

Одноступенчатое обеспечение интенсивности изнашивания поверхностей трения при лезвийной обработке

На основе проведенных исследований предложены теоретические зависимости для определения интенсивности изнашивания в зависимости от режимов резания лезвийными инструментами. Они позволяют определить оптимальные режимы резания для обеспечения требуемой интенсивности изнашивания поверхностей трения при лезвийной обработке.

Ключевые слова: износостойкость; интенсивность изнашивания; лезвийная обработка; качество поверхностного слоя; режимы резания.

S.Yu. Syanov, Can. Sc. Tech.

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University", 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

Single-stage support of friction surface wear intensity at edge processing

On the basis of the investigations carried out there are offered theoretical dependences for the determination of wear intensity with regard to cutting modes with edge tools. They allow defining optimum cutting modes to ensure the required intensity of friction surface wear at edge processing.

Keywords: wear resistance; wear intensity; edge processing; surface layer quality; cutting modes.

Эксплуатационные свойства деталей оказывают существенное влияние на качество и надежность изделий. Одним из основных эксплуатационных свойств является износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Она оценивается скоростью изнашивания или интенсивностью изнашивания. Износостойкость зависит от параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей, которые зависят от режимов резания лезвийной обработки.

Износ поверхностей трения приводит к уменьшению размеров деталей, что способст-

вует выходу из строя, как отдельных деталей, так и механизма в целом. Поэтому одноступенчатое обеспечение износостойкости поверхностей трения, то есть вопрос установления теоретической взаимосвязи интенсивности изнашивания с режимами резания лезвийной обработки, является весьма актуальным.

В [1, 2, 3] представлены зависимости для определения интенсивности изнашивания в период приработки и нормального изнашивания от параметров качества и физико-механических свойств их поверхностного слоя:

в период приработки:

$$I_h = \frac{1,2Ra^{2/3}}{n_1\lambda t_m^{3/2}S_m} \left(\frac{P}{H_{\mu 0}} \right)^{7/6} \sqrt{15\pi(2\pi WzH_{\max})^{1/3} \left(1 + \frac{2\pi H_{\mu 0}(1-\mu^2)}{E} \right)}, \quad (1)$$

в период нормального изнашивания:

$$I_h = \frac{1,2\pi}{n_1\lambda t_m^{3/2}H_{\mu 0}^{3/2}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi RaWzH_{\max})^{1/3}}{ESm}}, \quad (2)$$

где n_1 – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала; λ – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений на износ, который можно определить по [1 – 4]; t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; $H_{\mu 0}$ – поверхностная микротвердость; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля; Wz – параметр волнистости; H_{\max} – максимальное макроотклонение; Sm – средний шаг неровностей; E – модуль упругости первого рода; μ – коэффициент Пуассона; P – давление.

Теоретические зависимости параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя от режимов резания лезвийной обработки получены в [4].

Макроотклонения при лезвийной обработке определяются четырьмя факторами [3]: геометрической неточностью станка; разностью упругих деформаций технологической системы при обработке поверхностей; температурными деформациями технологической системы в процессе обработки поверхности; изно-

сом режущего инструмента при обработке поверхности.

Сложение этих составляющих по длине, ширине или диаметру поверхности при определении H_{\max} производится геометрически. Величина максимального макроотклонения определяется условиями лезвийной обработки (применяемым оборудованием, схемой базирования, применяемым инструментом и т.п.) и может быть рассчитана по методике, представленной в [3].

Подставляя в (1) и (2) зависимости для параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя от режимов резания лезвийной обработки из [4], получим окончательные зависимости для определения интенсивности изнашивания в период приработки и нормального изнашивания в зависимости от режимов резания лезвийной обработки:

в период приработки:

при $\varphi \leq \arcsin(S/(2r))$, $\varphi_1 < \arcsin(S/(2r))$:

$$I_h = (S\lambda n_1)^{-1} 0,046 \sqrt{\left(\frac{6,28 \left(S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} \left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon 0}} \right)^{0,8} + 7,3 \cdot 10^{-9} \varphi^{0,35} \rho^{0,17} \delta^{0,36} t^{0,06} \tau_p^{0,75} \right) (\mu^2 - 1)}{ES^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} H \mu_{\text{исх}} \left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon 0}} \right)^{0,8}} - 1 \right) \times \left[\frac{\left(6,28 H \max c_y S^{y_p} v^{z_p} \left(HB_{\max}^n t^{x_p} - HB_{\min}^n (t - Rz_{\text{исх}} - Wz_{\text{исх}})^{x_p} \right) \right)^{0,33}}{j_1 HB_{\text{cp}}^n \sqrt{T_h^2 \omega_{\epsilon}^2 - \frac{\omega_{\epsilon}^2}{\omega_c^2} + 1}} \right] \times \left[\frac{0,2 Rz_p + 0,24r(1 - \cos(\varphi)) + \frac{0,48 \text{tg}(\varphi)(\cos(\varphi) - \cos(\varphi_1)) + 0,24 \text{tg}(\varphi) \text{tg}(\varphi_1)(S - r(\sin(\varphi) - \sin(\varphi_1)))}{\text{tg}(\varphi) + \text{tg}(\varphi_1)}}{0,1 \rho \left(\frac{1000}{\sigma_T \left(9,81c + 9,81 \exp \left(\frac{a \left(\frac{pv^l \sigma_{\epsilon} (St)^m}{1000 F \alpha_1} + 293 \right)}{b + 100} \right) \right) - 1} + \frac{0,2 c_y S^{y_p} v^{z_p} \left(HB_{\max}^n t^{x_p} - HB_{\min}^n (t - Rz_{\text{исх}})^{x_p} \right)}{j_1 HB_{\text{cp}}^n} \right)^{\frac{2}{3}} \times \left(\frac{PS^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} H \mu_{\text{исх}} \left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon 0}} \right)^{0,8}}{S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} \left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon 0}} \right)^{0,8} + 7,3 \cdot 10^{-9} \varphi^{0,35} \rho^{0,17} \delta^{0,36} t^{0,06} \tau_p^{0,75}} \right)^{\frac{7}{6}}$$

при $\varphi > \arcsin(S/(2r))$, $\varphi_1 \geq \arcsin(S/(2r))$:

$$I_h = (S\lambda n_1)^{-1} 0,046 \sqrt{\left[\frac{6,28 \left(S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} \left(\frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_{\epsilon 9}} \right)^{0,8} + 7,3 \cdot 10^{-9} \varphi^{0,35} \rho^{0,17} \delta^{0,36} t^{0,06} \tau_p^{0,75} \right) (\mu^2 - 1)}{ES^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} H \mu_{\text{исх}} \left(\frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_{\epsilon 9}} \right)^{0,8}} - 1 \right] \times$$

$$\times \left[\frac{\left(6,28 H \max c_y S^{y_p} v^{z_p} \left(HB_{\text{max}}^n t^{x_p} - HB_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}} - Wz_{\text{исх}})^{x_p} \right) \right)}{j_T HB_{\text{cp}}^n \sqrt{T_h^2 \omega_\epsilon^2 - \frac{\omega_\epsilon^2}{\omega_c^2} + 1}} \right]^{0,33} \times$$

$$\times \left[\frac{1000}{\sigma_T \left(9,81c + 9,81 \exp \left(\frac{a \left(\frac{pv^l \sigma_\epsilon (St)^m}{1000 F \alpha_1} + 293 \right)}{b + 100} \right) \right) - 1} \right] \times$$

$$\times \left[0,2Rz_p + 0,24r - 0,12\sqrt{4r^2 - S^2} - 0,0019\rho \right] \times$$

$$\times \left[\frac{2S - \frac{1000}{\sigma_T \left(9,81c + 9,81 \exp \left(\frac{a \left(\frac{pv^l \sigma_\epsilon (St)^m}{1000 F \alpha_1} + 293 \right)}{b + 100} \right) \right) + 1} + \frac{0,2c_y S^{y_p} v^{z_p} \left(HB_{\text{max}}^n t^{x_p} - HB_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}})^{x_p} \right)}{j_T HB_{\text{cp}}^n} \right]^{2/3} \times$$

$$\times \left[\frac{PS^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} H \mu_{\text{исх}} \left(\frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_{\epsilon 9}} \right)^{0,8}}{S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} \left(\frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_{\epsilon 9}} \right)^{0,8} + 7,3 \cdot 10^{-9} \varphi^{0,35} \rho^{0,17} \delta^{0,36} t^{0,06} \tau_p^{0,75}} \right]^{7/6}$$

при $\varphi \geq \arcsin(S/(2r))$, $\varphi_1 < \arcsin(S/(2r))$:

$$I_h = (S\lambda n_1)^{-1} 0,046 \sqrt{\left[\frac{6,28 \left(S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} \left(\frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_{\epsilon 9}} \right)^{0,8} + 7,3 \cdot 10^{-9} \varphi^{0,35} \rho^{0,17} \delta^{0,36} t^{0,06} \tau_p^{0,75} \right) (\mu^2 - 1)}{ES^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} H \mu_{\text{исх}} \left(\frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_{\epsilon 9}} \right)^{0,8}} - 1 \right] \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\frac{\left(6,28H \max c_y S^{y_p} v^{z_p} \left(HB_{\max}^n t^{x_p} - HB_{\min}^n (t - Rz_{\text{исх}} - Wz_{\text{исх}})^{x_p} \right) \right)}{j_T HB_{\text{cp}}^n \sqrt{T_h^2 \omega_g^2 - \frac{\omega_g^2}{\omega_c^2} + 1}} \right]^{0,33} \times \\ & \times \left[0,2Rz_p + 0,24r(1 - \cos(\varphi)) + 0,24 \sin(\varphi_1) \left(S \cos(\varphi_1) + \sqrt{S \sin(\varphi_1) (2r - S \sin(\varphi_1))} \right) - 0,1\rho \left(\frac{2r}{S} + \frac{1}{\text{tg}(\varphi)} \right)^{-1} \right] \times \\ & \times \left[\frac{1000}{\sigma_T \left(9,81c + 9,81 \exp \left(\frac{a \left(\frac{pv' \sigma_g (St)^m}{1000 F \alpha_1} + 293 \right)}{b + 100} \right) \right) - 1} + \frac{0,2c_y S^{y_p} v^{z_p} \left(HB_{\max}^n t^{x_p} - HB_{\min}^n (t - Rz_{\text{исх}})^{x_p} \right)}{j_T HB_{\text{cp}}^n} \right]^{2/3} \times \\ & \times \left[\frac{PS^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} H \mu_{\text{исх}} \left(\frac{\sigma_g}{\sigma_{g3}} \right)^{0,8}}{S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} \left(\frac{\sigma_g}{\sigma_{g3}} \right)^{0,8} + 7,3 \cdot 10^{-9} \varphi^{0,35} \rho^{0,17} \delta^{0,36} t^{0,06} \tau_p^{0,75}} \right]^{7/6} \end{aligned}$$

в период нормального изнашивания:

при $\varphi \leq \arcsin(S/(2r))$, $\varphi_1 < \arcsin(S/(2r))$:

$$\begin{aligned} I_h = & (\lambda n_1)^{-1} \left[\frac{\left(S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} \left(\frac{\sigma_g}{\sigma_{g3}} \right)^{0,8} + 7,3 \cdot 10^{-9} \varphi^{0,35} \rho^{0,17} \delta^{0,36} t^{0,06} \tau_p^{0,75} \right)^{-2/3}}{S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} H \mu_{\text{исх}} \left(\frac{\sigma_g}{\sigma_{g3}} \right)^{0,8}} \right]^{2/3} (ES)^{-0,5} \times \\ & \times \left(j_T HB_{\text{cp}}^n \sqrt{T_h^2 \omega_g^2 - \frac{\omega_g^2}{\omega_c^2} + 1} \right)^{-1/6} 0,021 \sqrt{(30 - 30\mu^2) \left(6,28H \max c_y S^{y_p} v^{z_p} \left(HB_{\max}^n t^{x_p} - HB_{\min}^n (t - Rz_{\text{исх}} - Wz_{\text{исх}})^{x_p} \right) \right)^{0,33}} \times \\ & \times \left[\frac{0,2Rz_p + 0,24r(1 - \cos(\varphi)) + \frac{0,48 \text{tg}(\varphi) (\cos(\varphi) - \cos(\varphi_1)) + 0,24 \text{tg}(\varphi) \text{tg}(\varphi_1) (S - r(\sin(\varphi) - \sin(\varphi_1)))}{\text{tg}(\varphi) + \text{tg}(\varphi_1)}}{\left(\frac{1000}{\sigma_T \left(9,81c + 9,81 \exp \left(\frac{a \left(\frac{pv' \sigma_g (St)^m}{1000 F \alpha_1} + 293 \right)}{b + 100} \right) \right) - 1} + \frac{0,2c_y S^{y_p} v^{z_p} \left(HB_{\max}^n t^{x_p} - HB_{\min}^n (t - Rz_{\text{исх}})^{x_p} \right)}{j_T HB_{\text{cp}}^n} \right)^{0,33}} \right]^{0,5} \end{aligned}$$

при $\varphi > \arcsin(S/(2r))$, $\varphi_1 \geq \arcsin(S/(2r))$:

$$I_h = (\lambda n_1)^{-1} \left(\frac{\left(S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{\theta\theta}} \right)^{0,8} + 7,3 \cdot 10^{-9} \varphi^{0,35} \rho^{0,17} \delta^{0,36} t^{0,06} \tau_p^{0,75} \right)^{-2/3}}{S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} H \mu_{\text{исх}} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{\theta\theta}} \right)^{0,8}} \right) (\text{ES})^{-0,5} \times$$

$$\times \left(j_T \text{HB}_{\text{cp}}^n \sqrt{T_h^2 \omega_e^2 - \frac{\omega_e^2}{\omega_c^2} + 1} \right)^{-0,166} 0,021 \sqrt{(30 - 30\mu^2) (6,28H \max c_y S^{y_p} v^{z_p} (\text{HB}_{\text{max}}^n t^{x_p} - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}} - Wz_{\text{исх}})^{x_p}))^{0,33}} \times$$

$$\times \left(\frac{1000}{\sigma_T \left(9,81c + 9,81 \exp \left(\frac{a \left(\frac{pv^l \sigma_e (St)^m}{1000F\alpha_1} + 293 \right)}{b + 100} \right) \right)} - 1 \right)^{-1}$$

$$\times \left(0,2Rz_p + 0,24r - 0,12\sqrt{4r^2 - S^2} - 0,0019\rho \right) \times$$

$$\times \left(2S - \frac{1000}{\sigma_T \left(9,81c + 9,81 \exp \left(\frac{a \left(\frac{pv^l \sigma_e (St)^m}{1000F\alpha_1} + 293 \right)}{b + 100} \right) \right)} + 1 + \frac{0,2c_y S^{y_p} v^{z_p} (\text{HB}_{\text{max}}^n t^{x_p} - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}})^{x_p})}{j_T \text{HB}_{\text{cp}}^n} \right)^{-0,33} \right)^{0,5}$$

при $\varphi \geq \arcsin(S/(2r))$, $\varphi_1 < \arcsin(S/(2r))$

$$I_h = (\lambda n_1)^{-1} \left(\frac{\left(S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{\theta\theta}} \right)^{0,8} + 7,3 \cdot 10^{-9} \varphi^{0,35} \rho^{0,17} \delta^{0,36} t^{0,06} \tau_p^{0,75} \right)^{-2/3}}{S^{1,1} v^{0,28} \alpha^{0,09} r^{3,5} H \mu_{\text{исх}} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{\theta\theta}} \right)^{0,8}} \right) (\text{ES})^{-0,5} \times$$

$$\times \left(j_T \text{HB}_{\text{cp}}^n \sqrt{T_h^2 \omega_e^2 - \frac{\omega_e^2}{\omega_c^2} + 1} \right)^{-1/6} 0,021 \sqrt{(30 - 30\mu^2) (6,28H \max c_y S^{y_p} v^{z_p} (\text{HB}_{\text{max}}^n t^{x_p} - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}} - Wz_{\text{исх}})^{x_p}))^{0,33}} \times$$

$$\times \left(\left[0,2Rz_p + 0,24r(1 - \cos(\varphi)) + 0,24\sin(\varphi_1) (S \cos(\varphi_1) + \sqrt{S \sin(\varphi_1) (2r - S \sin(\varphi_1))}) \right] - 0,1\rho \left(\frac{2r}{S} + \frac{1}{\text{tg}(\varphi)} \right)^{-1} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{1000}{\sigma_T \left(9,81c + 9,81 \exp \left(\frac{a \left(\frac{pv^l \sigma_e (St)^m}{1000F\alpha_1} + 293 \right)}{b + 100} \right) \right)} - 1 \right)^{-1} + \frac{0,2c_y S^{y_p} v^{z_p} (\text{HB}_{\text{max}}^n t^{x_p} - \text{HB}_{\text{min}}^n (t - Rz_{\text{исх}})^{x_p})}{j_T \text{HB}_{\text{cp}}^n} \right)^{-0,33} \right)^{0,5}$$

где S – подача; r – радиус при вершине; φ , φ_1 – главный и вспомогательный углы в плане; γ – передний угол; $HВ_{ср}$ – твердость обрабатываемой поверхности; $HВ_{min}$, $HВ_{max}$ – минимальное и максимальное значение твердости обрабатываемой поверхности; t – глубина резания; ρ – радиус скругления режущей кромки; $Rz_{исх}$ – высота исходной шероховатости поверхности; J_T – жесткость технологической системы; c_y , n , x_p , y_p , z_p – экспериментальные коэффициенты [1]; σ_T – предел текучести материала обрабатываемой детали; Rz_p – высота шероховатости вершины режущего лезвия; a , b , c – эмпирические коэффициенты [4]; $Wz_{исх}$ – высота исходной волнистости поверхности; T_h – постоянная времени демпфирования; ω_b , ω_c – частоты вынужденных и собственных колебаний технологической системы; τ_p – сопротивление материала обрабатываемой детали пластическому сдвигу; α , γ – углы режущего лезвия; δ – высота площадки износа по задней грани; σ_s – предел прочности обрабатываемого материала; $\sigma_{сэ}$ – предел прочности электротехнической стали; α_1 – коэффициент линейного расширения материала инструмента; F – площадь поперечного сечения инструмента; p , m , l – коэффициенты [1]; $H_{исх}$ – исходная микротвердость материала.

Полученные зависимости позволяют определять оптимальные режимы резания лезвийной обработки от требуемой интенсивности изнашивания, а также технологически обеспечивать износостойкость деталей машин при лезвийной обработке.

Анализируя полученные теоретические за-

висимости можно сделать вывод о том, что интенсивность изнашивания возрастает с ростом подачи и скорости резания, а глубина резания на интенсивность изнашивания оказывает незначительное влияние.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. **Инженерия поверхности деталей** / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2009. – 320 с.
3. **Суслов, А.Г., Дальский, А.М.** Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
4. **Справочник технолога** / под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

REFERENCES

1. Suslov, A.G., Brawn, E.D., Vitkevich, N.A. *Machine Quality: Reference book*. In 2 Vol., Vol.1. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 256.
2. *Parts Surface Engineering* / Author group; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 320.
3. Suslov, A.G., Dalsky, A.M. *Scientific Fundamentals of Engineering Technique*. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – pp. 684.
4. *Technologist's reference book* / under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: *Innovation Mechanical Engineering*, 2019. – pp. 800.

Рецензент д.т.н.
Александр Олегович Горленко

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-910-293-62-96.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 15.03.2021. Выход в свет 20.03.2021.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+