

И.В. Ерёменкова, к.т.н.

(МГТУ Н.Э.Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)

E-mail: bauman@bmstu.ru

## Технологическое обеспечение герметичности неподвижных разъемных соединений по двухступенчатой схеме организации производства

*Приведены теоретические уравнения для расчета герметичности неподвижных разъемных соединений с учетом качества контактирующих поверхностей. Даны теоретические и эмпирические зависимости для определения параметров качества поверхностей деталей для различных методов их обработки. Изложено двухступенчатое конструкторско-технологическое обеспечение герметичности неподвижных разъемных металлических соединений.*

**Ключевые слова:** эксплуатационное свойство; герметичность; технологическое обеспечение; качество поверхностного слоя деталей машин.

I.V. Eryomenkova, Can. Sc. Tech.

(Bauman STU of Moscow, 1 Building, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, 105005)

## Technological support of fixed split joint impermeability in two-stage circuit of production organization

*The oretical equations are shown for the calculation of fixed split joint impermeability taking into account contacting surface quality. There are given theoretical and empirical dependences for the definition of quality parameters in parts surfaces for different methods of their processing. A two-stage design-technological support of fixed split metal joint impermeability is presented.*

**Keywords:** operation property; impermeability; technological support; quality of machinery surface layer.

Любое эксплуатационное свойство изделия и его соединений, в частности и герметичность, подлежат обеспечению на стадии конструкторско-технологической подготовки производства. В зависимости от типа и структуры организации производства, определяющей внешние и внутренние условия решения задачи обеспечения герметичности, существует два подхода. Первый подход заключается в условиях классического разделения функций и решаемых задач между разными специалистами, а именно конструктором и технологом (двухступенчатая схема конструкторско-технологической подготовки производства). Второй подход подразумевает наличие возможностей для решения задач конструктора и технолога одним специалистом (одноступенчатая схема). В данной статье рассматривается реализация первого подхода.

При обеспечении герметичности соединений по первому подходу [1 – 5], конструктор

осуществляет выбор конструкторских и технических решений (материал, твердость, конструкция, геометрическая форма, параметры точности, качество поверхностного слоя), обеспечивающих заданные служебным назначением величины необходимой и достаточной герметичностью соединения (рис. 1).

Для решения задачи герметизации конструктор определяет метод моделирования механизма герметизации и определения утечки (натекания) через межповерхностную полость, а также модели описания её формирования в процессе сближения герметизирующих поверхностей с учётом механизмов переноса герметизируемой среды.

Используя результаты предшествующих исследований теории контактных перемещений сопрягаемых поверхностей [6], получены теоретические зависимости определения утечки (натекания) герметизируемой среды.



Рис. 1. Структурная схема конструкторских решений при обеспечении герметичности

Для жидкостей утечка  $Q_{ж}$ , мм<sup>3</sup>/с, рассчитывается по формуле:

$$Q_{ж} = \frac{\pi \cdot d_{к} \cdot \Delta p \cdot u \cdot [(H_{max} + W_z + R_z) - y_{к}]^3}{12 \cdot \mu \cdot \ell} K', \quad (1)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления, вызывающий движение среды, МПа;  $d_{к}$ ,  $\ell$  – размеры контакта, мм;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости среды, характеризующий скорость движения среды, МПа·с;  $H_{max}$  – макроотклонение (погрешность формы), мм;  $W_z$  – средняя высота волн, мм;  $R_z$  – средняя высота неровностей поверхности, мм;  $y_{к}$  – нормальное контактное сближение поверхности, мм.

Для газов, находящихся под действием давления больше 0,1 МПа – ламинарный режим течения, утечка  $Q_{г}$ , г/с, определяется следующим выражением:

$$Q_{г} = \frac{\pi \cdot d_{к} \cdot M \cdot (p_1^2 - p_2^2) \cdot [(H_{max} + W_z + R_z) - y_{к}]^3}{0,024 \cdot \mu \cdot \ell \cdot R \cdot T} K', \quad (2)$$

где  $M$  – молекулярная масса герметизируемого вещества;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура газа.

Для газов, находящихся под действием давления меньше 0,1 МПа, имеет место молекулярный режим течения, в соответствии с которым натекание  $Q_{гн}$ , мм<sup>3</sup>·МПа/с, определяется выражением:

$$Q_{гн} = 0,042 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \frac{\Delta p \cdot u \cdot [(H_{max} + W_z + R_z) - y_{к}]^3}{\ell} K'. \quad (3)$$

Такой подход к расчету герметичности позволяет определять не только герметизирующую способность соединения или поверхности, но и определить качество поверхностного слоя, обеспечивающее допустимую величину утечки (натекания), а также оценить технологические возможности в обеспечении герметичности. Однако осуществление конструктором подбора всех соответствующих параметров возможно лишь методом подбора (метод перебора) подходящих параметров, что требует дополнительных усилий по оптимизации решения этой задачи.

Из полученных теоретических зависимостей очевидна необходимость точного определения комплекса параметров качества поверхности, по сравнению с использованием вероятностно-статистического подхода обеспечения герметичности соединений. Вероятностно-статистический подход обладает повышенными затратами ресурсов (себестоимостью) и ограничивается определением конструктора лишь влиянием шероховатости поверхности, без учёта влияния на герметизирующую способность других параметров качества поверхностного слоя.

При таком подходе к решению задачи обеспечения герметичности соединений исходными данными для технолога в настоящее время является параметр неровности поверхностного слоя – шероховатость, причём только её высотное значение. По предлагаемому инструментарию решения задач конструктора в качестве исходных данных предлагается учитывать комплекс параметров качества поверхностного слоя оказывающих наибольшее влияние на герметизацию поверхности. Однако при определении технологических возможностей в обеспечении одновременно несколь-

ких показателей качества поверхностного слоя возникают сложности сравнения (рис. 2).

На этапе определения возможных экономически целесообразных методов изготовления изделий с учётом конкретного производства предлагается использовать таблично-расчётный метод, основанный на следующем подходе.

Полученные теоретические зависимости определения утечки (натекания) герметизируемой среды сводятся к одной эквивалентной зависимости вида:

$$Q_m = B \cdot (C - D \cdot F)^3 \cdot G, \quad (4)$$

где составляющая  $B$  характеризует условия эксплуатации;  $C$  – высота пористого слоя до приложения нагрузки;  $D$  – нормальное контактное сближение без учёта геометрии контакта и нагрузки (при наличии в соединении взаимного смещения герметизирующих поверхностей вместо  $D$  принимается  $D'$ );  $F$  – учитывает геометрию контакта и нагрузку;  $G$  – характеризует влияние на герметичность плотности контакта.

$$B_{ж} = \frac{\Delta p \cdot u}{\mu}, \quad (с^{-1}); \quad (5)$$

$$B_{Г} = \frac{(p_1^2 - p_2^2) \cdot u \cdot M}{0,024 \cdot \mu \cdot R \cdot T}, \quad (Г/(с \cdot мм^3)); \quad (6)$$

$$B_{ГН} = 0,042 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \Delta p \cdot u, \quad (мм \cdot МПа/с); \quad (7)$$

$$C = H \max + Wz + Rz, \quad (мм); \quad (8)$$

Табличные составляющие определяются по формулам:

$$D = \left[ \pi \cdot \left( \frac{0,4 \cdot \pi \cdot Rz \cdot Wz \cdot Hmax}{H_{\mu 0}} \right)^{1/3} + 1 \right] \cdot 10 \cdot \pi \cdot \frac{1 - \mu^2}{E \cdot Rz} \cdot H_{\mu 0} \cdot Sm, \quad мм/МПа \quad (9)$$

$$D' = D \cdot \left( 2 \cdot \sqrt{1 + f^2} - 1 \right), \quad мм/МПа. \quad (10)$$

Составляющие рассчитываются с использованием следующих зависимостей:

$$F = \left( \frac{N}{A} \right)^{1/3}, \quad Н/мм^2 \quad (11)$$

$$G_{ж} = G_{Г} = \frac{\pi \cdot d_{\kappa}}{\ell} K' \quad (12)$$

$$G_{ГН} = \frac{K'}{\ell}, \quad мм^{-1} \quad (13)$$

Табличные данные для определения возможностей методов обработки соединений, изготавливаемых из коррозионностойкой стали 08X18H10T в обеспечении герметичности, приведены в табл. 1 – 3.

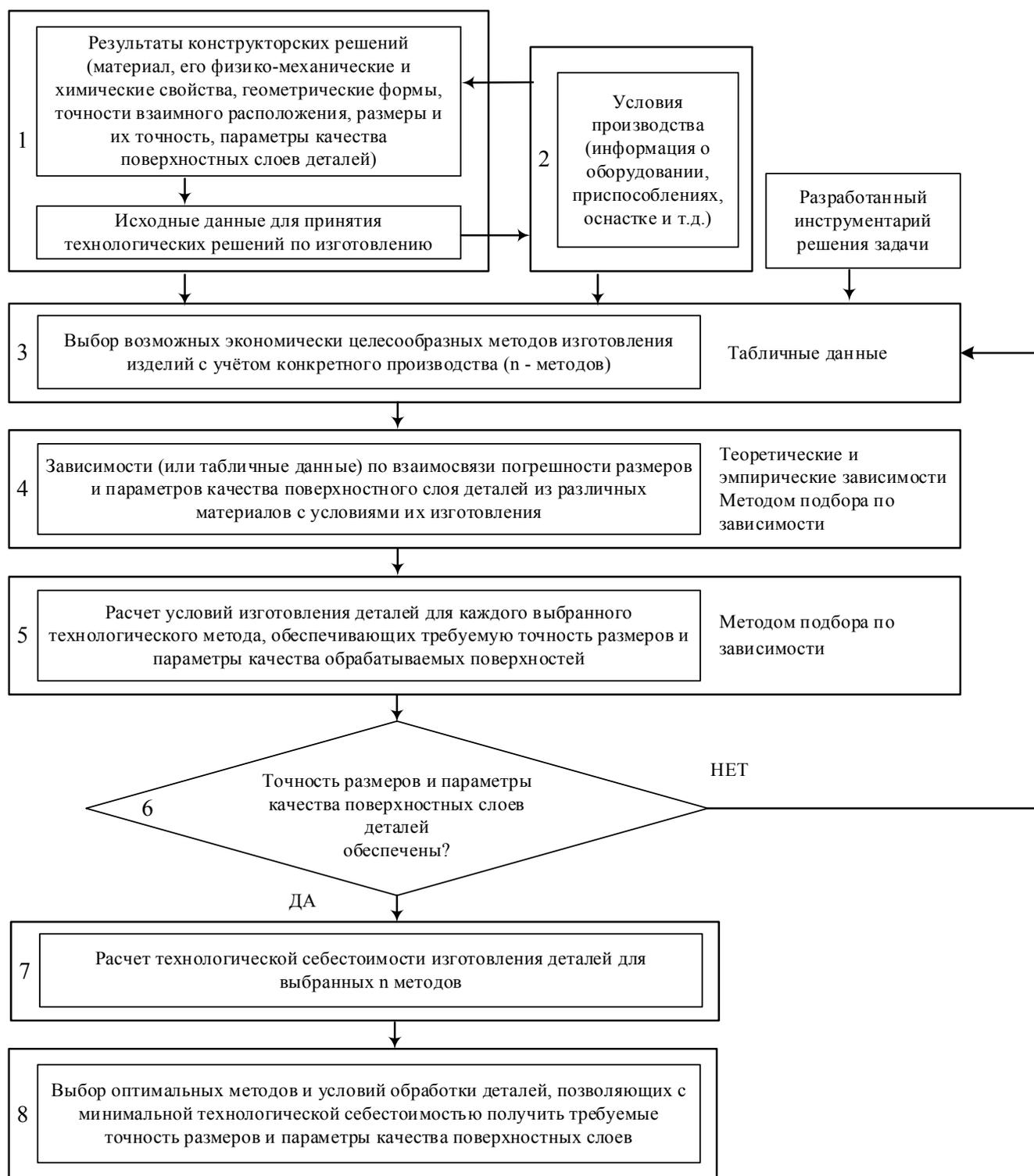


Рис. 2. Структурная схема технологических решений при обеспечении герметичности

Из полученных выше уравнений видно, что, установив взаимосвязь параметров качества поверхностного слоя с условиями обработки этих поверхностей, получается прямая взаимосвязь утечки (натекания) герметизируемой среды с условиями технологической обработки поверхностей. Это возможно благодаря имеющейся связи параметров поверхностного слоя с условиями обработки [7]. При

использовании этих зависимостей необходимо учитывать рассматриваемое сечение, так как влияние тех или иных факторов на формирование продольных и поперечных неровностей не одинаково.

При механических методах обработки макроруклонение  $H_{max}$ , мм, поверхности определяется зависимостью:

$$H_{max} = H_1 \pm H_2 \pm H_3 \pm H_4, \quad (14)$$

где  $H_1$  – составляющая, вызванная геометрической неточностью станка;  $H_2$  – составляющая, вызванная упругими деформациями элементов технологической системы;  $H_3$  – со-

ставляющая, вызванная тепловыми деформациями элементов технологической системы;  $H_4$  – составляющая, вызванная износом инструмента.

**1. Данные для определения возможностей технологических методов обработки стали 08X18H10T в обеспечении параметров качества плоских стыков соединения и их герметичности**

Методы обработки	Параметры качества поверхностного слоя				Составляющие для определения $Q_T$ по (4)			Составляющая, характеризующая эксплуатационные условия					
								вода при 9,3 МПа	воздух при 9,3 МПа	воздух при 9,3 Па			
	$H_{max}$ , МКМ	$Wz$ , МКМ	$Rz$ , МКМ	$Sm$ , мм	$C$ , мм	$D$ , мм/МПа	$D'$ , мм/МПа	$B_{ж}$ , $c^{-1}$	$B_{г}$ , г/(с·мм <sup>3</sup> )	$B_{гн}$ , мм·МПа/с			
Торцовое точение													
чистовое	50÷120	2,5÷10	8÷32	0,08÷0,25	0,0605÷0,162	0,0027÷0,0093	0,0028÷0,0095	1,0267	457,343	391,802			
тонкое	15÷50	0,8÷3	1,6÷8,0	0,025÷0,125	0,0246÷0,061	0,0016÷0,0029	0,0016÷0,003						
Плоское шлифование													
чистовое	16÷40	1,6÷5,0	1,6÷8,0	0,025÷0,125	0,0192÷0,053	0,0009÷0,0032	0,001÷0,003						
тонкое	6÷25	0,63÷2	0,4÷1,6	0,01÷0,032	0,007÷0,0286	0,0003÷0,0012	0,0003÷0,0012						
плосковершинное	20÷100	2÷16	1,6÷12,5	0,25÷5	0,0236÷0,1285	0,0011÷0,0078	0,0011÷0,008						
Притирка													
обычная	4÷10	0,4÷0,8	0,1÷0,5	0,008÷0,04	0,0045÷0,0113	0,0001÷0,0004	0,0001÷0,0004						
плосковершинная	5÷7	0,6÷1,6	0,1÷2,0	0,02÷0,25	0,0107÷0,0536	0,0002÷0,0015	0,0002÷0,0015						

**2. Данные для определения возможностей технологических методов обработки стали 08X18H10T в обеспечении параметров качества цилиндрических стыков соединения (наружные тела вращения) и их герметичности**

Методы обработки	Параметры качества поверхностного слоя				Составляющие для определения $Q_T$ по (4)			Составляющая, характеризующая эксплуатационные условия					
								вода при 9,3 МПа	воздух при 9,3 МПа	воздух при 9,3 Па			
	$H_{max}$ , МКМ	$Wz$ , МКМ	$Rz$ , МКМ	$Sm$ , мм	$C$ , мм	$D$ , мм/МПа	$D'$ , мм/МПа	$B_{ж}$ , $c^{-1}$	$B_{г}$ , г/(с·мм <sup>3</sup> )	$B_{гн}$ , мм·МПа/с			
Обтачивание													
получисто-вое	80÷200	3,2÷10	10÷80	0,16÷0,4	0,0932÷0,2900	0,0038÷0,0149	0,0038÷0,0152	1,0267	457,343	391,802			
чистовое	40÷100	1,6÷4	4÷12,5	0,08÷0,16	0,0456÷0,1165	0,0018÷0,0047	0,0018÷0,0048						
Шлифование													
чистовое	10÷40	0,5÷4	1÷6,25	0,025÷0,1	0,0115÷0,0503	0,0005÷0,0028	0,0005÷0,0028						
тонкое	6÷20	0,16÷0,8	0,25÷1,25	0,008÷0,025	0,0064÷0,0221	0,0002÷0,0007	0,0002÷0,0006						
плосковершинное	10÷100	0,5÷10	1,6÷12,5	0,063÷1,25	0,0121÷0,1225	0,0006÷0,00664	0,0006÷0,0066						
Притирка													
обычная	4÷15	0,08÷0,1	0,05÷0,5	0,006÷0,04	0,0041÷0,0156	0,0001÷0,0003	0,0001÷0,0003						
плосковершинная	15÷60	0,4÷0,8	0,5÷4	0,032÷0,2	0,0159÷0,0648	0,0004÷0,0016	0,0004÷0,0016						

3. Данные для определения возможностей технологических методов обработки стали 08X18H10T в обеспечении параметров качества цилиндрических стыков соединения (внутренние тела вращения) и их герметичности

Методы обработки	Параметры качества поверхностного слоя				Составляющие для определения $Q_T$ по (4)			Составляющая, характеризующая эксплуатационные условия					
	$H_{max}$ , МКМ	$Wz$ , МКМ	$Rz$ , МКМ	$Sm$ , мм	$C$ , мм	$D$ , мм/МПа	$D'$ , мм/МПа	вода при 9,3 МПа	воздух при 9,3 МПа	воздух при 9,3 Па			
								$B_{ж}$ , с <sup>-1</sup>	$B_{г}$ , г/(с·мм <sup>3</sup> )	$B_{гн}$ , мм·МПа/с			
Растачивание													
чистовое	20÷80	2,5÷6,25	4÷10	0,08÷0,16	0,0265÷0,0963	0,0016÷0,0047	0,0016÷0,0048	1,0267	457,343	391,802			
тонкое	6÷40	0,5÷4	1÷4	0,02÷0,1	0,0075÷0,048	0,0004÷0,0024	0,0004÷0,0024						
Шлифование													
чистовое	10÷40	1,25÷6,25	1,6÷8	0,025÷0,1	0,0129÷0,0543	0,0007÷0,0035	0,0008÷0,0035						
тонкое	6÷20	0,32÷1,6	0,4÷1,6	0,008÷0,025	0,0103÷0,0232	0,0005÷0,001	0,0006÷0,001						
плосковер-шинное	15÷90	0,5÷10	1,6÷12,5	0,063÷1	0,0171÷0,1125	0,0006÷0,0062	0,0006÷0,0063						
Притирка													
обычная	2÷10	0,125÷0,63	0,1÷0,8	0,005÷0,04	0,0022÷0,0114	0,0001÷0,0005	0,0001÷0,0005						
плосковер-шинная	5÷50	0,4÷1,25	0,5÷4	0,032÷0,2	0,0059÷0,0553	0,0003÷0,0017	0,0003÷0,0018						

Для поверхностей, обрабатываемых обтачиванием или растачиванием при рассмотрении соединения наибольшее влияние на герметичность будет оказывать макроотклонение, образуемое в продольном направлении. Для лезвийной и абразивной обработок мак-

роотклонение определяется геометрической неточностью станка и жесткостью заготовки и инструмента, поэтому в этих случаях составляющими  $H_3$  и  $H_4$  можно пренебречь. При этом макроотклонения будут определяться:

$$H_{max} = \Delta \pm \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_o^y \cdot v^n}{E \cdot K \cdot J} K_{mp} \cdot K_{\phi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{\rho p} \cdot x^3, \quad (15)$$

где  $\Delta$  – биение оси шпинделя, мм;  $C_p$  – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала / материала режущей части инструмента / вида обработки;  $t$  – глубина резания, мм;  $S_o$  – подача, мм/об;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $x, y, n$  – показатели степени для конкретных условий обработки;  $K_{mp}$  – коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости;  $K_{\phi p}, K_{\gamma p}, K_{\lambda p}, K_{\rho p}$  – коэффициенты, учитывающие влияние геометрических параметров режущей части инструмента;  $E$  – модуль уп-

ругости обрабатываемого материала, МПа;  $K$  – коэффициент, учитывающий вид закрепления заготовки (при консольном закреплении заготовки в патроне  $K = 3$ , для закрепленной заготовки в центрах  $K = 48$ , для закрепления заготовки в патроне с поджатием задним центром  $K = 140$ );  $J$  – момент инерции сечения детали, мм<sup>4</sup>;  $x$  – расстояние от точки закрепления до точки обработки, мм.

Для торцового точения макроотклонение рассчитывается по формуле:

$$H_{max} = C \pm \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_o^y \cdot L_p^3}{3 \cdot E \cdot J} K_{mp} \cdot K_{\phi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{\rho p} \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{нар} \cdot n_{ш}}{1000} \right)^n - \left( \frac{\pi \cdot d_{отв} \cdot n_{ш}}{1000} \right)^n \right], \quad (16)$$

где  $C$  – неперпендикулярность оси шпинделя к направляющим станка, мм;  $d_{\text{нар}}$  – наружный диаметр заготовки, мм;  $d_{\text{отв}}$  – диаметр отверстия, мм;  $n_{\text{ш}}$  – частота вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $J$  – момент инерции сечения державки инструмента,  $\text{мм}^4$ ;  $L_p$  – вылет резца, мм.

Для поверхностей, обрабатываемых плоским шлифованием макроотклонение определяется из уравнения:

$$H_{\text{max}} = C_{\text{н}} \pm \frac{C_N \cdot t^x \cdot v_3^r \cdot B^z}{3 \cdot E \cdot J}, \quad (17)$$

где  $C_{\text{н}}$  – непараллельность оси шпинделя и направляющих стола, мм;  $B$  – ширина шлифования, мм;  $v_3$  – скорость движения заготовки, м/мин;  $C_N$  и  $x, z, r$  – поправочный коэффициент и показатели степени;  $J$  – момент инерции шлифовального круга,  $\text{мм}^4$ .

При шлифовании наружных и внутренних поверхностей тел вращения:

$$H_{\text{max}} = C_{\text{н}} \pm \frac{C_N \cdot t^x \cdot v_3^r \cdot S^y \cdot d^q}{3 \cdot E \cdot J}, \quad (18)$$

где  $C_{\text{н}}$  – биение оси шпинделя, мм;  $S$  – продольная подача, мм/об;  $d$  – диаметр шлифуемой детали, мм.

В общем случае образование волнистости при механических методах обработки определяется по формуле:

$$Wz = 1,2 \cdot \sqrt{H_{w1}^2 + H_{w2}^2 + H_{w3}^2}, \text{ мм} \quad (19)$$

где  $H_{w1}$  – составляющая волнистости от исходной волнистости обрабатываемой поверхности;  $H_{w2}$  – составляющая от биения заготовки и инструмента;  $H_{w3}$  – составляющая от геометрии инструмента и кинематики его перемещения (при лезвийной обработке учитывается в составляющих  $H_{w1}$  и  $H_{w2}$ ).

Волнистость при обтачивании и растачивании цилиндрических поверхностей деталей рассчитывается по формуле:

$$Wz = 1,2 \cdot \left[ \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot v^z \cdot [HB_{\text{max}}^n \cdot t^x - HB_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \right)^2 + \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot v^z \cdot [HB_{\text{max}}^n \cdot t^x - HB_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \cdot \left( 1 + \cos \left[ (m-1) - \frac{180}{m} \right] \right) \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (20)$$

где  $C_p, y, z, x, n$  – коэффициент и показатели степени, зависящие от марки обрабатываемого материала и вида обработки;  $HB_{\text{max}}, HB_{\text{min}}$  – максимальная и минимальная твердость обрабатываемого материала, МПа;  $Wz_{\text{исх}}$  – средняя высота волн исходной обрабатываемой поверхности, мм;  $Rz_{\text{исх}}$  – высота неровностей исходного профиля шероховатости, мм;  $j_{\text{тс}}$  – жесткость технологической системы, МПа/мм;  $m$  – знаменатель рациональной дроби.

Для торцового точения:

$$Wz = 1,2 \cdot \left[ \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot [HB_{\text{max}}^n \cdot t^x - HB_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \right)_{\times} \times \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z \right] \right]^2 + \left( \frac{C_p \cdot S_o^y \cdot [HB_{\text{max}}^n \cdot t^x - HB_{\text{min}}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x]}{j_{\text{тс}}} \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z - \left( \frac{\pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot n_{\text{ш}}}{1000} \right)^z \right] \right)_{\times} \times \left( 1 + \cos \left[ (m-1) - \frac{180}{m} \right] \right) \right]^{1/2}, \quad (21)$$

Для поверхностей, обрабатываемых шлифованием:

$$Wz = 1,2 \cdot \left[ \left( \frac{C_p \cdot S^y \cdot v^z \cdot [HB_{\text{max}}^n \cdot t^x - HB_{\text{min}}^n \cdot (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x] \cdot [E_2(1 - \mu_1^2) + E_1(1 - \mu_1^2)]}{\pi \cdot B \cdot E_1 \cdot E_2} \right)_{\times} \times \ln \frac{2\pi \cdot B \cdot E_1 \cdot E_2 (D_{\text{кр}} + d_3)}{C_p \cdot S^y \cdot v^z \cdot [HB_{\text{max}}^n \cdot t^x - HB_{\text{min}}^n \cdot (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x] \cdot [E_2(1 - \mu_1^2) + E_1(1 - \mu_1^2)]} \right) \right]^2 + \left( 1 + \cos \left[ (m-1) - \frac{180}{m} \right] \right) \right]^{1/2}, \quad (22)$$

$$+ \frac{C_p \cdot S^y \cdot v^z \cdot \left[ HB_{\max}^n \cdot t^x - HB_{\min}^n (t - Wz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх}})^x \right]^2}{J_{mc}} + \left( A_{кр} \left[ 1 - \cos \left( 13,2 \frac{v_D}{f_n} \sqrt{\frac{1}{A_{кр}} \left( \frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{d_3} \right)} \right) \right] \right)^2 \right)^{1/2}$$

где  $A_{кр}$  – амплитуда биения шпинделя станка;  $f_n$  – частота биения;  $E_1$  и  $E_2$  – модуль упругости обрабатываемой поверхности и шлифовального круга, МПа;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты Пуансона обрабатываемого материала и материала шлифовального круга;  $D_{кр}$ ,  $d_3$  – диаметр круга и заготовки, мм;  $S$  – продольная подача, мм/об.

В общем случае при всех механических методах обработки параметр шероховатости  $Rz$ , мкм, определяется из выражения [6]:

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \tag{23}$$

где  $h_1$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента;  $h_2$  – составляющая, обусловленная колебаниями инструмента;  $h_3$  – составляющая, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки;  $h_4$  – составляющая, обусловленная шероховатостью рабочей поверхности инструмента.

$$Rz = h_1 + \frac{C_y \cdot S^y \cdot v^z \cdot \left[ HB_{\max}^n \cdot t^x - HB_{\min}^n (t - Rz_{\text{исх}})^x \right]}{J_{тс}} + h_3 + Rz_{\text{вр}}, \tag{24}$$

где  $Rz_{\text{вр}}$  – средняя высота профиля шероховатости на вершине резца.

Составляющая  $h_1$  и  $h_3$  рассчитываются по формулам, приведенным в табл. 4.

#### 4. Формулы расчета составляющей $h_1$ и $h_3$

Условие	$h_1$	$h_3$
При $\varphi < \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}$ и $\varphi_1 < \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}$	$r \cdot (1 - \cos \varphi) + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot (S - r \cdot (\sin \varphi + \sin \varphi_1)) - r \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi) \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi}$	$\frac{b_{\text{сдв}}}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}}$
При $\varphi \geq \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}$ и $\varphi_1 \geq \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}$	$\frac{S^2}{8 \cdot r}$	$\frac{b_{\text{сдв}} \cdot (2 \cdot S + b_{\text{сдв}})}{32 \cdot r}$
При $\varphi \geq \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}$ и $\varphi_1 < \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}$	$r \cdot (1 - \cos \varphi) + \sin \varphi \cdot (S \cdot \cos \varphi_1 - \sqrt{S \cdot \sin \varphi_1 \cdot (2 \cdot r - S \cdot \sin \varphi_1)})$	$\frac{b_{\text{сдв}}}{\frac{2 \cdot r}{S} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}}$
При $\varphi < \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}$ и $\varphi_1 \geq \arcsin \frac{S}{2 \cdot r}$		$\frac{b_{\text{сдв}}}{\frac{2 \cdot r}{S} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi}}$

*Примечание.*  $r$  – радиус закругления вершины резца, мм;  $\varphi$  и  $\varphi_1$  – главный и вспомогательный углы в плане;  $b_{\text{сдв}}$  – величина отгеснения.

Общее уравнение взаимосвязи средней высоты профиля шероховатости поверхности с условиями её абразивной обработки:

$$Rz = \frac{\xi \left( N \frac{B}{S_{\text{пр}}} - 1 \right)}{10^3} \left\{ t - \frac{P}{j_{\text{ТС}}} - \frac{\frac{P}{S_{\text{пр}}} \left[ E_2 \cdot (1 - \mu_1^2) + E_2 \cdot (1 - \mu_2^2) \right]}{\pi \cdot E_1 \cdot E_2} \right\} \times$$

$$\times \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (D_{\text{кр}} + dz)}{\frac{P}{S_{\text{пр}}} \left[ E_2 \cdot (1 - \mu_1^2) + E_2 \cdot (1 - \mu_2^2) \right]} + \frac{\lambda^2 \cdot \left( 1 \pm \frac{v_D}{60 \cdot v_{\text{кр}}} \right)}{4 \cdot 10^3 \cdot D} \left. \right\} +$$

$$+ \frac{\left( 1 - \frac{\tau_{\text{сд}}}{\sqrt{\tau_{\text{сд}}^2 + \sigma_m^2}} \right) \cdot \left[ 2r \cdot \left( \frac{\tau_{\text{сд}}}{\sqrt{\tau_{\text{сд}}^2 + \sigma_m^2}} \right) \right]}{32}$$
(25)

где  $\xi$  – коэффициент, зависящий от концентрации абразивных зерен;  $N$  – число выхаживаний;  $P$  – нормальная составляющая сил резания, Н;  $\lambda$  – средний шаг между зернами инструмента, мм; «+» – для наружного шлифования; «-» – для внутреннего шлифования.

Подставляя соответствующие уравнения в полученные теоретические зависимости утечки (натекания) (1) – (3), получаем взаимосвязь герметичности с условиями обработки при различных технологических методах.

В ходе проведения экспериментов получили эмпирические зависимости параметров качества поверхностного слоя с условиями обработки. Эти зависимости предназначены для накопления базы данных существующих зависимостей и используются в расчетах герметичности от условий обработки, путём подстановки в полученные зависимости (1) и (2).

Для метода обработки: торцовое точение ( $S$  – подача на оборот (0,05...0,3 мм/об);  $v$  – скорость резания (100...150 м/мин);  $t$  – глубина резания (0,1...0,3 мм)).

$$Wz_{\text{ноп}} = 0,79 \frac{S^{0,22} \cdot v^{0,57}}{t^{0,002}}; \quad (26)$$

$$Rz_{\text{ноп}} = 2,92 S^{0,22} \cdot v^{0,09} \cdot t^{0,02}. \quad (27)$$

Для метода обработки: торцовое точение ( $S$  – подача на оборот (0,05...0,3 мм/об);

$v$  – скорость резания (100...150 м/мин);  $t$  – глубина резания (0,5...2 мм)).

$$Wz_{\text{ноп}} = 0,4 S^{0,59} \cdot v^{0,77} \cdot t^{0,01}; \quad (28)$$

$$Rz_{\text{ноп}} = 0,99 S^{0,39} \cdot v^{0,41} \cdot t^{0,05}. \quad (29)$$

Для метода обработки: растачивание ( $S$  – подача на оборот (0,05...0,1 мм/об);  $v$  – скорость резания (40...100 м/мин);  $t$  – глубина резания (0,05...0,1 мм)).

$$Wz_{\text{ноп}} = 29,78 \frac{S^{0,12} \cdot t^{0,07}}{v^{0,03}}; \quad (30)$$

$$Rz_{\text{ноп}} = 0,04 \frac{S^{0,31} \cdot v^{0,93}}{t^{0,02}}. \quad (31)$$

Для метода обработки – обтачивание: ( $S$  – подача на оборот (0,05...0,1 мм/об);  $v$  – скорость резания (40...100 м/мин);  $t$  – глубина резания (0,05...0,1 мм)).

$$Wz_{\text{ноп}} = 9,81 S^{0,12} \cdot v^{0,28} \cdot t^{0,02}; \quad (32)$$

$$Rz_{\text{пол}} = 0,84S^{0,60} \cdot v^{0,54} \cdot t^{0,13} \quad (33)$$

Таким образом, разработанные теоретические положения и методы оценки герметичности позволяют реализовать конструкторско-технологическую подготовку в различных типах и структурах организации производства с различными внешними и внутренними условиями решения задачи обеспечения герметичности. Полученные результаты позволяют снизить затраты на подготовку и производство изделий, а также повысить качество работы всего изделия, надежность, уменьшить риски аварий и загрязнения окружающей среды в случаях разгерметизации агрессивных сред.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Качество машин:** Справочник. В 2 т. Т. 1 / Под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 1995. – 253 с.
2. **Рыжов, Э.В., Сулов, А.Г., Федоров, В.П.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 173 с.
3. **Сулов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 203 с.
4. **Сулов, А.Г., Дальский, А.М.** Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

5. **Дальский, А.М., Сулов, А.Г., Назаров, Ю.Ф.** Технология изготовления деталей машин. Т. 3 / Под общ. ред. А.Г. Сулова. 2000. – 840 с.

6. **Сулов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 203 с.

7. **Сулов, А.Г.** Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений. – М.: Наука, 1977. – 100 с.

### REFERENCES

1. *Machine Quality: reference book. In 2 Vol. Vol.1 / Under the editorship of A.G. Suslov.* – М.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 253.

2. Ryzhov, E.V., Suslov, A.G., Fyodorov, V.P. *Technological Support of Machinery Operation Properties.* – М.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 173.

3. Suslov, A.G. *Technological Support of State Parameters of Parts Surface Layer.* – М.: mechanical Engineering, 1987. – pp. 203.

4. Suslov, A.G., Dalsky, A.M. *Scientific Fundamentals of Engineering Process.* – М.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 684.

5. Dalsky, A.M., Suslov, A.G., Nazarov, Yu.F. *Technology of Machinery Manufacturing. Vol.3 / under the general editorship of A.G. Suslov.* 2000. – pp. 840.

6. Suslov, A.G. *Technological Support of Parts Surface Layer State Parameters.* – М.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 203.

7. Suslov, A.G. *Technological Support of Joints Contact Stiffness.* – М.: Science, 1977. – pp. 100.

*Рецензент д.т.н.  
Виктор Петрович Тихомиров*

