

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article_5bb4b1fa312305.73805115

*Посвящается памяти д.т.н., проф. Рыжова Э.В.,
который являлся официальным оппонентом
при защите докторской диссертации автора данной статьи.*

В.Ф. Безъязычный, д.т.н.

*(Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П. А. Соловьева, 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53),*

М.Н. Дмитриева, к.т.н.

(Объединенная двигателестроительная корпорация – «Сатурн», 152903, г. Рыбинск, пр. Ленина, 16)

E-mail: technology@rsatu.ru; DMH221081@yandex.ru

Теоретический анализ взаимосвязи контактной жесткости сопрягаемых поверхностей с технологическими условиями их обработки

Изложен авторский вариант расчетного определения величины сближения контактируемых поверхностей под нагрузкой с учетом шероховатости обработанной поверхности и наклепа поверхностного слоя этих поверхностей. Выполнен анализ влияния режимов обработки на величину контактного сближения поверхностей, а также сопоставление результатов расчета параметра податливости с экспериментальными данными.

Ключевые слова: контактная жесткость; податливость; шероховатость поверхности; наклеп поверхностного слоя; режимы обработки.

V.F. Beziyazychny, Dr. Sc. Tech.,

(Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk, 53, Pushkin Str., Rybinsk, 152934)

M.N. Dmitrieva, Can. Sc. Tech.

(United Engine Production Corporation "Saturn", 163, Lenin Avenue, Rybinsk, 152903)

Theoretical analysis of mating surfaces contact rigidity with technological conditions of their machining

An author's version for the design definition of an approach value of contact surfaces under load taking into account roughness of a surface worked and a surface layer cold work of these surfaces is presented. The analysis of a processing mode impact upon the value of surfaces contact approach is carried out, and also the comparison of the computation results of a flexibility parameter with experimental data is performed.

Keywords: contact rigidity; flexibility; surface roughness; surface layer cold work; machining modes.

Как известно, контактная жесткость контактируемых поверхностей деталей характеризует их взаимное сближение под действием нагрузки P и оценивается по величине коэффициента контактной жесткости j и величине сближения контактируемой поверхности под действием нагрузки y , а именно отношением приращения удельного давления, действующе-

щего в заданном направлении, к соответствующему приращению взаимного перемещения контактирующих поверхностей в том же направлении.

Если сила направлена по нормали к контактируемой поверхности, то контактная жесткость называется нормальной контактной жесткостью. Величина обратная коэффициенту

нормальной контактной жесткости j называется коэффициентом нормальной податливости ω . В том случае, когда между нагрузкой P и перемещением y существует линейная связь, можно записать:

$$j = \frac{P}{y} \quad \text{и} \quad \omega = \frac{y}{P}.$$

Контактные сближения поверхностей складываются из упругих $y_{\text{упр}}$ и пластических $y_{\text{пл}}$ деформаций выступов микронеровностей контактирующих поверхностей. На основании формул для определения величины упругих и пластических деформаций выступов микронеровностей, предложенных проф. Сусловым А.Г., а также выражений проф. Рыжова Э.В. по определению контурной площади

контакта и зависимостей, предложенных авторами для определения степени и глубины наклепа, были получены зависимости для определения величины пластической и упругой контактной деформации от параметров качества поверхностного слоя для различных видов контакта поверхностей: при контакте шероховатой и гладкой поверхностей, а также при контакте двух шероховатых поверхностей при параллельном, перпендикулярном и произвольном расположении следов обработки на контактирующих поверхностях [1].

Названные зависимости для случая контакта двух шероховатых поверхностей при произвольном расположении следов обработки (случай наиболее характерный для реального контакта) имеют следующий вид:

$$y_{\text{пл}} = 0,546Rz \times \left[\frac{100N_1N_2k_5 \left(r_1 + r_2 + \sin \omega \sqrt{r_{\text{np1}} + r_{\text{np2}}} + \cos \left(\frac{\pi}{2} - \omega \right) \sqrt{r_{\text{non1}} + r_{\text{non2}}} \right) K}{tm3h_H r_2} \times \left(\frac{PE}{2\pi r_2 \sigma_{T_2}} \right)^m (ck_3)^{1-m} \right]^{\frac{1}{\nu}}, \quad (1)$$

$$y_{\text{упр}} = \left[\frac{P}{\left(\frac{\pi}{4 \cdot 10^4} \frac{tm_1 Sm_1}{(0,546Rz_1)^{\frac{1}{n_{\text{non1}}}}} \frac{tm_2 Sm_2}{(0,546Rz_2)^{\frac{1}{n_{\text{non2}}}}} \right)^{\frac{n_{\text{non1}} n_{\text{non2}} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \omega \right)}{n_{\text{non1}} + n_{\text{non2}}}}} \right]^{\frac{1}{n_{\text{non}}}} \times \times k(e) \frac{1 - \mu^2}{E} (c\sigma_T)^{\left(1 - \frac{1}{n_{\text{non}}}\right)} \frac{tmSm}{100} \frac{1}{(0,546Rz)^{\frac{1}{n_{\text{non}}}}} \quad (2)$$

где r_1, r_2 – приведенный радиус закругления вершины единичной микронеровности; $r_{\text{np1}}, r_{\text{np2}}$ – радиус закругления вершины единичной микронеровности в продольном направлении; $r_{\text{non1}}, r_{\text{non2}}$ – радиус закругления вершины единичной микронеровности в поперечном направлении; N_1, N_2 – количество вершин микронеровностей, находящихся в контакте; ν – параметр кривой опорной поверхности шероховатости; Rz_1, Rz_2 – высота неровностей профиля контактирующих поверхностей в поперечном направлении; m – показатель степени, определяемый как сумма параметров кривых опорных поверхностей; k_5 – коэффициент, полученный в результате численного решения исходного интегрального уравнения для отыскания фактической площади контакта; k_3 – коэффициент, учитывающий изменение величины сближения контактирующих поверхностей при деформации микронеровностей за счет осадки основания; K – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала; h_H – глубина наклепа в поверхностном слое контактирующей поверхности; $k(e)$ – эллиптический интеграл первого рода; $c\sigma_T$ – напряжение, приводящее в пластическое состояние выступ, где c – коэффициент; σ_T – предел текучести материала детали; E – модуль упругости материала детали; μ – коэффициент Пуассона материала детали; tm – относительная длина опорной поверхности на уровне средней линии; Sm – средний шаг неровностей профиля; n_{non} – порядок параболоида, моделирующего выступ микронеровностей профиля в поперечном направлении (положительное рациональное число); ω – угол между направлением расположения микронеровностей на контактируемых поверхностях.

В формулах (1) и (2) индексами 1 обозначены параметры, относящиеся к поверхности с большей твердостью, индексами 2 – относящиеся к поверхности с меньшей твердостью.

На основе полученных выражений разработана последовательность расчетного определения величины контактного сближения поверхностей (рис. 1).

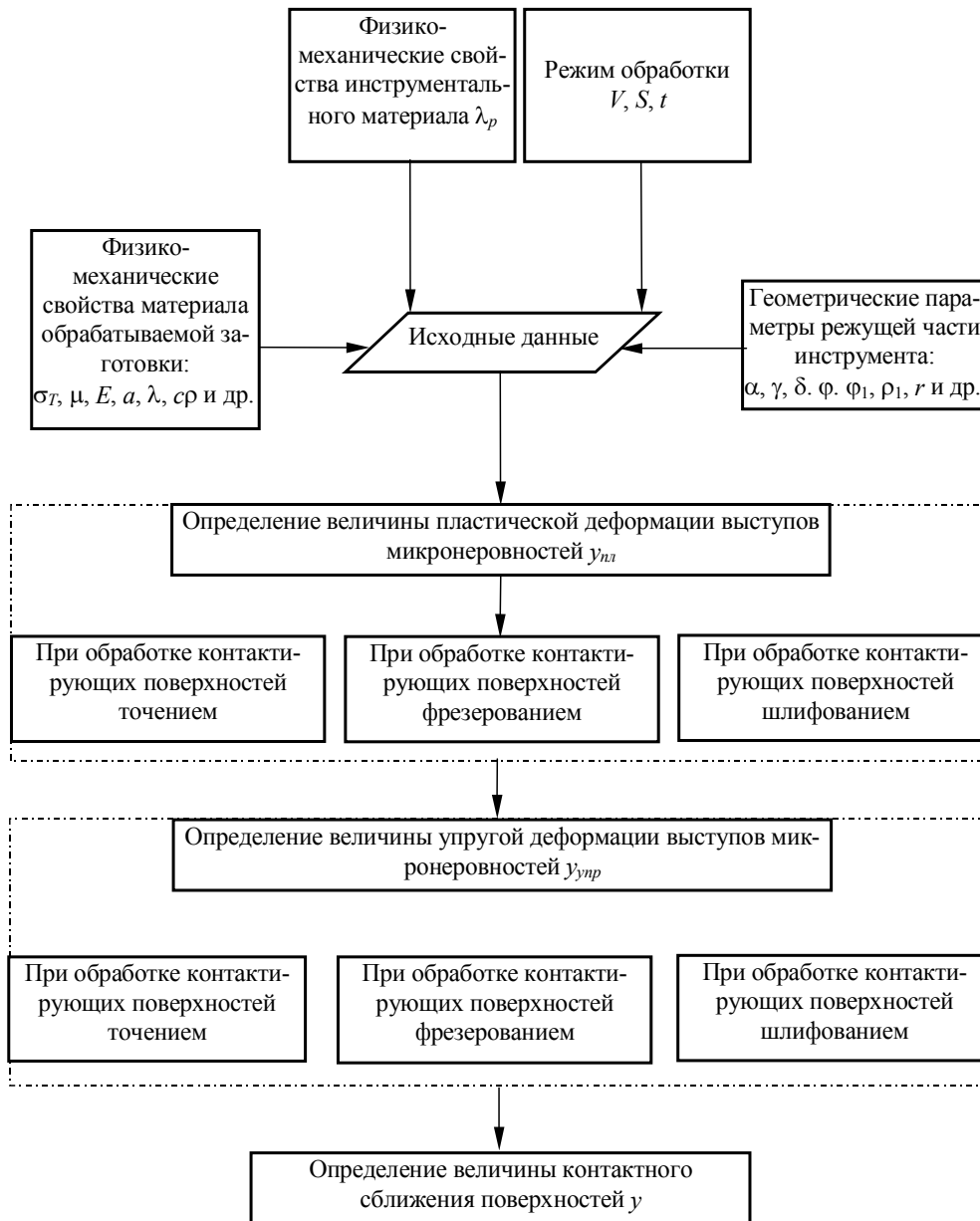


Рис. 1. Последовательность определения величины сближения контактных поверхностей под действием нагрузки

На основе уравнений (1) и (2) с использованием зависимостей, устанавливающих взаимосвязь параметров качества поверхностного слоя (высоты микронеровностей и глубины наклепа) с технологическими условиями обработки, получены зависимости для определения величины контактного сближения поверхностей. Данное теоретическое исследование проводилось для каждого из четырех видов контакта на примере трех наиболее рас-

пространенных видов обработки поверхностей: точения, фрезерования и шлифования.

Получены формулы для определения пластических $y_{пл}$ (3) и упругих $y_{упр}$ (4) деформаций выступов микронеровностей контактирующих поверхностей.

$$\text{При } \varphi > \arcsin \frac{S}{2r} \text{ и } \varphi_1 > \arcsin \frac{S}{2r}$$

$$y_{\text{упр}} = \frac{P}{\left(\frac{0,25\pi S m_1 \sin \omega S m_2}{18,7 \cdot 10^3 R z_1^{1,02} R z_2^{1,02}} \right)^{0,5}} k(e) \frac{1-\mu^2}{E} (c\sigma_T) \frac{S m}{95,6 R z^{1,02}}, \quad (3)$$

$$y_{\text{пл}} = 0,546 \left(\frac{S_\phi^2}{8r \cdot 10^{-3}} \right)^{1,02} \times \left[\frac{\left(r_1 + r_2 + \sin \omega \sqrt{r_{\text{np}_1} + r_{\text{np}_2}} + \cos \left(\frac{\pi}{2} - \omega \right) \sqrt{r_{\text{non}_1} + r_{\text{non}_2}} \right) K}{r_2} \times \frac{v^{0,28} r^{3,55} s^{1,7} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}}{7,08 \cdot 10^{-6} \tau_p^{0,75} S^{0,6} t^{0,06} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35} \delta^{0,35}} \times \frac{100 N_1 N_2 k_5}{tm} \left(\frac{PE}{2\pi r_2 \sigma_{T_2}} \right)^m (ck_3)^{1-m} \right]^{\frac{1}{v}} \quad (4)$$

где S_ϕ – значение подачи, являющиеся функцией толщины сечения среза [3]:

$$S_\phi = \frac{a_1^{0,125} b_1^{0,7} c\rho\theta\rho_1^{0,1} a^{0,43} \left(2,85 \sin^{0,115} \alpha v^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075} \right)}{v \lambda \sin^{0,165} \alpha} \left[\arccos \left(1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}} \right) + \frac{a_2 B^{-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho_1} \right] \cos \alpha \quad (5)$$

$$t \tau_p \left[1 + \frac{1}{B} + \text{tg}(\text{arctg} B - \gamma) \right]$$

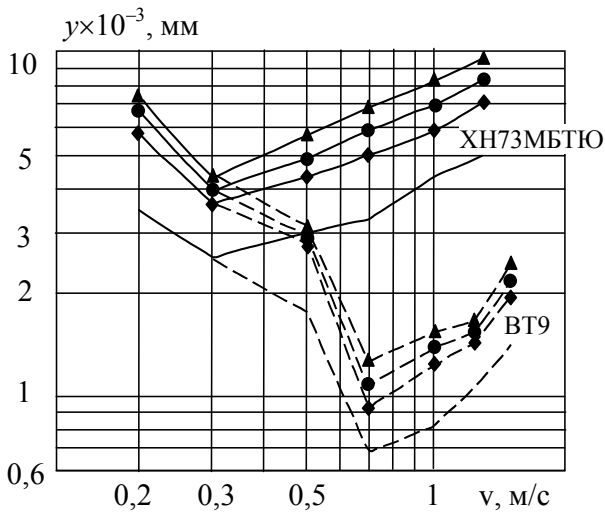
где b_1 – ширина сечения среза, м; a_1 – толщина сечения среза, м; b – суммарная длина рабочей части режущих кромок, м; δ – длина фаски износа по задней поверхности инструмента, м; ρ_1 – радиус округления режущей кромки резца, м; θ – максимальная температура в любом слое обрабатываемой поверхности, °С; B – безразмерный комплекс, характеризующий угол наклона условной плоскости сдвига; τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па; α и γ – задний и передний углы резца, градус; v – скорость резания, м/с; a – температуропроводность материала обрабатываемой детали, м²/с; λ , λ_p – теплопроводность обрабатываемого и инструментального материалов, Вт/м · К; β и ε – угол заострения и угол при вершине резца в плане, радиан; $c\rho$ – объемная теплоемкость материала обрабатываемой детали, Дж/м³ · К; a_2 , b_2 , x – коэффициенты, зависящие от сочетания свойств обрабатываемого и инструментального материалов (табл. 1).

1. Значения коэффициентов a_2 , b_2 , x

Коэффициенты	Значение B		
	$B \leq 5,0$	$5,0 < B \leq 0,9$	$B > 0,9$
a_2	0,557	0,44	0,294
b_2	0,078	0,45	3,4
x	0,75	0,53	0,445

Был выполнен расчет величины контактного сближения поверхностей деталей на примере материалов, имеющих широкое применение в авиадвигателестроении, и получены зависимости, характеризующие взаимосвязь контактного сближения поверхностей с условиями их обработки (рис. 2).

Для подтверждения полученных теоретических зависимостей были проведены эксперименты для трех видов обработки поверхностей: при обработке точением, торцевым фрезерованием и плоским шлифованием. Рассматривался контакт двух шероховатых поверхностей при произвольном расположении следов обработки. При проведении экспериментов контактные поверхности образцов обрабатывались с определенными режимами, после чего определялась величина контактного сближения обработанных поверхностей. Нагрузка на стык составила 1000 Н, что соответствует принятому при теоретических расчетах.

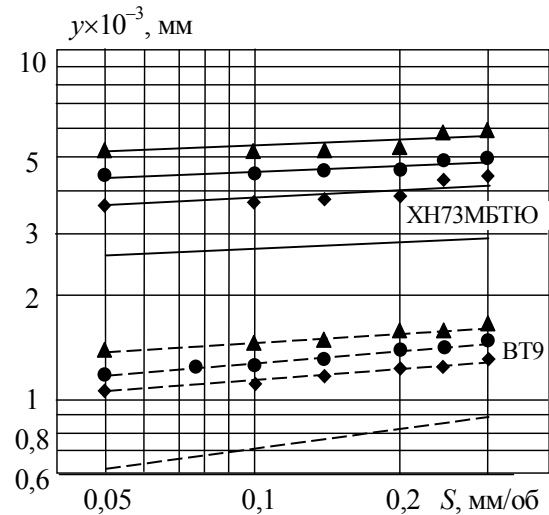


а)

Зависимость контактного сближения контактируемых поверхностей, обработанных точением, от скорости резания.

Для ВТ9 $S = 0,2$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$.

Для ХН73МБТЮ $S = 0,3$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$

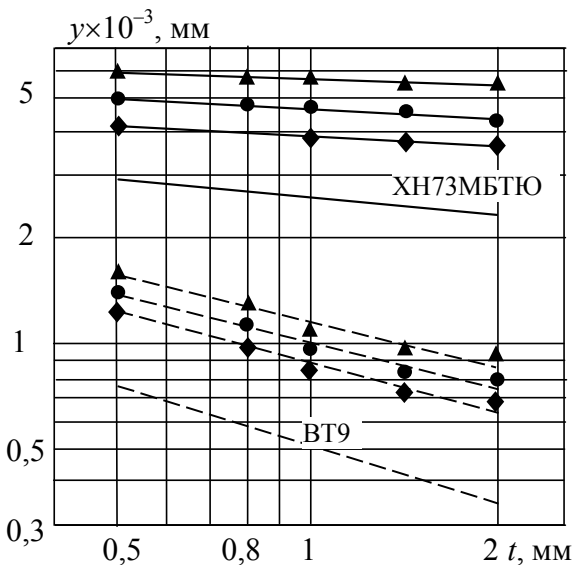


б)

Зависимость контактного сближения контактируемых поверхностей, обработанных точением, от подачи.

Для ВТ9 $v = 1$ м/с; $t = 0,5$ мм; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$.

Для ХН73МБТЮ $v = 0,5$ м/с; $t = 0,5$ мм; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$



в)

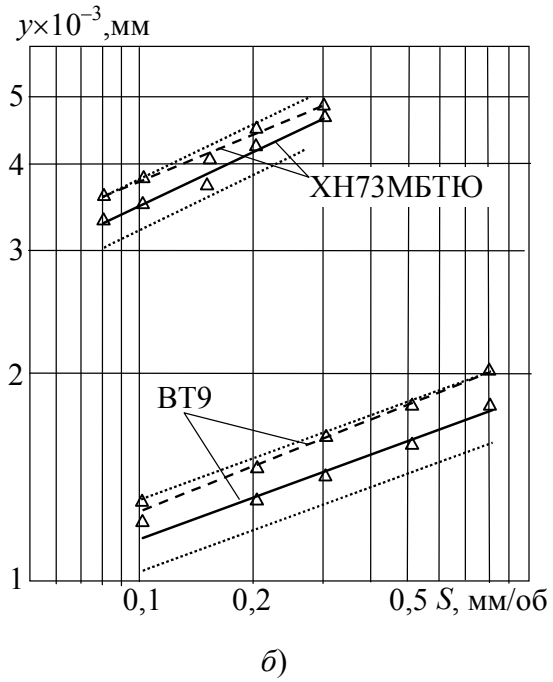
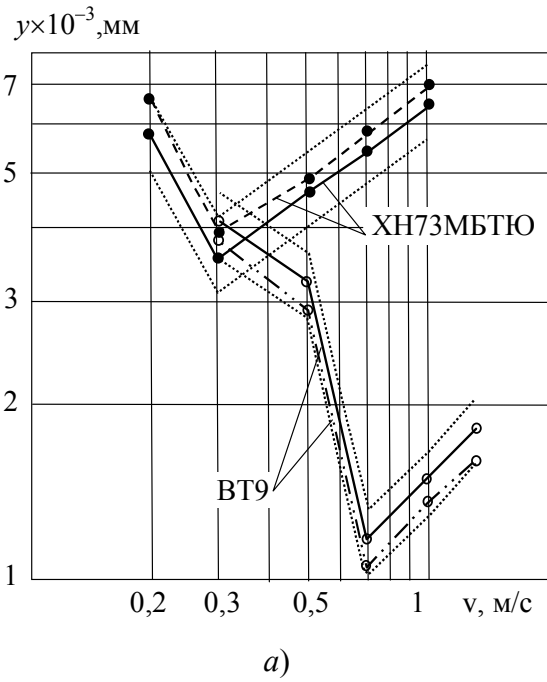
Зависимость контактного сближения контактируемых поверхностей, обработанных точением, от глубины резания $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$.

Для ВТ9 $v = 1$ м/с; $S = 0,2$ мм/об; $r = 1$ мм;

Для ХН73МБТЮ $v = 0,5$ м/с; $S = 0,3$ мм/об;

—▲—	Контакт двух шероховатых поверхностей при параллельном расположении следов обработки
—●—	Контакт двух шероховатых поверхностей при произвольном расположении следов обработки
—◆—	Контакт двух шероховатых поверхностей при перпендикулярном расположении следов обработки
—	Контакт шероховатой и гладкой поверхностей
—	Контактное сближение образцов из ХН73МБТЮ
- - - - -	Контактное сближение образцов из ВТ9

Рис. 2. Сближения контактируемых поверхностей от режимов резания



Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретического исследования

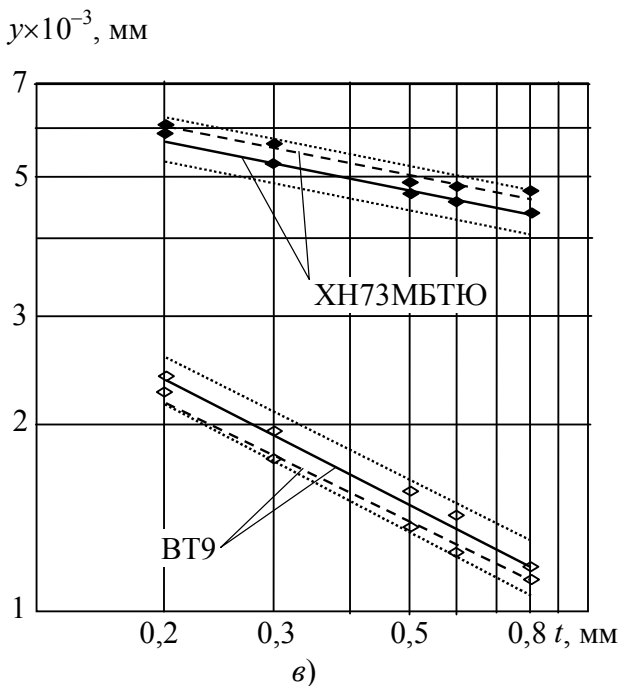
Для ВТ9 $S = 0,2$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$.

Для ХН73МБТЮ $S = 0,3$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$

Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретического исследования

Для ВТ9 $v = 1$ м/с; $t = 0,5$ мм; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$.

Для ХН73МБТЮ $v = 0,3$ м/с; $t = 0,5$ мм; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$



Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретического исследования

Для ВТ9 $v = 1$ м/с; $S = 0,2$ мм/об; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$.

Для ХН73МБТЮ $v = 1$ м/с; $S = 0,3$ мм/об; $r = 1$ мм; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$

- – результаты расчета;
- – результаты эксперимента;
- – доверительный интервал по результатам экспериментов

Рис. 3. Сопоставление значений сближения y теоретических и экспериментальных

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с матрицей планирования 2^3 . В качестве входных параметров использовались наиболее характерные для конкретного вида обработки режимы: для точения и торцевого фрезерования таковыми являются

подача на оборот и подача на зуб соответственно, скорость и глубина резания; для плоского шлифования – скорость детали, глубина резания и продольная подача.

По результатам экспериментов были получены эмпирические зависимости, при-

годные для инженерных расчетов. Например, при обработке контактирующих поверхностей точением контактное сближение определяется по зависимостям:

– для поверхности детали из сплава ХН73МБТЮ

$$y = \frac{0,57S^{0,22-0,9 \ln t} v^{0,47-0,9 \ln S}}{t^{1,19}}; \quad (6)$$

– для поверхности детали из сплава ВТ9

$$y = \frac{0,44S^{0,09} v^{1,06-1,14 \ln S}}{t^{0,3}}. \quad (7)$$

Аналогичные формулы получены при обработке контактирующих поверхностей фрезерованием и шлифованием [2].

На рис. 3 приведено графическое сопоставление результатов экспериментов с результатами теоретического исследования. Расхождение колеблется от 8 до 14 %, что допустимо для практического использования теоретических уравнений.

Разработан алгоритм расчетного определения режимов обработки контактирующих поверхностей, обеспечивающих заданную контактную жесткость стыка, представленный в виде блок-схемы на рис. 4.

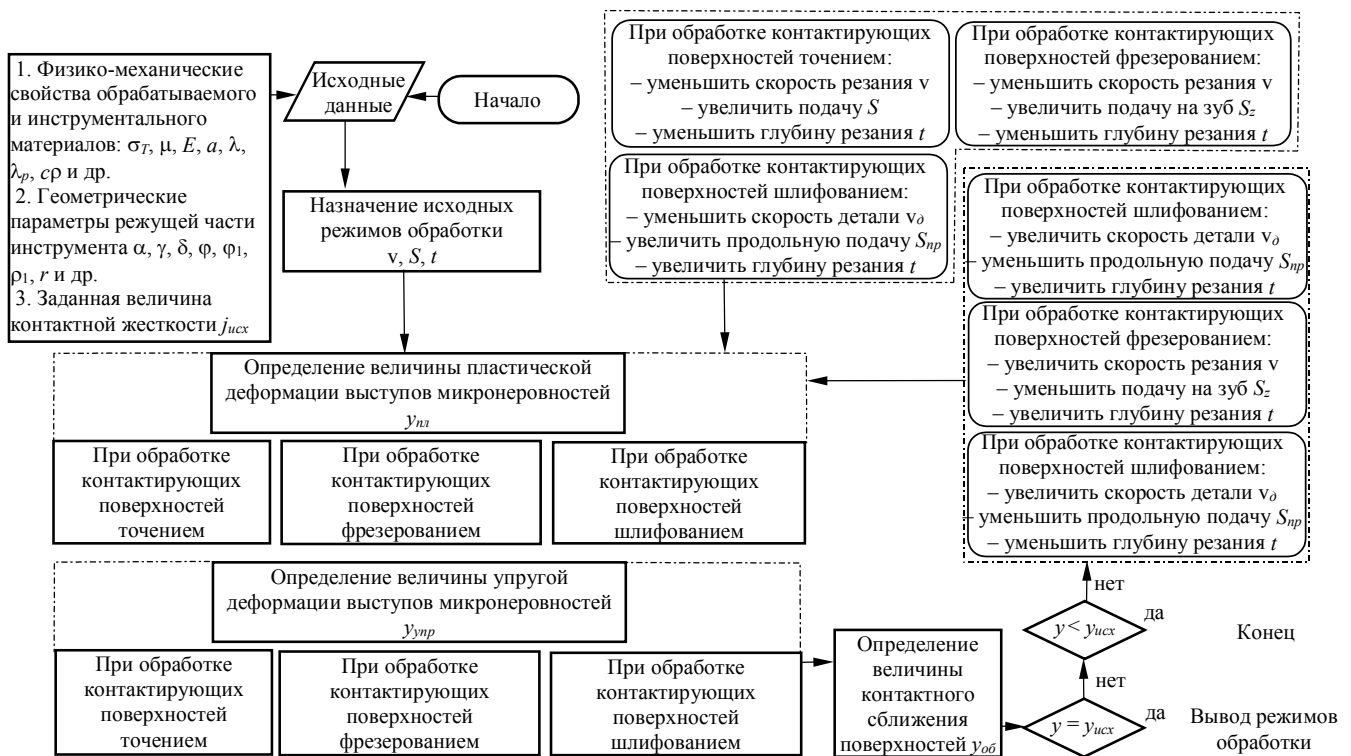


Рис. 4. Алгоритм расчетного определения режимов механической обработки с целью обеспечения заданной контактной жесткости

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М: Машиностроение, 2000.– 320 с.
2. Дмитриева, М.Н. Взаимосвязь контактной жесткости поверхностей, обработанных точением, с технологическими условиями их обработки// Справочник. Инженерный журнал. – 2008. –№8. – С.14-18
3. Безъязычный, В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения.– М.: Машиностроение, 2012.– 320 с.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Quality of Machinery Surface Layer*. М.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
2. Dmitrieva, M.N. Contact rigidity interconnection of surfaces turned with technological conditions of their machining // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2008. – No. 8. – pp. 14-18.
3. Bezyazychny, V.F. *Similarity Method in Engineering Technique*. – М.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 320.

Рецензент д.т.н. А.М. Тамаркин