

2. RSS 3.1109-82. Uniform System of Technological Documentation. Terms and Definitions of Basic Concepts. M.: Standardinform, 2012.

3. RSS 14.004-83. Technological Preproduction. Terms and Definitions of Basic Concepts. M.: Standardinform, 2008.

Рецензент д.т.н. Б.М. Базров

УДК 621.9.015

DOI: 10.12737/article\_5a70c103c3eaf0.91595644

О.А. Горленко, д.т.н.

(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»  
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)

E-mail: goa-bgtu@mail.ru

## Метод пробных заготовок в обеспечении параметров шероховатости поверхности деталей машин

*Рассмотрен метод технологического обеспечения параметров шероховатости деталей машин, суть которого заключается в обработке пробных заготовок по заранее намеченному плану, разработке математико-статистической модели связи параметров шероховатости с технологическими факторами и определении уровней последних, гарантирующих достижение заданных значений параметров шероховатости при обработке основной партии заготовок.*

**Ключевые слова:** детали машин; параметры шероховатости поверхности; технологическое обеспечение; экспериментально-статистический подход.

О.А. Gorlenko, D. Eng.

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University", 7, 50 Years of October Avenue, Bryansk, 241035)

## Method of test blanks in assurance of surface roughness parameters of machine parts

*A method for technological support of roughness parameters for machine parts based on an experimental statistical approach is considered. The essence of the method consists in the processing of test blanks (or their test surfaces) according to a pre-planned scheme, in the roughness parameter assessment of test blanks, in the development of mathematical statistical model of the connection of roughness parameters with technological factors and on the basis of the model given a definition of their levels ensuring obtaining the roughness parameter values specified at machining a basic batch blanks. The peculiarities in technological support of relative supporting lengths of a rough surface profile and also a method for the formation of complex functional parameters of a rough surface are touched upon. The necessity for the creation of portable control measuring systems allowing the realization in practice this method is emphasized.*

**Keywords:** machine parts; parameters of surface roughness; technological support; experimental statistical approach.

Одной из задач технологического обеспечения параметров качества поверхностного слоя (в частности параметров шероховатости) деталей машин является выбор методов и назначение режимов обработки их рабочих поверхностей. При этом приходится учитывать, что каждому методу обработки (с учётом влияния технологической наследственности) присущи свои количественные и качественные характеристики и направления неровно-

стей, а назначаемые режимы обработки должны обеспечить не только заданную производительность при наименьшей себестоимости, но и регламентированные параметры качества поверхностного слоя [1 – 4].

Чаще всего режимы обработки (например, скорость резания и подача), параметры и характеристики применяемого инструмента назначаются по нормативам, составленным на основе опыта специалистов в области техноло-

гической подготовки производства. Такие нормативы, как правило, не учитывают многообразия встречающихся на практике условий обработки и поэтому не могут гарантировать обеспечение заданных параметров качества поверхностного слоя деталей машин.

В этой связи одним из методов в технологическом обеспечении параметров качества поверхностного слоя, в частности параметров шероховатости, деталей машин является рассматриваемый ниже метод пробных заготовок, базирующийся на экспериментально-статистическом подходе [5].

Следует заметить, что известен метод пробных заготовок, применяемый в практике как метод настройки станков для обеспечения заданной точности рабочих поверхностей деталей машин. Суть этого метода заключается в том, что установка режущих инструментов производится на определённый настроечный размер, а правильность настройки оценивается по результатам обработки некоторого количества (от 2 до 8 и более) пробных заготовок. Настройка признаётся правильной, если среднее арифметическое размеров пробных заготовок находится в пределах некоторого допуска на настройку.

Решение задач технологического обеспечения параметров шероховатости во многом зависит от того, какие параметры шероховатости регламентированы конструктором и как они заданы. В соответствии с ГОСТ 2.309 – 73 «Межгосударственный стандарт. Единая система конструкторской документации. Обозначения шероховатости поверхности» на чертежах деталей шероховатость поверхности регламентируется либо одним из высотных параметров ( $Ra$ ,  $Rz$  или  $Rmax$ ), либо одним из шаговых параметров ( $Sm$  или  $S$ ), либо одним из параметров  $tp$ , характеризующим распределение материала неровностей по высоте.

При указании наибольшего значения параметра шероховатости в обозначении приводят параметр шероховатости без предельных отклонений, например  $Ra\ 0,4$ . При указании наименьшего значения параметра шероховатости после обозначения параметра следует указывать «*min*», например  $Ra\ 3,2\ min$ . При указании диапазона значений параметра шероховатости поверхности в обозначении шероховатости приводят пределы значений параметра, размещая их в две строки, например  $Ra_{0,4}^{0,8}$ . При этом в верхней строке приводят значение параметра, соответствующее более

грубой шероховатости. При указании номинального значения параметра шероховатости поверхности в обозначении приводят это значение с предельными отклонениями, например:  $Rz\ 50_{-10\%}$ ;  $Sm\ 0,63^{+20\%}$ ;  $t_{50}\ 50 \pm 20\%$ .

При указании двух и более параметров шероховатости поверхности в обозначении шероховатости значения параметров записывают сверху вниз в следующем порядке: параметр высоты неровностей профиля, параметр шага неровностей профиля, относительная опорная длина профиля.

Следует обратить внимание на то, что в соответствии с изменённой редакцией ГОСТ 2789 – 73 «Межгосударственный стандарт. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики» параметр  $Rz$  (наибольшая высота профиля) определяется как сумма высоты наибольшего выступа профиля  $Rp$  и глубины наибольшей впадины профиля  $Rv$  в пределах базовой длины  $l$ , а параметр  $Rmax$  (полная высота профиля) – как сумма высоты наибольшего выступа профиля  $Rp$  и глубины наибольшей впадины профиля  $Rv$  в пределах длины оценки  $L$ . При этом шаг неровностей профиля определяется как отрезок средней линии профиля, содержащий неровность профиля, а шаг местных выступов профиля – как отрезок средней линии между проекциями на неё наивысших точек соседних местных выступов профиля. В этой связи параметр  $Sm$  (средний шаг неровностей профиля) оценивается как среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины, а параметр  $S$  (средний шаг местных выступов профиля) – как среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины.

Суть предлагаемого метода пробных заготовок в обеспечении параметров шероховатости поверхности заключается в следующем:

1. Обработка пробной партии заготовок (или пробных поверхностей заготовок) по плану полного  $2^k$  или дробного  $2^{k-p}$  факторного эксперимента, где  $k$  – число рассматриваемых технологических факторов, влияющих на изменчивость параметров шероховатости,  $p$  – то же, влияние которых смешано с влиянием взаимодействий факторов. Исходя из того, что число пробных заготовок не должно быть слишком большим, наиболее приемлемыми являются планы полных факторных экспериментов  $2^2$ ,  $2^3$  и дробных –  $2^{3-1}$ ,  $2^{4-1}$ .

Число повторений  $u$  при этом также не должно быть слишком большим, поэтому можно рекомендовать принимать в зависимо-

сти от плана эксперимента  $u = 2, 3, 4$  так, чтобы общее число обрабатываемых заготовок  $n = uN = u2^k$  или  $n = uN = u2^{k-p}$  не превышало 8 или 16, или, в крайнем случае, 24. Число пробных заготовок может быть значительно сокращено, когда опыты с повторениями, например  $u = 4$ , проводятся только в центре плана эксперимента (технологические факторы при этом принимают значения  $x_j = 0$ ).

2. Измерение параметров шероховатости  $R_1, R_2, \dots, R_i$  пробных заготовок.

3. Разработка математико-статистической модели способа обработки пробных заготовок, которую можно представить в виде следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \hat{R} &= a_{10} + \sum_1^k a_{1j} x_j; \\ \hat{R} &= a_{20} + \sum_1^k a_{2j} x_j; \\ \dots &= \dots + \dots; \\ \hat{R} &= a_{i0} + \sum_1^k a_{ij} x_j, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\hat{R}$  – предсказываемые значения параметра качества;  $a_{j0}$  и  $a_{ij}$  – коэффициенты;  $x_j$  – технологические факторы, определяющие условия обработки  $j = 1, 2, \dots, k$ , число факторов  $k \geq j$ .

Уровни варьирования факторов  $x_j$  верхний и нижний, обозначаемые соответственно +1 и -1, принимают на основе опыта и справочных данных по режимам обработки. Уравнения (1) должны содержать факторы, влияние которых на параметры качества  $R_i$  является существенным на принятом уровне значимости  $\alpha$ , быть статистически значимыми и адекватными. Результаты математико-статистического анализа каждого из уравнений (1) следует представлять в виде табл. 1. Фактор  $x_j$  подлежит включению в уравнения (1), если

фактическое значение  $F_j$  отношения больше критического значения.

$$F_j = \frac{M_j}{S_e^2} > F_{1;N(u-1);(\alpha)}$$

Уравнения (1) в целом значимы, если

$$F_{\text{пер}} = \frac{M_{\text{пер}}}{S_{\text{ост}}^2} > F_{m;uN-m-1;(\alpha)}$$

и адекватны, если

$$F_{\text{ад}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_e^2} > F_{N-m-1;N(u-1);(\alpha)}$$

При отсутствии повторений ( $u = 1$ ) удаётся проверить только значимость уравнений (1). Если уравнения оказались неадекватными, необходимо, как известно, перенести центр плана эксперимента или изменить интервалы варьирования факторов. Если связи между параметрами качества и технологическими факторами оказываются незначимыми, но адекватными, то уравнения (1) представляют в виде  $\hat{R}_j = \bar{R}_j$ , где  $\bar{R}_j = \sum_N \sum_u R_{iNu} / Nu$  – среднее значение параметра качества.

Когда опыты по обработке пробных заготовок повторяют только в центре плана, при  $x_j = 0$ , в качестве дисперсии воспроизводимости принимают следующее:

$$s_e^2 = \frac{1}{u-1} \left[ \sum_u R_{i0u}^2 - \left( \sum_u R_{i0u} \right)^2 / u \right]$$

с  $N(u - 1)$  степенями свободы.

Значения коэффициентов  $a_{j0}$  и  $a_{ij}$  в уравнениях (1) вычисляют с помощью выражения:

$$a_{ij} = \frac{\sum_N \sum_u R_{iNu} x_j}{Nu}$$

при определении коэффициента  $a_{j0}$  принимают условно для всех опытов  $x_j = +1$ .

Мерой тесноты связи между параметрами шероховатости и технологическими факторами является коэффициент множественной детерминации  $R^2 = S_{\text{пер}} / S_0$ , оценивающий долю вариации параметров качества, обуславливаемой технологическими факторами; влияние же отдельного фактора может быть оценено с помощью коэффициентов  $d_j^2 = S_j / S_0$ .

4. Определение уровней технологических факторов  $x_j^*$ , позволяющих обеспечить регламентированные значения параметров шероховатости  $R^*$ . При этом следует учитывать то, как заданы параметры шероховатости: либо максимальным значением, либо минимальным значением, либо номинальным значением с предельными отклонениями.

1. Дисперсионный анализ эксперимента  $2^k$  или  $2^{k-p}$  с  $u$  повторениями по обработке пробных заготовок (для параметра  $R_i$ )

Источник вариации параметров качества	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	$F$ – отношение
Факторы:				
$x_1$	1	$S_1$	$M_1 = S_1$	$F_1 = M_1 / s_{\text{ост}}^2$
$x_2$	1	$S_2$	$M_2 = S_2$	$F_2 = M_2 / s_{\text{ост}}^2$
...	...	...	...	...
$x_j$	1	$S_j$	$M_j = S_j$	$F_j = M_j / s_{\text{ост}}^2$
...	...	...	...	...
$x_k$	1	$S_k$	$M_k = S_k$	$F_k = M_k / s_{\text{ост}}^2$
Регрессия ( $m$ значимых факторов из $k$ )	$m$	$S_{\text{рег}} = \sum_1^m S_j$	$M_{\text{рег}} = S_{\text{рег}} / m$	$F_{\text{рег}} = M_{\text{рег}} / s_{\text{ост}}^2$
Остаток	$uN - m - 1$	$S_{\text{ост}} = S_0 - S_{\text{рег}}$	$s_{\text{ост}}^2 = \frac{S_{\text{ост}}}{uN - m - 1}$	–
Неадекватность	$N - m - 1$	$S_{\text{ад}} = S_{\text{ост}} - S_e$	$s_{\text{ад}}^2 = \frac{S_{\text{ад}}}{N - m - 1}$	$F_{\text{ад}} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_e^2}$
Воспроизводимость	$N(u - 1)$	$S_e$	$s_e^2 = \frac{S_e}{N(u - 1)}$	–
Сумма	$uN - 1$	$S_0$	–	–

**Примечания:** 1.  $N = 2^k$  или  $N = 2^{k-p}$  – число опытов по обработке пробных заготовок.

2. Суммы квадратов вычисляются по следующим уравнениям:

$$S_j = \sum_N \sum_u R_{iNu} x_j / Nu; S_0 = \sum_N \sum_u R_{iNu}^2 - \left( \sum_N \sum_u R_{iNu} \right)^2 / Nu; S_e = \sum_N \left[ \sum_u R_{iNu} - \left( \sum_u R_{iNu}^2 \right) / u \right],$$

где  $R_{iNu}$  – наблюдаемое значение параметра качества  $R_i$  при повторении  $u$  опыта  $N$ .

В этой связи, прежде всего, необходимо определить доверительные интервалы  $\pm \Delta R^*$ , характеризующие технологические возможности принятых условий обработки пробных заготовок:

$$\Delta R^* = t_{(1-\alpha/2);f} \sqrt{s_e^2 / u}, \quad (2)$$

где  $t_{(1-\alpha/2);f}$  – критерий Стьюдента для принятого значения  $\alpha$  и числа степеней свободы  $f = N(u - 1)$ ;  $s_e^2$  – дисперсия воспроизводимости;  $u$  – число повторений (см. табл. 1).

Если параметр шероховатости задан максимальным значением  $R_{\text{max}}$ , то уровни технологических факторов выбираются таким обра-

зом, чтобы обеспечивалось номинальное значение  $R_{\text{max}} - \Delta R^*$ ; если задан минимальным значением  $R_{\text{min}}$ , то должно обеспечивать номинальное значение  $R_{\text{min}} + \Delta R^*$ . Если параметр шероховатости задан номинальным значением (на основе которого определяются уровни технологических факторов  $x_j^*$ ) с предельными отклонениями ( $ES_R$  и  $EI_R$ ), то интервал допуска  $T_R = ES_R - EI_R$  и доверительный интервал  $\pm \Delta R^*$  должны перекрываться полностью или частично. В противном случае следует изменять условия обработки пробных заготовок.

**5.** Принятие решения об обработке основной партии заготовок или изменении условий обработки пробных заготовок.

Свои особенности имеет решение задачи

технологического обеспечения относительных опорных длин  $tp$  шероховатой поверхности, характеризующие распределение материала неровностей в верхних слоях до уровня средней линии профиля. Как известно, неровности, расположенные до уровня 30...40 % от  $Rz$  (примерно до уровня средней линии) оказывают наибольшее влияние на эксплуатационные свойства деталей машин, в частности на их износостойкость и контактную жёсткость.

Начальный участок опорной кривой может быть аппроксимирован зависимостью

$$tp = tm \left( \frac{P}{100} \frac{Rz}{Rp} \right)^v = tm \left( \frac{P}{100} \frac{k_z}{k_p} \right)^v,$$

где  $tm$  – относительно опорная длина профиля шероховатости поверхности в %;  $P$  – значение уровня сечения профиля в %;  $Rz$  – наибольшая высота профиля;  $Rp$  – высота наибольшего выступа;  $k_z = Rz / Ra$  и  $k_p = Rp / Ra$ ;  $v$  – показатель, характеризующий кривизну начального участка опорной кривой. Как известно

$$v = \frac{tm}{50} \frac{Rp}{Ra} - 1 = \frac{tm}{50} k_p - 1.$$

Следует заметить, что параметр  $tm$  имеет склонность стабилизироваться относительно значений  $tm = 50$  % (для технологических методов обработки резанием) и  $tm = 60$  % (для методов поверхностного пластического деформирования). Параметры  $k_z$  и  $k_p$  также принимают определённые значения для различных технологических методов обработки (в силу тесной корреляционной зависимости между параметрами  $Rz$  и  $Ra$ ,  $Rp$  и  $Ra$ ).

Характер распределения материала неровностей в верхних слоях зависит, таким образом, в большей мере от соотношения  $k_p$ . При  $tm = 50$  %, если  $k_p = Rp / Ra > 2$ , то  $v > 1$ , если  $k_p = 2$ ,  $v = 1$ , и если  $k_p < 2$ , то  $v < 1$  (рис. 1).

Также свои особенности имеет решение задачи технологического обеспечения совокупности функциональных параметров шероховатости поверхности. Решение такой задачи во многом упрощается при объединении совокупности индивидуальных параметров в комплексный параметр.

Известен, например, комплексный параметр шероховатости поверхности Крагельского–Комбалова  $\Delta = Rz / \rho b^{1/v}$ , где  $\rho$  – радиус

скругления вершин поверхностей;  $b$  и  $v$  – параметры опорной кривой профиля ( $tp = b\rho^v$ ).

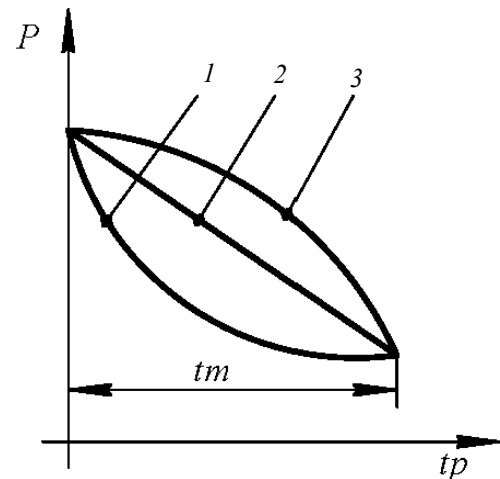


Рис. 1. Характер распределения материала неровностей:

$1 - k_p > 2$ ;  $2 - k_p = 2$ ;  $3 - k_p < 2$

Применительно к конкретным условиям эксплуатации деталей машин, комплексный параметр шероховатости  $Q$  может быть определён на основе регрессионных моделей результатов испытаний пробных деталей. Например, если для эксплуатационного показателя  $J$  получено уравнение связи в зависимости от параметров шероховатости  $R_j$ .

$$J = b_0 R_1^{b_1} R_2^{b_2} R_3^{b_3},$$

то очевидно,  $J = b_0 Q$ , где  $Q = R_1^{b_1} R_2^{b_2} R_3^{b_3}$ . Для такого комплексного показателя шероховатости  $Q$  могут быть определены уровни технологических факторов  $x_j^*$  в соответствии с уравнениями (1).

Для широкого применения на практике рассматриваемых методов технологического обеспечения параметров шероховатости поверхности ответственных деталей машин необходимо создание портативных контрольно-измерительных систем, позволяющих на основе профилографирования поверхностей пробных заготовок определять ординаты их профиля относительно средней линии, проводимой так, чтобы в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение ординат профиля до этой линии было минимальным. То есть такие системы должны создаваться на базе микро ЭВМ и оснащаться блоками оперативной оптимизации условной обработки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин: монография. – Киев: Наук. думка, 1984. – 272 с.
2. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей: монография. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
3. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин: монография. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
4. Суслов, А.Г., Дальский, А.М. Научные основы технологии машиностроения: научная монография. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
5. Суслов, А.Г., Горленко, О.А. Экспериментально-статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин: монография. М.: Машиностроение-1, 2003. – 303 с.
6. Маталин, А.А. Технология машиностроения: учебник для машиностроительных вузов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1985. – 496 с.

## REFERENCES

1. Ryzhov, E.V. *Technological Methods for Wear-resistance Increase in Machine Parts*: monograph. – Kiev: Scientific Thought, 1984. – pp. 272.
2. Suslov, A.G. *Technological Support of State Parameters in Surface Layer of Parts*: monograph. – M.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 208.
3. Suslov, A.G. *Quality of Surface Layer in Machine Parts*: monograph. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
4. Suslov, A.G., Dalsky, A.M. *Scientific Fundamentals of Engineering Techniques*: scientific monograph. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 684.
5. Suslov, A.G., Gorlenko, O.A. *Experimental Statistical Method in Assurance of Surface Quality in Machine Parts*: monograph. M.: Mechanical Engineering-1, 2003. – pp. 303.
6. Matalin, A.A. *Engineering Techniques*: textbook for engineering colleges. – L.: Mechanical Engineering, Leningrad Branch, 1985. – pp. 496.

Рецензент д.т.н. С.Г. Бишутин

УДК 62-97/-98

DOI: 10.12737/article\_5a70c104131317.37567110

В.Г. Гусев, д.т.н.

(Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87)

E-mail: prof\_gusev@mail.ru

## Эффективная технология обработки наплавленных поверхностей корпусных деталей

*Проанализирована известная технология механической обработки наплавленных поверхностей корпусных деталей грузовых железнодорожных вагонов. Вскрыты и устранены её недостатки путем разработки технологии, основанной на применении высокоэффективного комбинированного режущего инструмента. Комбинированные режущие инструменты обеспечивают высокопроизводительную механическую обработку наплавленных поверхностей за один рабочий ход, а нулевые задние углы увеличивают ресурс работы дорогих твердосплавных пластин в два раза. Режущие инструменты испытаны в процессе механической обработки названных поверхностей, что подтвердило их высокую эффективность.*

**Ключевые слова:** механическая обработка; корпусная деталь; наплавленная поверхность; комбинированный режущий инструмент; производительность.

V.G. Gusev, D. Eng.

(Stoletovs State University of Vladimir 87, Gorky Str., Vladimir, 600000)

## Efficient technology for processing weld surfaces in case parts

*A well-known technology of machining weld surfaces in case parts of freight cars is analyzed. Its drawbacks are defined and eliminated by means of the development of techniques based on the use of high-capacity combined cutters. Combined cutters ensure a high-capacity machining of weld surfaces during one travel and zero back angles increase expensive hard-alloy plate life by a factor of two. Cutters are tested in the course of mentioned surface machining which confirmed their high efficiency.*

**Keywords:** machining; case part; weld surface; combined cutter; productivity.