публикации 10.11.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 22/08/2025; revised 10/11/2025; published 25/12/2025

Колодяжный Дмитрий Юрьевич – доктор технических наук, и.о. проректора по научной деятельности, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.
Email: kolod@mail.ru

Черкашин Станислав Олегович – аспирант кафедры «Технология машиностроения», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.
Email: ct4ccher@yandex.ru

Вороненко Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.
Email: vpvoronenko@yandex.ru

Dmitry Yu. Kolodyazhny – DrSc(Eng.), Acting Vice-Rector for Scientific Activities, Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, Russia.
Email: kolod@mail.ru

Stanislav O. Cherkashin – Postgraduate Student of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, Russia.
Email: ct4ccher@yandex.ru

Vladimir P. Voronenko – DrSc(Eng.), Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, Russia.
Email: vpvoronenko@yandex.ru