

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

С.Ю. Съянов, 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;  $\lambda$  – 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;  $\mu$  – 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:

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

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

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

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

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

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:

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

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

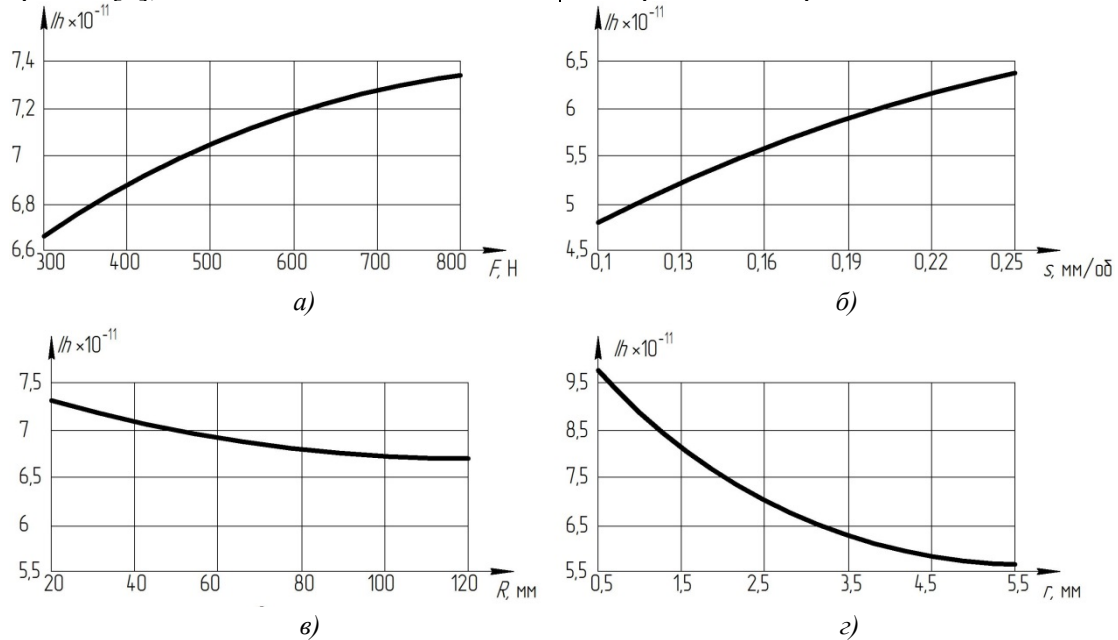
$$\left. \left( \sqrt[3]{\frac{FRp_{исх}^2}{\pi\sqrt{rR}(HB_{max} - HB_{min})}} + r(1 - \cos\varphi_a) + Rz_{ин} + Rz_{исх} \right)^{0,165} \left( \left( H_{max} \left( Wz_{исх} - \left( \frac{9FRa_{исх}^2}{\pi HB\sqrt{rR}} \right)^{0,33} \right)^2 + \right. \right. \right.$$

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

В формулах:  $s$  – подача;  $r$  – профильный радиус инструмента;  $R$  – радиус инструмента;  $\varphi_a$  – 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;  $\sigma_T$  – 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); *г* – 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