

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article_5c8b5ce9c06c31.07069800

М.Н. Нагоркин, В.П. Федоров, И.Л. Пыриков, М.П. Топорков

РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Рассмотрены статистические законы распределения технологических параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин и способы регламентации их значений в технологической документации с целью выполнения технических требований с заданной надёжностью. Представлены соответствующие теоретические зависимости для расчета допустимых границ вари-

ации параметров шероховатости в процессе обработки поверхностей, пригодные к практическому использованию.

Ключевые слова: параметры качества поверхности, статистические законы распределения, математическое ожидание, нормальное отклонение, параметры шероховатости.

M.N. Nagorkin, V.P. Fyodorov, I.L. Pyrikov, M.P. Toporkov

REGULATIONS OF ROUGHNESS PARAMETERS FOR MACHINERY FUNCTIONAL SURFACES IN TECHNOLOGICAL DOCUMENTATION

On the basis of the probability theory approach to the formation of surface roughness parameters in machinery during machining there is offered an algorithmic solution of an urgent problem of the regulations of roughness parameters for machinery functional surfaces in technological documentation. The algorithmic solutions for the following parameter versions are developed (RSS 2.309-73): the highest value; the smallest value; a value range; a rated value with ultimate deviations; an indication of two and more parameters. The theoretical investigation results may serve as a starting point for the further development of theory and practice for the technological support of roughness parameters in machinery functional surfaces with the required

reliability.

For a wide actual realization of investigation results the solution of a number of problems is needed: 1) the development of standards or guide information on the regulations in technological documentation of required technological values of roughness parameters; 2) the further development of investigations in the field of technological support reliability of quality parameters (including roughness) of blank surfaces in the course of machining in technologically flexible systems.

Key words: parameters of surface quality, statistical laws of distribution, mathematical expectation, normal deviation, roughness parameters.

Введение

В процессе конструирования детали конструктор назначает параметры качества её функциональных поверхностей, исходя из необходимости обеспечения требуемых эксплуатационных свойств соединения (износостойкость, контактная жёсткость, усталостная прочность и др.) [1-3 и др.]. Наряду с точностью обработки, физико-механическими свойствами в их число входят и геометрические параметры: шероховатость, волнистость и макроотклоне-

ния. Параметры шероховатости наиболее полно стандартизованы как в плане физической трактовки и методик определения, так и в плане обозначений в нормативно-технической документации (НТД) на изделие. Анализ показывает, что параметры шероховатости поверхности, определяющие эксплуатационные свойства деталей машин, представляют собой элементы конечного множества N_K [1; 2; 4; 6; 7 и др.]:

$$N_K = \{Ra, Rz, Rp, Sm, tp, \rho_m, Wa, Wmax, Smw, Hmax, H_{\mu 0}, U_n, h_n, \sigma_0, h_{\sigma 0}\}. \quad (1)$$

В технической документации на изделие из параметров шероховатости задётся либо какой-то один (например Ra), либо несколько (например Ra, Sm, tp). Это

конструкторские параметры, значения которых далее обозначаются R_{ik} . В этих случаях регламентируемые параметры принадлежат множеству (1), т.е. $Ra \in N_K$ и

$(x_1 = Ra, x_2 = Sm, x_3 = tp) \in N_k$.

Фактические значения параметров шероховатости, полученные после той или иной обработки функциональной поверхности детали, являются технологическими параметрами качества R_{iT} . Это случайные величины с соответствующими законами распределения и статистическими характеристиками. В связи с этим технолог

Результаты исследований

Технологические параметры качества R_{iT} являются случайными величинами с соответствующими законами распределения и статистическими характеристиками: $\mu(R_{iT})$ – математическое ожидание, $S(R_{iT})$ – среднее квадратическое (нормальное) отклонение (СКО), ν – коэффициент вариации, которые определяются по известным формулам математической статистики.

В соответствии с ГОСТ 25142-82 (п. 2.10) среднее значение параметра шероховатости поверхности \bar{p} оценивается зависимостью

$$\bar{p} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j, \quad (2)$$

где k – число единичных длин оценки; p_j – значение параметра, определённое на одной базовой длине; n_i – число базовых длин на единичной длине оценки.

Таким образом, измерения шероховатости следует проводить на различных участках m поверхности ($m \in (1, 2, \dots, k)$), причём каждое измерение должно включать n базовых длин (обычно $k = 3 \dots 5$, $n = 5$). В этом случае математическое ожидание параметра $\mu(R_{iT})$ определяется зависи-

должен регламентировать их в интервале, обеспечивающем выполнение технических требований НТД с заданной надёжностью. Практическое отсутствие научно обоснованных методик расчета допустимых интервалов вариации технологических значений параметров шероховатости подчеркивает актуальность исследований в этом направлении.

мостью

$$\mu(R_{iT}) = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k \left(\frac{1}{n} (R_{iT})_j \right)_m. \quad (3)$$

Закон распределения параметров шероховатости в большинстве случаев принимается нормальным. Это обосновано влиянием на их формирование в процессе обработки большого числа различных случайных факторов (неоднородность материала обрабатываемой заготовки; динамические характеристики технологической системы; техническое состояние оборудования в момент обработки, отклонения фактических эксплуатационных параметров технологической оснастки от заданных; параметры качества предварительно обработанной поверхности, случайность которых передаётся через механизм технологического наследования, и др.).

Для технологических параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей нормальное распределение задаётся плотностью распределения (4) или интегральной функцией распределения (5):

$$f(R_{iT}) = \frac{1}{S\{R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(R_{iT} - \mu\{R_{iT}\})^2}{2S^2\{R_{iT}\}} \right], \quad (4)$$

$$F(R_{iT}) = \frac{1}{S\{R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{R_{iT}} \exp \left[-\frac{(R_{iT} - \mu\{R_{iT}\})^2}{2S^2\{R_{iT}\}} \right] dx, \quad (5)$$

где теоретически $-\infty < R_{iT} < \infty$.

При выборе статистических законов распределения технологических значений параметров шероховатости следует учитывать, что если в качестве случайной переменной рассматриваются время или пара-

метры шероховатости поверхности, то их отрицательные значения не имеют физического смысла. В связи с этим для описания распределения параметров шероховатости целесообразно использовать усечённый нормальный закон распределения, который

получается ограничением интервала изменения случайной величины обеспечиваемого параметра R_{iT} только положительными значениями. Его целесообразно использовать при больших значениях коэффици-

ента вариации v . Функция плотности вероятности усечённого нормального распределения для технологических значений параметров шероховатости поверхности имеет вид

$$f(R_{iT}) = \frac{c}{S\{R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(R_{iT} - \mu\{R_{iT}\})^2}{2S^2\{R_{iT}\}}\right], \quad (6)$$

где c – коэффициент для распределения, ограниченного пределами изменения R_{iT} от

a до b , который определяется из условия

$$\int_a^b f(R_{iT})d(R_{iT}) = c[F(b) - F(a)] = 1. \quad (7)$$

$$c = \frac{1}{F(b) - F(a)} = \frac{1}{\Phi\left(\frac{b - \mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right) - \Phi\left(\frac{a - \mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right)}, \quad (8)$$

где $F(a)$ и $F(b)$ – значения интегральных функций нормального распределения для предельных значений R_{iT} .

В рассматриваемом случае усечённое нормальное распределение используется, как и в большинстве случаев, с предельными значениями $a = 0$ и $b = \infty$, что аргументировано в теории надёжности невоз-

можностью отказов при отрицательных значениях времени, а для технологического обеспечения параметров шероховатости – невозможностью физической реализации их отрицательных значений.

В случае, когда $a = 0$ и $b = \infty$, зависимость (8) приводится к виду

$$c = \frac{1}{\Phi(\infty) - \Phi\left(-\frac{\mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right)} = \frac{1}{0,5 - \Phi\left(\frac{\mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right)}. \quad (9)$$

Для определения коэффициента c можно использовать таблицы функции Лапласа или квантилей нормального распределения.

Так, при $0 \leq R_{iT} \leq \infty$ имеются следующие характеристики усечённого нормального распределения:

$$\bar{\mu}\{R_{iT}\} = \mu\{R_{iT}\} + kS\{R_{iT}\}, \quad (10)$$

$$\bar{D}\{R_{iT}\} = \bar{S}^2 = S^2\left(1 - k^2 - k\frac{\mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}}\right), \quad (11)$$

где $\bar{\mu}\{R_{iT}\}$, $\bar{D}\{R_{iT}\}$, $\bar{S}\{R_{iT}\}$ – математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение для усечённого нормального распределения; $\mu\{R_{iT}\}$,

$D\{R_{iT}\}$ и $S\{R_{iT}\}$ – те же параметры для нормального распределения.

Величина k определяется выражением

$$k = \frac{c}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\mu^2\{R_{iT}\}}{2S^2\{R_{iT}\}}\right]. \quad (12)$$

На практике обычно имеют место случаи, когда $\mu\{R_{iT}\} > 2S\{R_{iT}\}$. Тогда коэффициент $c \approx 1$, в связи с чем необходи-

мость учёта отсечения нормального распределения отпадает. Интегральная функция для усечённого нормального распре-

деления технологических параметров шероховатости R_{iT} имеет вид

$$F\{R_{iT}\} = c \left[\frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{R_{iT} - \mu\{R_{iT}\}}{S\{R_{iT}\}} \right) \right]. \quad (13)$$

Исключение появления отрицательных значений параметров возможно при использовании других законов распределения, в частности логарифмически нормального распределения и распределения Вейбулла.

Закон логарифмически нормального распределения успешно применяется при

описании наработки на отказ сложных технических и технологических систем в машиностроении, а также при построении имитационных моделей Кобба - Дугласа [3-5; 7]. Плотность распределения вероятностей величины R_{iT} для технологических систем в этом случае имеет вид

$$f(\ln R_{iT}) = \frac{1}{S'\{\ln R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln R_{iT} - \mu')^2}{2S'^2\{\ln R_{iT}\}} \right], \quad (14)$$

а её функция распределения определяется выражением

$$F(\ln R_{iT}) = \frac{1}{S'\{\ln R_{iT}\}\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu')^2}{2S'^2\{\ln R_{iT}\}} \right] dx, \quad x > 0. \quad (15)$$

Здесь введено обозначение $x = \ln R_{iT}$. При логарифмически нормальном

распределении вероятностные характеристики R_{iT} определяются по зависимостям:

$$M(x) = \exp \left(\mu + \frac{(S')^2}{2} \right), \quad (16)$$

$$D(x) = \exp(2\mu' + (S')^2 [\exp(S')^2 - 1]), \quad (17)$$

$$v = \sqrt{\exp(S')^2 - 1}. \quad (18)$$

Величины μ' и S' оценивают по результатам измерений параметров шероховатости R_{iT} :

$$\mu' = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln R_{ijT} \quad (19),$$

$$S' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\ln R_{ijT} - \mu')^2}. \quad (20)$$

В ряде случаев может оказаться целесообразным использование распределения Вейбулла, плотность и интегральная

функция которого задаются в виде следующих зависимостей:

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a} \right)^{b-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{a} \right)^b \right], \quad x \geq 0, \quad (21),$$

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x}{a} \right)^b \right], \quad x \geq 0, \quad (22)$$

где $a > 0$, $b > 0$ – параметры масштаба и формы.

Под величиной x подразумевается исследуемый или обеспечиваемый техно-

логический параметр шероховатости R_{iT} .

Основные характеристики распределения Вейбулла:

$$M(x) = aK, \quad D(x) = a^2(c - K^2), \quad v = \sqrt{\frac{c}{K^2} - 1}, \quad (23)$$

где $K = \Gamma(1 + 1/b)$; $c^2 = \Gamma(1 + 2/b) - K^2$; $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} U^{z-1} \exp(-U) dU$ – гамма-функция.

Особенностью распределения Вейбулла является то, что с изменением параметра формы изменяется и вид графика функции плотности распределения. Это

позволяет соответствующим подбором параметров обеспечить хорошее совпадение экспериментальных данных с аналитическим выражением. Кроме того, распреде-

ление Вейбулла при соответствующих значениях параметров включает в себя как частные случаи экспоненциальное распределение ($b = 1$) и распределение Рэлея ($b = 2$), а также может быть при $b = 5$ близко к нормальному.

В ходе конструкторской подготовки производства в большинстве случаев на чертеже детали регламентируются конструкторские значения параметров качества поверхности детали, в том числе параметры шероховатости R_{iK} , для которых ГОСТ 2.309-73 предусматривает пять возможных методов регламентации (таблица). В большинстве случаев в нормативно-технической документации для параметров шероховатости указывается наибольшее значение, которое затем дублируется в технологической документации на изготовление детали. Это ошибочный путь, так как конструкторское значение параметра R_{iK} – детерминированная постоянная величина, а его технологическое значение R_{iT} – величина случайная, имеющая соответ-

ствующий закон распределения и статистические характеристики (математическое ожидание $\mu(R_{iT})$, среднее квадратическое отклонение $S(R_{iT})$, коэффициент вариации $\nu(R_{iT})$ и др.) [1; 2; 6 и др.]. Таким образом, вероятность точного обеспечения $R_{iT} = R_{iK}$ стремится к нулю, поэтому необходимо определять интервальное технологическое обеспечение параметров качества обрабатываемых поверхностей, в том числе и параметров шероховатости.

Теоретически установлено, что при возможном равенстве математических ожиданий обеспечиваемых технологических значений параметров шероховатости $\mu_k(R_{iT})$ их средние квадратические отклонения $S_k(R_{iT})$ (здесь k – номер рассматриваемой ТС) различны для различных ТС обработки, следовательно, в этих случаях надёжность технологического обеспечения параметра шероховатости R_{iT} в заданном интервале $[a, b]$ ($P_1(R_{i1T} \in [a, b])$) будет различной [4; 6; 8 и др.]:

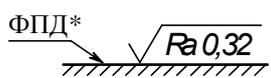
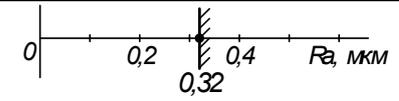
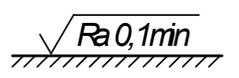
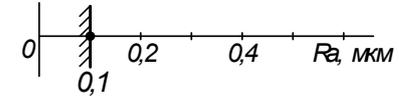
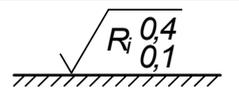
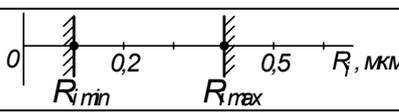
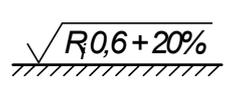
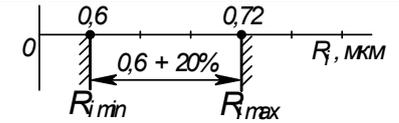
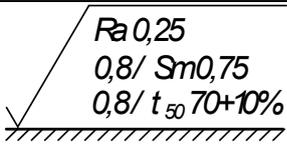
$$P_1(R_{i1T} \in [a, b]) > P_2(R_{i2T} \in [a, b]) > P_3(R_{i3T} \in [a, b]), \tag{24}$$

где

$$P_k(R_{ikT} \in [a, b]) = \int_{-\infty}^b f(x)dx - \int_{-\infty}^a f(x)dx; \quad x = R_{ikT}. \tag{25}$$

Таблица

Регламентация параметров шероховатости поверхностей деталей по ГОСТ 2.309-73 и их схематическое изображение

Вид указания параметров	Обозначение в конструкторской документации	Схематичное изображение границ параметра
1 Наибольшее значение		
2 Наименьшее значение		
3 Диапазон значений		
4 Номинальное значение с предельными отклонениями		
5 Указание двух и более параметров	 <ul style="list-style-type: none"> → параметр высоты шероховатости → параметр шага на базовой длине 0,8 мм → относительная опорная длина профиля на уровне $p = 50\%$ на базовой длине 0,8 мм 	

* ФПД – функциональная поверхность детали.

Возможны различные варианты обработки заготовки детали, когда при равенстве СКО обеспечиваются различные математические ожидания технологических значений R_{ik} .

В целом при обработке в одной технологической системе (ТС) возможны варианты, входящие в ограничиваемое множество методов обработки.

Можно предложить варианты назначения технологических значений параметров шероховатости при разработке технологической документации в соответствии с рекомендуемыми ГОСТ 2.309-73 видами указания параметров шероховатости.

При регламентации в конструкторской документации наибольшего значения параметра шероховатости (рис. 1а) при выборе технологического значения, равного конструкторскому (вариант 1), неизбежно теоретическое получение брака «+», которое составит при нормальном распределении в соответствии с правилом «трёх сигм» максимум 49,86 %, что не обеспечит выполнение технических условий обеспечения качества по параметрам шерохова-

тости. С целью обеспечения обработки без брака в этом случае целесообразно установить технологическое значение $\mu_2(R_{iT})$ (вариант 2):

$$\mu_2(R_{iT}) = R_{iK} - 3S\{R_{iT}\}. \quad (26)$$

Аналогично решается задача определения допустимых технологических значений параметров шероховатости при обеспечении конструкторских регламентируемых минимальных значений $R_{iK \min}$ (рис. 1б). В этом случае при назначении технологолом $\mu_1(R_{iT}) = R_{iK \min}$ при нормальном распределении R_{iT} неизбежно теоретическое получение брака ($R_{iT} < R_{iK \min}$) до 49,86 % в соответствии с правилом «трех сигм». Обеспечение обработки поверхности без брака по i -му параметру шероховатости в этом случае возможно при назначении его математического ожидания

$$\mu_2(R_{i2T}) = R_{iK \min} - 3S\{R_{iT}\}. \quad (27)$$

Соотношение (27) справедливо в том случае, когда при настройках ТС на технологическое обеспечение $\mu_1(R_{iT})$ и $\mu_2(R_{iT})$ (рис. 1б) средние квадратические отклонения $S\{R_{ijT}\}$ будут одинаковы.

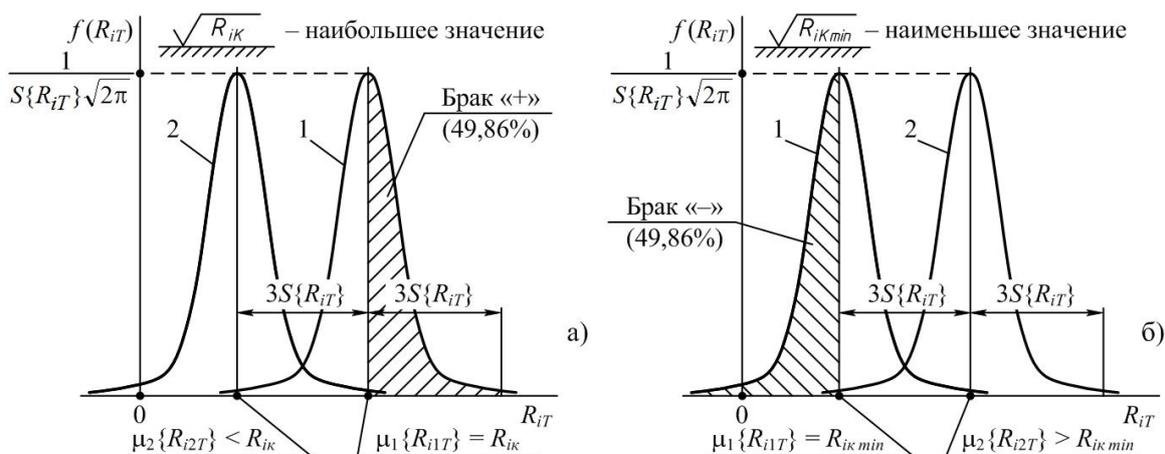


Рис. 1. Варианты выбора технологических значений R_{iT} , обеспечивающих наибольшие (а) и наименьшие (б) конструкторские значения R_{iK} параметров шероховатости поверхности для условий обработки без брака

Если $S\{R_{ijT}\} \neq const$, то задача решается аналогично с использованием в зависимостях (26) и (27) соответствующих значений $S\{R_{i1T}\}$ и $S\{R_{i2T}\}$.

Таким образом, зависимости (26) и (27) приобретают следующий вид:

$$\mu_2(R_{i2T}) = R_{iK} - 3S\{R_{i1T}\}, \quad (28)$$

$$\mu_2(R_{i2T}) = R_{iK \min} + 3S\{R_{i2T}\}. \quad (29)$$

Если в случае задания конструкторского значения параметра R_{iK} диапазоном допустимых значений ($R_{iK} \in [A, B]$) назна-

чить математическое ожидание параметра R_{iT} равным минимальному ($\mu_1\{R_{i1T}\} = R_{iK \min} = A$) или максимальному ($\mu_2\{R_{i2T}\} = R_{iK \max} = B$) значениям, то в соответствии с правилом «трёх сигм» в первом случае возможен брак «←» ($\approx 49,9 \%$), а во втором случае – брак «→» ($\approx 49,9 \%$).

Таким образом, ограничения технологических значений параметра R_{iT} по вариантам 1 и 2 (рис. 2) неприемлемы. Целесообразно выбирать третий вариант, когда

значение $\mu_3\{R_{i3T}\}$ равно, например, середине интервала $[A, B]$:

$$\mu_3\{R_{i3T}\} = \frac{B - A}{2} = \frac{R_{iKmax} - R_{iKmin}}{2} = \mu_3\{R_{i3T}\}_{опт}. \quad (30)$$

При этом для исключения брака важно, чтобы соблюдалось условие

$$6S_3\{R_{i3T}\} \leq R_{iKmax} - R_{iKmin}. \quad (31)$$

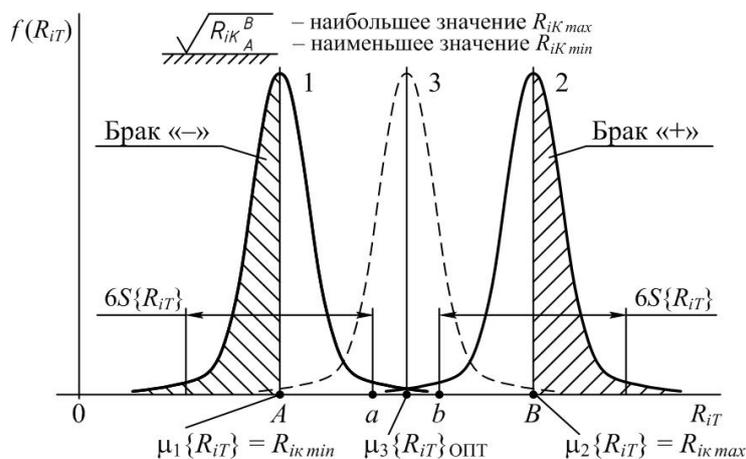


Рис. 2. Выбор технологического значения параметра шероховатости при его заданном диапазоне значений

Если это условие не соблюдается, то возможны два варианта:

1) поиск других условий обработки в данной ТС, которые при сохранении значения $\mu_3\{R_{i3T}\}$ привели бы к необходимому уменьшению $S_3\{R_{i3T}\}$;

2) поиск другой ТС обработки, обеспечивающей выполнение условий (30) и (31).

Если эти варианты неприемлемы, решается вопрос о надёжности P обеспечения параметра R_{iT} в заданном интервале $[A, B]$ ($P(R_{iT} \in [A, B])$) и проводится согласование приемлемости такого решения с конструктором.

В настоящее время требуемая надёжность технологического обеспечения параметров качества функциональных поверхностей деталей (в том числе и параметров шероховатости) [4-7] в конструкторской нормативно-технической документации не указывается. Это является серьёзным недостатком проектно-конструкторской разработки.

ГОСТ 2.309-73 предусматривает возможность задания номинального значения параметра шероховатости с симметричными предельными отклонениями (таблица). В этом случае при его технологическом

обеспечении (рис. 3) целесообразно выбрать математическое ожидание технологического параметра R_{iT} , равное номинальному конструкторскому значению:

$$\mu\{R_{iT}\} = R_{iKном}. \quad (32)$$

При этом с целью исключения брака должно соблюдаться условие

$$6S\{R_{iT}\} \leq R_{iKmax} - R_{iKmin}. \quad (33)$$

Для случая 1 (рис. 3) это условие соблюдается, а для случая 2 – нет, что приводит к возможности получения брака «←» или «+».

Соответствующие вероятности P можно рассчитать по известным зависимостям теории вероятностей:

$$P(R_{iT} > R_{iKmax}) = 1 - \int_{-\infty}^B f(x)dx \quad (34)$$

$$P(R_{iT} < R_{iKmin}) = \int_{-\infty}^A f(x)dx. \quad (35)$$

В зависимостях (34) и (35) величина $x = R_{iT}$.

При ограничении значений двух и более параметров для каждого из них назначают технологическое решение, используя представленные результаты, и находят приемлемое решение. При этом технологу следует выбирать технологиче-

ски гибкий (в плане управления процессом формирования параметров качества) способ обработки поверхностей деталей, например отделочно-упрочняющую обработку методом поверхностного пластического деформирования (ППД) с учётом технологической наследственности.

Следует иметь в виду, что факты наличия брака «+» и брака «-» по параметрам шероховатости технологически сравнительно легко устранимы. Однако это

устранение связано не только с потерей производительности технологического процесса, но и с нарушением расчетной технологии обработки, что приводит в конечном счёте к браку по обеспечиваемым эксплуатационным свойствам в связи с возникновением побочных явлений (шаржирование поверхности, нарушение требуемой топографии поверхностного слоя, относительной опорной площади микропрофиля и др.).



Рис. 3. Схема определения технологического значения параметра шероховатости при задании его номинального значения с симметричными предельными отклонениями

Заключение

Разработано алгоритмическое обеспечение реализации ГОСТ 2.309-73 в плане регламентации параметров шероховатости поверхностей деталей машин в технологической документации, пригодное к практическому использованию.

Результаты теоретических исследований могут послужить отправной точкой для дальнейшего развития теории и практики технологического обеспечения параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин с требуемой надёжностью.

Для широкой практической реализации результатов исследований необходимо решение ряда задач: 1) разработка стандартов или руководящих материалов по регламентации в технологической документации требуемых технологических значений параметров шероховатости; 2) дальнейшее развитие исследований в области надёжности технологического обеспечения параметров качества (в том числе и шероховатости) поверхностей заготовок в процессе обработки в технологически гибких системах [3-6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Сулов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 174 с.
2. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Сулов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2006. – 447 с.
3. Фёдоров, В.П. Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки: монография / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин, Е.В. Ковалёва. – Брянск: БГТУ, 2012. – 192 с.
4. Нагоркин, М.Н. Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синте-

- тических материалов: монография / М.Н. Нагоркин; под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2017. – 304 с.
5. Фёдоров, В.П. Принципы и средства технологического обеспечения заданных законов распределения параметров качества по обрабатываемой поверхности детали / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин // Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки: кол. моногр. / под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2014. – С. 172-220.
 1. Ryzhov, E.V. *Technological Support of Machinery Operational Properties* / E.V. Ryzhov, A.G. Suslov, V.P. Fyodorov. – M.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 174.
 2. *Technological Support and Operational Properties Increase in Parts and Their Joints* / A.G. Suslov, V.P. Fyodorov, O.A. Gorlenko [et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. – Mechanical Engineering, 2006. – pp. 447.
 3. Fyodorov, V.P. *Technological Support of Regular Change in Parts Surface Quality Parameters During Machining*: monograph / V.P. Fyodorov, M.N. Nagorkin, E.V. Kovalyova. – Bryansk: BSTU, 2012. – pp. 192.
 4. Nagorkin, M.N. *Parametric Reliability of Machinery Surface Finishing and Strengthening with Super-Hard Synthetic Tools*: monograph / M.N. Nagorkin; under the editorship of A.V. Kirichek. – M.: Spectrum, 2017. – pp. 304.
 6. Фёдоров, В.П. Технологическое обеспечение закономерного изменения качества поверхностного слоя деталей при обработке на станках с ЧПУ / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин // Научные технологии в машиностроении. – 2011. – № 2. – С. 40-46.
 7. Fyodorov, V.P. Determination of parametric reliability of machining technological systems by simulation technique / V.P. Fyodorov, M.N. Nagorkin, A.V. Totai // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 124 (2016) 012053.
 5. Fyodorov, V.P. Principles and means of technological support of specified laws on quality parameter distribution on part surface worked / V.P. Fyodorov, M.N. Nagorkin // *Efficient Technologies of Surface Plastic Deformation and Combined Machining*: group monograph / under the editorship of A.V. Kirichek. – M.: Spectrum, 2014. – pp. 172-220.
 6. Fyodorov, V.P. Technological support of quality regular changes in parts surface layer during machining on NC machines / V.P. Fyodorov, M.N. Nagorkin // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – No.2. – pp. 40-46.
 7. Fyodorov, V.P. Determination of parametric reliability of machining technological systems by simulation technique / V.P. Fyodorov, M.N. Nagorkin, A.V. Totai // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 124 (2016) 012053.

Статья поступила в редакцию 6.12.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Воронежского государственного технического университета
Кириллов О.Н.

Статья принята к публикации 12.02.19.

Сведения об авторах:

Нагоркин Максим Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и химия» Брянского государственного технического университета, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru.

Федоров Владимир Павлович, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, e-mail: fedorov.tm.2017@yandex.ru.

Nagorkin Maxim Nikolaevich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Life Safety and Chemistry”, Bryansk State Technical University, e-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru.

Fyodorov Vladimir pavlovich, Dr. Sc. Tech, Prof. of the Dep. “Engineering Technique”, Bryansk State Technical University, e-mail: fedorov.tm.2017@yandex.ru.

Пыриков Игорь Лаврентьевич, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, e-mail: pyrikov.tm.2017@yandex.ru.

Топорков Михаил Петрович, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, e-mail: toporkov.tm.2017@yandex.ru.

Pyrikov Igor Lavrentievich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Technique”, Bryansk State Technical University, e-mail: pyrikov.tm.2017@yandex.ru.

Toporkov Michael Petrovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Engineering Technique”, Bryansk State Technical University, e-mail: toporkov.tm.2017@yandex.ru.