



УДК 621.9

DOI:10.30987/2223-4608-2021-4-10-19

**А.Г. Суслов**, д.т.н.,

**В.А. Хандожко**, к.т.н.

(Брянский государственный технический университет, 241035, г. Брянск, ул. 50 лет Октября, 7)

E-mail: vichandozhko@gmail.com

## **Одноступенчатое технологическое обеспечение и повышение контактной жесткости деталей машин**

*Представлены теоретические и эмпирические зависимости контактной жесткости неподвижного стыка при первом и повторном нагружениях от режимов технологических методов обработки поверхностей стыка. Приводятся данные о возможностях технологических методов обработки в обеспечении и повышении контактной жесткости.*

**Ключевые слова:** технологическое обеспечение; контактная жесткость; технологические методы обработки.

**A.G. Suslov**, Dr. Sc. Tech.,

**V.A. Khandozhko**, Can. Sc. Tech.

(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

## **Single-stage technological support and machinery contact rigidity increase**

*Theoretical and empirical dependences of contact rigidity in a fixed joint at the first and repeated loadings upon engineering methods of a joint surface treatment are presented. There are shown data on potentialities of engineering methods of treatment in support and increase of contact rigidity.*

**Keywords:** technological support; contact rigidity; engineering methods of treatment.

Высокая производительность и точность работы технологического оборудования напрямую зависит от точности изготовления деталей машин, в том числе под действием нагрузки, когда возникают их объемные и контактные деформации. Способность деталей машин сопротивляться деформациям характеризуется их жесткостью. Если задача повышения объемной жесткости является исключительно конструкторской, то задача обеспечения контактной жесткости, обусловленной параметрами качества поверхностного слоя, является преимущественно технологической, так как формирование параметров качества поверхностного слоя происходит при механической обработке поверхностей деталей. Изменяя параметры качества поверхностного

слоя, можно обеспечить заданную контактную жесткость.

Известны теоретические зависимости контактной жесткости деталей от параметров качества поверхностного слоя (параметры шероховатости, волнистости и макроотклонений) и физико-механических свойств поверхности (предел текучести, поверхностная микротвердость, модуль Юнга и др.) [1]. В свою очередь параметры качества поверхностного слоя деталей машин зависят от режимов обработки технологическими методами: точением; фрезерованием; шлифованием; отделочно-упрочняющей обработкой поверхностным пластическим деформированием (ОУО ППД) и др.

Прогнозирование параметров качества поверхностного слоя от режимов обработки

(этап 1) и далее контактной жесткости от параметров качества поверхностного слоя (этап 2) является прямой задачей технолога. Такой подход известен как двухступенчатое решение задачи технологического обеспечения эксплуатационных свойств. Назначение режимов обработки, позволяющих получить заданную контактную жесткость с минимальной технологической себестоимостью, является обратной задачей технолога. Разные технологические методы обработки (например, чистовое точение и получистовое шлифование) позволяют получить одинаковые значения контактной жесткости.

Для решения обратной задачи технолога применяют методы нелинейной оптимизации, однако ее решение осложняется отсутствием теоретических зависимостей, связывающих контактную жесткость с режимами обработки. Прогнозирование контактной жесткости непосредственно от режимов обработки (прямая задача) и назначение режимов обработки для обеспечения заданной контактной жесткости (обратная задача) известны как одноступенчатое решение задачи технолога.

Теоретическая взаимосвязь контактной жесткости деталей непосредственно с условиями их обработки может быть получена на основе математического описания единой физической картины контактных деформаций как при обработке, так и при эксплуатации или методом подстановки теоретических взаимосвязей параметров качества поверхностного слоя деталей с условиями их обработки в теоретические уравнения контактной жесткости [1, 2].

Контактная жесткость определяется по формуле (1):

$$j = p/y, \quad (1)$$

где  $p$  – удельная нагрузка, приходящаяся на геометрическую площадь контакта, Мпа/мкм;

$y$  – контактные перемещения, мкм.

Контактные перемещения определяют по формуле (2):

$$y = y_{пл} + y_{упр}, \quad (2)$$

где  $y_{пл}$  – пластическая контактная деформация, мкм;  $y_{упр}$  – упругая контактная деформация, мкм.

При повторных нагружениях (начиная с шестой) контактная деформация носит упругий характер, то есть  $y = y_{упр}$ .

Зависимости контактных перемещений от параметров качества поверхностного слоя и физико-механических свойств имеют вид [1]:

$$y_{плi} = \pi \left( \frac{2 \pi P Ra_i Wz_i H \max_i}{A k'_i \sigma_{\pi i}} \right)^{1/3}; \quad (3)$$

$$y_{упi} = 2 \pi \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} k'_i \sigma_{\pi i} S m_i \frac{y_{плi}}{Ra_i}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) приняты следующие обозначения:  $i$  – индекс поверхности в стыке;  $P$  – сила, Н;  $Ra$  – среднеарифметическое отклонение профиля, мкм;  $Wz$  – высота волнистости, мкм;  $H \max$  – макроотклонение, мкм;  $A$  – геометрическая площадь контакта, мм;  $k'$  – коэффициент поверхностного упрочнения;  $\sigma_{\pi}$  – предел текучести материала, Мпа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга, Мпа;  $S m$  – средний шаг неровностей, мм.

Подставляя теоретические зависимости параметров качества поверхностного слоя деталей машин от условий их обработки в теоретические уравнения контактных перемещений [2], а затем полученные выражения – в зависимости (3), (4), получим общие теоретические уравнения зависимости контактной жесткости детали при первом  $j_1$  и повторном  $j_{повт}$  нагружении.

При точении цилиндрической поверхности контактная жесткость определяется по формулам:

$$j_1 = p / \sum_{i=1}^2 \pi \cdot \left[ \frac{0,48\pi P \left( \frac{S_i^{2,7}}{10} + C_{yi} S_i^{yp} v_i^{zp} \frac{HB_{\max i}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min i}^n \cdot (t_i - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \right) \cdot C_{yi} S_i^{yp} v_i^{zp}}{A \cdot H_{\mu 0i}} \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \frac{HB_{\max i}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min i}^n \cdot (t_i - Wz_{исxi} - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \cdot H_{\max i} \right]^{\frac{1}{3}} + \\ + 10\pi^2 \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} \cdot H_{\mu 0i} \cdot S_i \left[ \frac{0,48\pi P \left( \frac{S_i^{2,7}}{10} + C_{yi} S_i^{yp} v_i^{zp} \frac{HB_{\max i}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min i}^n \cdot (t_i - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \right) \cdot C_{yi} S_i^{yp} v_i^{zp}}{A \cdot H_{\mu 0i}} \rightarrow \right.$$

$$\rightarrow \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Wz_{исх} - Rz_{исх})^{xp}}{j_{ТС} \cdot HB_{ср}^n} \cdot H_{\max} \left. \right)^{\frac{1}{3}} \left/ \frac{S_i^{2,7}}{10} + C_{yi} S_i^{yp} v_i^{zp} \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Rz_{исх})^{xp}}{j_{ТС} \cdot HB_{ср}^n} \right. \quad (5)$$

$$j_{повт} = p \left/ \sum_{i=1}^2 \pi \cdot \left[ \frac{0,48\pi P \left( \frac{S_i^{2,7}}{10} + C_{yi} S_i^{yp} v_i^{zp} \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Rz_{исх})^{xp}}{j_{ТС} \cdot HB_{ср}^n} \right) \cdot C_{yi} S_i^{yp} v_i^{zp}}{A \cdot H_{\mu 0i}} \right] \right. \rightarrow$$

$$\left. \rightarrow \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Wz_{исх} - Rz_{исх})^{xp}}{j_{ТС} \cdot HB_{ср}^n} \cdot H_{\max} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

где  $S$  – подача, мм/об;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $t$  – глубина резания, мкм;  $j_{ТС}$  – жесткость технологической системы, Н/мм;  $HB_{\min}$  – минимальная твердость обрабатываемого материала;  $HB_{\max}$  – максимальная твердость обрабатываемого материала;  $HB_{ср}$  – средняя твердость обрабатываемого материала;  $H_{\mu 0}$  – микротвердость;  $Wz_{исх}$  и  $Rz_{исх}$  – средняя высота исходной волнистости

и шероховатости, мкм.

Теоретические исследования показывают, что контактная жесткость цилиндрических соединений в значительной мере будет зависеть от номинального диаметра и зазора, которые формируют номинальную площадь контакта.

При торцевом точении контактная жесткость определяется по формулам:

$$j_1 = \frac{P}{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left[ 1,2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{инстр} / 5) \cdot C_i \cdot \left( \frac{S_i}{10^3} \right)^y v_i^n \cdot \left( \left( \frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left( \frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх} - Wz_{исх} \right)^x \right) \cdot H_{\max_i}} \right]^{1/3}} + \rightarrow$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \left[ \frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left[ 1,2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{инстр} / 5) \cdot C_i \cdot \left( \frac{S_i}{10^3} \right)^y v_i^n \cdot \left( \left( \frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left( \frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх} - Wz_{исх} \right)^x \right) \cdot H_{\max_i}} \right]^{1/3}}{G_i + Rz_{инстр} / 5} \right] \quad (7)$$

$$j_{повт} = \frac{P}{\sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \left[ \frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left[ 1,2 \cdot (G_i + Rz_{инстр} / 5) \cdot C_i \cdot \left( \frac{S_i}{10^3} \right)^y v_i^n \cdot \left( \left( \frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left( \frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх} - Wz_{исх} \right)^x \right) \cdot H_{\max_i} \cdot H_{\mu 0i}^{-1} \right]^{1/3}}{G_i + Rz_{инстр} / 5} \right]} \quad (8)$$

коэффициенты  $B$ ,  $C_i$  и  $G_i$  определяются по формулам (9) – (11) соответственно:

$$B = \frac{\pi(2\pi P)^{\frac{1}{3}}}{A} \quad (9)$$

$$C_i = \frac{10C_{pi} K_{Mpi} K_{\Phi pi} K_{\gamma pi} K_{\lambda pi} K_{rpi}}{j_{ТСi}} \quad (10)$$

$$G_i = \begin{cases} \left( \frac{r_i(1 - \cos\varphi_i)}{\cos\gamma_i} + \frac{\operatorname{tg}\varphi_i \operatorname{tg}\varphi_{i1} [S_i - r_i(\sin\varphi_i + \sin\varphi_{i1})] - r_i \operatorname{tg}\varphi_i (\cos\varphi_{i1} - \cos\varphi_i)}{\cos\gamma_i (\operatorname{tg}\varphi_{i1} + \operatorname{tg}\varphi_i)} + \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow 10^3 \cdot C_i \cdot \left( \left( \frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left( \frac{t_i}{10^3} - Rz_{\text{исх}i} \right)^x \right) + \frac{F_i}{\operatorname{ctg}\varphi_i + \operatorname{ctg}\varphi_{i1}} \right) / 5, \\ \text{где } \varphi_i < \arcsin(S_i/2r_i) \text{ и } \varphi_{i1} < \arcsin(S_i/2r_i) \\ \left( \frac{r_i}{\cos\gamma_i} - \frac{\sqrt{4r_i^2 - S_i^2}}{2\cos\gamma_i} + \frac{F_i(2S_i + F_i)}{32r_i} + 10^3 \cdot C_i \cdot \left( \left( \frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left( \frac{t_i}{10^3} - Rz_{\text{исх}i} \right)^x \right) \right) / 5, \\ \text{где } \varphi_{i1} \geq \arcsin(S_i/2r_i) \text{ и } \varphi_i \geq \arcsin(S_i/2r_i) \\ \left( \frac{r_i(1 - \cos\varphi_{i1}) + \sin\varphi_{i1} [S_i \cos\varphi_{i1} - \sqrt{S_i \sin\varphi_{i1} (2r_i - S_i \sin\varphi_{i1})}]}{\cos\gamma_i} + \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow 10^3 \cdot C_i \cdot \left( \left( \frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left( \frac{t_i}{10^3} - Rz_{\text{исх}i} \right)^x \right) + \frac{F_i}{\operatorname{ctg}\varphi_{i1} + \frac{2r_i}{S_i}} \right) / 5, \\ \text{где } \varphi_{i1} \geq \arcsin(S_i/2r_i) \text{ и } \varphi_i \geq \arcsin(S_i/2r_i), \end{cases} \quad (11)$$

где коэффициент  $F_i$  определяет формуле:

$$F_i = 0,5\rho_i \left( 1 - \frac{2\tau_{oi}}{\sigma_{\tau i}} \right). \quad (12)$$

В формулах (7) – (12) приняты следующие обозначения:  $Rz_{\text{инстр}}$  – высота неровностей профиля по десяти точкам режущего инструмента, мкм;  $C_p, K_{MP}, K_{\varphi P}, K_{\gamma P}, K_{\lambda P}, K_{rP}, x, y$  – эмпирические коэффициенты в формуле для определения силы резания;  $t$  – глубина резания, мкм;  $\varphi$  – главный угол в плане режущего

инструмента;  $\varphi_1$  – вспомогательный угол в плане режущего инструмента;  $\rho$  – радиус кромки режущего инструмента, мкм;  $\tau_o$  – предел прочности материала на срез, МПа.

Анализ полученной зависимости показывает, что основное влияние на контактную жесткость при торцовом точении оказывают подача, скорость резания и глубина резания.

При торцовом фрезеровании контактная жесткость определяется по формулам:

$$j_i = \frac{p}{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left( 1,2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{\text{инстр}}/5) \cdot C_i \cdot \left( \frac{S_{zi}}{10^3} \right)^y \left( \frac{\pi}{1000v_i} \right)^w \cdot \left( \left( \frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left( \frac{t_i}{10^3} - Rz_{\text{исх}i} - Wz_{\text{исх}i} - \delta_i \right)^x \right) \cdot H\max_i}{H_{\mu 0i}} \right)^{1/3}} + \rightarrow \quad (13)$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \frac{\left( \sum_{i=1}^2 B \cdot \left( 1,2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{\text{инстр}}/5) \cdot C_i \cdot \left( \frac{S_{zi}}{10^3} \right)^y \left( \frac{\pi}{1000v_i} \right)^w \cdot \left( \left( \frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left( \frac{t_i}{10^3} - Rz_{\text{исх}i} - Wz_{\text{исх}i} - \delta_i \right)^x \right) \cdot H\max_i \right)^{1/3}}{G_i + Rz_{\text{инстр}}/5} \right)^2$$

$$j_{\text{повт}} = \frac{p}{\sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left( 1,2 \cdot (G_i + Rz_{\text{инстр}}/5) \cdot C_i \cdot \left( \frac{S_{zi}}{10^3} \right)^y v_i^n \cdot \left( \left( \frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left( \frac{t_i}{10^3} - Rz_{\text{исх}i} - Wz_{\text{исх}i} \right)^x \right) \cdot H\max_i \cdot H_{\mu 0i}^{-1}}{G_i + Rz_{\text{инстр}}/5} \right)^{1/3}} \quad (14)$$

В формулах (13) и (14) приняты следующие обозначения:  $Sz$  – подача на зуб, мм/зуб;  $C$ ,  $x$ ,  $y$  – эмпирические коэффициенты в формуле

для определения силы резания;  $\delta$  – биение зубьев фрезы.

При плоском шлифовании контактная жесткость определяется по формулам:

$$j_1 = \frac{p}{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left( \frac{0,5(-u + [u^2 + 2k_m k_{s1} R \max_n^2 (0,5k_{s2} + u/t_\phi)]^2) \left(\frac{L^*}{\text{Ч}_B}\right)^2}{4D_K \cdot k_{s1}} \cdot (Y_{0\max} e^{-k_{\min}} - Y_{0\min} e^{-k_{\max}}) \right)^{1/3} H_{\mu 0i}} + \rightarrow$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \left( \frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left( \frac{0,5(-u + [u^2 + 2k_m k_{s1} R \max_n^2 (0,5k_{s2} + u/t_\phi)]^2) \left(\frac{L^*}{\text{Ч}_B}\right)^2}{4D_K \cdot k_{s1}} \cdot (Y_{0\max} e^{-k_{\min}} - Y_{0\min} e^{-k_{\max}}) \right)^{1/3}}{0,15(-u + [u^2 + 2k_m k_{s1} R \max_n^2 (0,5k_{s2} + u/t_\phi)]^2)} \right)^{1/3} \quad (15)$$

$$j_{\text{новт}} = \frac{p}{\sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \left( \frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left( \frac{0,15(-u + [u^2 + 2k_m k_{s1} R \max_n^2 (0,5k_{s2} + u/t_\phi)]^2) \left(\frac{L^*}{\text{Ч}_B}\right)^2}{4D_K \cdot k_{s1}} \cdot (Y_{0\max} e^{-k_{\min}} - Y_{0\min} e^{-k_{\max}}) \cdot H_{\mu 0i}^{-1}} \right)^{1/3}}{0,15(-u + [u^2 + 2k_m k_{s1} R \max_n^2 (0,5k_{s2} + u/t_\phi)]^2)} \right)^{1/3}} \quad (16)$$

В формулах (15) и (16) приняты следующие обозначения [4]:  $u$  – линейный износ круга, мкм;  $k_m$ ,  $k_{s1}$ ,  $k_{s2}$ ,  $k_{\min}$ ,  $k_{\max}$  – эмпирические коэффициенты;  $R_{\max}$  – наибольшая высота профиля шероховатости;  $t_\phi$  – глубина шлифования, мм;  $L^*$  – длина шлифования, мм;  $D_K$  – диаметр круга, мм;  $\text{Ч}_B$  – число волн за время контакта шлифовального круга с заготовкой;  $Y_{0\max}$ ,  $Y_{0\min}$  – максимальный и мини-

мальный натяги в технологической системе соответственно.

Анализ полученных зависимостей показывает, что контактная жесткость плоских поверхностей при шлифовании в основном зависит от зернистости, скорости заготовки, поперечной подачи, числа выхаживаний.

При отделочно-упрочняющей обработке контактная жесткость определяется по формулам:

$$j_1 = \frac{p}{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left( 0,3 \cdot \frac{10^3 S_i^2}{8R_i} + Rz_{\text{исх}i} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{a_{\text{нш}i}^2 \cdot (1 + f_i^2)^{0,5}}{R_i} - \frac{11P_i}{16E_i \cdot a_{\text{нш}i}} \right) \cdot Rp_{\text{исх}i}}{tm_{\text{исх}i}} \right]^{\frac{1}{v_{\text{исх}i} + 1}} - \frac{11P_i}{32E_i \cdot a_{\text{нш}i}} \right) \times \rightarrow$$

$$\begin{aligned} & \times \sqrt{\left( Wz_{исхi} - 2 \left( \frac{9P_i R a_{исхi}^2}{\pi R_i H B_{исхi}} \right)^{1/4} \right)^2 + \left( 1,4(1+f_i^2) \Delta_p^{0,5} \left[ \frac{4j_{ТСi}}{\pi R_i H B_{исхi} (h_{кинi} + h_{упри})} \right]^{0,5} \right)^2 + \left( h_{кинi} - 2 \left[ 1 - \frac{f_i \left( \sqrt{\frac{h_{кинi}}{2}} + 1 \right)}{\sqrt{\left( \frac{h_{кинi}}{8r_i} + 1 \right) (1+f_i^2)}} \right] \cdot \frac{H \max_i}{H_{\mu 0i}} \right)^2} + \rightarrow \\ & \rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1-\mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \sum_{i=1}^2 B \cdot \left( 0,3 \cdot \left[ \frac{10^3 S_i^2}{8R_i} + Rz_{исхi} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left\{ \frac{\left( \frac{a_{плi}^2 \cdot (1+f_i^2)^{0,5}}{R_i} - \frac{11P_i}{16E_i \cdot a_{плi}} \right) \cdot Rp_{исхi}}{tm_{исхi}} \right\}^{\frac{1}{v_{исхi}+1}} - \frac{11P_i}{32E_i \cdot a_{плi}} \right] \right) \times \rightarrow \\ & \sqrt{\left( Wz_{исхi} - 2 \left( \frac{9P_i R a_{исхi}^2}{\pi R_i H B_{исхi}} \right)^{1/4} \right)^2 + \left( 1,4(1+f_i^2) \Delta_p^{0,5} \left[ \frac{4j_{ТСi}}{\pi R_i H B_{исхi} (h_{кинi} + h_{упри})} \right]^{0,5} \right)^2 + \left( h_{кинi} - 2 \left[ 1 - \frac{f_i \left( \sqrt{\frac{h_{кинi}}{2}} + 1 \right)}{\sqrt{\left( \frac{h_{кинi}}{8r_i} + 1 \right) (1+f_i^2)}} \right] \cdot \frac{H \max_i}{H_{\mu 0i}} \right)^2} \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \left( 0,25 \cdot \left[ \frac{10^3 S_i^2}{8R_i} + Rz_{исхi} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left\{ \frac{\left( \frac{a_{плi}^2 \cdot (1+f_i^2)^{0,5}}{R_i} - \frac{11P_i}{16E_i \cdot a_{плi}} \right) \cdot Rp_{исхi}}{tm_{исхi}} \right\}^{\frac{1}{v_{исхi}+1}} - \frac{11P_i}{32E_i \cdot a_{плi}} \right] \right) \\ & j_{повт} = p / \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1-\mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \sum_{i=1}^2 B \cdot \left( 0,3 \cdot \left[ \frac{10^3 S_i^2}{8R_i} + Rz_{исхi} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left\{ \frac{\left( \frac{a_{плi}^2 \cdot (1+f_i^2)^{0,5}}{R_i} - \frac{11P_i}{16E_i \cdot a_{плi}} \right) \cdot Rp_{исхi}}{tm_{исхi}} \right\}^{\frac{1}{v_{исхi}+1}} - \frac{11P_i}{32E_i \cdot a_{плi}} \right] \right) \times \rightarrow \\ & \sqrt{\left( Wz_{исхi} - 2 \left( \frac{9P_i R a_{исхi}^2}{\pi R_i H B_{исхi}} \right)^{1/4} \right)^2 + \left( 1,4(1+f_i^2) \Delta_p^{0,5} \left[ \frac{4j_{ТСi}}{\pi R_i H B_{исхi} (h_{кинi} + h_{упри})} \right]^{0,5} \right)^2 + \left( h_{кинi} - 2 \left[ 1 - \frac{f_i \left( \sqrt{\frac{h_{кинi}}{2}} + 1 \right)}{\sqrt{\left( \frac{h_{кинi}}{8r_i} + 1 \right) (1+f_i^2)}} \right] \cdot \frac{H \max_i}{H_{\mu 0i}} \right)^2} \quad (18) \end{aligned}$$

В формулах (17) и (18) приняты следующие обозначения [2]:  $a_{пл}$  – радиус отпечатка после снятия нагрузки, мм;  $f$  – коэффициент трения;  $R$  – радиус ролика, мм;  $Rp$  – высота выступов профиля, мкм;  $tm$  – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии;  $h_{кин}$  – уменьшение размера детали при перемещении инструмента вдоль обрабатываемой поверхности, мкм;  $h_{упр}$  – упругая составляющая уменьшения размера детали при перемещении инструмента вдоль обрабатываемой поверхности, мкм;  $\Delta_p$  – биение поверхности ролика.

Анализ полученных зависимостей показывает, что контактная жесткость плоских по

верхностей в данном случае зависит от подачи при предварительном фрезеровании, усилия и подаче при ОУО ППД.

Проведенные экспериментальные нормализованные исследования контактной жесткости цилиндрических поверхностей позволили установить возможность различных технологических методов обработки по обеспечению непосредственно значений контактной жесткости как при первом, так и при повторных нагрузках (табл. 1).

Эмпирические уравнения взаимосвязи контактной жесткости цилиндрических поверхностей с условиями их обработки имеют следующий вид:

для точения и растачивания:

$$j = k_0 \frac{v^{k_1} \cdot HB^{k_3}}{S^{k_2}}; \quad (19)$$

для круглого и внутреннего шлифования:

$$j = k_0 \frac{HB^{k_3}}{S^{k_1} \cdot z^{k_2}}, \quad (20)$$

где  $v$  – скорость резания – 40...200 м/мин; HB – твердость материала по Бринеллю –

105...290;  $S$  – продольная подача: для точения и растачивания – 0,1...0,4 мм/об, для круглого и внутреннего шлифования в долях ширины круга – (0,2...0,5)  $B$ ;  $z$  – зернистость шлифовального круга – 10...100.

Значения коэффициентов  $k_0, k_1, k_2, k_3$  уравнений (19) и (20) для различных методов обработки и вида контроля контактной жесткости приведены в табл. 2.

**1. Возможности методов механической обработки в обеспечении нормализованных значений контактной жесткости деталей**

Методы обработки	Контактная жесткость поверхности, МПа/мкм			
	с учетом только шероховатости		с учетом шероховатости и волнистости	
	$j_1$	$j_{повг}$	$j_1$	$j_{повг}$
<b>Наружные поверхности вращения</b>				
Точение:				
- черновое	0,24...19,74	0,43...41,10	0,15...11,60	0,38...27,63
- получистовое	1,79...35,38	4,98...63,18	0,67...27,93	1,50...54,42
- чистовое	4,41...41,60	17,18...78,51	1,72...32,76	9,01...58,98
Круглое шлифование:				
- черновое	17,35...51,91	42,35...103,55	13,32...45,35	33,78...89,79
- получистовое	22,40...57,37	59,73...122,91	17,15...48,73	45,63...100,34
- чистовое	33,73...65,89	78,08...137,94	24,35...58,94	63,18...125,74
<b>Внутренние поверхности вращения</b>				
Растачивание:				
- черновое	0,11...12,97	0,27...29,43	0,05...9,94	0,17...22,79
- получистовое	1,58...43,78	4,97...81,92	0,79...33,49	1,91...65,91
- чистовое	5,09...51,04	19,06...101,72	4,10...38,96	13,25...83,85
Внутреннее шлифование:				
- черновое	18,17...50,29	45,19...103,89	14,21...44,73	37,72...89,11
- получистовое	26,94...53,74	65,50...116,34	19,17...45,78	41,42...97,52
- чистовое	35,93...61,67	76,01...129,25	28,45...56,76	70,52...116,16

Эксперименты показали, что, если зазор в соединении при первом нагружении оказывает влияние на контактную жесткость, то при повторных нагрузках он практически не влияет на контактную жесткость соединения.

Нормализованные экспериментальные исследования контактной жесткости плоских поверхностей позволили установить возможности торцевого фрезерования и плоского шлифования в обеспечении контактной жесткости как при первом, так и при повторных нагрузках (табл. 3).

Эмпирические уравнения взаимосвязи контактной жесткости плоских поверхностей с условиями их обработки имеют следующий вид:

для торцевого фрезерования:

$$j = k_0 \frac{v^{k_1} \cdot HB^{k_3}}{Sz^{k_2}}, \quad (21)$$

где  $v$  – скорость резания – 40...120 м/мин; HB – твердость материала по Бринеллю –

105...290;  $Sz$  – подача на зуб – 0,02...0,1 мм/зуб;

для плоского шлифования:

$$j = k_0 \frac{HB^{k_3}}{S^{k_1} \cdot z^{k_2}}, \quad (22)$$

где HB – твердость материала по Бринеллю – 105...290;  $S$  – подача – (0,2...0,5)  $B$ ;  $z$  – зернистость круга – 10...100.

Значения коэффициентов  $k_0, k_1, k_2, k_3$  уравнений (21) и (22) для различных методов и видов нормализованного измерения контактной жесткости приведены в табл. 4.

Полученные результаты показывают, что механические методы обработки обладают широкими возможностями в изменении контактной жесткости рабочих поверхностей деталей машин.

При лезвийной обработке основное влияние на контактную жесткость оказывает подача, при абразивной – зернистость шлифовального круга.

2. Значения коэффициентов  $k_0, k_1, k_2, k_3$  в зависимости от методов обработки и вида контроля контактной жесткости

Методы обработки	С учетом только шероховатости				С учетом шероховатости и волнистости			
	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Наружные поверхности вращения								
Гочение:	$\frac{7,04 \cdot 10^{-7}}{1,21 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,47}{0,66}$	$\frac{1,8}{1,76}$	$\frac{2,73}{2,63}$	$\frac{3,68 \cdot 10^{-7}}{1,47 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,66}{0,6}$	$\frac{1,77}{2,13}$	$\frac{2,6}{2,57}$
- черновое								
- получистовое	$\frac{2,85 \cdot 10^{-5}}{1,27 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0,38}{0,32}$	$\frac{0,7}{0,84}$	$\frac{2,04}{1,54}$	$\frac{1,79 \cdot 10^{-6}}{1,3 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{0,56}{0,58}$	$\frac{1,13}{1,15}$	$\frac{2,28}{2,05}$
- чистовое	$\frac{0,004}{0,35}$	$\frac{0,29}{0,21}$	$\frac{0,47}{0,33}$	$\frac{1,2}{0,82}$	$\frac{3,95 \cdot 10^{-4}}{0,01}$	$\frac{0,34}{0,39}$	$\frac{0,52}{0,31}$	$\frac{1,45}{1,02}$
Круглое шлифование:	$\frac{2,57}{7,14}$	$\frac{0,44}{0,39}$	$\frac{0,27}{0,21}$	$\frac{0,65}{0,56}$	$\frac{0,88}{4,52}$	$\frac{0,38}{0,29}$	$\frac{0,22}{0,19}$	$\frac{0,79}{0,61}$
- черновое								
- получистовое	$\frac{30,85}{110,7}$	$\frac{0,27}{0,22}$	$\frac{0,63}{0,6}$	$\frac{0,41}{0,31}$	$\frac{28,99}{51,58}$	$\frac{0,32}{0,18}$	$\frac{0,77}{0,57}$	$\frac{0,49}{0,41}$
- чистовое	$\frac{11,39}{23,73}$	$\frac{0,18}{0,13}$	$\frac{0,24}{0,17}$	$\frac{0,37}{0,35}$	$\frac{7,18}{18,39}$	$\frac{0,36}{0,27}$	$\frac{0,32}{0,19}$	$\frac{0,41}{0,34}$
Внутренние поверхности вращения								
Растачивание:	$\frac{4,41 \cdot 10^{-7}}{1,3 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,56}{0,67}$	$\frac{1,88}{1,9}$	$\frac{2,69}{2,56}$	$\frac{4,03 \cdot 10^{-8}}{2,09 \cdot 10^{-7}}$	$\frac{0,65}{0,51}$	$\frac{2,39}{2,34}$	$\frac{3,01}{2,98}$
- черновое								
- получистовое	$\frac{1,69 \cdot 10^{-5}}{1,04 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0,4}{0,36}$	$\frac{0,87}{0,92}$	$\frac{2,13}{1,54}$	$\frac{1,79 \cdot 10^{-6}}{9,33 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,44}{0,72}$	$\frac{0,96}{0,96}$	$\frac{2,43}{2,03}$
- чистовое	$\frac{0,003}{0,12}$	$\frac{0,11}{0}$	$\frac{0,46}{0,36}$	$\frac{1,43}{1,04}$	$\frac{9,16 \cdot 10^{-4}}{12,64 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0,15}{0,08}$	$\frac{0,42}{0,33}$	$\frac{1,6}{1,35}$
Внутреннее шлифование:	$\frac{2,69}{7,59}$	$\frac{0,38}{0,29}$	$\frac{0,24}{0,2}$	$\frac{0,63}{0,55}$	$\frac{1,02}{5,02}$	$\frac{0,47}{0,32}$	$\frac{0,21}{0,15}$	$\frac{0,75}{0,57}$
- черновое								
- получистовое	$\frac{28,95}{72,7}$	$\frac{0,12}{0,16}$	$\frac{0,47}{0,4}$	$\frac{0,36}{0,27}$	$\frac{15,48}{45,86}$	$\frac{0,3}{0,28}$	$\frac{0,51}{0,51}$	$\frac{0,43}{0,38}$
- чистовое	$\frac{7,5}{16,1}$	$\frac{0,13}{0,08}$	$\frac{0,11}{0,1}$	$\frac{0,38}{0,39}$	$\frac{5,85}{25,25}$	$\frac{0,22}{0,18}$	$\frac{0,17}{0,13}$	$\frac{0,41}{0,27}$

*Примечание.* В числителе содержатся значения коэффициентов для расчета контактной жесткости при первом на-гружении, в знаменателе – при повторном.

3. Возможности методов механической обработки в обеспечении нормализованных значений контактной жесткости детали

Методы обработки	Контактная жесткость поверхности, МПа/мкм			
	с учетом только шероховатости		с учетом шероховатости и волнистости	
	$j_1$	$j_{повт}$	$j_1$	$j_{повт}$
Торцевое фрезерование:				
- черновое	0,16...14,1	0,32...33,2	0,11...10,2	0,25...24,3
- получистовое	1,62...38,2	4,96...62,3	0,73...30,5	1,65...60,2
- чистовое	4,85...46,6	18,2...72,3	2,85...39,6	12,5...71,6
Плоское шлифование:				
- черновое	4,2...40,5	16,5...72,6	2,5...34,2	8,2...60,3
- получистовое	18,2...52,4	31,2...80,0	10,2...42,4	26,6...70,1
- чистовое	28,8...59,2	58,8...83,4	20,5...52,8	48,2...76,2

4. Значения коэффициентов  $k_0, k_1, k_2, k_3$  в зависимости от методов обработки и метода контроля контактной жесткости

Методы обработки	с учетом только шероховатости				с учетом шероховатости и волнистости				
	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	
Торцевое фрезерование:									
	- черновое	$\frac{8,1 \cdot 10^{-7}}{1,5 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,45}{0,68}$	$\frac{1,7}{1,6}$	$\frac{2,75}{2,65}$	$\frac{4,1 \cdot 10^{-7}}{1,8 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,65}{0,62}$	$\frac{1,75}{2,1}$	$\frac{2,65}{2,60}$
	- получистовое	$\frac{3,2 \cdot 10^{-5}}{1,6 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0,35}{0,30}$	$\frac{0,75}{0,85}$	$\frac{2,1}{1,6}$	$\frac{1,85 \cdot 10^{-6}}{1,4 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{0,54}{0,56}$	$\frac{1,14}{1,17}$	$\frac{2,31}{2,1}$
- чистовое	$\frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,42}$	$\frac{0,26}{0,19}$	$\frac{0,44}{0,36}$	$\frac{1,1}{0,75}$	$\frac{4,2 \cdot 10^{-4}}{12 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0,32}{0,35}$	$\frac{0,50}{0,29}$	$\frac{2,65}{0,95}$	
Плоское шлифование:									
	- черновое	$\frac{1,1}{3,6}$	$\frac{0,35}{0,28}$	$\frac{0,26}{0,20}$	$\frac{0,60}{0,32}$	$\frac{0,72}{2,2}$	$\frac{0,32}{0,26}$	$\frac{0,20}{0,18}$	$\frac{2,75}{0,58}$
	- получистовое	$\frac{11,6}{20,7}$	$\frac{0,28}{0,25}$	$\frac{0,64}{0,6}$	$\frac{0,45}{0,40}$	$\frac{9,5}{17,6}$	$\frac{0,30}{0,20}$	$\frac{0,75}{0,60}$	$\frac{0,50}{0,40}$
- чистовое	$\frac{20,8}{80,6}$	$\frac{0,25}{0,20}$	$\frac{0,50}{0,42}$	$\frac{0,40}{0,38}$	$\frac{16,5}{52,8}$	$\frac{0,35}{0,28}$	$\frac{0,30}{0,22}$	$\frac{0,42}{0,36}$	

*Примечание.* В числителе приводятся значения коэффициентов для расчета контактной жесткости при первом погружении, в знаменателе – при повторном.

Анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований контактной жесткости показывает на широкие возможности ее технологического повышения. Так как значение коэффициента средней контактной жесткости зависит от поверхностной твердости и несущей способности шероховатости, то для его повышения с успехом могут быть использованы методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием (ОУО ППД), особенно это относится для первичных нагружений.

При ОУО ППД на различных режимах наружных цилиндрических поверхностей образцов, изготовленных из различных конструкционных сталей, коэффициент средней контактной жесткости имеет следующий диапазон значений (табл. 5).

5. Возможности обкатывания и алмазного выглаживания для повышения контактной жесткости наружных цилиндрических поверхностей

Метод ОУО ППД	Диапазон значений $j_{cp}$ , МПа/мкм	
	при первом нагружении	при повторных нагрузках
Обкатывание	7,2...160	15,1...160,2
Алмазное выглаживание	24,9...150,2	31,2...185,6

Эмпирические уравнения взаимосвязи коэффициента средней контактной жесткости

наружных цилиндрических поверхностей с условиями их ОУО ППД имеют следующий вид.

*Обкатывание:*

– при первичном нагружении:  

$$j_1 = 0,003 \cdot v^{0,24} \cdot p^{0,18} \cdot HB^{1,52/S^{0,51}} \cdot S_0^{0,26}; \quad (23)$$

– при повторных нагрузках:  

$$j_{повт} = 0,003 \cdot v^{0,3} \cdot p^{0,14} \cdot HB^{1,52/S^{0,42}} \cdot S_0^{0,38}. \quad (24)$$

*Алмазное выглаживание:*

– при первичном нагружении:  

$$j_1 = 0,0045 \cdot v^{0,33} \cdot S_B^{0,25} \cdot p^{0,12} \cdot HB^{1,17/S^{0,82}}; \quad (25)$$

– при повторных нагрузках:  

$$j_{повт} = 0,0036 \cdot v^{0,36} \cdot S_B^{0,21} \cdot p^{0,1} \cdot HB^{1,22/S^{0,73}}. \quad (26)$$

где  $v$  – скорость резания при чистовом точении перед ОУО ППД – 100...250 м/мин;  $S$  – подача при точении – 0,07...0,12 мм/об;  $p$  – давление при ОУО ППД – 200...620 МПа;  $S_0$  и  $S_B$  – подача при обкатывании и выглаживании – 0,05...0,1 мм/об.

Аналогичные результаты получены и при ОУО ППД плоских поверхностей (табл. 6)

6. Возможности накатывания и вибронакатывания для повышения контактной жесткости плоских поверхностей

Метод ОУО ППД	Диапазон значений $j_{cp}$ , МПа/мкм	
	при первом нагружении	при повторных нагрузках
Накатывание торцевой многошариковой головкой	4,9...30,6	10,0...36,7
Вибронакатывание	14,8...66,3	24,1...84,0

Эмпирические уравнения взаимосвязи коэффициента средней контактной жесткости плоских поверхностей при повторных нагрузках с условиями их ОУО ППД имеют вид:

– накатывание деталей из чугуна СЧ21:

$$j_{cp} = 5,12p^{0,51} \cdot v^{0,06} \cdot n^{0,1} / Ra_{исх}^{0,4} \cdot S_{пр}^{0,05}, \quad (27)$$

– вибронакатывание деталей из стали 40X (HRC 30):

$$j_{cp} = 392,7p^{0,22} \cdot n^{0,15} / Ra_{исх}^{0,24} \cdot S_{пр}^{0,23}. \quad (28)$$

где  $p$  – давление при ОУО ППД – 200...700 МПа;  $v$  – скорость накатывания – 14...70 м/мин;  $n$  – число рабочих ходов – 1...3;  $S_{пр}$  – продольная подача – 13...160 мм/мин;  $Ra_{исх}$  – исходное среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости обрабатываемой поверхности – 0,44...2,25 мкм.

Результаты исследований убедительно показывают, что повышение контактной жесткости возможно как за счет оптимизации режимов ОУО ППД, так и за счет учета явления технологической наследственности.

Оптимальными режимами накатывания плоских поверхностей деталей из чугуна СЧ21 с  $Ra_{исх} = 1,25...2,5$  мкм являются:  $p = 240$  МПа;  $S_{пр} = 160$  мм/мин;  $v = 35$  м/мин;  $n = 1$ . Обработка на этих режимах позволяет с достаточно высокой производительностью получать значения коэффициентов средней контактной жесткости:  $j_1 = 30,6$  МПа/мкм;  $j_{повт} = 36,7$  МПа/мкм.

Оптимальными режимами вибронакатывания плоских поверхностей деталей из стали 40X (HRC 30) с  $Ra_{исх} = 1,25...2,5$  мкм являются:  $p = 700$  МПа;  $S_{пр} = 160$  мм/мин;  $n = 2$ . Обработка на этих режимах позволяет с высокой производительностью получать значения коэффициента средней контактной жесткости:  $j_1 = 66,3$  МПа/мкм;  $j_{повт} = 84,0$  МПа/мкм.

Причем для повышения контактной жесткости при первом нагружении ОУО ППД необходимо производить на отделочно-упрочняющих режимах, при повторных нагрузках – на отделочных режимах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений. – М.: Наука, 1977. – 102 с.
2. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / Под общей ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
3. Медведев, Д.М., Хандожко, В.А. Одноступенчатое технологическое обеспечение контактной жесткости шлифованных поверхностей деталей машин и их стыков // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2015. – № 1 (32). – С. 82 – 89.
4. Бишутин, С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании: Монография. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 144 с.

## REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Technological Support of Joints Contact Rigidity*. – М.: Science, 1977. – pp. 102.
2. Suslov, A.G. *Technological Support and Increase of Operation Properties of Parts and Their Joints / under the general editorship of A.G. Suslov*. – М.: Mechanical Engineering, 2006. – pp. 448.
3. Medvedev, D.M., Khandozhko, V.A. Single-stage technological support of ground surface contact rigidity in machinery and parts joints // *Bulletin of Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk*. – 2015. – No.1(32). – pp. 82-89.
4. Bishutin, S.G. *Support of Required Aggregate of Quality Parameters for Surface Layers of Parts when Grinding: monograph*. – М.: Mechanical Engineering – 1, 2004. – pp. 144.

Рецензент д.т.н.  
Александр Николаевич Михайлов

