

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.91.01

А. Н. СУТЯГИН

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
РАВНОВЕСНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Рассматривается вопрос обеспечения износостойкости поверхностного слоя деталей узлов трения на основе управления геометрическими и физико-механическими параметрами качества поверхностного слоя, формирующимися в результате механической обработки. *Механическая обработка; равновесные параметры качества; поверхностный слой; накопленная энергия; износостойкость*

Современное машиностроение предъявляет особые требования к повышению уровня надежности и увеличению ресурса машин. Благодаря фундаментальным работам большого круга ученых различных научных школ достигнуты значительные успехи в области изучения качества поверхностного слоя, формируемого в процессе механической обработки. Результаты многочисленных исследований, бесспорно, подтверждают факт влияния качества поверхностного слоя деталей машин после механической обработки на их эксплуатационные свойства. Это влияние может по-разному отражаться на надежности и работоспособности деталей. Вследствие дефектов поверхностного слоя в материале детали протекает процесс более быстрого накопления повреждений, приводящих к образованию трещины, ее развитию и разрушению детали. Особенно актуальна эта проблема в авиастроении, космической технике и других отраслях машиностроения.

**1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА**

Вопросам определения взаимосвязи интенсивности изнашивания с технологическими условиями обработки посвящены работы В. Ф. Безъязычного [1], А. В. Боярникова [2], А. А. Маталина [3], Л. Ю. Пружанского [4], Э. В. Рыжова [5], А. Г. Сулова [6] и других ученых.

Нормальная работа узла характеризуется минимальной интенсивностью изнашивания материала и одновременным образованием равновесных геометрических и физико-механических параметров поверхностного слоя

деталей машин [6–8]. Продолжительность периода приработки сопрягаемых деталей машин зависит от того, насколько исходные параметры качества поверхностного слоя отличаются от оптимальных.

Анализ научных работ показывает, что при проектировании технологической операции с использованием расчетных методов назначения технологических условий обработки закладываются решения, обеспечивающие заданные эксплуатационные свойства деталей машин, в частности, износостойкость. Выявлено, что в ответственных узлах на стадии изготовления деталей стремятся технологически обеспечить на поверхностях деталей машин оптимальные параметры качества поверхностного слоя.

**2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Существующие методики расчета интенсивности изнашивания деталей машин отличаются тем, что в одних рассчитывается интенсивность изнашивания по заданным параметрам качества поверхностного слоя, в других – определяется интенсивность изнашивания для заданных режимов обработки, которые не всегда обеспечивают получение равновесных параметров качества поверхностного слоя деталей машин, необходимых для нормальной работы узла. В связи с этим возникает необходимость разработки математической модели, связывающей технологические условия механической обработки с равновесными параметрами качества поверхностного слоя деталей машин.

**3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Разработка математической модели взаимосвязи параметров поверхностного слоя (шеро-

ховатости поверхности и степени наклепа после механической обработки) и интенсивности изнашивания контактируемых поверхностей осуществлялась следующим образом.

Любое кристаллическое тело обладает внутренней и поверхностной энергией. Изменение внутренней энергии описывается уравнением удельной энергии деформации  $\Delta w$ , накапливаемой в материале за счет образования дислокаций [9]:

$$\Delta w = f(HV, HV_0, \alpha_0, G), \quad (1)$$

где  $G$  – модуль сдвига исследуемого материала;  $\alpha_0$  – параметр междислокационного взаимодействия;  $HV$  – микротвердость поверхностного слоя исследуемой детали на определенной глубине;  $HV_0$  – микротвердость недеформированного материала.

Результатом взаимодействия контактирующих поверхностей деталей машин является формирование новых поверхностей, сопровождающееся освобождением энергии  $\gamma_{\text{эф}}$ , затраченной на их образование [10]:

$$\gamma_{\text{эф}} = f(F, Rz, HV), \quad (2)$$

где  $F$  – нормальная сила взаимодействия элементов пары трения;  $Rz$  – высота неровностей профиля исследуемой поверхности;  $HV$  – микротвердость поверхностного слоя исследуемой детали на определенной глубине.

В результате приработки сопрягаемых деталей машин материальная поверхность детали приходит к такому физическому состоянию и такой структуре, при которых поверхностный слой обладает минимальной потенциальной энергией, то есть представляет устойчивую систему, допускающую в данных условиях минимальную диссипацию энергии. Образовавшиеся таким образом геометрические (шероховатость) и физико-механические (микротвердость) параметры качества поверхностного слоя называются равновесными.

В соответствии с первым законом термодинамики работа силы трения с учетом специфики образования равновесного состояния поверхностей трения равна:

$$W_{\text{ТР}} = f(f, F, S_{\text{ТР}}, V_{\text{И}}, Rz_{\text{равн}}, HV_{\text{равн}}, HV_0, \alpha_0, G), \quad (3)$$

где  $W_{\text{ТР}}$  – работа трения;  $f$  – коэффициент трения;  $F$  – нормальная сила взаимодействия элементов пары трения;  $S_{\text{ТР}}$  – путь трения;  $Rz_{\text{равн}}$  – равновесная шероховатость сопрягающихся поверхностей элементов;  $HV_{\text{равн}}$  – равновесная микротвердость поверхностного слоя исследуемой детали на определенной глубине;  $V_{\text{И}}$  – объем изношенного материала;  $HV_0$  – микротвердость недеформированного материала;  $G$  –

модуль сдвига исследуемого материала;  $\alpha_0$  – параметр междислокационного взаимодействия. Принимая далее во внимание, что выражение  $(V_{\text{И}} / S_{\text{ТР}})$  представляет собой величину интенсивности изнашивания  $J_V$  [11], получили взаимосвязь интенсивности изнашивания с равновесными параметрами шероховатости и степени наклепа поверхностного слоя деталей машин:

$$J_V = Kj(fF3\pi S_{\text{ТР}} Rz_{\text{равн}} \cdot 2 \cdot 10^{-3} [HV_0(N_{\text{равн}} + 1)]^{1,19} - 4F^2) / \left( \frac{3\pi}{\alpha_0^2 G} S_{\text{ТР}} Rz_{\text{равн}} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \times [HV_0(N_{\text{равн}} + 1)]^{1,19} [0,32HV_0 N_{\text{равн}}] \right)^2,$$

где  $J_V$  – интенсивность изнашивания, м<sup>3</sup>/м;  $Kj$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-механических свойств материала;  $f$  – коэффициент трения материалов контактной пары;  $F$  – нормальная сила взаимодействия элементов пары трения, Н;  $S_{\text{ТР}}$  – путь трения, м;  $G$  – модуль сдвига материала, Па;  $Rz_{\text{равн}}$  – параметр равновесной шероховатости сопрягающихся поверхностей элементов, м;  $HV_{\text{равн}}$  – равновесная микротвердость поверхностного слоя исследуемой детали на определенной глубине, Па;  $\alpha_0$  – параметр междислокационного взаимодействия;  $HV_0$  – микротвердость недеформированного материала, Па.

Используя формулы для определения взаимосвязи шероховатости поверхности и степени наклепа с технологическими условиями механической обработки [12, 13], получили взаимосвязь интенсивности изнашивания с технологическими условиями механической обработки:

$$J_V = f(Kj, f, F, S_{\text{ТР}}, r, HV_0, \alpha_0, h_c, \sigma_B, \sigma_{ВЭ}, p_1, t, B, \gamma, \tau_p), \quad (5)$$

где  $p_1 = f(a_1, b_1, \text{ср}, \theta, \rho_1, a, \lambda, \lambda_p, \beta, \varepsilon, V, \alpha, \gamma, \tau_p, a_2, b_2, c, \xi, \chi, x, y, z, b, \delta_1)$ ;  $h_c$  – глубина наклепа;  $V$  – скорость резания;  $t$  – глубина резания;  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу;  $\lambda$  и  $\lambda_p$  – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов;  $\theta$  – температура плавления обрабатываемого материала;  $\alpha$  и  $\gamma$  – задний и передний углы резца;  $\varphi$  и  $\varphi_1$  – главный и вспомогательный углы в плане;  $\beta, \varepsilon$  – угол заострения и угол при вершине резца в плане;  $r$  – радиус при вершине резца в плане;  $\rho_1$  – радиус округления режущей кромки резца;  $\delta_1$  – величина износа резца по задней поверхности;  $\sigma_B$  – предел прочности обрабатываемого материала;  $a$  – температуропроводность обрабатываемого материала;  $\sigma_{ВЭ}$  – предел прочности

электротехнической стали, принятой за эталон;  $c_p$  – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала;  $a_1$  – толщина среза;  $b_1$  – ширины среза;  $b$  – суммарная длина режущих кромок;  $B = \frac{cB^x D^z}{\Gamma^y (1 - \sin \gamma)^{0.73}}$  – безразмерный комплекс;  $B = \frac{Va_1}{a}$  – безразмерный комплекс;  $\Gamma = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \cdot \varepsilon$  – безразмерный комплекс;  $D = a_1/b_1$  – безразмерный комплекс;  $a_2, b_2, c, \xi, \chi, x, y, z$  – величины, зависящие от свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов расчетного и экспериментального определения интенсивности изнашивания образцов (из материалов: сталь ШХ15, сталь 45, сталь У7, сталь ЭИ961, сплав ХН77ТЮР) в условиях равновесного состояния поверхностного слоя показал, что погрешность расчета по предложенной зависимости (4) не превышает 12% с учетом ввода поправочного коэффициента  $K_j$  для разных групп материалов. В результате анализа экспериментальных данных было выявлено, что величина коэффициента  $K_j$  характеризует способность материала сопротивляться пластическому деформированию и разрушению в процессе трения. Используя степенную аппроксимацию экспериментальных значений, получили следующее выражение для определения коэффициента  $K_j$ :

$$K_j = 20 \cdot \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_{0.2} \cdot \delta} \right)^{-4.14}, \quad (6)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности, Па;  $\sigma_{0.2}$  – предел текучести условный с допуском на величину пластической деформации при нагружении 0,2%, Па;  $\delta$  – относительное удлинение.

#### 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе полученных зависимостей предложена методика расчетного определения режимов механической обработки с целью обеспечения износостойкости поверхностного слоя деталей машин, алгоритм которой представлен на рис. 1. Работа алгоритма заключается в следующем. Вводятся данные по материалу детали: модуль сдвига  $G$ , микротвердость поверхностного слоя материала  $HV_0$ , а также условия работы детали в узле: нормальная сила взаимодействия элементов пары трения  $F$ , коэффициент трения материалов контактной пары  $f$  и параметр междислокационного взаимодействия  $\alpha_0$ . По формуле (4) производится расчет интенсивности изнашивания  $J_V$  и соответствующих ей параметров качества поверхностного слоя в равновесном состоянии (степени наклепа  $N_{равн}$  и шероховатости  $Rz_{равн}$ ). Дальнейшая работа алгоритма сводится к расчету режимов механической обработки, который производится на основе алгоритма, разработанного учеными РГАТА имени П. А. Соловьева [14].

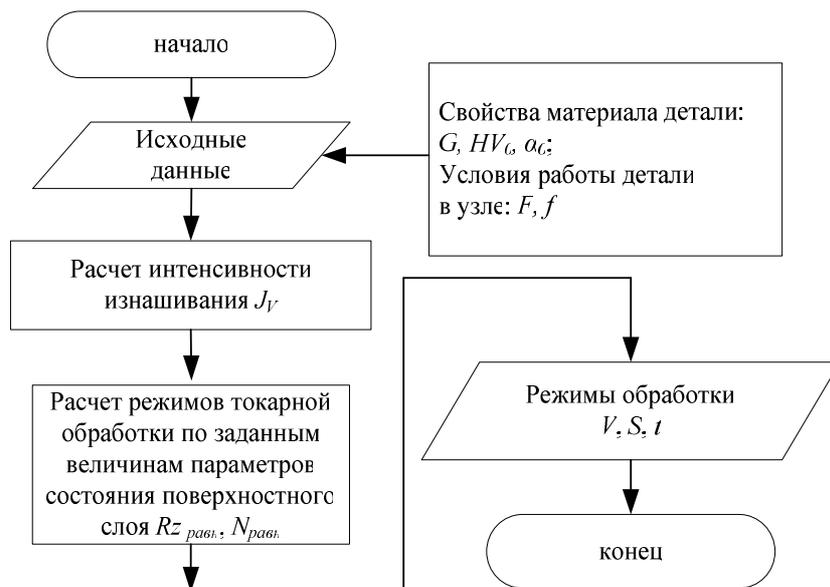


Рис. 1. Алгоритм расчетного определения режимов механической обработки с целью обеспечения износостойкости поверхностного слоя деталей машин

В работе получены зависимости интенсивности изнашивания от режимов резания при лезвийной обработке, позволяющие аналитически рассчитывать интенсивность изнашивания для выбираемых режимов резания, назначать или корректировать соответствующую технологическую обработку поверхности, позволяющую обеспечивать формирование равновесных геометрических и физико-механических параметров качества поверхностного слоя деталей машин:

$$\bullet J_v = 3,71 \cdot 10^{-8} S^{0,054} V^{0,85} t^{-0,12} r^{-0,069} \varphi^{-0,69} F^{0,95}$$

для стали ШХ15;

$$\bullet J_v = 2,945 \cdot 10^{-8} S^{0,024} V^{0,428} t^{-0,046} r^{-0,077} \varphi^{-0,909} F^{0,907}$$

для стали 30ХГСА;

$$\bullet J_v = 3,294 \cdot 10^{-9} S^{0,17} V^{0,15} t^{-0,09} r^{-0,13} \varphi^{-0,05} F^{0,89} \quad \text{для}$$

стали ЭИ961;

$$\bullet J_v = 2,574 \cdot 10^{-9} S^{0,27} V^{0,68} t^{-0,2} r^{-0,11} \varphi^{-0,62} F^{0,84} \quad \text{для}$$

стали 45,

где  $S$  – подача, мм/об;  $V$  – скорость резания, м/с;  $t$  – глубина резания, мм;  $r$  – радиус при вершине резца в плане мм;  $\varphi$  – главный угол в плане, град;  $F$  – нормальная сила взаимодействия элементов пары трения, Н. Уравнения адекватно описывают процесс при  $S = 0,05...0,08$  мм/об;  $V = 0,1...0,2$  м/с;  $t = 0,25...0,4$  мм;  $\varphi = 45...60^\circ$ ;  $r = 0,3...1$  мм;  $F = 100...500$  Н; трение без смазки; упругий характер взаимодействия; температура на контакте не более  $120^\circ\text{C}$ .

## ВЫВОДЫ

1. Полученное на основе энергетического подхода к проблеме определения взаимосвязи интенсивности изнашивания контактируемых поверхностей деталей машин с параметрами качества поверхностного слоя обобщенное уравнение взаимосвязи интенсивности изнашивания с геометрическими (шероховатость) и физико-механическими (степень наклепа) параметрами качества поверхностного слоя деталей машин в условиях нормальной работы узла позволяет рассчитать интенсивность изнашивания в равновесном состоянии сопрягаемых деталей машин с учетом технологических условий механической обработки.

2. Анализ результатов экспериментальных исследований интенсивности изнашивания контактируемых поверхностей после механической обработки показал, что полученная математическая модель взаимосвязи интенсивности изнашивания с технологическими условиями механической обработки позволяет количественно оценить интенсивность изнашивания со-

прягаемых деталей машин, прошедших стадию приработки.

3. Разработанный алгоритм расчетного определения технологических условий механической обработки с целью обеспечения износостойкости поверхностного слоя деталей машин позволяет на стадии проектирования технологического процесса определять режимы механической обработки, в результате которых в детали формируется поверхностный слой с определенными геометрическими и физико-механическими свойствами, сокращающими время приработки деталей машин.

4. Полученные расчетные зависимости интенсивности изнашивания от параметров механической обработки позволяют аналитически рассчитывать интенсивность изнашивания для выбираемых режимов резания, назначать или корректировать соответствующую технологическую обработку поверхности, в результате которой время приработки сопрягаемых деталей машин будет наименьшим, что позволяет повысить их долговечность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Безъязычный, В. Ф.** Проблемы совершенствования технологических процессов механической обработки, контроля и сборки высокоточных узлов трения / В. Ф. Безъязычный // Вестник РГТА. 2002. № 1. С. 3–26.
2. **Боярников, А. В.** Повышение эффективности чистового точения на основе моделирования процессов стружкообразования, трения, изнашивания инструмента и образования обработанной поверхности сталей: автореф. дисс. ... канд техн. наук / А. В. Боярников. Омск, 2000. 17 с.
3. **Маталин, А. А.** Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А. А. Маталин. М.: Машиностроение, 1970. 320 с.
4. **Пружанский, Л. Ю.** Истирающая способность обработанной поверхности / Л. Ю. Пружанский. М.: Наука, 1975. 64 с.
5. **Рыжов, Э. В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / О. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. М.: Машиностроение, 1979. 179 с.
6. **Суслов, А. Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя / А. Г. Суслов. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
7. **Комбалов, В. С.** Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей / В. С. Комбалов. М.: Наука, 1983. 213 с.
8. **Суслов, А. Г.** Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
9. **Прокофьев, М. А.** Технологическое обеспечение параметров наклепа поверхностного слоя де-

талей при шлифовании на основе исследования скрытой энергии деформации : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / М. А. Прокофьев. Рыбинск, 2006. 16 с.

10. **Кашеев, В. Н.** Процессы в зоне фрикционного контакта металлов / В. Н. Кашеев. М.: Машиностроение, 1978. 213 с.

11. **ГОСТ 27674 – 88.** Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения – Введ. 1988–03–01. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1988. 21 с.

12. **Безъязычный, В. Ф.** Оптимизация технических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В. Ф. Безъязычный, Т. Д. Кожина, А. К. Константинов [и др.]. М.: Изд-во МАИ. 1993. 184 с.

13. **Безъязычный, В. Ф.** Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей. Часть первая / В. Ф. Безъязычный, В. Н. Крылов, В. А. Полетаев [и др.]. М.: Машиностроение, 2005. 560 с.

14. **Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 3452.** Расчет технологических

условий токарной обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные показатели деталей / В. Ф. Безъязычный, Т. Д. Кожина, С. А. Волков. Зарег. в Отрасл. фонде алгоритмов и программ 21.04.04. 1 с.

## ОБ АВТОРЕ



**Сутягин Александр Николаевич**, асс. каф. техн. авиац. двигателей и общ. машиностр. Рыбинск. гос. авиац. технологич. акад. им. П. А. Соловьева. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энергетич. установкам (Рыбинск, 2005г.). Иссл. в обл. технологич. обеспечения качества деталей машин.