



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №5 (131). С. 27-38.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №5 (131). P. 27-38.

Обзорная статья
УДК 621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-27-38

Возможности одноступенчатого обеспечения контактной жесткости деталей на стадии проектирования

Анатолий Григорьевич Суслов¹, д.т.н.,
Виктор Александрович Хандожко², к.т.н.
^{1,2}Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия
¹naukatm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>
²vichandozhko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Представлены теоретические зависимости контактной жесткости деталей на стадии проектирования от условий обработки поверхностей стыка. Приведены технологические методы обработки в обеспечении контактной жесткости. Рассмотрены методика и пример расчета режимов обработки и выбора оптимального метода обработки.

Ключевые слова: технологическое обеспечение, контактная жесткость, возможности технологических методов обработки, оптимизация

Для цитирования: Суслов А.Г., Хандожко В.А. Возможности одноступенчатого обеспечения контактной жесткости деталей на стадии проектирования // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №5 (131). – С. 27-38.
doi:10.30987/2223-4608-2022-5-27-38.

Review article

Possibilities for single-round ensuring of parts contact rigidity at the design stage

Anatoly G. Suslov¹, Dr. Sc. Tech.,
Viktor A. Khandozhko², Cand. Sc. Tech.
^{1,2}Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia
¹naukatm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>
²vichandozhko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Annotation. Theoretical dependences of the contact rigidity of parts at the design stage on machining conditions of joint surfaces are given. Technological methods of machining for ensuring contact rigidity are provided. Methodology and sample calculations of operating modes with the choice of the optimal working method are viewed.

Keywords: technological support, contact rigidity, possibilities of manufacturing handling technique, optimization

For citation: Suslov A.G., Khandozhko V.A. Possibilities for singleround ensuring of parts contact rigidity at the design stage. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.5 (131), pp. 27-38.
doi: 10.30987/2223-4608-2022-5-27-38.

Введение

Высокие требования к точности, производительности и быстроходности машин повы-

шают значимость критерия жесткости, который в значительной степени определяет точность работы машин под нагрузкой, их виброустойчивость, условия контактирования, и,

как следствие, долговечность деталей [1 – 3]. Жесткость любой машины зависит от двух компонентов. Один из них может быть вычислен с достаточной степенью точности по соответствующим формулам сопротивления материалов или теории упругости для различных деталей, рассматриваемых как балки, пластинки, плиты, оболочки. Второй компонент – контактная жесткость – определяет способность поверхностных слоев деталей, находящихся в контакте, сопротивляться действию сил, стремящихся их сдеформировать.

Для прецизионных машин определяющее значение имеет контактная жесткость, определяемая сближением поверхностей деталей в местах сопряжения. Оценка контактной жесткости позволяет решать ряд таких важных технических задач, как распределение и концентрация давления по поверхности контакта, оптимизация конструкций из условий отсутствия резкой концентрации давления и местных раскрытий стыков, установление механизма работы фрикционных соединений и др. К числу динамических задач, требующих знания контактной жесткости, относятся: определение демпфирования и собственных частот колебаний, определение динамической устойчивости, ослабление затянутых соединений, накопление остаточных перемещений деталей под действием повторных ударных нагрузок.

Контактная жесткость влияет на точность установки деталей в приспособлениях, обработки и их сборки, т.е. на точности и качестве работы изделий в машино- и приборостроении.

В машинах контактные деформации довольно существенны. Например, в суппортах токарных станков контактные деформации составляют 80...90 % общих деформаций, в портальных станках с ползунами – 60...80 %. В приводах станков контактные перемещения в шпоночных и шлицевых соединениях, муфтах, опорах валов вызывают угловые перемещения шпинделей того же порядка, что и перемещения от чистого закручивания валов, или до 1/3 от общих угловых перемещений.

Наличие волнистости и отклонений от правильной геометрической формы (неплоскостность, некруглость, конусность и т.п.) в реальных стыках машин приводит к тому, что нагрузки воспринимаются небольшой частью контактирующих поверхностей. Этим объясняется сравнительно низкая жесткость стыков. Поверхностные контактирующие слои могут быть рассмотрены как тонкие упругие прокладки между деталями.

Контактная жесткость определяется по формуле:

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

где p – удельная нагрузка, приходящаяся на геометрическую площадь контакта, МПа/мкм; y – контактные перемещения, мкм.

Контактные перемещения определяют по формуле:

$$y = y_{\text{пл}} + y_{\text{упр}}, \quad (2)$$

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

При повторных нагружениях (начиная с шестой) контактная деформация носит упругий характер, т.е. $y = y_{\text{упр}}$.

Известно, что эксплуатационные свойства количественно характеризуются их показателями. Для эксплуатационного свойства контактная жесткость к показателям относят сближения при первом, при повторном нагружении и контактную жесткость. Заданным показателям эксплуатационных свойств соответствует совокупность параметров качества поверхностного слоя и физико-механических свойств поверхности, для обеспечения которых на чертежах деталей указывают соответствующие технические требования.

Конструкторские расчеты на жесткость должны учитывать как объемные деформации в стыках деталей машин, так контактные сближения. Если заданная (допускаемая) объемная деформация обеспечивается формой, размерами детали и свойствами материала, т.е. конструктивно, то заданное контактное сближение (заданная контактная жесткость) обеспечивается формированием заданной совокупности параметров качества поверхностного слоя в процессе механической обработки поверхностного слоя деталей, т.е. технологически.

Традиционно инженер-конструктор должен указать на чертеже заданную совокупность параметров шероховатости, волнистости, макроотклонений и др. для технологического обеспечения заданного сближения в стыке. Инженер-технолог должен выбрать несколько различных технологических методов отделочной обработки поверхностей в стыке и рассчитать для них режимы обработки, которые обеспечат заданную совокупность параметров шероховатости, волнистости и макроотклонений. В дальнейшем выбирается один из мето-

дов, оптимальный по какому-либо критерию, например, технологической себестоимости.

Описанный алгоритм получил название двухступенчатого обеспечения эксплуатационных свойств: на первом этапе (конструирование) рассчитывают совокупность параметров качества поверхностного слоя для обеспечения показателей эксплуатационных свойств, на втором этапе (разработка технологии изготовления) рассчитывают совокупность режимов обработки для обеспечения этой совокупности параметров качества поверхностного слоя.

Данный подход имеет недостатки. Для обеспечения заданной совокупности параметров качества поверхностного слоя сложно подобрать сочетание режимов обработки. Выбор оптимального метода отделочной обработки также затруднен из-за множественного сочетания режимов обработки для обеспечения заданных показателей эксплуатационных свойств. Так, одно и то же значение контактной жесткости наружной цилиндрической поверхности может быть обеспечено при тонком обтачивании, алмазном выглаживании или круглом шлифовании.

Одноступенчатый подход к обеспечению контактной жесткости лишен этих недостатков. Инженер-конструктор должен указать на чертеже проектную (заданную) контактную жесткость детали (или стыка), чтобы инженер-технолог мог выбрать метод обработки поверхности и рассчитать режимы обработки, обеспечивающие заданную контактную жесткость, минуя определение параметров качества поверхностного слоя.

В данном случае говорят о решении так называемой обратной задачи технолога. Для решения обратной задачи технолога применяют методы нелинейной оптимизации, однако ее решение осложняется отсутствием теоретических зависимостей, связывающих контактную жесткость с режимами обработки.

Таким образом, конструкторско-технологическое обеспечение эксплуатационного свойства контактная жесткость базируется на теоретических или эмпирических зависимостях между контактной жесткостью и режимами обработки для заданного метода обработки.

Для торцового точения искомая функция имеет вид:

$$j = f(v, s_0), \quad (3)$$

где v – скорость резания; s_0 – скорость подачи на оборот.

Для торцового фрезерования искомая функция имеет вид:

$$j = f(v, s_z), \quad (4)$$

где v – скорость резания; s_z – скорость подачи на зуб.

Для плоского шлифования искомая функция имеет вид:

$$j = f(z, s_{\text{поп}}, v_{\text{заг}}, n), \quad (5)$$

где z – зернистость круга; $s_{\text{поп}}$ – поперечная подача стола; $v_{\text{заг}}$ – скорость заготовки; n – число выхаживаний.

Существуют 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.) [4]. 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.

Теоретическая взаимосвязь контактной жесткости деталей непосредственно с методами и режимами их обработки может быть получена на основе математического описания совместной физической картины контактных перемещений 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 [4, 5].

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

$$y_{\text{ни}} = \pi \left(\frac{2\pi P Ra_i Wz_i H_{\text{max}i}}{A k'_i \sigma_{\text{ти}}} \right)^{1/3}; \quad (6)$$

$$y_{\text{ни}} = 2\pi \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} k'_i \sigma_{\text{ти}} S m_i \frac{y_{\text{ни}}}{Ra_i}. \quad (7)$$

где i – индекс поверхности в стыке; P – сила,

H ; Ra – среднеарифметическое отклонение профиля, мкм; Wz – высота волнистости, мкм; H_{\max} – макроотклонение, мкм; A – геометрическая площадь контакта, мм; k' – коэффициент поверхностного упрочнения; σ_T – предел текучести материала, МПа; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга, МПа; Sm – средний шаг неровностей, мм.

Подставим теоретические зависимости для шероховатости, волнистости и макроотклонений деталей машин от методов и режимов обра-

ботки в теоретические уравнения контактных деформаций [6], а затем полученные выражения – в зависимости (6), (7), получим общие теоретические уравнения зависимости контактной жесткости детали при первом j_1 и повторном $j_{\text{повт}}$ нагружении от режимов обработки [7, 8].

При точении цилиндрической поверхности контактная жесткость определяется по формулам:

$$j_1 = p \sum_{i=1}^2 \pi \cdot \left[\frac{0,48\pi P \left(\frac{s_i^{2,7}}{10} + C_{yi} s_i^{yp} v_i^{zp} \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \right) \cdot C_{yi} s_i^{yp} v_i^{zp}}{A \cdot H_{\mu 0i}} \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Wz_{исxi} - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \cdot H_{\max} \right)^{\frac{1}{3}} + \\ + 10\pi^2 \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} \cdot H_{\mu 0i} \cdot s_i \left[\frac{0,48\pi P \left(\frac{s_i^{2,7}}{10} + C_{yi} s_i^{yp} v_i^{zp} \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \right) \cdot C_{yi} s_i^{yp} v_i^{zp}}{A \cdot H_{\mu 0i}} \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Wz_{исxi} - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \cdot H_{\max} \right)^{\frac{1}{3}} \left/ \frac{s_i^{2,7}}{10} + C_{yi} s_i^{yp} v_i^{zp} \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \right]; \quad (8)$$

$$j_{\text{повт}} = p \sum_{i=1}^2 \pi \cdot \left[\frac{0,48\pi P \left(\frac{s_i^{2,7}}{10} + C_{yi} s_i^{yp} v_i^{zp} \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \right) \cdot C_{yi} s_i^{yp} v_i^{zp}}{A \cdot H_{\mu 0i}} \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow \frac{HB_{\max}^n \cdot t_i^{xp} - HB_{\min}^n \cdot (t_i - Wz_{исxi} - Rz_{исxi})^{xp}}{j_{TC} \cdot HB_{срi}^n} \cdot H_{\max} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (9)$$

где s – подача, мм/об; v – скорость резания, м/мин; t – глубина резания, мкм; j_{TC} – 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; $Wz_{исx}$ и

$Rz_{исx}$ – средняя высота исходной волнистости и шероховатости, мкм.

Теоретические исследования показывают, что основное влияние на контактную жесткость цилиндрических соединений оказывают номинальный диаметр и зазор, которые формируют номинальную площадь контакта.

При торцевом точении контактная жесткость определяется по формулам:

$$j_1 = \frac{P}{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left(1,2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{инстр\ i} / 5) \cdot C_i \cdot \left(\frac{s_i}{10^3}\right)^y \cdot v_i^n \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3}\right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх\ i} - Wz_{исх\ i}\right)^x \right) \cdot H_{\max\ i}}{H_{\mu 0i}} \right)^{1/3}} + \rightarrow$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S m_i \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left(1,2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{инстр\ i} / 5) \cdot C_i \cdot \left(\frac{s_i}{10^3}\right)^y \cdot v_i^n \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3}\right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх\ i} - Wz_{исх\ i}\right)^x \right) \cdot H_{\max\ i}}{H_{\mu 0i}} \right)^{1/3}}{G_i + Rz_{инстр\ i} / 5} \right)^3 \quad (10)$$

$$j_{\text{повт}} = \frac{P}{\sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S m_i \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left(1,2 \cdot (G_i + Rz_{инстр\ i} / 5) \cdot C_i \cdot \left(\frac{s_i}{10^3}\right)^y \cdot v_i^n \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3}\right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх\ i} - Wz_{исх\ i}\right)^x \right) \cdot H_{\max\ i} \cdot H_{\mu 0i}^{-1} \right)^{1/3}}{G_i + Rz_{инстр\ i} / 5} \right)^3} \quad (11)$$

Коэффициенты B , C_i и G_i определяются по формулам (12) – (14) соответственно:

$$B = \frac{\pi(2\pi P)^{\frac{1}{3}}}{A} \quad (12)$$

$$C_i = \frac{10C_{pi} K_{MPi} K_{\phi Pi} K_{\gamma Pi} K_{\lambda Pi} K_{rPi}}{j_{Tci}} \quad (13)$$

$$G_i = \begin{cases} \left(\frac{r_i(1 - \cos \varphi_i) + \operatorname{tg} \varphi_i \operatorname{tg} \varphi_{i1} [s_i - r_i(\sin \varphi_i + \sin \varphi_{i1})] - r_i \operatorname{tg} \varphi_i (\cos \varphi_{i1} - \cos \varphi_i)}{\cos \gamma_i} + \frac{\operatorname{tg} \varphi_i \operatorname{tg} \varphi_{i1} [s_i - r_i(\sin \varphi_i + \sin \varphi_{i1})] - r_i \operatorname{tg} \varphi_i (\cos \varphi_{i1} - \cos \varphi_i)}{\cos \gamma_i (\operatorname{tg} \varphi_i + \operatorname{tg} \varphi_{i1})} + \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow 10^3 \cdot C_i \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3}\right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх\ i}\right)^x \right) + \frac{F_i}{\operatorname{ctg} \varphi_i + \operatorname{ctg} \varphi_{i1}} \right) / 5, \\ \text{где } \varphi_i < \arcsin(s_i/2r_i) \text{ и } \varphi_{i1} < \arcsin(s_i/2r_i) \\ \left(\frac{r_i}{\cos \gamma_i} - \frac{\sqrt{4r_i^2 - s_i^2}}{2\cos \gamma_i} + \frac{F_i(2s_i + F_i)}{32r_i} + 10^3 \cdot C_i \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3}\right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх\ i}\right)^x \right) \right) / 5, \\ \text{где } \varphi_{i1} \geq \arcsin(s_i/2r_i) \text{ и } \varphi_i \geq \arcsin(s_i/2r_i) \\ \left(\frac{r_i(1 - \cos \varphi_{i1}) + \sin \varphi_{i1} [s_i \cos \varphi_{i1} - \sqrt{s_i \sin \varphi_{i1} (2r_i - s_i \sin \varphi_{i1})}]}{\cos \gamma_i} + \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow 10^3 \cdot C_i \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3}\right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх\ i}\right)^x \right) + \frac{F_i}{\operatorname{ctg} \varphi_{i1} + \frac{2r_i}{s_i}} \right) / 5, \\ \text{где } \varphi_i \geq \arcsin(s_i/2r_i) \text{ и } \varphi_{i1} \geq \arcsin(s_i/2r_i) \end{cases} \quad (14)$$

где коэффициент F_i определяет формуле:

$$F_i = 0,5\rho_i \left(1 - \frac{2\tau_{oi}}{\sigma_{\tau i}} \right). \quad (15)$$

В формулах (10) – (15) приняты следующие обозначения: $Rz_{инстр}$ – высота неровностей профиля по десяти точкам режущего инструмента, мкм; C_p , K_{MP} , $K_{\phi P}$, $K_{\gamma P}$, $K_{\lambda P}$, K_{rP} , x , y – эмпирические коэффициенты в формуле для определения силы резания; t – глубина ре-

зания, мкм; ϕ – главный угол в плане режущего инструмента; ϕ_1 – вспомогательный угол в плане режущего инструмента; ρ – радиус кромки режущего инструмента, мкм; τ_0 – предел прочности материала на срез, МПа.

Анализ полученного выражения показывает, что контактная жесткость при торцовом точении главным образом зависит от подачи, скорости резания и глубины резания.

При торцовом фрезеровании контактная жесткость определяется по формулам:

$$j_1 = \frac{p}{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left[1,2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{инстр}/5) \cdot C_i \cdot \left(\frac{s_{zi}}{10^3}\right)^y \left(\frac{\pi}{1000v_i}\right)^w \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3}\right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{иски} - Wz_{иски} - \delta_i\right)^x\right) \cdot H_{\max i}}{H_{\mu 0 i}} \right]^{1/3}} + \rightarrow$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0 i} S m_i \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left[1,2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{инстр}/5) \cdot C_i \cdot \left(\frac{s_{zi}}{10^3}\right)^y \left(\frac{\pi}{1000v_i}\right)^w \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3}\right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{иски} - Wz_{иски} - \delta_i\right)^x\right) \cdot H_{\max i}}{H_{\mu 0 i}} \right]^{1/3}}{G_i + Rz_{инстр}/5} \right]^{1/3} \quad (16)$$

$$j_{\text{повт}} = \frac{p}{\sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0 i} S m_i \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left[1,2 \cdot (G_i + Rz_{инстр}/5) \cdot C_i \cdot \left(\frac{s_{zi}}{10^3}\right)^y v_i^n \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3}\right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{иски} - Wz_{иски}\right)^x\right) \cdot H_{\max i} \cdot H_{\mu 0 i}^{-1}\right]^{1/3}}{G_i + Rz_{инстр}/5} \right]^{1/3}} \quad (17)$$

где s_z – подача на зуб, мм/зуб; C , x , y – эмпирические коэффициенты в формуле для определения силы резания; δ – биение зубьев фрезы.

При плоском шлифовании контактная жесткость определяется по формулам:

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

$$\rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0 i} S m_i \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left[\frac{0,15 \left(-u + \left[u^2 + 2k_m k_{s1} R \max_u^2 (0,5k_{s2} + u/t_\phi) \right]^2 \right) \left(\frac{L^*}{N_V} \right)^2 \cdot (Y_{0\max} e^{-k_{e\min}} - Y_{0\min} e^{-k_{e\max}})}{4D_K \cdot k_{s1}} \cdot H_{\mu 0 i}} \right]^{1/3}}{0,15 \left(-u + \left[u^2 + 2k_m k_{s1} R \max_u^2 (0,5k_{s2} + u/t_\phi) \right]^2 \right)} \right]^{1/3} \quad (18)$$

$$j_{\text{повт}} = \frac{P}{\sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S m_i \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left(0,15 \left(-u + \left[u^2 + 2k_m k_{s1} R \max_n^2 (0,5k_{s2} + u/t_\phi) \right]^2 \right) \frac{\left(\frac{L^*}{N_V} \right)^2}{4D_K \cdot k_{s1}} \cdot (Y_{0\max} e^{-k_{\min}} - Y_{0\min} e^{-k_{\max}}) \cdot H_{\mu 0i}^{-1} \right)^{1/3}}{0,15 \left(-u + \left[u^2 + 2k_m k_{s1} R \max_n^2 (0,5k_{s2} + u/t_\phi) \right]^2 \right)} \right]} \quad (19)$$

где u – линейный износ круга, мкм; $k_m, k_{s1}, k_{s2}, k_{\min}, k_{\max}$ – эмпирические коэффициенты; R_{\max} – наибольшая высота профиля шероховатости; t_ϕ – глубина шлифования, мм; L^* – длина шлифования, мм; D_K – диаметр круга, мм; N_V – число волн за время контакта шлифовального круга с заготовкой; $Y_{0\max}, Y_{0\min}$ – максимальный и минимальный натяги в технологической системе соответственно [9].

Анализ полученных выражений показывает, что основное влияние на контактную жесткость плоских поверхностей при шлифовании оказывают зернистость круга, скорость заготовки, поперечная подача и число выхаживаний.

При отделочно-упрочняющей обработке контактная жесткость определяется по формулам:

$$j_i = \frac{P}{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left(0,3 \cdot \left[\frac{10^3 S_i^2}{8R_i} + R z_{\text{исх}i} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left\{ \left[\frac{\left(\frac{a_{\text{пл}i}^2 \cdot (1 + f_i^2)^{0,5}}{R_i} - \frac{11P_i}{16E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right) \cdot R p_{\text{исх}i}}{m_{\text{исх}i}} \right]^{\frac{1}{v_{\text{исх}i} + 1}} - \frac{11P_i}{32E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right\} \times \rightarrow \right. \right. \\ \times \left. \left. \sqrt{\left(W z_{\text{исх}i} - 2 \left(\frac{9P_i R a_{\text{исх}i}^2}{\pi R_i H B_{\text{исх}i}} \right)^{1/4} \right)^2 + \left(1,4(1 + f_i^2) \Delta_{\text{пр}i}^{0,5} \left[\frac{4j_{\text{ТС}i}}{\pi R_i H B_{\text{исх}i} (h_{\text{кин}i} + h_{\text{упр}i})} \right]^{-0,5} \right)^2 + \left(h_{\text{кин}i} - 2 \left[1 - \frac{f_i \left(\sqrt{\frac{h_{\text{кин}i}}{2} + 1} \right)}{\sqrt{\left(\frac{h_{\text{кин}i}}{8r_i} + 1 \right) (1 + f_i^2)}} \right] \right)^2 \cdot \frac{H \max_i}{H_{\mu 0i}} \right)} \right]^{1/3} \\ \rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S m_i \sum_{i=1}^2 B \cdot \left(0,3 \cdot \left[\frac{10^3 S_i^2}{8R_i} + R z_{\text{исх}i} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left\{ \left[\frac{\left(\frac{a_{\text{пл}i}^2 \cdot (1 + f_i^2)^{0,5}}{R_i} - \frac{11P_i}{16E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right) \cdot R p_{\text{исх}i}}{m_{\text{исх}i}} \right]^{\frac{1}{v_{\text{исх}i} + 1}} - \frac{11P_i}{32E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right\} \times \rightarrow \right. \right. \\ \left. \left. \sqrt{\left(W z_{\text{исх}i} - 2 \left(\frac{9P_i R a_{\text{исх}i}^2}{\pi R_i H B_{\text{исх}i}} \right)^{1/4} \right)^2 + \left(1,4(1 + f_i^2) \Delta_{\text{пр}i}^{0,5} \left[\frac{4j_{\text{ТС}i}}{\pi R_i H B_{\text{исх}i} (h_{\text{кин}i} + h_{\text{упр}i})} \right]^{-0,5} \right)^2 + \left(h_{\text{кин}i} - 2 \left[1 - \frac{f_i \left(\sqrt{\frac{h_{\text{кин}i}}{2} + 1} \right)}{\sqrt{\left(\frac{h_{\text{кин}i}}{8r_i} + 1 \right) (1 + f_i^2)}} \right] \right)^2 \cdot \frac{H \max_i}{H_{\mu 0i}} \right)} \right]^{1/3} \\ \times \left. \left. \left(0,25 \cdot \left[\frac{10^3 S_i^2}{8R_i} + R z_{\text{исх}i} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left\{ \left[\frac{\left(\frac{a_{\text{пл}i}^2 \cdot (1 + f_i^2)^{0,5}}{R_i} - \frac{11P_i}{16E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right) \cdot R p_{\text{исх}i}}{m_{\text{исх}i}} \right]^{\frac{1}{v_{\text{исх}i} + 1}} - \frac{11P_i}{32E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right\} \right] \right) \right\} \right) \quad (20)$$

$$j_{\text{повт}} = p / \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1-\mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S m_i \sum_{i=1}^2 B \cdot \left(0,3 \cdot \frac{10^3 s_i^2}{8R_i} + R z_{\text{исх}i} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{a_{\text{пл}i}^2 \cdot (1+f_i^2)^{0,5}}{R_i} - \frac{11P_i}{16E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right) \cdot R p_{\text{исх}i}}{t m_{\text{исх}i}} \right\}^{\frac{1}{v_{\text{исх}i}+1}} - \frac{11P_i}{32E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right) \times \rightarrow$$

$$\times \sqrt[1/3]{ \left(W z_{\text{исх}i} - 2 \left(\frac{9P_i R a_{\text{исх}i}^2}{\pi R_i H B_{\text{исх}i}} \right)^{1/4} \right)^2 + \left(1,4(1+f_i^2) \Delta_p^{0,5} \left[\frac{4j_{\text{ТС}i}}{\pi R_i H B_{\text{исх}i} (h_{\text{кин}i} + h_{\text{упр}i})} \right]^{0,5} \right)^2 + \left(h_{\text{кин}i} - 2 \left[1 - \frac{f_i \left(\sqrt{\frac{h_{\text{кин}i}}{2} + 1}} \right)}{\sqrt{\left(\frac{h_{\text{кин}i}}{8r_i} + 1 \right) (1+f_i^2)}} \right] \cdot \frac{H_{\text{max}i}}{H_{\mu 0i}} \right)^2 } \right)^{1/3}, \quad (21)$$

$$\times 0,25 \cdot \frac{10^3 s_i^2}{8R_i} + R z_{\text{исх}i} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{a_{\text{пл}i}^2 \cdot (1+f_i^2)^{0,5}}{R_i} - \frac{11P_i}{16E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right) \cdot R p_{\text{исх}i}}{t m_{\text{исх}i}} \right\}^{\frac{1}{v_{\text{исх}i}+1}} - \frac{11P_i}{32E_i \cdot a_{\text{пл}i}} \right\}$$

где $a_{\text{пл}}$ – радиус отпечатка после снятия нагрузки, мм; f – коэффициент трения; R – радиус ролика, мм; R_p – высота выступов профиля, мкм; $t m$ – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; $h_{\text{кин}}$ – уменьшение размера детали при перемещении инструмента вдоль обрабатываемой поверхности, мкм; $h_{\text{упр}}$ – упругая составляющая уменьшения размера детали при перемещении инструмента вдоль обрабатываемой поверхности, мкм; Δ_p – биение поверхности ролика.

Анализ полученных выражений показывает, что основное влияние на контактную жесткость плоских поверхностей оказывают пода-

ча при предварительном фрезеровании, усилие и подаче при ОУО ППД.

Для выбора оптимального метода обработки необходима база справочных данных о возможностях различных технологических методов в обеспечении контактной жесткости. 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 нагружениях (табл. 1, 2).

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

Методы обработки	Контактная жесткость поверхности, МПа/мкм			
	с учетом только шероховатости		с учетом шероховатости и волнистости	
	j_1	$j_{\text{повт}}$	j_1	$j_{\text{повт}}$
Наружные поверхности вращения				
<u>Точение:</u>				
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
<u>Круглое шлифование:</u>				
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
Внутренние поверхности вращения				
<u>Растачивание:</u>				
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
<u>Внутреннее шлифование:</u>				
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

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

Методы обработки	Контактная жесткость поверхности, МПа/мкм			
	с учетом только шероховатости		с учетом шероховатости и волнистости	
	j_1	$j_{повт}$	j_1	$j_{повт}$
<u>Торцевое фрезерование:</u>				
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
<u>Плоское шлифование:</u>				
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

Нормализованный метод определения нормальной контактной жесткости представлен в [10]. Он позволяет определить значения контактной жесткости с учетом только шероховатости (точечный контакт) и с учетом шероховатости и волнистости (без учета макроотклонений). Для учета макроотклонений в реальных деталях можно воспользоваться справочными данными [11].

Основной задачей является правильный и быстрый выбор метода отделочной обработки и назначение режимов резания. Для этого была разработана программа, которая определяет оптимальные по условию минимума технологической себестоимости методы и режимы механической обработки, для обеспечения заданной контактной жесткости.

Условие минимизации целевой функции имеет вид:

$$f_{\text{цел}} = T_{\text{маш}} \Rightarrow \min. \quad (22)$$

Для торцового точения комплекс ограничений запишем в виде:

$$\begin{cases} v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ s_{\min} \leq s \leq s_{\max} \\ j(v, s) = \text{const} \end{cases}.$$

Для торцового фрезерования:

$$\begin{cases} v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ s_{z \min} \leq s_z \leq s_{z \max} \\ j(v, s_z) = \text{const} \end{cases}.$$

Для плоского шлифования:

$$\begin{cases} z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ s_{\text{поп} \min} \leq s_{\text{поп}} \leq s_{\text{поп} \max} \\ v_{\text{заг} \min} \leq v_{\text{заг}} \leq v_{\text{заг} \max} \\ n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ j(z, s_{\text{поп}}, v_{\text{заг}}, n) = \text{const} \end{cases}.$$

Исходными данными являются:

1. Размеры контактирующих поверхностей, которые определяют необходимость учета только шероховатости, шероховатости и волнистости или шероховатости, волнистости и макроотклонений.

2. Система технологических ограничений (минимальные и максимальные режимы обработки).

3. Требуемое значение контактной жесткости (при первом или повторных нагружениях).

В табл. 3 приведены исходные данные расчета режимов обработки и выбора оптимального метода обработки. Обе детали в стыке имеют одинаковые размеры и метод обработки.

В табл. 4 – 6 приведены условия обработки плоских поверхностей и оптимальные режимы для торцового точения, торцового фрезерования и плоского шлифования для обеспечения $j_1 = 0,15$ МПа/мкм и $j_{\text{повт}} = 0,6$ МПа/мкм.

Оптимизация выполнена с применением программного обеспечения MathCAD. Как видно, наименьшее машинное время обработки получается при плоском шлифовании ($T_{\text{маш}} = 1,38$ мин для обеспечения $j_1 = 0,15$ МПа/мкм; $T_{\text{маш}} = 1,25$ мин для обеспечения $j_{\text{повт}} = 0,6$ МПа/мкм).

Таким образом, для приведенных исходных данных оптимальным по условию производительности методом обеспечения заданной контактной жесткости является плоское шлифование. Для обеспечения $j_1 = 0,15$ МПа/мкм оптимальные режимы: зернистость $z_{\text{опт}} = 20$; поперечная подача $s_{\text{поп.опт}} = 3,6$ мм/дв.ход; скорость подачи $v_{\text{заг.опт}} = 12$ м/мин; число выхаживаний $n_{\text{опт}} = 2$. Для обеспечения $j_{\text{повт}} = 0,6$ МПа/мкм оптимальные режимы: зернистость $z_{\text{опт}} = 25$; поперечная подача $s_{\text{поп.опт}} = 4$ мм/дв.ход; скорость подачи $v_{\text{заг.опт}} = 12$ м/мин; число выхаживаний $n_{\text{опт}} = 2$.

3. Исходные данные для выбора метода и расчета оптимальных режимов обработки плоских деталей

Параметр	Значение
Номинальная нагрузка в стыке P , Н	1000
Номинальная площадь в контакте A , мм ²	100
Путь резания L , мм	100
Макроотклонение H_{\max} , мкм	5
Средняя высота исходной шероховатости $Rz_{\text{исх}}$, мкм	20
Средняя высота исходной волнистости $Wz_{\text{исх}}$, мкм	20
Инструментальный материал	Твердый сплав
Материал заготовки	Конструкционная сталь
Предел прочности материала заготовки на разрыв σ_B , МПа	750
Предел текучести материала заготовки σ_T , МПа	335
Микротвердость материала заготовки $H_{\text{ц0}}$	300
Модуль Юнга материала заготовки E , МПа	$2,1 \times 10^5$
Коэффициент Пуассона μ	0,3
Жесткость системы технологической системы $j_{\text{ТС}}$, Н/мм	5000
Заданное значение контактной жесткости при первом и повторном нагружениях, МПа/мкм	0,15 0,6

4. Условия торцового точения и оптимальные режимы обработки плоских деталей

Параметр	Значение	
	j_1	$j_{\text{повт}}$
Главный угол в плане резца φ , °	45	
Вспомогательный угол в плане резца φ_1 , °	45	
Передний угол γ , °	10	
Угол наклона главной режущей кромки λ , °	5	
Радиус при вершине r , мм	2	
Радиус скругления режущей кромки ρ , мм	0,035	
Глубина резания t , мм	0,25	
Минимальная скорость резания v_{\min} , м/мин	50	
Максимальная скорость резания v_{\max} , м/мин	230	
Минимальная подача на оборот s_{\min} , мм/об	0,1	
Максимальная подача на оборот s_{\max} , мм/об	0,25	
Оптимальная скорость резания $v_{\text{опт}}$, м/мин	76	230
Оптимальная подача на оборот $s_{\text{опт}}$, мм/об	0,25	0,12
Машинное время обработки $T_{\text{маш}}$, мин	4,19	2,95

5. Условия торцового фрезерования и оптимальные режимы обработки плоских деталей

Параметр	Значение	
	j_1	$j_{\text{повт}}$
Главный угол в плане φ , °	30	
Вспомогательный угол в плане φ_1 , °	45	
Передний угол γ , °	10	
Угол наклона главной режущей кромки λ , °	- 5	
Радиус при вершине r , мм	2	
Радиус скругления режущей кромки ρ , мм	0,035	
Глубина резания t , мм	0,25	
Ширина фрезерования B , мм	100	
Число зубьев	10	
Минимальная скорость резания v_{\min} , м/мин	50	
Максимальная скорость резания v_{\max} , м/мин	230	
Минимальная подача на зуб $s_{z \min}$, мм/об	0,01	

Максимальная подача на зуб $s_{z \max}$, мм/об	0,025	
Оптимальная скорость резания $v_{\text{опт}}$, м/мин	230	126
Оптимальная подача на зуб $s_{z \text{ опт}}$, мм/об	0,017	0,01
Машинное время обработки $T_{\text{маш}}$, мин	2,6	7,93

6. Условия плоского шлифования и оптимальные режимы обработки плоских деталей

Параметр	Значение	
	j_1	$j_{\text{повт}}$
Диаметр шлифовального круга, мм	270	
Ширина шлифовального круга, мм	40	
Скорость резания v_K , м/с	35	
Глубина резания t , мм	0,03	
Минимальная зернистость круга z_{\min}	20	
Максимальная зернистость круга z_{\max}	100	
Минимальная скорость поперечной подачи $s_{\text{поп. min}}$, мм/дв.ход	0,5	
Максимальная скорость поперечной подачи $s_{\text{поп. max}}$, мм/дв.ход	4	
Минимальная скорость подачи $v_{\text{заг. min}}$, м/мин	2	
Максимальная скорость подачи $v_{\text{заг. max}}$, м/мин	12	
Минимальное число выхаживаний n_{\min}	1	
Максимальное число выхаживаний n_{\max}	6	
Оптимальная зернистость $z_{\text{опт}}$	20	25
Оптимальная скорость поперечной подачи $s_{\text{поп. опт}}$, мм/дв.ход	3,6	4
Оптимальная скорость подачи $v_{\text{заг. опт}}$, м/мин	12	12
Оптимальное число выхаживаний $n_{\text{опт}}$	2	2
Машинное время обработки $T_{\text{маш}}$, мин	1,38	1,25

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Качество** машин: справочник. В 2 т. Т.1. / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
2. **Качество** машин: справочник. В 2 т. Т.2. / А.Г. Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.
3. **Машиностроение**. Энциклопедия. Ред. совет. К.В. Фролов (пред.) и др. Надежность машин. Т. IV-3 / В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф., Соснин и др.; под общ. ред. В.В. Клюева. – 1998. – 592 с.
4. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений. – М.: Наука, 1977. – 102 с.
5. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / Под общей ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с. (Библиотека технолога).
6. **Медведев, Д.М., Хандожко, В.А.** Одноступенчатое технологическое обеспечение контактной жесткости шли-

фованных поверхностей деталей машин и их стыков // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2015. – №1 (32). – С. 82-89.

7. **Справочник** технолога / под общей ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

8. **Фундаментальные** основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2022. – 552 с.

9. **Бишутин, С.Г.** Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании: монография. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 144 с.

10. **Метод** определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков. Методические рекомендации. – М.: ВНИИМАШ. – 1982.

11. **Демкин, Н.Б., Рыжов, Э.В.** Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

REFERENCES

1. The quality of machines: a reference book, in 2 vols., vol.1. / A.G. Suslov, E.D. Brown, N.A. Vitkevich et al. /Moscow: Mashinostroenie, 1995, 256 p.
2. The quality of machines: a reference book, in 2 vols., vol.2. / A.G. Suslov, Yu.V. Gulyaev, A.M. Dalsky et al./ Moscow: Mashinostroenie, 1995, 430 p.
3. Mechanical Engineering. Encyclopedia / Editorial Council: K.V. Frolov (Chairman) et al. Moscow: Mechanical Engineering. Machine Reliability. Vol. IV-3 / V.V. Klyuev, V.V. Bolotin, F.R. Sosnin et al.; under the general editorship of V.V. Klyuev, 1998, 592 p. (in Russian).
4. Suslov, A.G. Technological support of contact stiffness in joints. Moscow: Nauka, 1977, 102 p.
5. Suslov, A.G. Technological support and operational properties increase in parts and their units / Under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mechanical Engineering, 2006, 448 p. (Technologist's Library).
6. Medvedev, D.M., Khandozhko, V.A. Singleround technological ensuring of grinding finish contact stiffness in machine components and their joints // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov, 2015, no.1 (32), pp. 82-89.
7. The technologist's handbook/under the general editorship of Suslov, A.G./Moscow: Innovatsionnoe Mashinostroenie, 2019, 800 p.
8. Fundamentals of technological support and reliability growth of engineering products / ed. by A.G. Suslov. Moscow: Innovatsionnoe Mashinostroenie, 2022, 552 p.
9. Bishutin S.G. Providing the required set of parameters of quality of surface layers of details at grind: monograph. Moscow, Mashinosrtoenie-1, 2004, 144 p.
10. An estimation method for determining the normal contact stiffness of fixed joints. Methodological recommendations/ Moscow: VNIIMASH,1982.
11. Demkin, N.B., Ryzhov, E.V. Surface quality and contact of machine parts. /Moscow: Mashinostroenie, 1981, 244 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.12.2021; одобрена после рецензирования 17.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 13.12.2021; approved after reviewing 17.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

