

УДК 621.9.047
DOI:10.30987/2223-4608-2021-4-20-24

С.Ю. Сьянов, к.т.н.
(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: SERG620@yandex.ru

Одноступенчатое обеспечение интенсивности изнашивания поверхностей трения при отделочно-упрочняющей обработке

Приведены теоретические зависимости для определения интенсивности изнашивания в зависимости от условий отделочно-упрочняющей обработки, позволяющие определить оптимальные условия для обеспечения требуемой интенсивности изнашивания поверхностей трения при отделочно-упрочняющей обработке.

Ключевые слова: износостойкость; интенсивность изнашивания; отделочно-упрочняющая обработка; качество поверхностного слоя; условия обработки.

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 during finish-strengthening

The theoretical dependences for the definition of wear intensity depending upon conditions of finish-strengthening allowing the definition of optimum conditions for support of required wear intensity in friction surfaces during finish-strengthening are shown.

Keywords: wear-resistance; wear-intensity; finish-strengthening; surface layer quality; treatment conditions.

На качество и надежность изделий большое влияние оказывают эксплуатационные свойства деталей. Одним из основных эксплуатационных свойств является износостойкость. Износостойкость, оцениваемая скоростью или интенсивностью изнашивания, зависит от параметров качества и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей, которые зависят от условий отделочно-упрочняющей обработки. Износ вызывает уменьшение размеров деталей, что приводит к выходу их из строя и как следствие механизма в целом.

Для обеспечения требуемой интенсивности изнашивания, с целью обеспечения качества и

надежности изделий, необходимо решить вопрос установления теоретической взаимосвязи интенсивности изнашивания поверхностей трения с условиями отделочно-упрочняющей обработки, т.е. решить задачу одноступенчатого обеспечения износостойкости поверхностей трения при отделочно-упрочняющей обработке, что является актуальной задачей.

Зависимости, связывающие интенсивность изнашивания в период приработки и нормального изнашивания с параметрами качества и физико-механическими свойствами их поверхностного слоя приведены в [1 – 3]:

в период приработки:

$$I_h = \frac{1,2Ra^{0,67}}{n\lambda t_m^{1,5} S_m} \left(\frac{P}{H_{\mu 0}} \right)^{1,17} \sqrt{15\pi(2\pi WzH_{\max})^{0,33} \left(1 + \frac{2\pi H_{\mu 0}(1-\mu^2)}{E} \right)}, \quad (1)$$

в период нормального изнашивания:

$$I_h = \frac{1,2\pi}{n\lambda t_m^{1,5} H_{\mu 0}^{0,67}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi Ra WzH_{\max})^{0,33}}{ESm}}, \quad (2)$$

где n – 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 по-

верхностного слоя от условий отделочно-упрочняющей обработки получены в [4].

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

в период приработки:
инструмент образует круглую или эллиптическую площадку контакта:

$$I_h = \left(\frac{0,53P}{\frac{-100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх}} \right)^{1,17} \frac{9,6}{n\lambda t_m^{1,5} Sm_{исх}} \times$$

$$\times \left(-Rp_{исх} \frac{150F\sqrt{1+f^2} \left(\pi\sqrt{rR}tm_{исх} \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)}{\left(\frac{\arccos \left(1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{1 - \frac{\arccos \left(1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{180}} \right) (h_{кин} - h_{уп}) + 2h_{уп}} \right)^{0,5} +$$

$$+ \sqrt[3]{\frac{FRp_{исх}^2}{\pi\sqrt{rR}(HB_{\max} - HB_{\min})}} + \frac{S^2}{8r} + Rz_{ин} + Rz_{исх}} \left(\left(H_{\max} \left(Wz_{исх} - \left(\frac{9FRa_{исх}^2}{\pi HB\sqrt{rR}} \right)^{0,33} \right)^2 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{27j_T (Wz_{ин}^2 + \Delta_{ин}^2)^{0,5} Ra_{исх} \left(\pi\sqrt{rR} \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)}{\left(\frac{\arccos \left(180 - 1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{1 - \frac{\arccos \left(180 - 1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{0,56 \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{0,5}} \right) (h_{кин} - h_{уп}) + 2h_{уп}} \right)^2 +$$

$$\left. \left. + h_{кин}^2 \right) \right)^{0,33} \left(1 + \frac{2\pi \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right) (1 - \mu^2)}{E} \right)^{0,5}$$

инструмент образует каплевидную площадку контакта:

$$I_h = \left(\frac{0,53P}{\frac{-100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх}} \right)^{1,17} \frac{9,6}{n\lambda t m_{исх}^{1,5} S m_{исх}} \times$$

$$\times \left(-Rp_{исх} \frac{150F\sqrt{1+f^2} \left(\pi\sqrt{rR} t m_{исх} \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right) \right)^{-1}}{\left(\frac{\arccos \left(1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{1 - \frac{\arccos \left(1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{180}} \right) (h_{кин} - h_{уп}) + 2h_{уп}} \right)^{0,5} +$$

$$+ \sqrt[3]{\frac{FRp_{исх}^2}{\pi\sqrt{rR}(HB_{max} - HB_{min})}} + r(1 - \cos\varphi_a) + Rz_{ин} + Rz_{исх}} \left(\left(Hmax \left(Wz_{исх} - \left(\frac{9FRa_{исх}^2}{\pi HB\sqrt{rR}} \right)^{0,33} \right)^2 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{27j_T(Wz_{ин}^2 + \Delta_{ин}^2)^{0,5} Ra_{исх} \left(\pi\sqrt{rR} \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right) \right)^{-1}}{\left(\frac{\arccos \left(180 - 1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{1 - \frac{\arccos \left(180 - 1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{0,56 \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{0,5}} \right) (h_{кин} - h_{уп}) + 2h_{уп}} \right)^2 +$$

$$\left. \left. + h_{кин}^2 \right) \right)^{0,33} \left(1 + \frac{2\pi \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right) (1 - \mu^2)}{E} \right)^{0,5}$$

в период нормального изнашивания:

инструмент образует круглую или эллиптическую площадку контакта:

$$I_h = \frac{23(1 - \mu^2)^{0,5}}{n\lambda t m_{исх}^{1,5} \left(\frac{-100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{0,67} (ESm_{исх})^{0,5}} \times$$

$$\times \left(-Rp_{исх} \frac{150F\sqrt{1+f^2} \left(\pi\sqrt{rR} t m_{исх} \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right) \right)^{-1}}{\left(\frac{\arccos \left(1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{1 - \frac{\arccos \left(1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15}mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5}}{-1} \right)}{180}} \right) (h_{кин} - h_{уп}) + 2h_{уп}} \right)^{0,5} +$$

$$\left. \left(\sqrt[3]{\frac{FRp_{исх}^2}{\pi\sqrt{rR}(HB_{max} - HB_{min})}} + \frac{s^2}{8r} + Rz_{ин} + Rz_{исх} \right)^{0,165} \left(\left(H_{max} \left(Wz_{исх} - \left(\frac{9FRa_{исх}^2}{\pi HB\sqrt{rR}} \right)^{0,33} \right)^2 + \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. + \frac{27j_T(Wz_{ин}^2 + \Delta_{ин}^2)^{0,5} Ra_{исх} \left(\pi\sqrt{rR} \left(\frac{100F^{0,15} mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right) \right)^{-1}}{\left(\arccos \left(180 - 1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15} mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5} \right) \right)} \right) (h_{кин} - h_{уп}) + 2h_{уп}} \right)^2 + h_{кин}^2 \right)^{0,165}$$

инструмент образует каплевидную площадку контакта:

$$I_h = \frac{23(1 - \mu^2)^{0,5}}{n\lambda t m_{исх}^{1,5} \left(\frac{-100F^{0,15} mH\mu_{исх}}{k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{0,67} (ESm_{исх})^{0,5}} \times$$

$$\times \left(-Rp_{исх} \left(\frac{150F\sqrt{1+f^2} \left(\pi\sqrt{rR} t m_{исх} \left(\frac{100F^{0,15} mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right) \right)^{-1}}{\left(\arccos \left(1,78s \left(F \left(\frac{100F^{0,15} mH\mu_{исх}}{-k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5} \right) - 1 \right)} \right) (h_{кин} - h_{уп}) + 2h_{уп}} \right)^{0,5} +$$

$$\left. \left(\sqrt[3]{\frac{FRp_{исх}^2}{\pi\sqrt{rR}(HB_{max} - HB_{min})}} + r(1 - \cos\varphi_a) + Rz_{ин} + Rz_{исх} \right)^{0,165} \left(\left(H_{max} \left(Wz_{исх} - \left(\frac{9FRa_{исх}^2}{\pi HB\sqrt{rR}} \right)^{0,33} \right)^2 + \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. + \frac{27j_T(Wz_{ин}^2 + \Delta_{ин}^2)^{0,5} Ra_{исх} \left(\pi\sqrt{rR} \left(\frac{-100F^{0,15} mH\mu_{исх}}{k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right) \right)^{-1}}{\left(\arccos \left(180 - 1,78s \left(F \left(\frac{-100F^{0,15} mH\mu_{исх}}{k_{исх}\sigma_T^{1,15}} + 99H\mu_{исх} \right)^{-1} \right)^{-0,5} \right) \right)} \right) (h_{кин} - h_{уп}) + 2h_{уп}} \right)^2 + h_{кин}^2 \right)^{0,165}$$

В формулах: s – подача; r – профильный радиус инструмента; R – радиус инструмента; φ_a – задний угол вдавливания; HB – твердость обрабатываемой поверхности; HB_{min} , HB_{max} –

минимальное и максимальное значение твердости обрабатываемой поверхности; $Rz_{исх}$, $Ra_{исх}$, $Rp_{исх}$, $tm_{исх}$, $Sm_{исх}$ – исходные параметры шероховатости; j_T – жесткость технологической системы; f – коэффициент трения между инструментом и заготовкой; σ_T – предел текучести материала обрабатываемой детали; m – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала [4]; $Wz_{исх}$ – высота исходной

волнистости поверхности; F – рабочее усилие; $k_{исх}$ – исходная степень упрочнения поверхности заготовки; $h_{кин}$ – глубина внедрения инструмента в материал заготовки; $h_{уп}$ – упругое восстановление обрабатываемого материала; $Rz_{инн}$ – шероховатость инструмента; $Wz_{инн}$ – высота волнистости инструмента; $\Delta_{инн}$ – величина биения инструмента; $H_{исх}$ – исходная микротвердость материала.

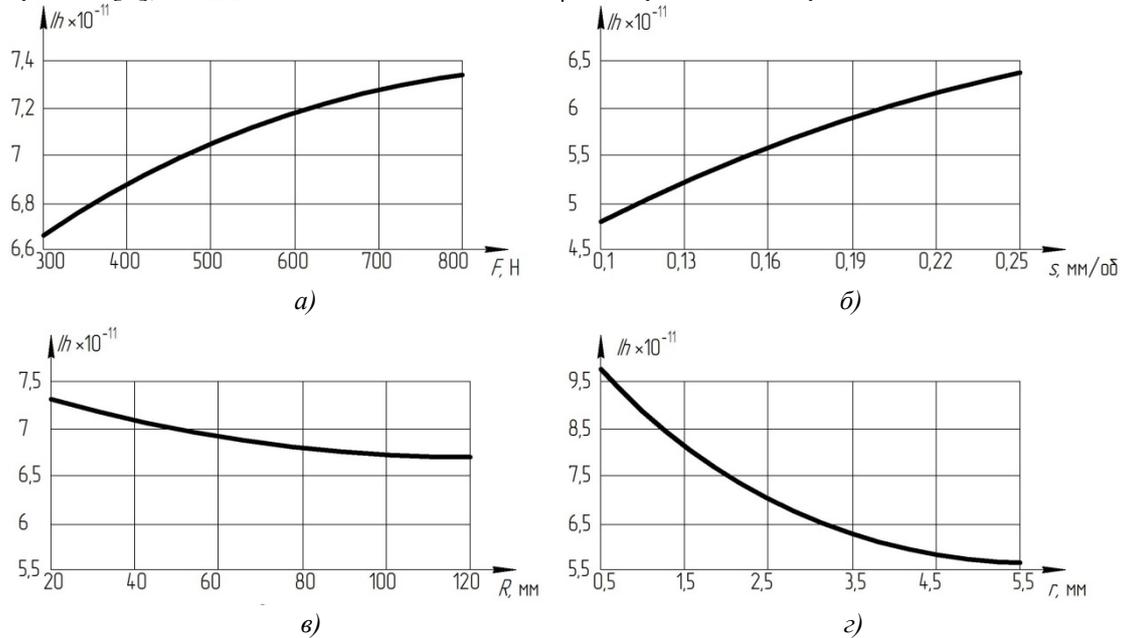


Рис. 1. Интенсивность изнашивания в зависимости от:

a – рабочего усилия ($R = 50$ мм; $r = 2,5$ мм; $s = 0,1$ мм/об); *б* – подачи ($F = 500$ Н; $R = 50$ мм; $r = 2,5$ мм); *в* – радиуса инструмента ($F = 500$ Н; $s = 0,1$ мм/об; $r = 2,5$ мм); *з* – профильного радиуса инструмента ($F = 500$ Н; $s = 0,1$ мм/об; $R = 50$ мм)

Анализируя полученные теоретические зависимости можно сделать вывод о том, что на интенсивность изнашивания при отделочно-упрочняющей обработке оказывают влияние не только режимы (подача и рабочее усилие), но и параметры, и качество инструмента (радиус и профильный радиус инструмента, шероховатость и волнистость инструмента). При этом (рис. 1) интенсивность изнашивания возрастает с ростом рабочего усилия F и подачи s , а с ростом профильного радиуса r и радиуса инструмента R интенсивность изнашивания уменьшается.

Таким образом, полученные теоретические зависимости позволяют определять оптимальные условия отделочно-упрочняющей обработки от требуемой интенсивности изнашивания, а также технологически обеспечивать износостойкость деталей машин при отделочно-упрочняющей обработке.

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 / А.Г. Суслов [и др.] / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2009 – 320 с.

3. **Суслов, А.Г., Дальский, А.М.** Научные основы технологий машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002 – 684 с.

4. **Справочник** технолога / под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.

REFERENCES

1. Machine Quality: Reference Book. In 2 Vol. Vol.1 / A.G. Suslov, E.D. Brawn, N.A. Vitkevich et al. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 256.

2. Machinery Surface Engineering / A.G. Suslov [et al.] / under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2009 – pp. 320.

3. Suslov, A.G., Salsky, A.M. Scientific Fundamentals of Engineering Technique. – M.: Mechanical Engineering, 2002 – pp. 684.

4. Technologist's Reference Book / under the editorship of A.G. Suslov. M.: Innovation Mechanical Engineering, 2019. – pp. 800.

Рецензент д.т.н.
Максим Николаевич Нагоркин