

УДК 621.8

DOI: 10.12737/article\_5a8ef9cc2f18f8.10224814

**В.Ф. Безъязычный, д.т.н.**  
(ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный  
технический университет имени П. А. Соловьева», 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53)  
E-mail: technology@rsatu.ru

## **Расчетное прогнозирование влияния технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин**

*Предложены зависимости для назначения технологических условий обработки, обеспечивающих заданные параметры качества поверхностного слоя при механической обработке, и расчётного определения показателей эксплуатационных свойств изделий на основе известных параметров качества поверхностного слоя.*

**Ключевые слова:** режим резания; поверхностный слой; эксплуатационные свойства деталей.

**V.F. Beziyazychny, D. Eng.**  
(FSBEI HE "Soloviyov State Aircraft Technical University of Rybinsk",  
53, Pushkin Str., Rybinsk, 152934)

## **Design prediction of processing conditions impact upon machine performance properties**

*The paper reports theoretical dependences defining a correlation of technological processing conditions (cutting modes, tool tip geometry, properties of worked and tool materials), quality parameters of a surface layer (surface roughness, degree and depth of cold work, residual stresses) and performance properties of machinery (fatigue resistance, wear-resistance, contact rigidity, press-fit connection strength) which can be used in a team-work of a designer and a technologist at simultaneous technological pre-production.*

**Keywords:** cutting mode; surface layer; performance properties of parts.

### **Введение**

При изготовлении деталей машин, как правило, преобладают операции механической обработки, в частности, обработки лезвийным инструментом. Они составляют свыше 50 % общей трудоемкости изготовления особо ответственных изделий. Окончательная механическая размерная обработка деталей является перспективной для дальнейшего развития технологии машиностроения.

Для многих деталей современных машин и других изделий нередко требуется обеспечение именно заданной величины и глубины залегания остаточных напряжений, глубины наклепа, требуемой шероховатости поверхности,

так как бесспорным фактом является то, что в ряде случаев чрезмерное уменьшение шероховатости или увеличение степени и глубины наклепа поверхности может оказаться вредным и снижать срок работы изделия. Тем не менее, до настоящего времени недостаточно представлены обобщенные теоретические зависимости между параметрами поверхностного слоя, точности обработки, эксплуатационными свойствами деталей машин и параметрами процесса механической обработки.

Актуальность решения задачи по определению технологических условий обработки обусловлена также необходимостью достижения стабильности или изменяемости по желаемым законам характеристик поверхностного слоя,

когда отдельные поверхности ответственных деталей работают в различных температурно-силовых условиях (например, диски и лопатки ГТД и др.)

В этом случае требуется определить взаимосвязь технологических условий обработки с параметрами качества поверхностного слоя, точности обработки, свойствами обрабатываемого и инструментального материалов, жёсткостью технологической системы СПИЗ, размерами детали, что в функциональном виде может быть представлено следующим образом:

$$(t, S, v, r, \varphi) = f \left( \begin{matrix} \sigma_{ост}, h_n, Rz, \Delta\varepsilon, T_p, \sigma_B, \sigma_T, E_D, \tau_p, \\ \mu, \beta_D, \beta_p, \lambda_{ст}, a, \lambda_d, \lambda_p, (c\rho)_и, \\ \theta_{пл}, \gamma, \alpha, \varphi_1, \rho_1, j_{сист}, B_1, H_1, L, H \end{matrix} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_B, E_D$  – предел прочности и модуль упругости обрабатываемого материала, МПа;  $\beta_D, \beta_p$  – коэффициент температурного линейного расширения обрабатываемого и инструментального материалов,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона обрабатываемого материала;  $\lambda_D, \lambda_d, \lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности инструментального, обрабатываемого материала и материала стержня режущего инструмента, соответственно, Дж/(м·сек  $^\circ\text{C}$ );  $\alpha$  и  $\gamma$  – задний и передний углы режущего инструмента, (радиан);  $\varphi$  и  $\varphi_1$  – главный и вспомогательный углы режущего инструмента в плане, (радиан);  $r$  и  $\rho_1$  – радиус при вершине режущего инструмента

в плане и радиус округления режущей кромки, мм;  $j_{сист}$  – жёсткость технологической системы СПИЗ, Н/м;  $L$  и  $H$  – длина и высота детали, мм;  $B_1$  и  $H_1$  – высота и ширина сечения державки режущего инструмента, мм;  $v$  – скорость резания, м/с;  $\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала на разрыв, МПа;  $h_n$  – глубина наклёпа материала поверхностного слоя детали, мкм;  $Rz$  – высота неровностей профиля обрабатываемой поверхности, мкм;  $t$  и  $S$  – глубина резания и подача, мм;  $\Delta\Sigma$  – суммарная погрешность обработки, мкм;  $\sigma_{ост}$  – величина остаточных напряжений на заданном уровне от поверхности, МПа;  $a$  – температуропроводность обрабатываемого материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $(c\rho)_д$  и  $(c\rho)_и$  – удельная объёмная теплоёмкость обрабатываемого и инструментального материалов; Дж/( $\text{м}^3 \cdot \text{K}$ );  $T_p$  – стойкость режущего инструмента, мин.

### Содержание исследования

Для реализации функциональной зависимости (1) необходимо иметь расчётные уравнения для определения параметров качества поверхностного слоя (остаточных напряжений в поверхностном слое, степени и глубины наклёпа и параметров шероховатости поверхности, погрешности обработки). Такие зависимости приведены в работах [1, 2]. Так, например, при  $r \left[ 1 - \sqrt{1 - (S/2r)^2} \right] \leq t \leq r(1 - \cos \varphi)$  высота неровностей на обработанной поверхности определяется по следующей зависимости:

$$Rz = \frac{1}{8r} \left\{ \frac{1}{\tau_p \left[ 1 + \frac{1}{B} + \text{tg}(\arctg B - \gamma) \right]} \left[ \frac{a_1^{0,125} b_1^{0,7} c\rho \theta \rho_1^{0,1} a^{0,43}}{v \lambda \sin^{0,165} \alpha} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[ 2,85 \sin^{0,115} \alpha v^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda_p \beta \varepsilon a_1^{0,57} \rho_1^{0,075} \right] - \right. \right. \\ \left. \left. - 0,5 \tau_p \rho_1 b \left( \frac{\arccos \left( 1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin \gamma)^{-x}} \right) +}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho_1} \right) \times \cos \alpha \right] \right\}, \text{ мм}$$

где  $B = 1/\text{tg} \beta$  – безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий степень пластических деформаций материала снимаемого припуска и материала поверхностного слоя обрабатываемой детали;  $\beta_1$  – угол наклона условной плоскости сдвига, градус;  $a_1$  и  $b_1$  – толщина и ширина среза, м;  $c\rho$  – удельная объёмная теплоёмкость обрабатываемого материала, Дж/( $\text{м}^3 \cdot \text{K}$ );  $\theta$  – температура в зоне резания,  $^\circ\text{C}$ ;  $\delta$  – высота площади износа режущей части инструмента по задней поверхности, м;  $x, a_2, b_2$  – величины, зависящие от сочетания свойств обрабатываемого и инструментального материалов [2].

Глубина наклёпа обработанной поверхности при точении жаропрочных сталей и сплавов рассчитывается по формуле

$$h_H = \frac{2,36 \cdot 10^{-8} \tau_p^{0,75} S^{0,6} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35}}{\nu^{0,28} r^{3,5} S^{1,7} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}}, \text{ м,}$$

где  $\tau_p$ , Па;  $S$ , м/об;  $t$ , м;  $\rho_1$ , м;  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\varphi$  – градус;  $r$ , м.

Формула справедлива для следующих условий обработки:  $t = 0,5 \dots 2$  мм;  $S = 0,05 \dots 0,4$  мм/об;  $\nu = 0,1 \dots 0,8$  м/с;  $r = 0,5 \dots 2$  мм;  $\rho_1 = 20 \dots 100$  мкм;  $\varphi = 15 \dots 90^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15^\circ$ ;  $\alpha = 5 \dots 20^\circ$ ;  $\gamma = 5 \dots 20^\circ$ , при наличии фаски износа резца  $\delta = 0,1 \dots 1,0$  мм.

С использованием таких зависимостей может решаться задача по определению технологических условий обработки, обеспечиваю-

щих заданные значения остаточных напряжений, глубины наклёпа, шероховатости поверхности и точности обработки, а также могут быть рассчитаны различные показатели, характеризующие качество поверхностного слоя обработанной детали, такие как шероховатость поверхности, глубина и степень наклёпа материала поверхностного слоя, распределение остаточных напряжений, показатели, характеризующие погрешность обработки, возникающей при резании и вызванной влиянием силовых и температурных деформаций системы СПИЗ, размерным износом режущего инструмента.

Для реализации изложенного выше разработана система расчета параметров процесса резания, алгоритм функционирования которой представлен на блок-схеме (рис. 1) [3].

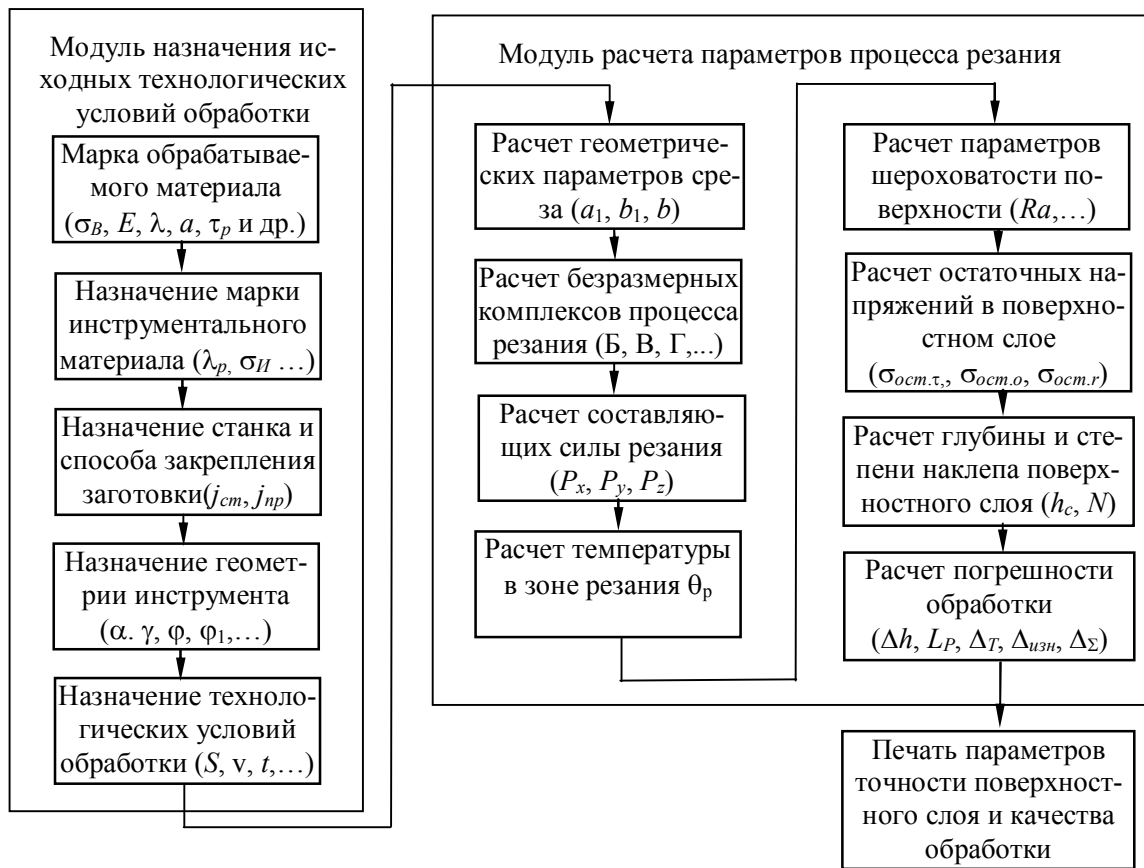


Рис. 1. Система расчета параметров качества поверхностного слоя и точности обработки деталей

Разработана также многоуровневая система расчета режимов резания, обеспечивающих заданные показатели точности обработки и качества поверхностного слоя деталей, для возможных сочетаний задаваемых параметров точности обработки и качества поверхностного слоя при различных сочетаниях искомых технологических условий обработки и огра-

ничениях, накладываемых на процесс оптимизационного поиска решения. Анализ результатов расчета показал, что использование многоуровневого алгоритма в системе обеспечивает значительно лучшее приближение получаемых показателей точности обработки и качества поверхностного слоя к их заданным величинам.

В табл. 1 представлены результаты расчета технологических условий обработки (режимов резания и геометрии инструмента), обеспечивающих заданные показатели точности обработки и качества поверхностного слоя (суммарную погрешность  $\Delta_{\Sigma}$ , шероховатость  $Ra$ , глубину наклепа  $h_c$  и величину остаточных

напряжений  $\sigma_{ост}$  на глубине 25 мкм в различных сочетаниях, полученные с использованием многоуровневой системы оптимизации (геометрические параметры инструмента на 1-м уровне оптимизации:  $r = 1,0$  мм;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15^\circ$ ;  $\alpha = 10^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\rho = 30$  мкм).

**1. Пример расчета технологических условий токарной обработки, обеспечивающих заданный комплекс параметров точности обработки и качества поверхностного слоя деталей, полученных с использованием многоуровневой системы расчета режимов резания**

Обрабатываемый и инструментальный материалы	Заданные параметры точности обработки и качества поверхностного слоя				Число уровней оптимизации $U$	Рассчитанные технологические условия обработки						Полученные параметры точности обработки и качества поверхностного слоя			
	$\Delta_{\Sigma}$ , мкм	$Ra$ , мкм	$h_c$ , мкм	$\sigma_{ост}$ , МПа		$S$ , мм/об	$v$ , м/с	$t$ , мм	$r$ , мм	$\varphi$ , град	$\varphi_1$ , град	$\Delta_{\Sigma}$ , мкм	$Ra$ , мкм	$h_c$ , мкм	$\sigma_{ост}$ , МПа
13X12HВМ – Т15К6	0 – 30	1,25	70	-180	2	0,25	1,80	0,50	2,67	45	15	-11,8	1,26	70	-167
	0 – 30	0,63	120	-200	3	0,16	1,40	0,84	2,33	40,8	15	-11,3	0,62	100	-183
	0 – 74	1,6	100	-140	2	0,36	1,28	1,06	4,12	45	15	-38,2	1,23	120	-211
	0 – 19	0,63	40	-80	3	0,10	2,27	0,89	0,86	44,5	15	-6,7	0,61	39	-67
ХН73МБТ Ю– ВК6М	0 – 19	1,0	100	-150	3	0,20	0,89	0,47	1,85	30	15	-10,0	0,84	97	-183
	0 – 30	1,25	120	-400	4	0,20	0,79	0,47	1,25	44,7	17,1	-15,6	1,32	113	-391
	0 – 19	0,63	70	-180	2	0,09	1,12	0,90	0,60	45	15	-8,5	0,63	70	-179
	0 – 30	1,0	100	-240	3	0,16	0,80	0,92	1,02	40,1	15	-11,3	0,98	100	-240
ВТ3-1 – ВК8	0 – 30	0,63	60	-100	4	0,11	0,55	0,50	0,72	43,2	16,7	-7,3	0,62	57	-107
	0 – 74	1,6	80	-140	3	0,14	0,31	0,67	0,50	40,4	15	-20,9	1,60	80	-144
	0 – 19	1,6	75	-150	2	0,13	0,39	1,09	0,39	45	15	-13,6	1,59	75	-152
	0 – 46	2,0	80	-120	3	0,16	0,38	1,07	0,47	36,6	15	-17,6	1,98	80	-129

Параметры качества поверхностного слоя представляют практический интерес с точки зрения обеспечения эксплуатационных свойств изделий, таких как усталостная прочность, износостойкость, контактная жесткость, прочность прессовых соединений и др.

В качестве характеристик сопротивления усталости материала детали использованы критерий поврежденности материала, который определяется по изменению модуля упругости  $E_{обн}/E_{исх}$ , где  $E_{обн}$  и  $E_{исх}$  – модули упругости материала поверхностного слоя детали после обработки и в исходном состоянии.

В результате исследований д.т.н. В.Ф. Безъязычного совместно с кандидатами технических наук Б.М. Драпкиным, М.В. Тимофеевым, Н.В. Осадчим, Р.В. Любимовым, А.Л. Водолагиным получена зависимость [4]:

$$\sigma_{-1} = \frac{C\sigma_{-исх}}{E_{исх} \left( \frac{2,85E^{0,1}}{B^{0,43} \sin^{0,05} \alpha} + 0,6625 \frac{\Gamma D^{0,3} E^{0,175}}{B \sin^{0,165} \alpha} \right)^K}, \quad (2)$$

где  $B, V, \Gamma, D, E$  – безразмерные комплексы процесса резания;  $C$  и  $K$  – величины, зависящие от свойств обрабатываемого материала;  $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_{исх}$  – предел выносливости материала детали после обработки и в исходном состоянии (до обработки).

Указанные комплексы определяются по приведенным ниже формулам [5].

$B = v/a_1/a$  – безразмерный комплекс, процесса резания, характеризующий степень влияния режимных условий процесса резания по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материалов, где  $v$  – скорость резания, м/с;  $a_1$  – толщина среза, м;  $a$  – теплопроводность обрабатываемого ма-

териала, м<sup>2</sup>/с;  $\Gamma = \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \beta \epsilon$  – безразмерный ком-

плекс процесса резания, отражающий влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов;  $\lambda$  и  $\lambda_p$  – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, Дж/м·°С;  $\beta$  и

$\varepsilon$  – угол заострения и угол при вершине резца в плане, радиан;  $D = a_1/b_1$  — безразмерный комплекс, характеризующий геометрию сечения среза, м;  $b_1$  – ширина среза;  $E = \rho/a_1$  – безразмерный комплекс, характеризующий влияние на процесс резания геометрической формы режущей кромки резца;  $\rho_1$  – радиус округления режущей кромки резца, м.

Зависимость предела выносливости материала детали от комплекса параметров качества поверхностного слоя определяется по следующим формулам [2]:

– при точении

$$\sigma_{-1} = m \cdot (\sigma_B / \sigma_{BЭ})^K \cdot Rz^{-0,05} \cdot h_c^{0,147} \cdot \sigma_{ост}^{-0,09},$$

– при фрезеровании

$$\sigma_{-1} = n \cdot (\sigma_B / \sigma_{BЭ})^L \cdot Rz^{-0,067} \cdot h_c^{0,139} \cdot \sigma_{ост}^{-0,063},$$

где  $m, n, K, L$  – величины, зависящие от вида обработки. При точении  $m = 420$  и  $K = 0,73$ ; при фрезеровании  $n = 224$  и  $L = 0,83$ ;

$\sigma_B/\sigma_{BЭ}$  – отношение предела прочности обрабатываемого материала к пределу прочности электротехнической стали.

– при шлифовании плоских поверхностей периферией круга:

• жаропрочных никелевых сплавов

$$\sigma_{-1} = 1151 \cdot Ra^{-0,2153} \cdot \sigma_{ост\ max}^{-0,095} \cdot h_H^{0,164}$$

• титановых сплавов

$$\sigma_{-1} = 1465 \cdot Ra^{-0,4042} \cdot \sigma_{ост\ max}^{-0,095} \cdot h_H^{0,164}$$

• конструкционных сталей

$$\sigma_{-1} = 653 \cdot Ra^{-0,0881} \cdot \sigma_{ост\ max}^{-0,095} \cdot h_H^{0,164}$$

При обработке точением с оптимальной скоростью резания  $\theta$ , соответствующей минимуму износа режущего инструмента и минимальной высоте шероховатости на обработанной поверхности, интенсивность изнашивания обрабатываемой поверхности  $J_h$  определяется по следующей зависимости [2]:

$$J_h = 0,0316 \cdot 3,7^{v+1} \alpha_2^{0,5} b \times \left\{ \frac{1}{8r} \times \left[ \frac{0,6625 a_1^{0,125} c_p \theta_0 \times \left( 4,3 \sin^{0,115} \alpha v^{0,57} a_1^{0,345} \lambda \left( \frac{t}{m} \right)^{0,3} + \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075} \right)}{\tau_p a^{-0,43} \sin^{0,05} \alpha v_0 t^{0,25} c_0 m^{0,74-n_0} \times b^{0,04} \rho_1^{n_0-0,1} (1 - 0,45 \sin \gamma)} \right]^{0,719-0,2(v+1)+5,2t_y} \right\} \times \left( \frac{34,64 \sigma_0}{k f_m} \right)^{t_y} \left( \frac{N}{A_c} \right)^{-0,323(v+1)+0,161-0,16t_y} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,161+0,84t_y-0,323(v+1)}$$

где  $a_1$  – толщина среза, м;  $b_p$  – длина контакта режущих кромок инструмента с обрабатываемым материалом, м;  $\beta$  и  $\varepsilon$  – угол заострения и угол при вершине резца в плане, радиан;  $v_0$  – оптимальная скорость резания, м/с;  $C_0$  – величина, зависящая от предела прочности обрабатываемого материала;  $m$  – величина, зависящая от соотношения подачи, глубины резания и радиуса при вершине резца в плане;  $v$  и  $b$  – параметры кривой аппроксимации опорной поверхности;  $\alpha$  – величина, зависящая от вида контакта поверхностей;  $\sigma_0$  – действующее напряжение, Па;  $k$  – коэффициент, характеризующий напряженное состояние на контакте;  $f_m$  – молекулярная составляющая коэффициента трения;  $N$  – сила, сжимающая контактируемые тела, Н;  $A_c$  – номинальная площадь соприкасающихся тел, мм<sup>2</sup>;  $t_y$  – параметр кривой функциональной усталости.

Таким образом, интенсивность изнашивания поверхности является функцией условий ее обработки, а также свойств материала детали.

Одним из видов соединений деталей в узлах являются соединения с натягом, которые могут выдержать в процессе эксплуатации изделия значительные нагрузки. Такие соединения имеют широкое применение в различных узлах и механизмах. Обеспечение требуемых прочностных характеристик соединений с на-

тягом зависит не только от выбора посадки в соединении, физико-механических свойств материалов деталей, их геометрических размеров, вида сборки, но и от качества поверхностного слоя сопрягаемых поверхностей деталей, в частности от шероховатости поверхности, степени и глубины наклепа поверхностного слоя. Последние зависят от технологических условий их обработки: режима резания, геометрии режущего инструмента и др.

Основными критериями, характеризующими прочность посадки, являются осевая сила  $P_0$  и момент  $M_{кр}$ , выдерживаемые соедине-

ниями, которые определяются по формулам [6]:  
– при изготовлении соединяемых деталей из различных материалов

$$P_0 = \pi \cdot l \cdot f_{ос} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\frac{C_1 W_1}{2(1 + \mu_1) \cdot \left(\frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1}\right)^2} + \frac{C_2 W_2}{2(1 + \mu_2) \cdot \left(\frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2}\right)^2}},$$

$$M_{кр} = \pi \cdot d \cdot l \cdot f_{кр} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\frac{C_1 W_1}{(1 + \mu_1) \cdot \left(\frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1}\right)^2} + \frac{C_2 W_2}{(1 + \mu_2) \cdot \left(\frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2}\right)^2}};$$

– при изготовлении соединяемых деталей из одного материала

$$P_0 = \pi \cdot l \cdot f_{ос} \cdot \frac{2(1 + \mu) \cdot \sigma_{0,2}^2 \cdot \delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\alpha^2 \cdot \frac{C_1 W_1}{N_1^2} + \frac{C_2 W_2}{N_2^2}},$$

$$M_{кр} = \pi \cdot d \cdot l \cdot f_{кр} \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot \sigma_{0,2}^2 \cdot \delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\alpha^2 \cdot \frac{C_1 W_1}{N_1^2} + \frac{C_2 W_2}{N_2^2}},$$

где  $d$  – номинальный диаметр соединения;  $l$  – длина контакта сопрягаемых поверхностей;  $f_{ос}$  и  $f_{кр}$  – коэффициенты трения при осевом сдвиге и при кручении;  $C_1$  и  $C_2$  – безразмерные коэффициенты, зависящие от свойств материалов сопрягаемых деталей.

Значения  $C_1$  и  $C_2$  определяют по формулам [7]:

$$C_1 = \frac{d^2 + d_0^2}{d^2 - d_0^2} - \mu_1; \quad C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2,$$

где  $d_0$  – диаметр отверстия пустотелого вала, мм (при сплошном вале  $d_0 = 0$  и  $C_1 = 1 - \mu$ );  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей;  $D$  – диаметр наружной поверхности втулки, мм;  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости материалов охватываемой и охватывающей поверхностей, соответственно, МПа;  $\delta_n$  – номинальный натяг, выбираемый из таблицы для конкретного соединения или задаваемый на чертеже изделия (определяется из условий заданной посадки сопряжения);  $Rz_1$  и  $Rz_2$  – высота неровностей сопрягаемых поверхностей;  $N$  – степень наклепа обработанной поверхности, определяемая по формуле

$$N = \frac{\alpha \sqrt{WG}}{\sigma_{0,2}},$$

где  $\alpha$  – параметр междислокационного взаимодействия в материале детали; значение  $\alpha$  следует определять по табл. 2;  $W$  – удельная накопленная энергия деформации, Дж/мм<sup>3</sup>;  $G$  – модуль сдвига материала детали, МПа;  $\sigma_{0,2}$  – условный предел текучести материала детали, МПа. Значение модуля сдвига материала, определяют по известной зависимости

$$G = \frac{E}{2(1 - \mu)},$$

где  $E$  – модуль упругости мате-

риала детали, МПа;  $W_1$  и  $W_2, N_1$  и  $N_2, \alpha_1$  и  $\alpha_2, \sigma'_{0,2}$  и  $\sigma''_{0,2}$  – значения накопленной энергии, степени наклепа, параметра междислокационного воздействия и условного предела текучести материалов первой и второй сопрягаемых деталей.

Формула для расчета скрытой энергии деформации  $W$ , Дж/м<sup>3</sup>, при токарной обработке в поверхностном слое материалов, в зависимости от параметров процесса резания, имеет следующий вид [1]:

$$W = 2 \cdot 10^{-7} \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{2,1698} \cdot t^{0,2396} \cdot v^{-0,5612} \cdot S^{9,6588} \cdot \varphi^{0,7009} \cdot \alpha^{-0,1857} \cdot \gamma^{-0,6240} \cdot \rho_1^{0,2879} \cdot r^{-0,3},$$

где  $\delta$  – относительное удлинение материала обрабатываемой детали;  $\sigma_B$  – предел прочности материала обрабатываемой детали, Па;  $t$  – глубина резания, мм;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $\varphi$  – главный угол резца в плане, градус;  $\alpha$  – задний угол резца, градус;  $\gamma$  – передний угол резца, градус;  $r$  – радиус при вершине резца в плане, мм.

2. Физико-механические свойства металлов и сплавов и рассчитанный для них коэффициент  $\alpha$

Материал	Предел прочности материала $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести материала $\sigma_T$ , МПа	Рассчитанный коэффициент $\alpha$
Углеродистые стали			
08	330	200	0,20
10,10кп	340	210	0,20
15	380	225	0,22
20,20кп	410	250	0,22
25	530	275	0,26
30	540	320	0,26
35	520	310	0,26
40	570	320	0,26
45	300	340	0,28
50	630	350	0,28
55	640	360	0,28
Легированные стали и сплавы			
30Г	550	290	0,28
50Г	650	370	0,28
60Г	700	380	0,30
35Г2	630	370	0,28
30Х	900	700	0,21
50Х	1100	900	0,20
20ХГ	800	600	0,23
15Х	750	560	0,23
40Х	1000	800	0,22
50ХФА	1250	1080	0,20
X18H9T	600	280	0,30
H23H18	920	630	0,28
12X18H9T	620	320	0,30
Жаропрочные сплавы			
XH77TIOP	1020	660	0,34
XH70BMTIO	1140	750	0,34
XH73MBTIO	1200	800	0,34
XH50BMTIOP	1220	785	0,35
XH70MBF	800	370	0,39
XH62BMKIO	950	500	0,39

При обработке шлифованием зависимости для расчета удельной скрытой энергии деформации  $W$ , Дж/м<sup>3</sup>, представлены следующими выражениями:

сталь 15: 
$$W = 0,0313 \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{-1,9156} \cdot t^{1,7196} \cdot v_{кр}^{-0,7705} \cdot S_{np}^{-0,3938},$$

сталь 45: 
$$W = 0,0313 \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{-1,9156} \cdot t^{2,883} \cdot v_{кр}^{-0,5097} \cdot S_{np}^{-0,6395},$$

XH77TIOP: 
$$W = 0,0313 \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{-1,9156} \cdot t^{2,1489} \cdot v_{кр}^{-0,6458} \cdot S_{np}^{-0,5269},$$

BT3-1: 
$$W = 0,0313 \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot \delta} \right)^{-1,9156} \cdot t^{3,842} \cdot v_{кр}^{-0,3397} \cdot S_{np}^{-2,2872},$$

где  $S_{np}$  – продольная подача стола, м/с;  $v_{кр}$  – скорость вращения круга, м/с;  $t$  – глубина резания, м.

Распределение накопленной энергии деформации по глубине поверхностного слоя можно установить по выражению, полученному М.А. Прокофьевым [4]:

$$W_h = W \cdot \exp(-kh),$$

где  $W_h$  – скрытая энергия деформации на глубине поверхностного слоя  $h$ , Дж/м<sup>3</sup>;

$W$  – удельная накопленная энергия деформации на поверхности, Дж/м<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент, характеризующий эффективность изменения скрытой энергии деформации по глубине поверхностного слоя.

При выполнении расчетов по определению накопленной энергии деформации в поверхностном слое следует учитывать следующее. Исследованиями установлено, что модуль упругости материала детали вследствие воздействия на него в процессе обработки теплового и силового факторов изменяется [2]. При механической обработке модуль упругости материала поверхностного слоя детали  $E_{обр}$  определяется следующей зависимостью:

$$E_{обр} = C \cdot A^K,$$

где  $C$  и  $K$  – величины, зависящие от материала обрабатываемой детали и определяемые по табл. 3.

### 3. Коэффициенты для расчёта модуля упругости в зависимости от группы материала

Группа обрабатываемых материалов	Вид обработки и значения коэффициентов			
	точение		фрезерование	
	$C \cdot 10^{-3}$	$K$	$C \cdot 10^{-3}$	$K$
Никелевые жаропрочные сплавы	165	-0,08	182	-0,08
Конструкционные стали	166	-0,10	197	-0,07
Титановые сплавы	88	-0,11	100	-0,15

### Заключение

Предложенные в данном исследовании расчетные зависимости позволяют на стадии конструкторско-технологической подготовки производства определять выбор методов обработки и технологические условия их выполнения с целью прогнозирования эксплуатационных свойств деталей машин.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Инженерия** поверхности деталей / Колл. авт. под ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. **Безъязычный, В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.
3. **Безъязычный, В.Ф., Киселев, Э. В.** Автоматизация расчета технологических условий обработки, обеспечивающих комплекс заданных параметров точности и качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей // Справочник. Инженерный журнал. (Приложение). 2008. № 8. – С. 13–23.

4. **Драпкин, Б.М., Кононенко, В.К., Безъязычный, В.Ф.** Свойства сплавов в экстремальном состоянии. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.

5. **Силин, С.С.** Метод подобия при резании материалов. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

6. **Безъязычный, В.Ф., Федулов, В.М., Чугуевская, С.В.** К вопросу расчетного определения прочностных характеристик сборочных соединений с натягом с учетом шероховатости поверхности собираемых деталей и степени их наклепа // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. № 4. – С. 21 – 26.

7. **Сборка** и монтаж изделий машиностроения: справочник. В 2-х т. / Ред. совет: В.С. Корсаков (предс.) и др. / под ред. В.С. Корсакова, В. К. Замятина, – М.: Машиностроение, 1983. 480 с.

8. **Новиков, М.П.** Основы технологии сборки машин и механизмов. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.

9. **Прокофьев, М.А.** Технологическое обеспечение параметров наклепа поверхностного слоя деталей при шлифовании на основе определения скрытой энергии деформации. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, – 2006.

### REFERENCES

1. *Parts Surface Engineering* / author group under the editorship of A.G. Syslov. – М.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.

2. **Beziyazychny, V.F.** *Similarity Method in Mechanical Engineering*. – М.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 320.

3. **Beziyazychny, V.F., Kiselyov, E.V.** Calculation automation of processing technological conditions ensuring complex of specified parameters of surface layer accuracy and quality and performance properties of parts // *Reference Book. Engineering Journal. (Appendix)*. 2008. No.8. – pp. 13-23.

4. **Drapkin, B.M., Kononenko, V.K., Beziyazychny, V.F.** *Alloy Properties at Extreme State*. – Mechanical Engineering, 2004. – pp. 256.

5. **Silin, S.S.** *Similarity Method at Material Cutting*. – М.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 152.

6. **Beziyazychny, V.F., Fedulov, V.M., Chuguevskaya, S.V.** To design definition problem of strength characteristics of assembly units with tightness taking into account surface roughness of parts assembled and degree of their cold work // *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Engineering*. – 2015. No.4. – pp. 21-26.

7. *Assembly and Mounting of Engineering Products*: reference book. In 2 Vol. / Editorial Board: V.S. Korsakov (Chairman) et al. / under the editorship of V.S. Korsakov, V.K. Zamyatin, - М.: Mechanical Engineering. 1983. pp. 480.

8. **Novikov, M.P.** *Fundamentals of Assembly Technology of Machines and Mechanisms*. - 5<sup>th</sup> edition revised. – М.: Mechanical Engineering, 1980. – pp. 592.

9. **Prokofiev, M.A.** *Technological Support of Cold Work Parameters of Surface Layer in Parts at Grinding on Basis of Latent Deformation Energy Definition*. Self-Abstract of the Thesis for the Can. Eng. degree. Rybinsk, - 2006.

Рецензент д.т.н. Ю.С. Степанов