
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.91.01: 621.914.1

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЯ****© 2023 г. А. А. Ковалев^{а,*}, Н. В. Рогов^а, С. Е. Тихомиров^б,
А. С. Краско^{а,с}, Ю. Е. Моисеев^а**^а*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*^б*АО “Корпорация “Комета”, Москва, Россия*^с*Российский технологический университет – МИРЭА, Москва, Россия***e-mail: kovalevartem@bmstu.ru*

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 15.08.2023 г.

Принята к публикации 20.08.2023 г.

В настоящей статье рассматривается влияние режимов резания на такую эксплуатационную характеристику, как усталостная прочность, при фрезеровании концевой фрезой. На основании литературного анализа было установлено, что усталостная прочность зависит от качества поверхностного слоя детали, неровности которого являются концентраторами напряжений. По результатам экспериментальных исследований получена математическая модель, описывающая взаимосвязь шероховатости и коэффициента концентрации напряжений от режимов резания.

Ключевые слова: коэффициент концентрации напряжений, шероховатость, режимы резания, чистовое фрезерование, концевая фреза, рычаг P10, скорость резания, подача на зуб

DOI: 10.31857/S023571192306010X, EDN: EEWNJG

Обеспечение эксплуатационно-технических характеристик ответственных деталей машин, работающих в условиях многократных воздействий, является важнейшей задачей на сегодняшний день. По данным статистических исследований более 80% поломок и разрушений происходит из-за усталостных процессов [1]. Поэтому для повышения надежности и долговечности работы изделий необходимо решить проблему усталостной прочности деталей.

На сегодняшний день авиационные изделия являются наиболее сложными и ответственными при производстве. К ним предъявляют высокие требования к показателям качества и надежности для обеспечения безопасности полета. В качестве примера был рассмотрен автомат перекоса.

Автомат перекоса является основным механизмом в системе управления вертолетом и предназначен для изменения общего шага несущего винта и циклического изменения углов лопастей в зависимости от азимутального положения.

Одной из составляющих рассматриваемого изделия является деталь “Рычаг P10”. Данный рычаг входит в состав системы поперечного управления вертолетом и предназначен для передачи силы и движения диску, закрепленного на кронштейне. Он обеспечивает изменения положения (наклона) тарелки автомата перекоса.

В процессе работы деталь испытывает действие переменных напряжений, что приводит к образованию и развитию трещин.



Рис. 1. Поверхность детали, подверженная многократным нагрузкам.

Для передачи движения, на плоскую поверхность рычага (рис. 1) воздействует переменная сила от тяги поперечного управления. Таким образом, такая поверхность подвержена многократным нагрузкам и именно к ней необходимо применять методы поверхностной обработки для повышения усталостной прочности.

Определение взаимосвязи усталостной прочности и качества поверхностного слоя детали. Под усталостной прочностью понимают способность материала изделия противостоять разрушению с течением времени под действием многократных знакопеременных нагрузок. Разрушение происходит из-за постепенного накопления повреждений в материале, которые приводят к образованию и развитию трещин.

Одной из характеристик, определяющих усталостную прочность, является предел выносливости σ_{-1} . Эта величина зависит от состояния и свойств поверхностного слоя детали и представляет собой наибольшее напряжение цикла, при котором после определенного числа циклов не наступает усталостное разрушение. За счет поверхностной обработки (обработка резанием, химико-термическая обработка, поверхностное пластическое деформирование) уровень предела усталости материала повышается [3–7].

Из выше сказанного также следует, что на усталостную прочность влияет шероховатость обработанной поверхности. Неровности, образующиеся на поверхности, являются концентраторами напряжений и могут привести к возникновению нарушений сплошности поверхностного слоя металла. Это становится причиной образования усталостных трещин, что в свою очередь приводит к падению предела выносливости детали [2]

$$\sigma_{-1d} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a},$$

где σ_{-1d} — предел выносливости конкретной детали с концентраторами напряжений; σ_{-1} — предел выносливости образца без концентраторов напряжений; σ_a — коэффициент концентрации напряжений.

Таким образом, для повышения усталостной прочности детали необходимо, чтобы коэффициент концентрации напряжений был минимальным.

В общем случае коэффициент рассчитывается по формуле [2]

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}},$$

где $\sigma_{\max}$ — наибольшие местные напряжения; $\sigma_{\text{ном}}$ — номинальные напряжения.

Для определения коэффициента концентрации напряжений в зависимости от качества поверхностного слоя можно использовать формулу [8]

$$\sigma_a = 1 + \frac{200}{t_m s_m} [2\gamma R_{\max} (R_{\max} - R_p)]^{0.5}, \quad (1)$$

где t_m — относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; s_m — средний шаг неровностей профиля шероховатости, мкм; γ — коэффициент, зависящий от шага неровностей к их высоте; $R_{\max}$ — наибольшая высота профиля шероховатости, мкм; R_p — расстояние от высшей точки наибольшего выступа профиля до линии единичных выступов в пределах базовой длины, мкм.

Выявление параметров технологической операции, оказывающие влияние на показатель качества поверхности. Для детали “Рычаг Р10” была проведена разработка маршрутного технологического процесса механической обработки, в результате которой для исследуемой поверхности (рис. 1) был выбран наиболее рациональный метод обработки — концевое фрезерование, проводимое боковой частью режущего инструмента. Механическая обработка заготовки велась на фрезерном станке с ЧПУ мод. VF-2 HAAS с помощью цельнотвердосплавной концевой фрезы 1K354-1600-100-XD 1730 [9].

Одной из характеристик при оценке качества обработанной поверхности после фрезерования является шероховатость. Наибольшее влияние на высоту неровностей оказывает подача на зуб S_z [10].

В работах А. Логинса и С. Нэджи Равая выявлено, что на шероховатость обработанной поверхности при концевом фрезеровании влияет скорость резания [11, 12].

Таким образом, в качестве параметров технологической операции, оказывающие доминирующие влияния на шероховатость поверхности использовали подачу на зуб и скорость резания.

Параметры и план экспериментального исследования. Цель экспериментального исследования — определение зависимости параметра шероховатости (Ra , мкм) от режимов резания (скорости резания и величины подачи).

В качестве заготовки был использован стальной пруток (20ХН3А) квадратного сечения 30×30 мм длиной $L = 150$ мм. Обработка проведена на фрезерном станке с ЧПУ мод. JVM-360LS с использованием твердосплавной концевой фрезы Ø16 мм с четырьмя зубьями. Пруток устанавливался в слесарные тиски с плоскими губками. Перед началом проведения эксперимента были выбраны режимы резания (подача на зуб и скорость резания) и занесены в табл. 1.

Подача S_M , мм/мин, определяется по формуле [13]

$$S_M = S_z z n.$$

Частота вращения, об/мин, определяется по формуле [13]

$$n = \frac{1000V}{\pi D}.$$

При исследовании зависимости параметра шероховатости поверхности Ra от режимов резания каждый из факторов рассматривался на трех уровнях (нижнем, нулевом и верхнем). Следовательно, число проводимых опытов составило [14]

$$U = u^k = 3^2 = 9.$$



Рис. 2. Процесс обработки поверхности боковой частью концевой фрезы.



Рис. 3. Измерение шероховатости профилометром мод. TR200.

Механический процесс обработки заготовки продемонстрирован на рис. 2.

Шероховатость после обработки определялась профилометром мод. TR200 (рис. 3).

В табл. 1 приведены режимы резания и экспериментальные значения шероховатости Ra .

Таблица 1. Значения режимов резания и параметров шероховатости

Материал	t , мм	S_z , мм/зуб	V , м/мин	n , об/мин	S_M , мм/мин	Ra , мкм
Сталь 20ХН3А	0.5	0.01	70	1394	55.8	0.343
			105	2090	83.6	0.322
			140	2787	111.5	0.243
		0.03	70	1394	167.3	0.726
			105	2090	250.8	0.613
			140	2787	334.5	0.512
		0.05	70	1394	278.8	0.934
			105	2090	418.0	0.779
			140	2787	557.4	0.752

Анализ взаимосвязи параметров шероховатости от режимов резания. При исследовании взаимосвязи была получена математическая модель, позволяющая оценить влияние таких режимов резания, как скорость резания и подача на зуб, на величину шероховатости Ra , мкм, при помощи регрессионного анализа [15].

Регрессионный анализ базировался на следующих предположениях: 1) припуск на чистовую поверхность не учитывается; 2) инструмент не меняется; 3) при каждом сочетании значений независимых переменных величина зависимой переменной y подчиняется закону нормального распределения; 4) переменные линейно независимы.

Регрессионный анализ основывается на многофакторном исследовании зависимой переменной y (шероховатость Ra) от независимых переменных x_i (скорости резания и подачи на зуб).

Для проведения многофакторного анализа рассмотрено две зависимости: линейная и нелинейная (степенная).

Формула линейного регрессионного анализа [15]

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (2)$$

где b_i – коэффициенты регрессии.

Формула нелинейного (степенного) регрессионного анализа [16]

$$y = k_0 \cdot x_1^{k_1} \cdot x_2^{k_2} \cdot \dots \cdot x_n^{k_n}. \quad (3)$$

Для определения значений параметров регрессий применялся метод наименьших квадратов (далее МНК). МНК позволяет получить такие оценки параметров, при которых сумма квадратов отклонений фактических значений шероховатости Ra от теоретических минимальна.

Подставив независимые переменные x_i (подача на зуб и скорость резания) и зависимую переменную y (Ra , мкм) в формулы (2), (3) получим

$$Ra = b_0 + b_1S_z + b_2V; \quad (4)$$

$$Ra = k_0S_z^{k_1}V^{k_2}. \quad (5)$$

Для определения линейных коэффициентов регрессии использована табл. 1 и функция *ЛИНЕЙН* программы Microsoft Excel.

По итогам проведенных вычислений были получены следующие коэффициенты:

$$b_0 = 0.439; \quad b_1 = 12.971; \quad b_2 = -0.02.$$

Подставив полученные коэффициенты в формулу (4), получили линейную функцию, описывающую зависимость параметров шероховатости от режимов резания

$$Ra = 0.439 + 12.971S_z - 0.002V.$$

Средняя погрешность полученной функции рассчитывалась по формулам [14]

$$\varepsilon = \frac{Ra - Ra_p}{Ra} 100\%; \quad (6)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n). \quad (7)$$

Полученные значения приведены в табл. 2.

Для определения степенных коэффициентов регрессии использована та же функция *ЛИНЕЙН*. Для этого введены переменные для преобразования степенной функции в линейную [16]

$$K = \ln(k_0); \quad S = \ln(S_z); \quad V = \ln(V); \quad R = \ln(R_a).$$

Таблица 2. Расчетные значения линейной функции

№	S_z , мм/зуб	V , м/мин	n , об/мин	S_M , мм/мин	Ra , мкм	Ra_p , мкм	ε , %	
1	0.01	70	1394	55.75	0.343	0.404	17.64	
2		105	2090	83.6	0.322	0.321	0.34	
3		140	2787	111.5	0.243	0.238	1.92	
4	0.03	70	1394	167.3	0.726	0.663	8.69	
5		105	2090	250.8	0.6125	0.58	5.25	
6		140	2787	334.5	0.512	0.498	2.78	
7	0.05	70	1394	278.8	0.9335	0.922	1.2	
8		105	2090	418	0.779	0.84	7.8	
9		140	2787	557.4	0.752	0.757	0.69	
						$\bar{\varepsilon}$, %	5.14	
						$\varepsilon_{\max}$, %	17.64	

Таблица 3. Расчетные значения степенной функции

№	S_z , мм/зуб	V , м/мин	n , об/мин	S_M , мм/мин	Ra , мкм	Ra_p , мкм	ε , %
1	0.01	70	1394	55.75	0.343	0.353	2.78
2		105	2090	83.6	0.322	0.296	8.08
3		140	2787	111.5	0.243	0.261	7.59
4	0.03	70	1394	167.3	0.726	0.703	3.17
5		105	2090	250.8	0.6125	0.590	3.64
6		140	2787	334.5	0.512	0.521	1.82
7	0.05	70	1394	278.8	0.9335	0.969	3.79
8		105	2090	418	0.779	0.813	4.43
9		140	2787	557.4	0.752	0.719	4.45
						$\bar{\varepsilon}$, %	4.42
						$\varepsilon_{\max}$, %	8.08

Полученная функция выглядит следующим образом:

$$Ra = K + k_1 S + k_2 V.$$

После проведения вычислений получены следующие коэффициенты:

$$k_0 = 39.751; \quad k_1 = 0.628; \quad k_2 = -0.431.$$

Подставив полученные коэффициенты в формулу (5) определена степенная функция, описывающая зависимость параметров шероховатости от режимов резания

$$Ra = 39.751 S_z^{0.628} V^{-0.431}. \quad (8)$$

Далее по формулам (6), (7) определена средняя погрешность полученной функции. Полученные значения приведены в табл. 3.

По полученным значениям сделан вывод, что степенная функция более точно описывает зависимость параметра шероховатости от режимов резания (максимальная погрешность степенной функции – 8.08% меньше линейной функции – 17.64%). Поэтому для дальнейшего анализа взаимосвязи использована степенная функция.

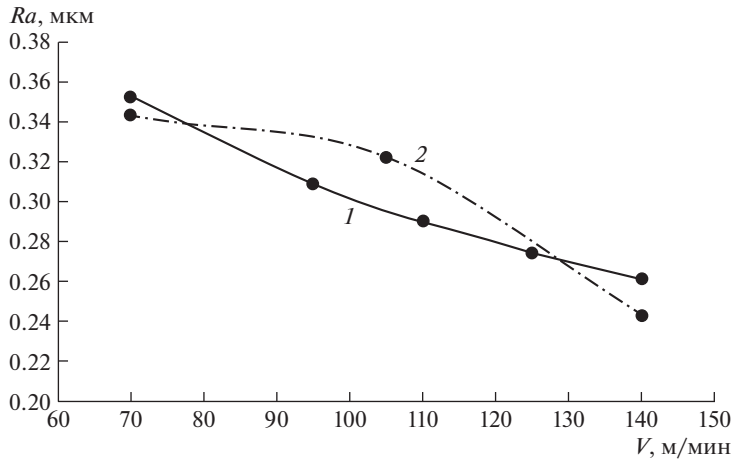


Рис. 4. Зависимость величины шероховатости Ra , мкм от скорости резания V , м/мин при $S_z = 0.01$ мм/зуб: 1 – степенная зависимость; 2 – экспериментальные данные.

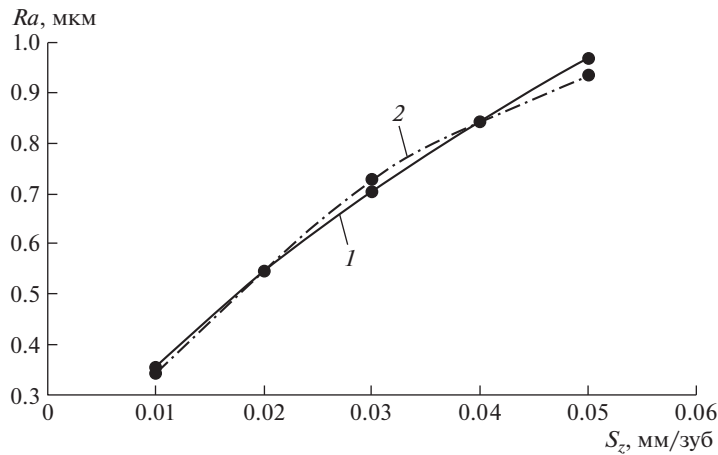


Рис. 5. Зависимость величины шероховатости Ra , мкм от подачи на зуб S_z , мм/зуб при $V = 140$ м/мин: 1 – степенная зависимость; 2 – экспериментальная зависимость.

Графики зависимости шероховатости Ra от скорости резания и подачи на зуб представлены на рис. 4, 5 соответственно.

Анализ взаимосвязи коэффициента концентрации напряжений от режимов резания. В зависимости от параметров шероховатости коэффициент концентрации напряжений определяется по формуле (1)

$$\sigma_a = 1 + \frac{200}{t_m S_m} [2\gamma R_{\max} (R_{\max} - Rp)]^{0.5}.$$

Корреляционная взаимосвязь параметров шероховатости при фрезеровании концевой фрезой боковой частью [17]

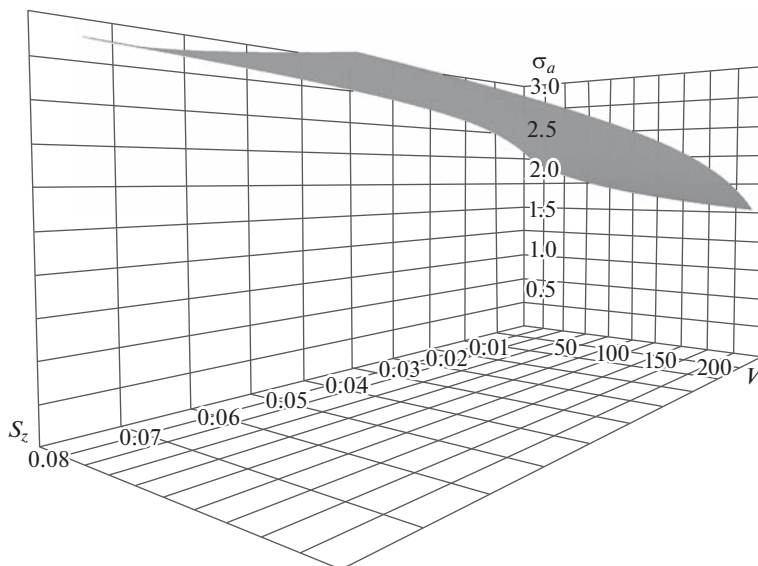


Рис. 6. Зависимость коэффициента концентрации напряжения от скорости резания и подачи на зуб.

$$R_{\max} = -0.1 + 5.65Ra; \quad (9)$$

$$Rp = 3.11Ra; \quad (10)$$

$$S_m = 86 + 603.25Ra. \quad (11)$$

Из полученных зависимостей параметров шероховатости (9), (10), (11) коэффициент концентрации напряжений

$$\sigma_a = 1 + \frac{200}{t_m(86 + 603.25Ra)} [2\gamma(0.01 - 0.819Ra + 14.351Ra^2)]^{0.5}. \quad (12)$$

После упрощения данной зависимости (12) получено

$$\sigma_a = 1 + \frac{1.746\gamma^{0.5}}{t_m} \left[1.036 - \frac{1 + 17.44Ra}{(1 + 7.015Ra)^2} \right]^{0.5}. \quad (13)$$

Подставив степенную функцию (8) в формулу (13) получен коэффициент концентрации напряжений в зависимости от режимов резания

$$\sigma_a = 1 + \frac{1.746\gamma^{0.5}}{t_m} \left[1.036 - \frac{1 + 693.26S_z^{0.628}V^{-0.431}}{(1 + 278.85S_z^{0.628}V^{-0.431})^2} \right]^{0.5}. \quad (14)$$

Зависимость коэффициента концентрации напряжений от скорости резания и подачи на зуб представлена на рис. 6.

Принято, что $\gamma = 0.95$; $t_m = 0.8$.

По полученным графикам зависимости сделан вывод, что при повышении скорости резания коэффициент концентрации напряжений уменьшается, а при повышении подачи на зуб, коэффициент концентрации напряжений увеличивается.

Расчет параметров технологической операции, обеспечивающих минимальный коэффициент концентрации напряжений. При изготовлении детали “Рычаг P10”, обработка

исследуемой поверхности велась цельнотвердосплавной концевой фрезой 1K354-1600-100-XD 1730.

Для обеспечения минимального коэффициента концентрации напряжений необходимо решить систему уравнений, состоящую из 3 критериев: 1) необходимо обеспечить шероховатость поверхности не менее Ra 0.8 мкм; 2) рекомендуемая подача на зуб (S_z) для обеспечения заданного качества поверхностного слоя не более 0.08 мм/зуб [9]; 3) рекомендуемая скорость резания (V) для обеспечения заданного качества поверхностного слоя не более 240 м/с.

Таким образом, можно составить систему из четырех неравенств

$$f(x) = \begin{cases} \sigma_a \rightarrow \min, \\ 0.01 \leq S_z \leq 0.08, \\ V \leq 240, \\ Ra \leq 0.8. \end{cases}$$

Данная система неравенств решена с помощью функции “Поиск решений” программы Microsoft Excel.

По итогам вычислений было получено

$$S_z = 0.01 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}; \quad V = 240 \frac{\text{м}}{\text{мин}}; \quad \sigma_a = 1.645.$$

При данных режимах резания обеспечивается минимальный коэффициент концентрации напряжений.

Выводы. 1. На основании анализа литературных источников было выявлено, что усталостная прочность зависит от шероховатости обработанной поверхности, неровности которой являются концентраторами напряжений. **2.** Была найдена формула связи коэффициента концентрации напряжений от параметров шероховатости:

$$\sigma_a = 1 + \frac{200}{t_m S_m} [2\gamma R_{\max} (R_{\max} - R_p)]^{0.5}.$$

3. Были определены параметры технологической операции, оказывающие влияние на качество поверхностного слоя детали — подача на зуб S_z и скорость резания V . **4.** По результатам эксперимента была получена взаимосвязь параметра шероховатости от режимов резания — подачи на зуб S_z и скорости резания V : $Ra = 39.751 \cdot S_z^{0.628} \cdot V^{-0.431}$. **5.** Была определена теоретическая зависимость коэффициента концентрации напряжений от режимов резания при фрезеровании концевой фрезой боковой частью и построены зависимости

$$\sigma_a = 1 + \frac{1.746\gamma^{0.5}}{t_m} \left[1.036 - \frac{1 + 693.26 S_z^{0.628} V^{-0.431}}{(1 + 278.85 S_z^{0.628} V^{-0.431})^2} \right]^{0.5}.$$

6. Были определены режимы резания при фрезеровании, обеспечивающие минимальный коэффициент концентрации напряжений

$$S_z = 0.01 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}; \quad V = 240 \frac{\text{м}}{\text{мин}}; \quad \sigma_a = 1.645.$$

Полученная теоретическая зависимость коэффициента концентрации напряжения от режимов резания позволяет определить рациональные режимы резания при фрезеровании концевой фрезой боковой частью для обеспечения необходимой усталостной прочности изделия. Однако, полученная теоретическая зависимость не учитывает влияние таких факторов, как применение смазочно-охлаждающих жидкостей, вибро-

устойчивости технической системы и др., поэтому существует необходимость в дальнейшем исследовании этой проблемы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролова О.А. Особенности разрушения конструкционных материалов при различных условиях нагружения: Учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2019. 91 с.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. 17-е изд., исп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 542 с.
3. Древняк В.В., Кочкин Д.Н., Зубов О.Е. Направления повышения долговечности изделий летательных аппаратов // Научный вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19. № 3. С. 29.
4. Дощечкина И.В., Семенчук В.Р. Роль разных способов поверхностной обработки в повышении усталостной прочности изделий // Вестник ХНАДУ. 2018. № 82. С. 44. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-raznyh-sposobov-poverhnostnoy-obrabotki-v-povyshenii-ustalostnoy-prochnosti-izdeliy>
5. Пономаренко И.В., Дьяченко С.С., Дощечкина И.В., Кондратенко И.И. Влияние различных методов поверхностного упрочнения на усталостную прочность // Вестник ХНАДУ. 2006. № 33. С. 41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-razlichnyh-metodov-poverhnostnogo-uprochneniya-na-ustalostnuyu-prochnost>
6. Физико-технологические основы методов обработки: Учеб. пособие / Под ред. А.П. Бабичева. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. 430 с.
7. Kovalev A.A., Krasko A.S., Rogov N.V. Evaluation of the Surface Roughness of Machine Parts with Wear-Resistant Gas Thermal Coatings during Turning // J. Mach. Manuf. Reliab. 2022. V. 51. P. 540. <https://doi.org/10.3103/S1052618822050089>
8. Михайлов А.Н. Функционально-ориентированные технологии. Особенности синтеза новых и нетрадиционных свойств изделий // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. тр. XV междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 15–20 сентября 2008 г. В 4 т. Донецк: ДонНТУ, 2008. Т. 2. С. 290.
9. Каталог металлорежущего инструмента Sandvik Coromant. Универсальные цельные концевые фрезы CoroMill Hard. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/tools/solid-round-tools/solid-carbide-end-mills/coromill-dura>
10. Соловацкая Л.В. Фрезерование типовых поверхностей деталей: Метод. указания. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 44 с.
11. Logins A., Torims T. The influence of high-speed milling strategies on 3D surface roughness parameters // Procedia Engineering. 2015. V. 100. P. 1253. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.491>
12. Ravai Nagy S., Paşca I., Lobonţiu M., Banica M. Experimental research of effective cutting speed influence on surface roughness in ball end milling of C45 material with hardness 34 HRC // Applied Mechanics and Materials. 2014. V. 657. P. 53. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.657.53>
13. Грубый С.В. Расчет режимов резания для операций механической обработки: Учебное пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.
14. Ремизова И.В. Планирование эксперимента при разработке систем управления: практикум. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. Часть 1. 52 с.
15. Максимова Т.Г., Попова И.Н. Эконометрика: Учебно-методическое пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2018 70 с.
16. Базилевский М.П. Построение степенно-показательных регрессионных моделей и их интерпретация // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии. 2020. № 4. С. 19.
17. Гимадеев М.Р. Повышение качества механообработки сложнопрофильных деталей на пятикоординатных обрабатывающих центрах: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2018. 147 с.