

УДК 621.923, 621.891  
DOI:10.30987/2223-4608-2021-4-33-37

**С.Г. Бишутин**, д.т.н.  
(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,  
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)  
E-mail: nad-bisch@yandex.ru

### Научноёмкая технология шлифования, обеспечивающая повышение долговечности поверхностей трения деталей машин

*Предложен новый подход к реализации финишного шлифования поверхностей трения деталей машин, обеспечивающий повышение их долговечности. Приведены результаты экспериментов по влиянию режимов обработки на износостойкость поверхности. Представлена методика выбора и корректировки режимов финишного шлифования поверхностей трения с учетом требуемой износостойкости.*

**Ключевые слова:** научноёмкая технология шлифования; поверхность трения; повышение износостойкости и долговечности.

**S.G. Bishutin**, Dr. Sc. Tech.  
(FSBEI HE "Bryansk State Technical University",  
7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

### Science intensive grinding technology ensuring life increase in machinery friction surfaces

*A new approach to the realization of machinery friction surface finish grinding ensuring parts life increase is offered. There are shown results of experiments on working mode impact upon surface wear-resistance. A procedure for the choice and correction of friction surface finish-grinding modes taking into account wear-resistance required is presented.*

**Keywords:** science intensive technology of grinding; friction surface; wear-resistance and life increase.

Большинство поверхностей трения ответственных деталей машин формируются в ходе финишного шлифования, при этом скорость изнашивания таких поверхностей при варьировании режимов обработки может меняться до нескольких раз [1 – 3]. Это объясняется различиями структурно-фазового состояния материала поверхностного слоя, формируемого при термическом и силовом воздействиях абразивной обработки. Поэтому для технологического обеспечения и повышения долговечности трибосопряжений необходимо учитывать влияние условий и режимов финишного шлифования.

Долговечность поверхностей трения зави-

сит от скорости их изнашивания  $\gamma$ , которая определяется следующим образом [2, 3]:

– для неприработанной шлифованной поверхности:

$$\gamma = ckH_{\gamma}(pv)^z; \quad (1)$$

– для приработанной шлифованной поверхности:

$$\gamma = ckpv, \quad (2)$$

где  $c$  – размерный коэффициент, зависящий от условий изнашивания поверхности;  $k$  – безразмерный коэффициент износостойкости поверхностного слоя детали пары трения;  $z$ ,  $H_{\gamma}$  – расчетные коэффициенты, учитывающие отклонение формы, волнистость и шеро-

ховатость поверхности трения, а также погрешность положения поверхности в паре трения или сборочном узле;  $p$  – давление в контакте;  $v$  – скорость скольжения.

Значение  $k$  будет определяться состоянием материала поверхностного слоя, зависящим от условий и режимов финишного шлифования. Это объясняется тем, что в ходе термического и силового воздействий абразивной обработки материал поверхностного слоя переводится в неравновесное состояние, что сопровождается формированием существенного количества приповерхностных микродефектов. В процессе трения материалы деталей на участках контакта претерпевают изменения, стремясь к более равновесному состоянию. Очевидно, что процесс перехода материала поверхностного слоя из неравновесного состояния (после обработки) в более равновесное (в процессе изнашивания) в основном и определяет влияние режимов шлифования на износостойкость поверхности.

Результаты исследований [3, 4] показали, что существует следующие параметры процесса шлифования, определяющие структурно-фазовое состояние поверхностного слоя:  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформирования металла при шлифовании,  $c^{-1}$ ;  $a_z$  – глубина внедрения зерен шлифовального круга в заготовку, м;  $\rho$  – радиус скругления режущих вершин зерен инструмента, м;  $\lambda$  – интенсивность контактирования рассматриваемого участка поверхности заготовки с абразивным инструментом,  $c^{-1}$ .

Указанные параметры комплексно характеризуют термическое и силовое воздействия абразивной обработки, формирующие состояние поверхностного слоя. Их можно определить по следующим формулам [3, 4]:

$$\lambda = \omega H; \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_i v_k}{L_3}; \quad (4)$$

$$a_z = \left( \frac{Q_\phi \left( 0,62 \frac{N}{V} \right)^2}{\rho^{0,5} A^{0,5} K_c v_k v_s H F_c (1 - \lambda_b) k_m k_b q} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – частота вращения заготовки или число рабочих ходов абразивного инструмента в единицу времени;  $H$  – число контактов рассматриваемого участка поверхности заготовки

со шлифовальным кругом;  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций материала поверхностного слоя при обработке, зависящая от его физико-механических характеристик;  $L_3$  – длина очага деформации перед вершиной абразивного зерна в направлении вектора скорости резания  $v_k$ ;  $Q_\phi$  – фактическая производительность процесса шлифования (зависит от режимов обработки и величины упругих отжатий в технологической системе);  $v_s$  – скорость подачи заготовки;  $F_c$  – доля вершин зерен рабочей поверхности шлифовального круга, находящихся на рассматриваемой глубине;  $V$  – объемное содержание зерен в круге;  $N$  – зернистость шлифовального круга;  $(1 - \lambda_b)$  – доля вершин зерен, образующих срезы;  $k_m$  – коэффициент, учитывающий фактическое число зерен на рабочей поверхности круга;  $k_b$  – коэффициент, учитывающий колебания рабочей поверхности круга относительно заготовки;  $q$  – отношение числа режущих вершин к числу абразивных зерен рабочей поверхности круга;  $A = D_k$  – для плоского шлифования периферией круга;  $A = D_3 D_k / (D_3 \pm D_k)$  – для круглого наружного (+) и внутреннего (–) шлифования периферией круга;  $D_3, D_k$  – диаметры заготовки и шлифовального круга;  $K_c$  – коэффициент стружкообразования.

Если предположить, что существует взаимосвязь между  $k$  и  $\dot{\varepsilon}$ ,  $a_z$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ , то уравнение размерности для величины  $k$  выглядит следующим образом:

$$L^0 T^0 = (T^{-1})^\alpha (L)^\beta (T^{-1})^\delta (L)^\phi, \quad (6)$$

где  $T$  – время;  $L$  – длина;  $\alpha, \beta, \delta, \phi$  – постоянные числа.

Из уравнения (6) следует, что  $\alpha = -\delta$  и  $\beta = -\phi$ . Тогда формулу для  $k$  можно представить в виде:

$$k = \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\lambda} \right)^\alpha \left( \frac{a_z}{\rho} \right)^\beta. \quad (7)$$

Значения  $\alpha$  и  $\beta$  в формуле (7) были определены в ходе триботехнических испытаний поверхностей, подвергнутых шлифованию на разных технологических режимах. Анализ полученных результатов показал, что коэффициент  $k$  имеет тесную корреляцию (коэффициент парной корреляции равен 0,89) со скоростью изнашивания поверхности (рис. 1), причем  $\alpha = 0,2$  и  $\beta = 1,5$ .

В таком случае уравнение (7) будет выглядеть следующим образом:

$$k = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\lambda}\right)^{0,2} \left(\frac{a_z}{\rho}\right)^{1,5};$$

$$3,5 \cdot 10^3 \leq \frac{\dot{\epsilon}}{\lambda} \leq 9 \cdot 10^6; \quad (8)$$

$$0,25 \leq \frac{a_z}{\rho} \leq 0,75.$$

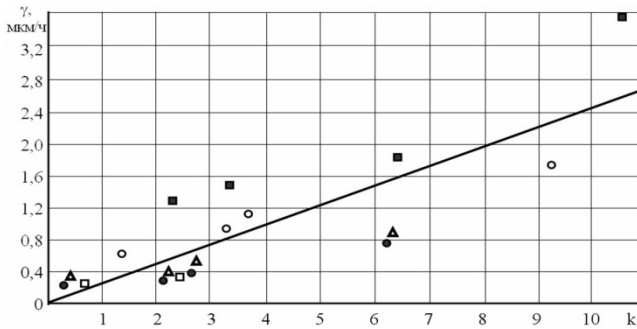


Рис. 1. Взаимосвязь скорости изнашивания  $\gamma$  и коэффициента  $k$  износостойкости материала поверхностного слоя:

□ – сталь 12ХН3А (HRC58...62); ○ – сталь 45 (HB200...220); ▲ – сталь 12Х18Н10Т (HB190...210); ■ – сталь 45 (HRC46...50); ● – сталь 35ХГСА (HRC40...45)

Отношения  $\dot{\epsilon}/\lambda$  и  $a_z/\rho$  можно рассчитать, используя данные работ [3 – 5].

Последнее уравнение позволяет оценивать износостойкость поверхности с учетом условий и режимов финишного шлифования.

Оценим с помощью уравнения (8) возможности финишной абразивной обработки по повышению износостойкости поверхности.

На чистовых режимах шлифования значение  $a_z/\rho$  обычно составляет 0,3...0,45. При переходе на более щадящие режимы обработки и использовании специальных смазочно-охлаждающих технологических средств, облегчающих процесс стружкообразования, удастся снизить соотношение  $a_z/\rho$  до 0,15...0,2, т.е. величину  $a_z/\rho$  при финишной абразивной обработке можно менять от 1,5 до 3 раз. Подставляя эти значения в уравнение (8), получается, что износостойкость поверхности можно повысить за счет подбора режимов и условий обработки до 2 – 4 раз.

Это подтвердилось результатами экспериментов, в ходе которых было установлено 2...3-кратное повышение износостойкости поверхности только лишь за счет варьирования глубины резания и времени выхаживания обрабатываемой поверхности (табл. 1), что доказывает возможность существенного повышения износостойкости и долговечности поверхности трения за счет изменения режимов шлифования.

**1. Изменение износостойкости поверхности (раз) при варьировании режимов окончательного шлифования**

| Материал (твердость)           | Варьируемая величина |                   |  |
|--------------------------------|----------------------|-------------------|--|
|                                | глубина шлифования   | время выхаживания | глубина шлифования и время выхаживания |
| Сталь 45 (HB 200...220)        | 1,4...1,5            | 1,8...1,9         | 2,5...2,7                              |
| Сталь 45 (HRC 46...50)         | 1,3...1,4            | 1,4...1,6         | 2,0...2,5                              |
| Сталь 12ХН3А (HRC 58...62)     | 1,2...1,3            | 1,3...1,5         | 1,9...2,2                              |
| Сталь 12Х18Н10Т (HB 190...210) | 1,6...2,0            | 1,7...2,4         | 2,6...3,0                              |
| Сталь 35ХГСА (HRC 40...45)     | 1,5...1,7            | 1,6...2,1         | 2,3...2,6                              |

*Примечания:* 1. Глубина шлифования варьировалась в пределах 6...20 мкм, время выхаживания – 0...5 мин.  
2. Испытания проводились на машине трения МИ-1М по схеме «вращающийся диск - невращающийся твердосплавный индентор»

Учитывая изложенное, можно рекомендовать следующую методику выбора и/или корректирования режимов финишного шлифования поверхностей трения.

1. Предварительный выбор режимов шлифования поверхности трения по данным [6], или анализ существующей технологической операции финишной абразивной обработки, в ходе которого необходимо выяснить применяемые технологические режимы обработки и определить исходные данные для расчетов

по формулам (3) – (5).

2. Определение степени влияния износостойкости рассматриваемой поверхности на износостойкость или долговечность узла трения, что необходимо для расчета требуемого изменения скорости изнашивания обрабатываемой поверхности. На данном этапе для выполнения необходимых расчетов можно использовать работы [2, 3, 7].

3. Расчет по формулам (3) – (5) параметров  $\dot{\epsilon}$ ,  $a_z$ ,  $\lambda$  для существующей технологической

операции финишной абразивной обработки поверхности трения.

4. Корректирование технологических режимов финишного шлифования в соответствии с неравенством:

$$\frac{k_1}{k_2} = \left( \frac{\dot{\epsilon}_1 \lambda_2}{\lambda_1 \dot{\epsilon}_2} \right)^{0,2} \left( \frac{a_{z1} \rho_2}{\rho_1 a_{z2}} \right)^{1,5} \geq \Pi, \quad (9)$$

где  $k_1, k_2$  – безразмерный коэффициент износостойкости поверхностного слоя детали до и после корректирования режимов обработки;  $\Pi$  – требуемое изменение износостойкости поверхности (скорости изнашивания) вследствие корректирования режимов обработки.

Индекс 1 в неравенстве (9) относится к исходным технологическим режимам, индекс 2 – к скорректированным режимам обработки.

Если неравенство (9) выполняется, то следует перейти к следующему этапу данной ме-

тодики, в противном случае необходимо продолжить корректировку технологических режимов финишной обработки.

5. Проверочные расчеты выбранных условий и режимов финишного шлифования для обеспечения заданных параметров качества и точности обрабатываемой поверхности [3 – 6].

Рассмотрим на конкретном примере процесс корректирования режимов финишного абразивного шлифования наружной цилиндрической поверхности трения.

Требуется увеличение в 1,5 раза износостойкости шкворневого узла транспортной машины (рис. 2). Ведущий вид изнашивания шкворневого соединения – усталостный. Поверхности трения ( $\varnothing 40$  мм) шкворня из стали 35ХГСА (40...45 HRC) формируются при круглом наружном шлифовании. Припуск под шлифование составляет 0,15 мм на сторону.

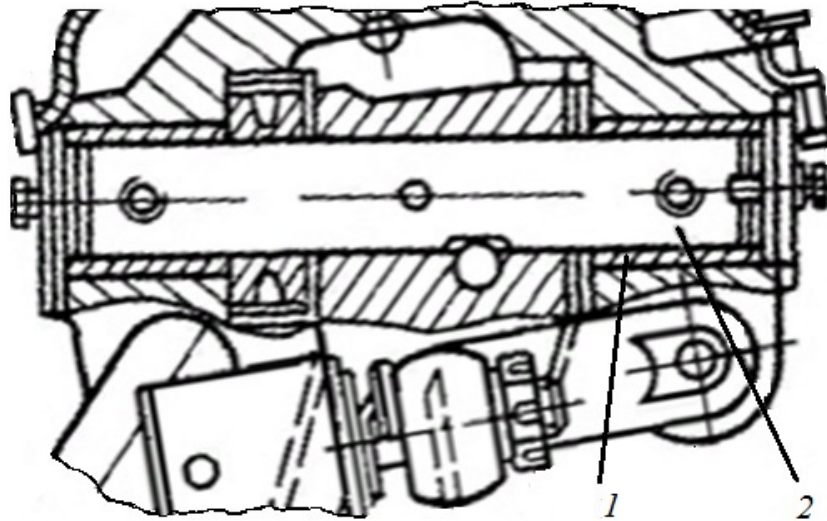


Рис. 2. Шкворневой узел транспортной машины:

1 – втулка; 2 – шкворень

Для обработки применяется шлифовальный круг 1–300×40×127 24AF46L6V. Режимы абразивной обработки следующие: скорость вращения круга  $v_k = 30$  м/с; скорость вращения заготовки  $v_3 = 30$  м/мин; поперечная подача шлифовального круга (глубина шлифования)  $t_\phi = 0,01$  мм/ход; продольная подача стола станка  $v_s = 0,3$  м/мин. Охлаждение осуществляется свободным поливом эмульсией «Укринол-1М».

В ходе анализа конструкции и условий работы узла установлено, что отношение скоростей изнашивания втулок и шкворня составляет 6/5. Тогда для повышения износостойкости

рассматриваемого сопряжения в 1,5 раза необходимо уменьшить скорость изнашивания шкворня примерно в 2 раза (т.е.  $\Pi = 2$ ). Это можно осуществить путем изменения режимов финишного шлифования. Изменения должны быть проведены в соответствии с неравенством (9) таким образом, чтобы

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{k_1}{k_2} = \left( \frac{\dot{\epsilon}_1 \lambda_2}{\lambda_1 \dot{\epsilon}_2} \right)^{0,2} \left( \frac{a_{z1} \rho_2}{\rho_1 a_{z2}} \right)^{1,5} = 2,$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  – скорость изнашивания шлифованной поверхности до и после корректирования

режимов обработки (см. (2), (8));  $k_1, k_2$  – безразмерный коэффициент износостойкости поверхностного слоя шкворня соответственно до и после корректирования режимов обработки.

Расчеты по уравнениям (3)–(5) показали, что для исходных режимов обработки  $a_{z1} = 7,5$  мкм;  $\rho_1 = 25$  мкм;  $\dot{\varepsilon}_1 = 5,6 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>;  $\lambda_1 = 82$  с<sup>-1</sup>.

Если снизить глубину шлифования до 6 мкм и применить в конце обработки выхаживание поверхностей шкворня в течение 1 минуты, то  $a_{z2} = 5$  мкм;  $\rho_2 = 25$  мкм;  $\dot{\varepsilon}_2 = 4,8 \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 140$  с<sup>-1</sup>.

Подставляя полученные данные в последнее уравнение, получим

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \left( \frac{5,6 \cdot 10^5}{82} \frac{140}{4,8 \cdot 10^5} \right)^{0,2} \left( \frac{7,5}{25} \frac{25}{5} \right)^{1,5} = 2,1.$$

Проведенные исследования подтвердили, что при новых режимах шлифования износостойкость поверхностей трения шкворня увеличивается в 1,9 – 2,3 раза, а также обеспечивается заданное качество и точность обработки.

Следует отметить, что за счет выбора рациональных режимов финишного шлифования возможно повышение износостойкости поверхности до 3 раз, что может быть обеспечено снижением глубины резания и вибраций в технологической системе, включением в цикл обработки выхаживающих ходов абразивного инструмента, применением смазочно-охлаждающих средств, облегчающих стружкообразование.

Рассмотренный подход к реализации технологии финишного шлифования целесообразно применять при изготовлении деталей машин, работающих преимущественно в условиях усталостного изнашивания. Если требуется повышение износостойкости более чем в 3 раза, то следует рассмотреть другие методы конструкторско-технологического повышения износостойкости поверхности трения детали, поскольку варьированием режимов шлифования нельзя достичь такого эффекта.

Проведенные исследования позволяют целенаправленно выбирать режимы шлифования с учетом требуемой износостойкости поверхности и долговечности пары трения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Безъязычный, В.Ф., Панфилов, Ю.В. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Бишутин, С.Г., Прудников, М.И. Износостойкость сформированных при шлифовании поверхностных слоев деталей машин / под ред. С.Г. Бишутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 100 с.
3. Бишутин, С.Г. Качество и износостойкость шлифованных поверхностей деталей автомобилей. – Брянск: Десяточка, 2011. – 100 с.
4. Бишутин, С.Г. Структурирование поверхностных слоев деталей при финишной абразивной обработке. – Брянск: БГТУ, 2009. – 100 с.
5. Бишутин, С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 144 с.
6. Бишутин, С.Г. Проектирование технологических операций шлифования. – Брянск: БГТУ, 2008. – 124 с.
7. Мышкин, Н.К., Петроковец, М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.

## REFERENCES

1. Suslov, A.G., Beziyazychny, V.F., Panfilov, Yu.V. *Parts Surface Engineering* / under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.
2. Bishutin, S.G., Prudnikov, M.I. *Wear-resistance of Machinery Surface Layers Formed at Grinding* / under the editorship of S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2010. – pp. 100.
3. Bishutin, S.G. *Quality and Wear-resistance of Ground Surfaces in Motor Car Parts*. – Bryansk: Desyatochka, 2011. – pp. 100.
4. Bishutin, S.G. *Parts Surface Layer Structuring at Finish Abrasion*. – Bryansk: BSTU, 2009. – pp. 100.
5. Bishutin, S.G. *Assurance of Quality Parameter Required Totality of Parts Layers During Grinding*. – M.: Mechanical Engineering-1, 2004. – pp. 144.
6. Bishutin, S.G. *Design of Grinding Technological Operations*. – Bryansk: BSTU, 2008. – pp. 124.
7. Myshkin, N.K., Petrokovets, M.I. *Friction, Lubrication, Wear. Physical Fundamentals and Technical Applications of Tribology*. – M.: Physmathlit, 2007. – pp. 368.

Рецензент д.т.н.  
Александр Николаевич Прокофьев