

ОЦЕНКА РАССЕЙЯНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Ковалев А.А. *, Рогов Н.В. **

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

(МГТУ им. Н.Э. Баумана),

2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005, Россия

** e-mail: kovalevarta@gmail.com*

*** e-mail: nikolayrogov_24@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 21.12.2020

Рассматриваются существующие способы оценки шероховатости в зависимости от режимов обработки, а также с учётом характеристик технологической среды. На основании полученных расчётов, с использованием инструментов математической статистики, была разработана методика, учитывающая вероятностный характер рассматриваемых процессов и позволяющая связать параметры, характеризующие процесс обработки, со значениями показателей качества поверхностного слоя.

Ключевые слова: качество поверхностного слоя детали, параметры лезвийной обработки, параметры технологической среды, математическая статистика, распределение случайных величин, функция плотности распределения.

Введение

В современном авиационном машиностроении является актуальной проблема обеспечения эксплуатационно-технических характеристик изделий, требования к уровню качества изготовления которых возрастают в условиях расширяющейся их номенклатуры при снижении затрат на производство и повышении производительности [1–6].

Эксплуатационно-технические характеристики закладываются на этапе проектирования, а обеспечиваются на этапе конструкторской обработки изделий и реализации технологического процесса их изготовления. К таким характеристикам относятся надёжность, живучесть и отказоустойчивость, контролепригодность, эксплуатационная и ремонтная технологичность [7].

В частности, обеспечение надёжности является одной из ключевых задач при изготовлении ответственных изделий. К этим изделиям относятся, например, авиационные детали, такие, как валы роторов газотурбинных двигателей (ГТД).

Валы газовых турбин входят в узел роторной части двигателя. Значительная частота вращения роторов, большие нагрузки от действия осевых и

радиальных сил создают высокие напряжения в валах и требуют повышенной точности обработки и балансировки при их изготовлении. Также высокие требования предъявляются к качеству поверхностей валов и состоянию поверхностного слоя [5].

Ввиду высоких темпов расширения номенклатуры выпускаемых изделий возникает необходимость ускорения технологической подготовки производства и сокращения объёма испытаний при их обработке.

С целью сокращения временных и материальных затрат целесообразно установить взаимосвязи между требуемыми эксплуатационно-техническими характеристиками изделия и параметрами технологических методов [8], а также технологических систем [9] в целом, реализующих изготовление рассматриваемых изделий.

Одними из устоявшихся основных материалов, применяемых для изготовления валов ГТД, являются высококачественные низкоуглеродистые легированные стали 18ХН3А, 12ХН3А, 15Х12Н2МВФАБ [5]. Однако для улучшения эксплуатационно-технических характеристик в настоящее время ис-

пользуют модифицированные существующие или новые материалы на основе композитов и наноструктур [10—15]. Проблема применения таких материалов с особыми физико-механическими свойствами заключается в отсутствии общедоступных статистических данных по их обработке, в частности режимов и характеристик свойств технологической среды, на этапе изготовления изделий. Так как применение технологических методов связано с разнообразием технологических сред, инструментов, свойств заготовок, то необходимо учитывать всё множество факторов, которые имеют зачастую различную природу и опосредованную взаимосвязь.

Таким образом, необходимо формализовать связь параметров технологической системы с эксплуатационно-техническими характеристиками изделий, изготавливаемых из вновь разработанных материалов.

Методика установления взаимосвязи значений показателя качества с параметрами технологической операции

Существуют различные исследования в области оценки и выявления взаимосвязей параметров обработки с качеством поверхности деталей [16—20]. В [16] и [18] исследовано контактное взаимодействие поверхностей тел с различными свойствами поверхностного слоя и установлены зависимости износа деталей от качества поверхностного слоя. Шероховатость поверхностей при этом моделировалась на основании сферических сегментов. В [17] также проведены подобные исследования, однако шероховатость поверхностей представлена как совокупность эллипсоидов. В [19] показано, что на эксплуатационные изменения поверхностных слоёв влияют геометрические параметры и физико-механические свойства поверхностей. Но при этом в [20] указывается, что в настоящее время нет единого подхода к оценке степени влияния параметров поверхностного слоя (шероховатости, остаточных напряжений и наклёпа) на эксплуатационные свойства.

На основании обзора источников предложена общая методика, которая может использоваться для установления взаимосвязей значений показателей качества поверхностного слоя изготавливаемой детали с параметрами технологической операции, на которой данные показатели качества формируются.

При разработке методики использовались методы статистического анализа качества обработки детали, изложенные в [21]. В основе пунктов

8—13 методики лежат известные из теории вероятностей и математической статистики зависимости [22].

Методика состоит из 14 этапов:

1. На основании анализа литературных источников и статистических данных определяется зависимость вида $X = f(r_1, r_2, \dots, r_n)$, связывающая получаемый показатель качества X с множеством различных параметров технологической среды (ТС) $\{r_i\}$ при обработке.

2. Разделение множества параметров ТС на подмножество параметров, являющихся детерминированными величинами $\{r_{\text{дет } j}\}$, $j = 1, \dots, s$, и подмножество параметров, являющихся случайными величинами $\{r_{\text{случ } k}\}$, $k = 1, \dots, n - s$.

3. Задаётся необходимое число машинных экспериментов $n_{\text{экс}}$.

4. Для параметров ТС, являющихся детерминированными величинами, задаются номинальные значения $r_{\text{дет } j}$.

5. Для параметров ТС, являющихся случайными величинами, задаются математические ожидания (МО) $r_{\text{случ. ср } k}$ и средние квадратические отклонения (СКО) $\sigma_{r_{\text{случ } k}}$. При $l = 1 \dots n_{\text{экс}}$ программными средствами создаются множества $\{r_{\text{случ } kl}\}$ для каждого k -го параметра, являющегося случайной величиной.

6. Программными средствами создаётся множество $X = \{X_l\}$ при $l = 1 \dots n_{\text{экс}}$, в котором каждый элемент рассчитывается по формуле

$$X_l = f(r_{\text{дет } 1}, r_{\text{дет } 2}, \dots, r_{\text{дет } s}, r_{\text{случ } 1l}, r_{\text{случ } 2l}, \dots, r_{\text{случ } (n-s)l}). \quad (1)$$

7. Определяются минимальный X_{min} и максимальный X_{max} элементы множества X .

8. Определяется число интервалов разбиения по формуле [21]

$$N = \sqrt{n_{\text{экс}}}, \quad (2)$$

и полученное значение округляется до ближайшего большего целого числа.

9. Ширина интервала определяется по формуле [21]

$$\Delta X = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{N}. \quad (3)$$

10. Определяются координаты середин полученных интервалов по формуле [21]

$$x_h = X_{\min} + \frac{\Delta X \cdot h}{2}, \quad (4)$$

где $h = 1, \dots, N$.

11. Определяется абсолютная частота m_h попадания значений множества X в h -й интервал разбиения. Находится значение f_h эмпирической функции плотности распределения случайной величины по формуле [21]

$$f_h = \frac{m_h}{n_{\text{экс}}}. \quad (5)$$

12. Строится графическая зависимость соответствующих значений f_h от x_h (точки $(x_1; f_1), (x_2; f_2), \dots, (x_N; f_N)$). На основании построенной зависимости принимается решение о возможности аппроксимации полученного множества точек функцией плотности нормального распределения. В случае, если модуль среднеквадратичной ошибки δ аппроксимации функции [23] меньше максимально допустимой ошибки δ_{\max} или равен ей ($|\delta| \leq \delta_{\max}$), осуществляется переход к пункту 13 методики. Если данное неравенство не выполняется, то осуществляется переход к пункту 3 методики и изменяется значение $n_{\text{экс}}$. Далее повторяются все пункты с 4 по 11.

13. Рассчитываются параметры полученного нормального распределения МО X_{cp} и СКО σ_X по формулам [21]:

$$X_{\text{cp}} = \frac{\sum_{l=1}^{n_{\text{экс}}} X_l}{n_{\text{экс}}}; \quad (6)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{n_{\text{экс}}} (X_l - X_{\text{cp}})^2}{n_{\text{экс}} - 1}}. \quad (7)$$

14. Определяется вероятность P того, что полученный в результате обработки с принятыми в пунктах 4 и 5 параметрами показатель качества X будет лежать в пределах от a до b (a и b – соот-

ветственно нижняя и верхняя допустимые границы значений показателя качества X). Математически обозначение вероятности при заданных условиях может быть записано как $P(a \leq X \leq b)$.

Приведённая методика описывается блок-схемой (рис. 1).

В статье подробно рассмотрен пункт 1 приведённой методики на примере обеспечения требуемой шероховатости поверхностного слоя детали.

Зависимость шероховатости от параметров технологической операции

В результате анализа источников [24–28] было выявлено, что наиболее полные эмпирически-теоретические зависимости для расчёта шероховатости содержатся в [27, 28].

В частности, показатель шероховатости Rz в общем случае определяется по формуле [28]:

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (8)$$

где h_1 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещений рабочей части инструмента, мкм; h_2 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, мкм; h_3 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, мкм; h_4 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента, мкм.

Распределение различных составляющих профиля шероховатости показано на рис. 2.

Каждая из составляющих профиля шероховатости зависит от множества параметров ТС, причём в зависимости от технологического метода обработки будут меняться и элементы множества параметров ТС, влияющие на значение составляющей профиля шероховатости. Все значения параметров ТС можно условно разделить на случайные и детерминированные.

Случайными являются те параметры, значения которых в процессе обработки изменяются в пределах некоторого допуска, а значения, принимаемые данными параметрами, подчиняются нормальному закону распределения. В качестве примера случайной величины можно привести силу резания. На значение силы резания влияют множество факторов, часть из которых являются детерминированными величинами, часть – постоянными, а некоторые факторы невозможно

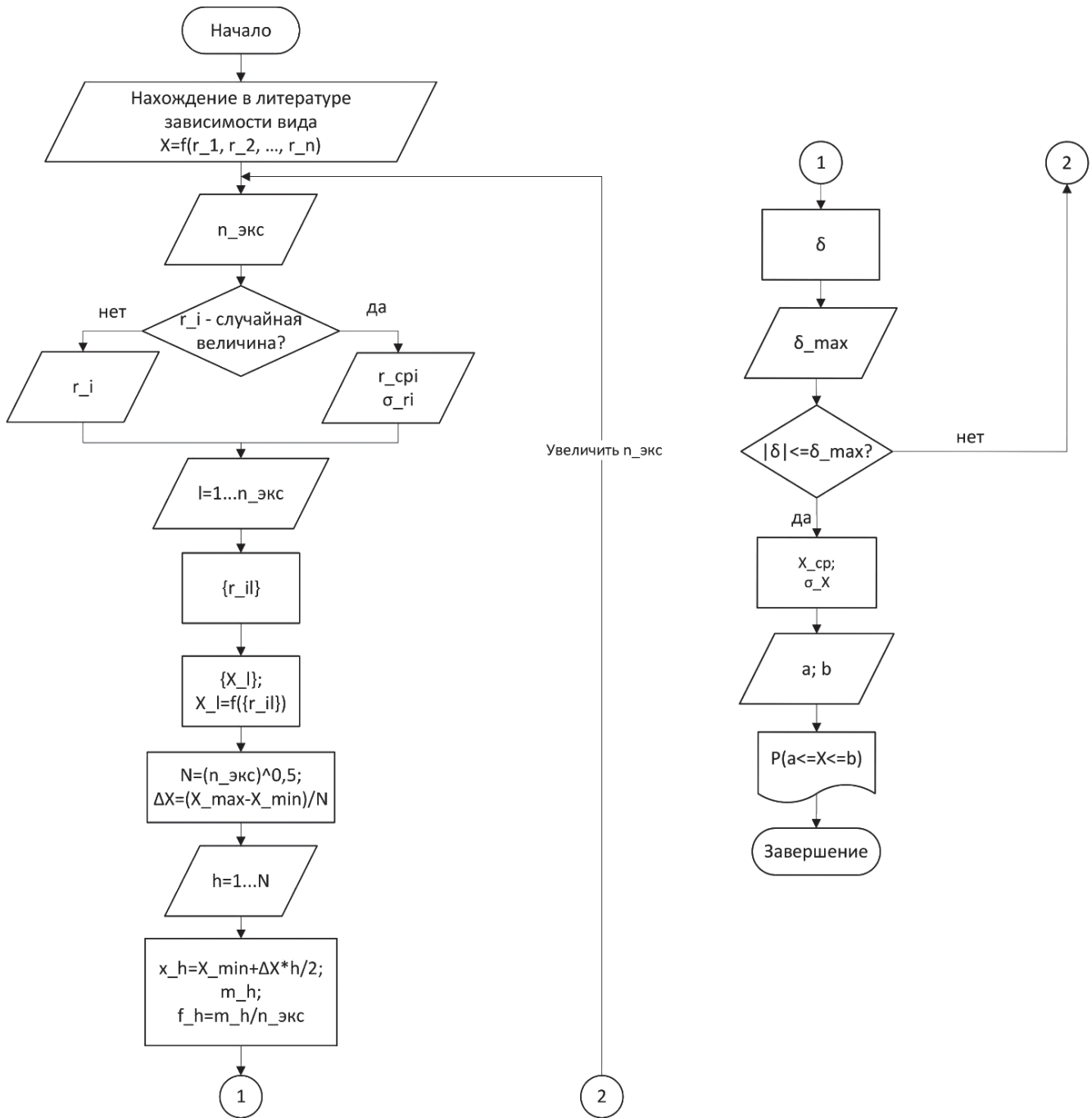


Рис. 1. Блок-схема

учесть. В частности, помимо подачи инструмента и скорости резания, которые являются детерминированными величинами (могут быть стабильно обеспечены оборудованием с минимальным допуском), на силу резания будут влиять:

- твёрдость поверхностного слоя заготовки, которая является случайной величиной, будет изменяться как в пределах одной заготовки, так и от заготовки к заготовке;

- глубина резания, которую следует рассматривать как случайную величину, так как объём припуска на предыдущем переходе будет разным, а значит, и фактическое значение снимаемого слоя материала на данном переходе может быть больше или меньше в пределах одной партии заготовок и др.

Детерминированными величинами следует считать те, которые могут быть обеспечены в процессе обработки достаточно стабильно (как

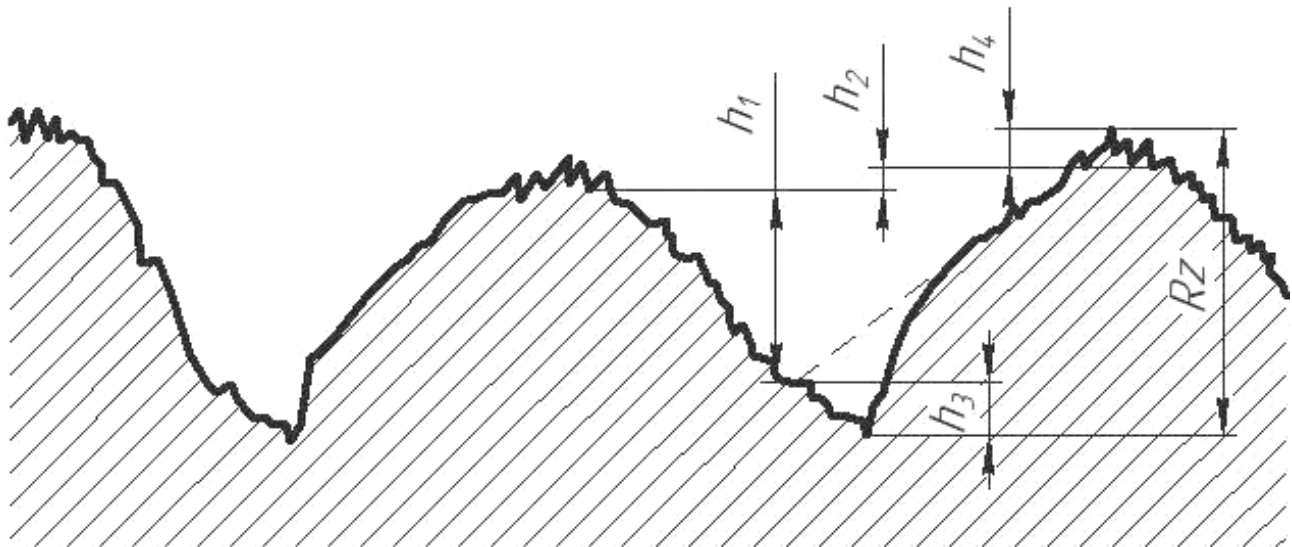


Рис. 2. Составляющие профиля шероховатости [28]

было сказано ранее, подачу и скорость резания на современном оборудовании с ЧПУ можно считать детерминированными величинами). Также к этим величинам следует отнести параметры, задающие границы диапазонов изменения случайных величин, например минимальную и максимальную твёрдость поверхностного слоя заготовки на обрабатываемом участке поверхности. Твёрдость является случайной величиной, но границы, задающие предельно допустимые значения этой величины, принимают неизменными в пределах партии заготовок.

Те параметры, которые не задаются в явном виде, учитываются коэффициентами, значения которых считаются постоянными и принимаются на основании справочных данных.

В табл. 1 приведены параметры ТС, необходимые для оценки шероховатости в зависимости от метода обработки.

В табл. 1: s – подача инструмента, мм/об; v – скорость резания, м/мин; $HB_{\min, \max}$ – минимальное и максимальное значения твёрдости на обрабатываемом участке; N – число выхаживаний при шлифовании; $s_{\text{пр}}$ – продольная подача при шлифовании, мм/об; v_d – скорость вращения детали, м/мин; $v_{\text{кр}}$ – скорость вращения шлифовального круга, м/мин; λ – частота возмущающей силы при шлифовании, Гц; T_h – постоянная времени демпфирования, с; ω – удельная производительность, с⁻¹; P – сила вдавливания инструмента при ППД, Н; r – радиус при вершине резца, мм; φ, φ_1 – главный и вспомогательный углы в плане, град; t – глубина обработки, мм; $Ra_{\text{исх}}$ – исходная шероховатость поверхности, мкм; $j_{\text{ТС}}$ – жёсткость технологической системы, Н/мм; $\tau_{\text{сдв}}$ – прочность материала на сдвиг, МПа; σ_T – пре-

Таблица 1

Параметры технологических сред [28]

Технологический метод	Детерминированные величины	Случайные величины	Коэффициенты
Точение	$s, v, HB_{\min}, HB_{\max}$	$r, j, j_1, t, Ra_{\text{исх}}, j_{\text{ТС}}, t_{\text{сдв}}, s_T, Ra_{\text{в.р}}, \varphi, \varphi_1$	$c_{P_y}, u_{P_y}, z_{P_y}, n, x_{P_y}$
Шлифование	$N, s_{\text{пр}}, v_d, v_{\text{кр}}, \lambda, T_h, \omega$	$B, t, P, j_{\text{ТС}}, r_{\text{зер}}, \tau_{\text{сдв}}, \sigma_T, E_{1,2}, \mu_{1,2}, d, D, l, \gamma, x$	$c_{P_y}, u_{P_y}, z_{P_y}, x_{P_y}, \xi, k_{y1}, \beta, k, \alpha, \varepsilon$
Поверхностно-пластическое деформирование (ППД)	s, P	$r_{\text{рол}}, \varphi_a, Ra_{\text{исх}}, Rp_{\text{исх}}, D_{\text{рол}}, HB_{\text{исх}}, f, E, Ra_{\text{инс}}$	—

дел текучести материала, МПа; $Ra_{в.р}$ – шероховатость при вершине резца, мкм; B – ширина шлифовального круга, мм; $r_{з\text{ер}}$ – средний радиус режущих зёрен, мм; $E_{1,2}$ – модуль упругости соответственно связки круга и заготовки, МПа; $\mu_{1,2}$ – коэффициент Пуассона соответственно связки круга и заготовки; D, d – диаметры шлифовального круга и детали соответственно, мм; l – средний шаг между зёрнами инструмента, мм; γ – половина средневероятного значения угла режущей части вершинки зерна, ...°; x – средняя величина зерна; $r_{\text{рол}}$ – профильный радиус ролика, мм; φ_a – задний угол вдавливания, ...°; $Rp_{\text{исх}}$ – высота сглаживания исходного профиля шероховатости, мкм; $D_{\text{рол}}$ – диаметр ролика, мм; $HB_{\text{исх}}$ – исходная твёрдость поверхности; f – коэффициент трения скольжения обрабатываемой поверхности; E – модуль упругости обрабатываемой поверхности, МПа; $Ra_{\text{исх}}$ – шероховатость поверхности инструмента, мкм; $c_{p_y}, y_{p_y}, z_{p_y}, n, x_{p_y}$ – коэффициенты, принимаемые согласно [29]; ξ – коэффициент, зависящий от концентрации абразивных зёрен [28]; k_y, β, k – коэффициенты, принимаемые согласно [30]; α – коэффициент формы зерна [30]; ϵ – коэффициент, учитывающий заделку зёрен в связке [30].

Задание параметров технологической среды для проведения машинного эксперимента

Расчёт получаемых при обработке показателей качества может быть проиллюстрирован на примере тонкого точения наружной поверхности вала ротора ГТД. Требуемая шероховатость поверхности вала составляет $Ra = 0,4$.

На основании данных из табл. 1 для точения составлены табл. 2–4, в которых приведены исходные данные. Сравниваются два варианта групп

параметров ТС. В табл. 2 представлены значения параметров, являющихся детерминированными величинами, в табл. 3 – случайными, а в табл. 4 – значения коэффициентов (для всех вариантов одни и те же). Значения коэффициентов уточнены по сравнению с приведёнными в [29] с целью достижения физического подобия результатов.

Прежде чем приступить к расчёту, необходимо для случайных величин сформировать массив данных, в котором будут храниться текущие случайные значения параметров технологической среды. Это было реализовано в программной среде РТС Mathcad 15.0.

Было установлено, что стабильные результаты получаются, если размер массива составляет $n_{\text{экс}} = 10^4$ записей. При дальнейшем увеличении числа записей (машинных экспериментов) результаты практически не изменяются, а скорость расчёта резко падает.

После ввода исходных данных вероятность получения шероховатости в заданных пределах определяется согласно разработанной общей методике.

Прежде всего надо отметить, что в процессе эксперимента был получен массив данных Ra , состоящий из 10^4 записей. Первоначально следует провести сортировку значений данного массива по возрастанию. В дальнейшем находятся максимальное (Ra_{max}) и минимальное (Ra_{min}) значения данного массива. Эти величины при каждом новом запуске программы будут принимать различные значения из-за того, что в состав исходных данных входят случайные параметры. Максимальное и минимальное значения в дальнейшем понадобятся для определения ширины интервала разбиения, но на окончательные данные они никак не повлияют.

Далее строится график эмпирической функции распределения случайной величины Ra (рис. 3).

Таблица 2

Значения детерминированных исходных данных

Параметр	Значение параметра	
	Вариант А	Вариант Б
Подача s , мм/об	0,15	0,1
Скорость резания v , м/мин	300	100
Наименьшая твёрдость на обрабатываемом участке HB_{min}	280	250
Наибольшая твёрдость на обрабатываемом участке HB_{max}	320	300

Таблица 3

Значения случайных исходных данных

Параметр	Вариант А		Вариант Б	
	Математическое ожидания	Одностороннее отклонение	Математическое ожидания	Одностороннее отклонение
Радиус при вершине резца r , мм	0,75	0,1	0,8	0,3
Главный угол в плане φ , ...°	45	1	5	1
Вспомогательный угол в плане φ_1 , ...°	25	1	5	1
Глубина резания t , мм	0,5	0,1	0,7	0,3
Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности $Ra_{исх}$, мкм	3,2	0,1	6,3	0,1
Жёсткость технологической системы $j_{ТС}$, Н/мм	1000	100	1000	100
Предел текучести обрабатываемого материала σ_T , МПа	900	70	900	70
Прочность обрабатываемого материала на сдвиг $\tau_{сдв}$, МПа	700	40	700	40
Шероховатость вершины режущего инструмента $Ra_{в.р}$, мкм	0,1	0,01	0,1	0,01

Таблица 4

Принятые значения коэффициентов

Обозначение коэффициента	Численное значение коэффициента
C_{py}	2430
x_{py}	1,2
y_{py}	0,6
z_{py}	-0,05
n	-0,05

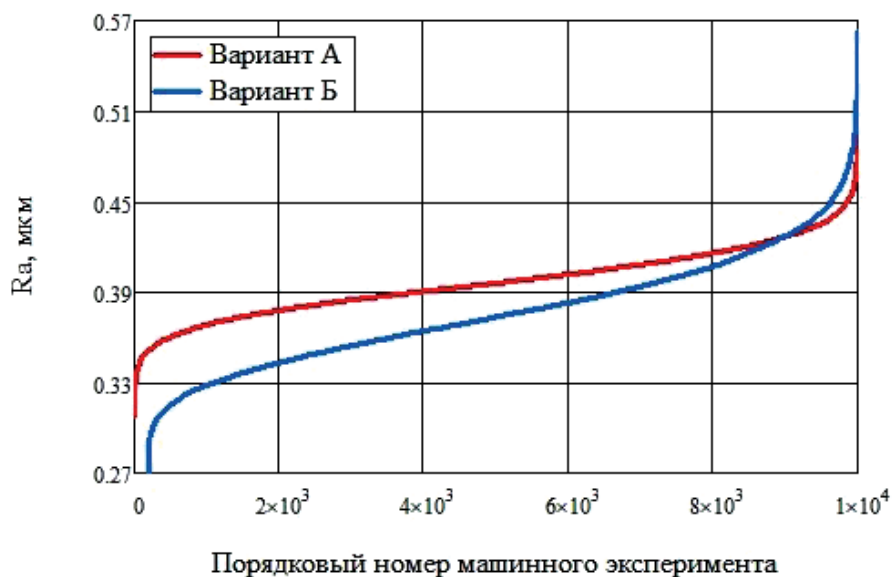


Рис. 3. Эмпирическая функция распределения

Обработка результатов машинного эксперимента

Согласно пунктам 7—13 методики были обработаны результаты машинного эксперимента. Графики обработанных данных эксперимента приведены на рис. 4 и 5.

Значения МО и СКО для вариантов А и Б приведены в табл. 5.

Для полученных результатов на основании известных для нормального закона распределения зависимостей [22] определяются вероятности на-

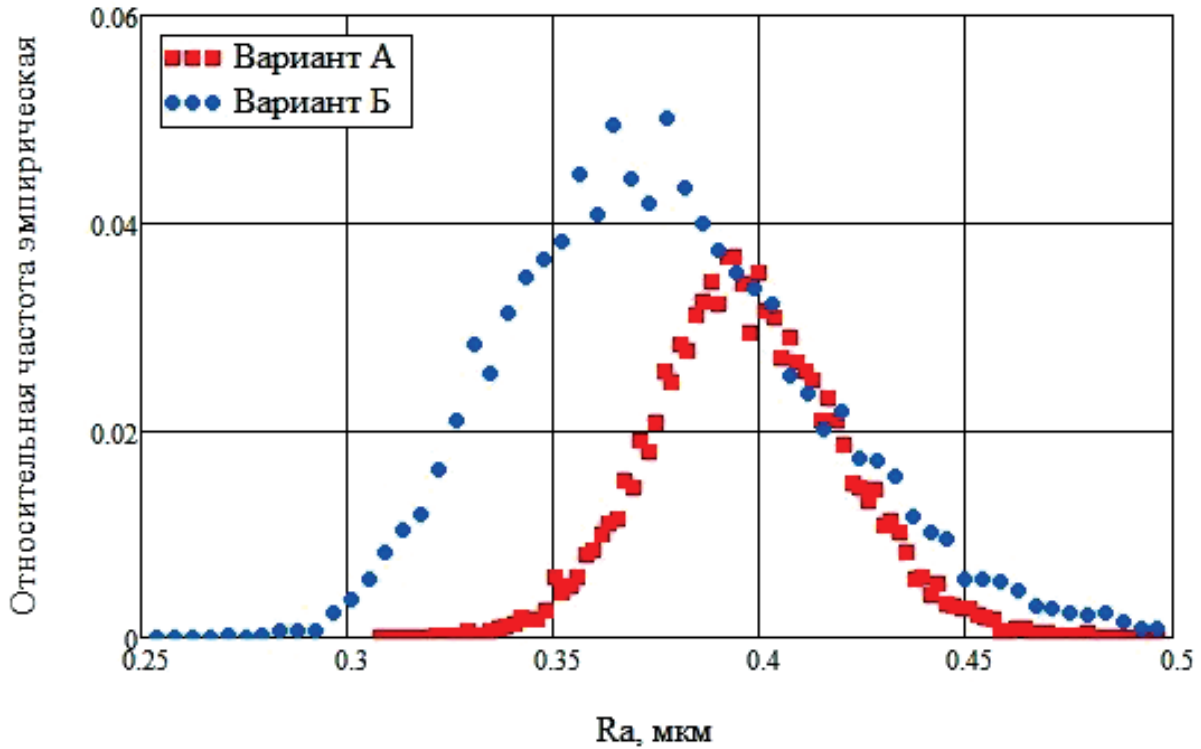


Рис. 4. График эмпирической функции плотности распределения величины Ra

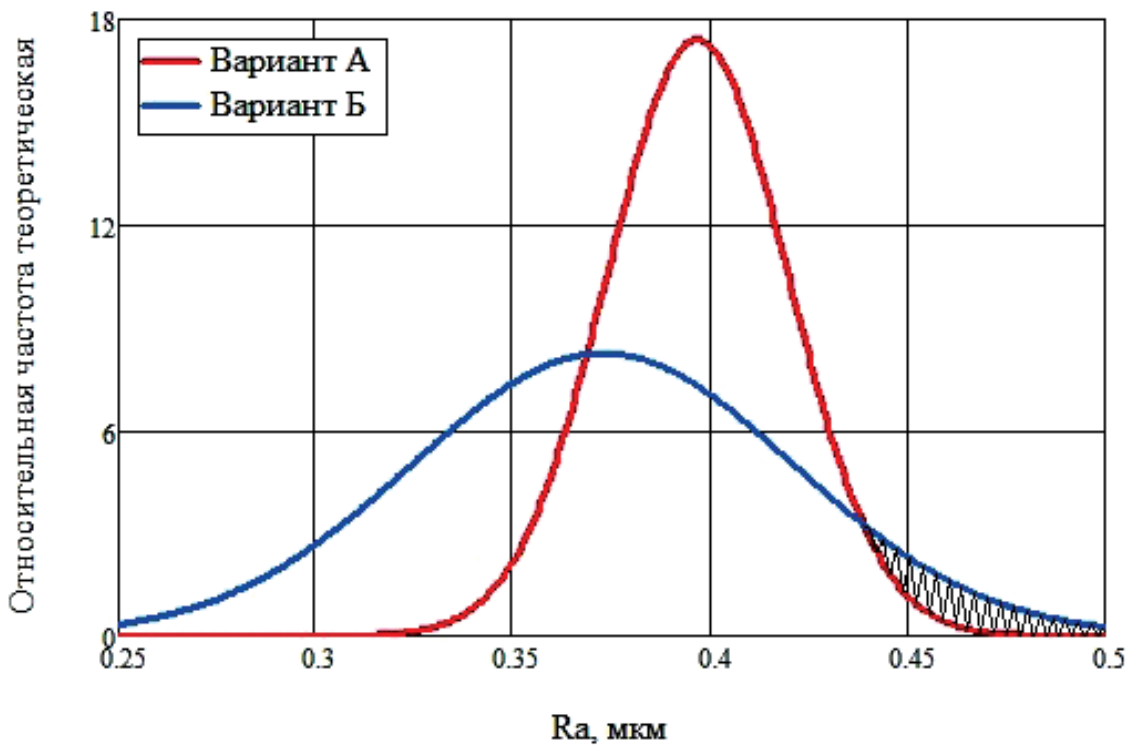


Рис. 5. График теоретической функции плотности нормального распределения величины Ra

Таблица 5 Библиографический список

Результаты машинного эксперимента

Варианты	А	Б
МО, Ra_{cp}	0,397	0,373
СКО, σ_{Ra}	0,023	0,048

хождения шероховатости в заданных пределах от a до b . В рассматриваемом случае $a = 0$ из физических соображений, $b = 0,4$ мкм согласно начальным условиям.

Таким образом, для варианта А $P = 0,55$, а для варианта Б $P = 0,71$. При этом следует заметить, что МО обоих вариантов не выходит за пределы установленного значения $0,4$ мкм. То есть для варианта А из 100 изделий бракованными по показателю шероховатости окажутся 45, а для варианта Б – 29.

Выводы

На основании проведённых расчётов можно сделать вывод, что из двух вариантов А и Б параметров технологических сред предпочтительным является вариант Б, так как в нём будет меньшее количество брака по показателю шероховатости. Однако следует отметить, что по графикам, приведённым на рис. 4 и 5, видно, что в варианте Б большее рассеяние параметров, что является нежелательным. Таким образом, обработка с параметрами, соответствующими варианту А, хоть и имеет большее МО, но обеспечивает более стабильные значения показателя качества. В заштрихованной на рис. 5 области значения шероховатости для варианта обработки Б будут встречаться чаще, чем значения для варианта А. То есть при варианте обработки Б брак хотя и встречается реже, но в случае брака шероховатость поверхности в целом будет выше, чем при варианте обработки А.

Таким образом, была решена задача установления взаимосвязи между параметрами ТС и получаемыми значениями показателя качества, в частности шероховатости. Предложенная методика учитывает не только номинальные значения показателей качества, получаемые в результате обработки, но и величину рассеивания этих значений. То есть методика учитывает вероятностный характер множества параметров, влияющих при обработке на получение требуемых эксплуатационных свойств изделий, в том числе показателей надёжности.

1. Громов В.Ф., Дунаев В.В., Еремин М.В., Макаров А.Ф. Повышение качества и ресурса авиационных конструкций в зонах механических соединений // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 1. С. 18–24.
2. Алтунин К.В. Разработка новых удельных параметров реактивного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 146–154. DOI: 10.34759/vst-2020-3-146-154
3. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надёжности деталей машин: Справочник. — М.: Машиностроение, 1992. — 304 с.
4. Фадеев Л.Л., Албагачиев А.Ю. Повышение надёжности деталей машин. — М.: Машиностроение, 1993. — 96 с.
5. Демин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. — 2-е изд. — Самара: Изд-во СГАУ, 2012. — 324 с.
6. Zhou Y., Zhu H., Zhang W. et al. Influence of surface roughness on the friction property of textured surface // Advances in Mechanical Engineering. 2015. Vol. 7. No. 2, pp. 1–9. DOI: 10.1177/1687814014568500
7. ГОСТ Р 56111-2014. Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. Номенклатура показателей эксплуатационно-технических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2015. — 12 с.
8. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации (ЕСТД). Термины и определения основных понятий (с Изменением № 1). — М.: Стандартинформ, 2012. — 98 с.
9. ГОСТ 27.004-85. Надёжность в технике (ССНТ). Системы технологические. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 2002. — 60 с.
10. Климов В.Г., Никитин В.И., Никитин К.В., Жаткин С.С., Когтева А.В. Применение износостойких натуральных композитов в технологии ремонта и модифицирования лопаток ротора газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 251–266.
11. Береснев А.Г., Логунов А.В., Логачева А.И. Проблемы повышения качества жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 3. С. 83–89.
12. Ghafarizadeh S., Lebrun G., Chatelain J.-F. Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 50. No. 8, pp. 1059–1071. DOI: 10.1177/0021998315587131
13. Gürgen S., Saçkesen I., Kuşhan M.C. Fatigue and corrosion behavior of in-service AA7075 aircraft component after thermo-mechanical and retrogression and re-aging treatments // Proceedings of the

- Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2018. Vol. 233. No. 9, pp. 1764–1772. DOI: 10.1177/1464420718784629
14. *Maleki H.N., Chakherlou T.N.* A new method for repairing aircraft structures containing aluminum alloy 2024-T3 using a combination of composite patch and bolt clamping // *Journal of Composite Materials*. 2018. Vol. 52. No. 30, pp. 4203–4218. DOI: 10.1177/0021998318777851
 15. *Zhang Ping, Wang Youqiang, Wang Qing, Yu Xiao.* Dislocation damage and adiabatic shear mechanisms of 7055 aluminum alloy during cutting process // *International Journal of Damage Mechanics*. 2020. Vol. 29. No. 8, pp. 1169–1180. DOI: 10.1177/1056789519894678
 16. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчётов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
 17. *Рыжов Э.В.* Контактная жёсткость деталей машин. — М.: Машиностроение, 1966. — 193 с.
 18. *Демкин Н.Б., Рыжов Э.В.* Качество поверхности и контакт деталей машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.
 19. *Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д.* Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. — М.: Машиностроение, 1988. — 240 с.
 20. *Безъязычный В.Ф.* Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // *Инженерный журнал*. 2000. № 4(37). С. 9–16.
 21. *Деев О.М., Истомин А.Б., Кондаков А.И.* Методические указания к лабораторным работам по дисциплинам «Технология машиностроения», «Управление качеством изделий». — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 45 с.
 22. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.* Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. — М.: Наука, 1969. — 510 с.
 23. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. — М.: Физматгиз, 1958. — 334 с.
 24. *Клюев В.В., Болотин В.В., Соснин Ф.Р.* и др. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-3. Надёжность машин. — М.: Машиностроение, 2003. — 592 с.
 25. *Зеленцов В.В.* Основы технологии производства и ремонта автомобилей: комплекс учебно-методических материалов. — Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2007. — 105 с.
 26. *Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А.* Шероховатость поверхностей: Теоретико-вероятностный подход / Под ред. А. А. Первозванского. — М.: Наука, 1975. — 344 с.
 27. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. — М.: Машиностроение, 2000. — 320 с.
 28. *Суслов А.Г., Дальский А.М.* Научные основы технологии машиностроения. — М.: Машиностроение, 2002. — 684 с.
 29. *Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. — Т. 1 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Инновационное машиностроение, 2018. — 756 с.*
 30. *Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. — М.: Машиностроение, 1977. — 391 с.*

EVALUATION OF QUALITY INDICATOR DISPERSION DEPENDING ON TECHNOLOGICAL PROCESS PARAMETERS

Kovalev A.A.* , Rogov N.V.**

*Bauman Moscow State Technical University (MSTU),
5, 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia*

** e-mail: kovalevarta@gmail.com*

*** e-mail: nikolayrogov_24@mail.ru*

Abstract

The article addresses the issue of determining the nominal value of roughness and its dispersion as the result of the outer surface of the “Rotor shaft of a gas turbine engine” part turning, being an element of the rotor part of an aircraft gas turbine engine.

The article describes a technique for establishing interrelation between the parameters of technological environments with quality indicators obtained as the result of processing in these technological environments. The technique is illustrated by the

example roughness evaluating of the part outer surface as the result of turning.

The article consists of three main parts: introduction, the main part and conclusions.

The introduction performs the analysis of literature related to the problem of establishing interrelations between the technological environments parameters and operational and technical characteristics of products. The rationale for the need to establish such dependencies is being presented.

The main part provides a technique for assessing the value and dispersion of parts' quality indicators depending on the values of the of technological environments parameters. Based on the results of this evaluation, a conclusion is being made on the probability of finding the value of the considered quality indicator within the specified limits. The technique is being illustrated by the example of roughness forming on the outer surface of the "Rotor shaft of a gas turbine engine" part while fine turning. The required roughness value is no more than Ra0.4. Based on computational results, probability evaluation of obtaining roughness of no more than Ra0.4 is being performed for the two different groups of technological environment parameters. The probability was 0.55 for the option A, and 0.71 for the option B.

It is noted in the conclusions that despite the fact that the probability value is greater for the option B than for the option A, in some cases the option A will be preferable, since the roughness values obtained while processing in a technological environment with these parameter values are of lower dispersion, i.e. more stable. The article indicates that the obtained roughness values will affect the operational and technical characteristics of the product, including reliability.

Keywords: part surface layer of the quality, edge processing parameters, technological environment parameters, math statistics, random values distribution, distribution density function.

References

- Gromov V.F., Dunaev V.V., Eryomin M.V., Makarov A.F. Improvement of aviation structure quality and life in mechanical joint. *Aerospace MAI Journal*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 18-24.
- Altunin K.V. Elaborating new specific parameters of a jet engine. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 146-154. DOI: 10.34759/vst-2020-3-146-154
- Kuznetsov N.D., Tseitlin V.I., Volkov V.I. *Tekhnologicheskie metody povysheniya nadezhnosti detalei mashin. Spravochnik* (Technological methods for reliability increasing of machine parts. Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 304 p.
- Fadeev L.L., Albagachiev A.Yu. *Povyshenie nadezhnosti detalei mashin* (Reliability improving of machine parts), Moscow, Mashinostroenie, 1993, 96 p.
- Demin F.I., Pronichev N.D., Shitarev I.L. *Tekhnologiya izgotovleniya osnovnykh detalei gazoturbinykh dvigatelei* (Manufacturing technology of gas turbine engines basic parts), Samara, SGAU, 2012, 324 p.
- Zhou Y., Zhu H., Zhang W. et al. Influence of surface roughness on the friction property of textured surface. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 1–9. DOI: 10.1177/1687814014568500
- Integrirovannaya logisticheskaya podderzhka eksportiruemoi produktsii voennogo naznacheniya. Nomenklatura pokazatelei ekspluatatsionno-tekhnicheskikh kharakteristik, GOST R 56111-2014* (Integrated logistic support of exported military products. Nomenclature of the technical operating capabilities indices, State Standard R 56111-2014), Moscow, Standarty, 2015, 12 p.
- Edinaya sistema tekhnologicheskoi dokumentatsii (ESTD). Terminy i opredeleniya osnovnykh ponyatii. GOST 3.1109-82* (Unified system for technological documentation. Terms and definitions of main concepts, State Standard 3.1109-82), Moscow, Standarty, 2012, 98 p.
- Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Sistemy tekhnologichesk. Terminy i opredeleniya. GOST 27.004-85* (Industrial product dependability. Technological systems. Terms and definitions, State Standard 27.004-85), Moscow, Standarty, 2002, 60 p.
- Klimov V.G., Nikitin V.I., Nikitin K.V., Zhatkin S.S., Kogteva A.V. Wear-resistant composites application in repair and modification technology of the GTD rotor blades. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 251-266.
- Beresnev A.G., Loghunov A.V., Loghachiova A.I. Some problems related to refinement of high-temperature alloys produced by means of granular metallurgy techniques. *Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 83-89.
- Ghafarizadeh S., Lebrun G., Chatelain J.-F. Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 50, no. 8, pp. 1059–1071. DOI: 10.1177/0021998315587131
- Gürgen S., SaCkesen I., Kuyhan M.C. Fatigue and corrosion behavior of in-service AA7075 aircraft component after thermo-mechanical and retrogression and re-aging treatments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2018, vol. 233, no. 9, pp. 1764–1772. DOI: 10.1177/1464420718784629
- Maleki H.N., Chakherlou T.N. A new method for repairing aircraft structures containing aluminum alloy 2024-T3 using a combination of composite patch and bolt clamping. *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 52, no. 30, pp. 4203–4218. DOI: 10.1177/0021998318777851
- Zhang Ping, Wang Youqiang, Wang Qing, Yu Xiao. Dislocation damage and adiabatic shear mechanisms of 7055 aluminum alloy during cutting process. *International Journal of Damage Mechanics*, 2020, vol. 29, no. 8, pp. 1169–1180. DOI: 10.1177/1056789519894678
- Kragel'skii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* (Fundamentals of

- friction and wear analysis), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 526 p.
17. Ryzhov E.V. *Kontaktnaya zhestkost' detalei mashin* (Contact stiffness of machine parts), Moscow, Mashinostroenie, 1966, 193 p.
 18. Demkin N.B., Ryzhov E.V. *Kachestvo poverkhnosti i kontakt detalei mashin* (Surface and contact quality of machine parts), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 244 p.
 19. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. *Poverkhnostnyi sloi i ekspluatatsionnye svoistva detalei mashin* (Surface layer and operation properties of machine parts), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 240 p.
 20. Bez'yazychnyi V.F. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2000, no. 4(37), pp. 9-16.
 21. Deev O.M., Istomin A.B., Kondakov A.I. *Metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam po distsiplinam "Tekhnologiya mashinostroeniya", "Upravlenie kachestvom izdelii"* (Guidelines to laboratory work on the "Engineering technology", "Product quality management" disciplines), Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2011, 45 p.
 22. Smirnov N.V., Dunin-Barkovskii I.V. *Kurs teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistiki dlya tekhnicheskikh prilozhenii* (Course on probability theory and mathematical statistics for technical applications), Moscow, Nauka, 1969, 510 p.
 23. Linnik Yu.V. *Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nablyudenii* (The least squares method and the mathematical-statistical theory fundamentals of observation processing), Moscow, Fizmatgiz, 1958, 334 p.
 24. Klyuev V.V., Bolotin V.V., Sosnin F.R. et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV-3. Nadezhnost' mashin* (Mechanical engineering. Encyclopedia. Reliability of machines), Moscow, Mashinostroenie, 2003, 592 p.
 25. Zelentsov V.V. *Osnovy tekhnologii proizvodstva i remonta avtomobilei: kompleks uchebno-metodicheskikh materialov* (Fundamentals of automobiles production and repair technology), Nizhnii Novgorod, Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2007, 105 p.
 26. Khusu A.P., Vitenberg Yu.R., Pal'mov V.A. *Sherokhovatost' poverkhnosti: Teoretiko-veroyatnostnyi podkhod* (Surface roughness. Probabilistic approach), Moscow, Nauka, 1975, 344 p.
 27. Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalei mashin* (Surface layer quality of machine parts), Moscow, Mashinostroenie, 2000, 320 p.
 28. Suslov A.G., Dal'skii A.M. *Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya* (Scientific fundamentals of mechanical engineering technology), Moscow, Mashinostroenie, 2002, 684 p.
 29. Vasil'ev A.S., Kutin A.A. (eds.) *Spravochnik tekhnologa-mashinostroytelya: v 2 t. T. 1* (Handbook of mechanical engineer. In 2 vols. Vol. 1), Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie, 2018, 756 p.
 30. *Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov: Spravochnik* (Abrasive and diamond processing of materials. Handbook), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 391 p.