

## **Обеспечение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники при технологической подготовке производства**

*Обоснована необходимость и целесообразность использования при технологической подготовке производства параллельной инженерной разработки конструкции и технологии изготовления изделия. Приведены направления параллельной инженерной разработки. Представлены расчетные зависимости для прогнозирования эксплуатационных свойств деталей авиационных двигателей, необходимые при совместной работе конструктора и технолога при параллельной конструкторско-технологической подготовке производства.*

**Ключевые слова:** технологическая подготовка производства; параллельная инженерная подготовка; эксплуатационные свойства детали; поверхностный слой; точность обработки.

**V.F. Beziyazhnyy, Dr. Sc. Tech.**

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

## **Quality assurance of products of mechanical engineering and aerospace engineering at technological pre-production**

*The necessity and purposefulness in the use of parallel engineering design development and manufacturing technology of products in the course of technological pre-production. There are shown directions for parallel engineering development. The calculated dependences for forecasting the operation properties of aircraft engine parts are presented which are necessary at the joint work of a designer and technologist in the course of parallel design-technological pre-production.*

**Keywords:** technological pre-production; simultaneous engineering preparation; operation properties of parts; surface layer; machining accuracy.

### **Введение**

В настоящее время для успешной организации параллельной инженерной работы конструктора и технолога имеются как организационные, так и технические, в том числе технологические, препятствия. Только интегрированное использование организационных методов параллельной инженерной разработки в совокупности с использованием технологических методов обеспечения эксплуатационных свойств деталей изделий должно существенно повысить уровень технологичности вновь проектируемых изделий машиностроения и

объединить процессы разработки конструкторской и технологической документации в единый взаимнеобходимый и взаимодостаточный процесс.

Параллельная инженерная разработка имеет ряд конкурентных преимуществ по сравнению с последовательной:

- позволяет выполнять проектирование на заданную себестоимость изготовления изделия;
- сокращает время выхода продукции на рынок;
- обеспечивает улучшение качества выпускаемой продукции;
- уменьшает затраты на разработку доку-

ментации и технологическую подготовку производства.

Опыт параллельно-последовательной работы применяется на многих зарубежных фирмах. Например, в авиадвигателестроении данный подход применяется на фирме Snecma (Франция) и др.

В России опыт параллельной инженерной разработки в настоящее время на промышленных предприятиях практически не применяется. Кроме организационного подхода требуется понимание и алгоритмизация технического процесса конструирования посредством выбора технологических процессов обработки деталей. Именно поэтому требуется разработка теоретических положений по этому направлению работы. Остановимся подробнее на технологических препятствиях и возможностях.

Современные правила разработки конструкторской документации подразделяются на следующие стадии:

- разработка проектной конструкторской документации;
- разработка рабочей конструкторской документации.

В основе технологической подготовки производства заложена модель последовательного выполнения этапов освоения изготовления по выпускаемой конструкторской документации: сначала проектной, затем серийной. Таким образом, в настоящее время реализуется последовательный процесс инженерной разработки, при котором вначале разрабатывается проектная конструкторская документация, затем производится подготовка производства к выпуску опытных образцов изделия. Опытные образцы испытываются, и принимается решение по выпуску серийной конструкторской документации, после выпуска которой проводится технологическая подготовка производства. Все требования к разработке конструкторской и технологической документации определяются соответствующими стандартами.

К сожалению это очень длительный цикл производства продукции. В связи с этим в настоящее время за рубежом достаточно широко используется параллельная инженерная разработка, которую следует рассматривать как организационно-технический подход, обеспечивающий интегрированное и, в значительной степени, одновременное проектирование как самих изделий, так и процессов их производства. Основателем данного метода является советский конструктор В.Г. Грабин. Применение этого метода позволило в сжатые сроки в период Великой Отечественной войны наладить выпуск артиллерийских систем. Основа этого подхода заключается в командной работе служб предприятия на всех этапах раз-

работки изделия, начиная с формирования концепции его разработки.

*Технологические направления параллельной инженерной работы* следующие.

– Анализ технологичности изделия и его деталей сборочных единиц с позиции изготовления и существующего на конкретном предприятии оборудования.

– Расчетное определение технологических условий обработки (режимов резания в сочетании с геометрией инструмента) с обеспечением заданной точности обработки и качества поверхностного слоя обработанной детали.

– Расчетное прогнозирование эксплуатационных свойств детали при назначенных методе обработки и технологических условиях обработки:

- а) усталостной прочности материала детали;
- б) износостойкости обработанной поверхности;
- в) контактной жесткости контактируемых поверхностей;
- г) прочности прессовых соединений и др.

– Технологическое обеспечение заданной точности изделия по массе (что характерно для авиации, космоса, судостроения и других отраслей машиностроения).

### Содержание исследования

Для многих деталей современных машин, в том числе авиационных двигателей, нередко требуется обеспечение именно заданной величины и глубины залегания остаточных напряжений, глубины и степени наклепа поверхностного слоя, 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 качества поверхностного слоя, точности обработки, эксплуатационными свойствами деталей машин и параметрами процесса механической обработки.

Актуальность решения задачи по определению технологических условий обработки обусловлена необходимостью достижения стабильности или изменяемости по желаемым законам характеристик качества поверхностного слоя, когда отдельные поверхности ответственных деталей работают в различных температурно-силовых условиях (например, диски, лопатки ГТД и др.) В этом случае требуется определить взаимосвязь технологических условий обработки с параметрами каче-

ства поверхностного слоя, точности обработки, свойствами обрабатываемого и инструментального материалов, жёсткостью технологической системы СПИЗ, размерами детали, что в функциональном виде может быть представлено следующим образом:

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

где  $\sigma_B$  и  $E_D$  – предел прочности на разрыв и модуль упругости обрабатываемого материала, МПа;  $\beta_D$  и  $\beta_p$  – коэффициент температурного расширения обрабатываемого и инструментального материалов,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона обрабатываемого материала;  $\lambda_p$ ,  $\lambda_d$ ,  $\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности инструментального, обрабатываемого материала и материала стержня режущего инструмента, соответственно, Дж/(м·сек· $^\circ\text{C}$ );  $\alpha$  и  $\gamma$  – задний и передний углы режущей части 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, 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,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $(cr)_D$  и  $(cr)_n$  – удельная объёмная теплоёмкость обрабатываемого и инструментального материалов, Дж/( $\text{м}^3 \cdot \text{K}$ );  $T_p$  – стойкость режущего инструмента, мин;  $\gamma$  и  $\alpha$  – передний и задний углы режущей части инструмента, градус;  $\theta_{пл}$  – температура плавления материала обрабатываемой детали,  $^\circ\text{C}$ .

Для реализации функциональной зависимости (1) необходимо иметь расчётные формулы 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 и др.]. При их использовании может решаться задача по определению технологических условий обработки, обеспечивающих заданные значения остаточ-

ных напряжений, глубины и степени наклёпа, шероховатости поверхности и точности обработки, а также могут быть рассчитаны 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 данной методики разработана система расчета параметров процесса резания, алгоритм функционирования которой представлен на блок-схеме (рис. 1) [3].

Параметры качества поверхностного слоя детали представляют практический интерес с точки зрения обеспечения эксплуатационных свойств изделий: усталостной прочности, износостойкости, контактной жесткости, прочности прессовых соединений и др.

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

Исследованиями автора совместно с кандидатами технических наук Друпкиным Б.М., Тимофеевым М.В., Осадчим Н.В., Любимовым Р.В., Водолагиным А.Л. получена зависимость [4]:

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

где  $B$ ,  $\Gamma$ ,  $D$ ,  $E$  – безразмерные комплексы процесса резания [5];  $C$  и  $K$  – величины, зависящие от свойств обрабатываемого материала (значения их приведены в работе [2]);  $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_{-исх}$  – предел выносливости материала детали после обработки и в исходном состоянии (до обработки);  $B = va_1/a$  – безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий степень влияния режимных условий процесса резания по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материалов, где  $a_1$  – толщина сечения среза;

$$\Gamma = \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \beta \varepsilon$$

– безразмерный комплекс процесса резания, отражающий влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводностей

инструментального и обрабатываемого материалов;  $\beta$  и  $\varepsilon$  – угол заострения и угол при вершине резца в плане, радиан;  $D = a_1/b_1$  – безразмерный комплекс, характеризующий

геометрию сечения среза;  $b_1$  – ширина сечения среза, м;  $E = \rho/a_1$  – безразмерный комплекс, характеризующий влияние на процесс резания геометрической формы режущей кромки резца.

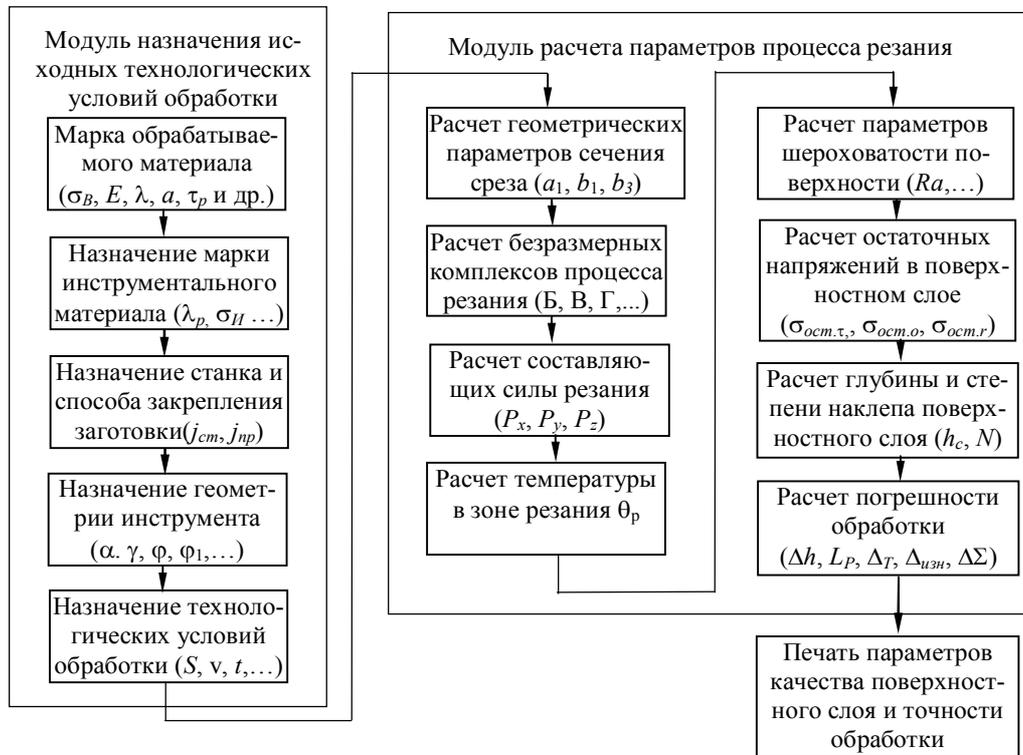


Рис. 1. Система расчета параметров качества поверхностного слоя и точности обработки деталей

Зависимость предела выносливости материала детали от комплекса параметров качества поверхностного слоя может быть определена по формулам [2]:

– при точении

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

– при фрезеровании

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

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

$$J_h = 0,0316 \cdot 3,7^{v+1} \alpha_2^{0,5} b \times$$

при фрезеровании  $n = 224$  и  $L = 0,83$ ;  $\sigma_B / \sigma_{BЭ}$  – отношение предела прочности обрабатываемого материала к пределу прочности электротехнической стали.

При обработке точением с оптимальной скоростью резания  $\theta_0$ , соответствующей минимуму износа режущего инструмента и минимальной высоте неровностей на обработанной поверхности, интенсивность изнашивания обработанной поверхности  $J_h$  определяется по следующей зависимости [2]:

$$\times \left\{ \frac{1}{8r} \times \left[ \frac{0,6625 a_1^{0,125} (c\rho)_n \theta_0 \times 4,3 (\sin^{0,115} \alpha) v_0^{0,57} a_1^{0,345} \lambda \left(\frac{t}{m}\right)^{0,3} + \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075}}{\tau_p a^{-0,43} (\sin^{0,05} \alpha) v_0^{0,25} c_0 m^{0,74-n_0} \times b^{0,04} \rho_1^{n_0-0,1} (1 - 0,45 \sin \gamma)} \right]^{\frac{2}{1-n_0}} \right\}^{0,719-0,2(v+1)+5,2t_y} \quad (3)$$

$$\times (v+1) \cdot \left( \frac{34,64 \sigma_0}{k f_m} \right)^{t_y} \left( \frac{N}{A_c} \right)^{-0,323(v+1)+0,161-0,16t_y} \left( \frac{1-\mu^2}{E} \right)^{0,161+0,84t_y-0,323(v+1)}$$

где  $b_3$  – длина контакта режущих кромок инструмента с обрабатываемым материалом, м;  $C_0$  – 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;  $\alpha_2$  – 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;  $\theta_0$  – оптимальная температура резания.

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

Контактная жесткость соединения характеризуется величиной сближения поверхностей  $y$  под действием силы, действующей перпендикулярно к контактируемым поверхностям:

$$y = y_{упр} + y_{пл},$$

где  $y_{упр}$  – величина упругой деформации микронеровностей;  $y_{пл}$  – величина пластической деформации микронеровностей на поверхности.

Численные значения составляющих суммарной величины сближения контактируемых поверхностей могут быть определены по следующим зависимостям, полученных автором с использованием результатов исследования д.т.н., проф. Сулова А.Г. [1].

$$y_{пл} = 0,546 \left( \frac{S_\phi^2}{8r \cdot 10^{-3}} \right)^{1,02} \times \left[ \frac{\left( r_1 + r_2 + (\sin \omega) \sqrt{r_{np1} + r_{np2}} + \cos \left( \frac{\pi}{2} - \omega \right) \sqrt{r_{non1} + r_{non2}} \right) K}{r_2} \times \frac{v^{0,28} r^{3,5} s^{1,7} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}}{7,08 \cdot 10^{-6} \tau_p^{0,75} S^{0,6} t^{0,06} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35} \delta^{0,35}} \times \frac{100 N_1 N_2 k_5}{tm} \left( \frac{PE_D}{2\pi \cdot r_2 \sigma_{T_2}} \right)^m (ck_3)^{1-m} \right]^{\frac{1}{v}}, \quad (4)$$

где  $S_\phi$  – значение подачи, являющееся функцией толщины сечения среза [2].

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

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

при  $\varphi > \arcsin \frac{S}{2r}$  и  $\varphi_1 > \arcsin \frac{S}{2r}$ .

В формулах (4) и (5) приняты следующие обозначения:

где  $r_1, r_2$  – приведенный радиус закругления вершины единичной микронеровности;  $r_{np1}, r_{np2}$  – радиус закругления вершины единичной микронеровности в продольном направлении;  $r_{non1}, r_{non2}$  – радиус закругления вершины единичной микронеровности в поперечном направлении;  $N_1, N_2$  – количество вершин мик-

ронеровностей находящихся в контакте;  $v$  – 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 оты-

скания 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;  $k(e)$  – эллиптический интеграл первого рода;  $c\sigma_T$  – напряжение, приводящее в пластическое состояние выступ, где  $c$  – коэффициент;  $tm$  – относительная длина опорной поверхности на уровне средней линии;  $\delta m$  – средний шаг неровностей профиля;  $n_{\text{non}}$  – порядок параболоида, моделирующего выступ микронеровностей профиля в поперечном направлении (положительное рациональное число);  $\delta$  – длина фаски износа по задней поверхности инструмента;  $\theta$  – максимальная температура в любом слое обрабатываемой поверхности;  $B$  – безразмерный комплекс, характеризующий угол схода стружки [2];  $a_2, b_2, x$  – коэффициенты, зависящие от сочетания свойств обрабатываемого и инструментального материалов;  $\omega$  – угол

пересечения следов обработки на контактируемых поверхностях.

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 натягом 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  $M_{\text{кр}}$ , выдерживаемые соединениями, которые определяются по формулам [6]:

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

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

где  $d$  – номинальный диаметр соединения, мм;  $l$  – длина контакта сопрягаемых поверхностей, мм;  $f_{\text{ос}}$  и  $f_{\text{кр}}$  – коэффициенты трения при осевом сдвиге и при кручении;  $C_1$  и  $C_2$  – безразмерные коэффициенты, зависящие от размеров и свойств материалов сопрягаемых деталей и определяемые по следующим 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;  $\delta_n$  – номинальный натяг, выбираемый из таблицы для конкретного соединения или задаваемый на чертеже изделия (определяется из условий заданной посадки сопряжения), мм;  $Rz_1$  и  $Rz_2$  – высота неровностей сопрягаемых поверхностей, мм;  $W_1$

и  $W_2$  – значения накопленной энергии в поверхностном слое материала первой и второй

сопрягаемых деталей;  $N = \frac{\alpha \sqrt{WG}}{\sigma_{0,2}}$  – степень

наклепа обработанной поверхности, где  $\alpha$  – параметр междислокационного взаимодействия в материале детали, значение  $\alpha$  приведены в работе [8];  $W$  – 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

$G = \frac{E_D}{2(1 - \mu)}$ , где  $E_D$  – модуль упругости мате-

риала детали, МПа;  $N_1$  и  $N_2, \alpha_1$  и  $\alpha_2, \sigma'_{0,2}$  и  $\sigma''_{0,2}$  – значения степени наклепа, параметра междислокационного воздействия и условного

предела текучести материалов первой и второй сопрягаемых деталей.

Формула для расчета накопленной энергии деформации при токарной обработке в по-

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

где  $\delta$  – относительное удлинение материала обрабатываемой детали;  $\sigma_B$  – предел прочности материала обрабатываемой детали на разрыв, Па.

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

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

где  $W_h$  – накопленная 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.

### 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. Суслова. – М.: Машиностроение. 2008.– 320 с.
2. **Безьязычный, В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012.– 320 с.
3. **Безьязычный, 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., Безьязычный, 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. **Безьязычный, В.Ф., Федулов, В.М., Чугуевская, С.В.** К вопросу расчетного определения прочностных ха-

рактеристик 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. **Безьязычный, В.Ф.** Расчетное прогнозирование влияния технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 3(81). – С. 14-21.

### REFERENCES

1. *Parts Surface Engineering* / Author group; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering. 2008. – pp. 380.
2. Beziyazychny, V.F. *Similarity Method in Engineering Technique*. – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 320.
3. Beziyazychny, V.F., Kiselyov, E.V. Calculation automation of machining technological conditions to ensure complex of specified parameters of accuracy and quality of surface layer and parts operation properties / *Reference Book. Engineering Journal. Appendix*. – 2008. – No.8. – pp. 13-23.
4. Drapkin, B.M. Kononenko, V.K., Beziyazychny, V.F. *Properties of Alloys in Extreme Condition*. – M.: Mechanical Engineering, 2004. – pp. 256.
5. Silin, S.S. *Similarity Method at Material Cutting*. – M.: Mechanical Engineering, 1979. – pp. 152.
6. Beziyazychny, V.F., Fedulov, V.M., Chuguevskaya, S.V. To the problem of computation definition of stress-strain properties in assembly units with interference taking into account surface roughness in assembled parts and degree of their cold work hardening // *Assemblage in Mechanical Engineering*. – 2015. – No.4. – pp. 21-26.
7. *Assembly and Installation 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. – M.: Mechanical Engineering, 1983. – pp. 480.
8. Beziyazychny, V.F. Estimated forecasting of impact of machining process requirements upon machinery operation properties // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.3 (81). – pp. 14-21.

Рецензент д.т.н. В.И. Гусев