

УДК 621.891; 621.923

С.Г. Бишутин

## **ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ, ПОДВЕРГНУТЫХ АБРАЗИВНОМУ ШЛИФОВАНИЮ<sup>1</sup>**

Представлены результаты исследований износостойкости наружных цилиндрических поверхностей стальных образцов, подвергнутых абразивному шлифованию на разных технологических режимах. Рассмотрена процедура оценки износостойкости поверхности детали на основе полученных экспериментальных значений интенсивности изнашивания образцов.

Ключевые слова: финишное абразивное шлифование, режимы шлифования, износостойкость поверхности, интенсивность изнашивания.

Износостойкость поверхностей во многом определяет долговечность узла трения, а следовательно, и машины в целом. Режимы шлифования оказывают существенное влияние на триботехнические показатели шлифованных поверхностей (например, интенсивность изнашивания таких поверхностей может меняться до 3 раз) [1-4].

Наиболее характерными деталями автомобилей, которые имеют поверхности трения, сформированные при шлифовании, являются коленчатые валы, распределительные валы, валы и шестерни коробок передач, поршневые кольца, впускные и выпускные клапаны, валы рулевых механизмов, поворотные цапфы, крестовины карданов, шкворни и др. Многие указанные детали имеют цилиндрические поверхности трения (коренные и шатунные шейки коленчатых валов, опорные шейки распределительных валов, стержни клапанов, шейки валов коробок перемены передач и раздаточных коробок, базовые поверхности крестовин карданов и т.д.). Эти поверхности трения окончательно формируются в ходе круглого наружного шлифования. Однако выбор соответствующих режимов и условий проведения финишных технологических операций шлифования, обеспечивающих требуемую износостойкость, представляет известные трудности. Этому актуальному вопросу и посвящена данная статья.

Износостойкость поверхностей деталей оценивают величиной, обратной интенсивности или скорости изнашивания. Наиболее приемлемым и наименее затратным путем управления износостойкостью поверхностей при традиционном шлифовании является изменение глубины шлифования и времени выхаживания поверхности [4; 5]. Указанные параметры определяют интенсивность и длительность термического и силового воздействий абразивной обработки на поверхностный слой, что влияет на структурно-фазовое состояние и износостойкость поверхности. В связи с этим исследования проводились в два этапа.

На первом этапе цилиндрические образцы из различных материалов были подвергнуты круглому наружному шлифованию электрокорундовым кругом прямого профиля зернистостью 16-25. Образцы устанавливались на оправке, которая базировалась в центрах станка. Перед обработкой каждого образца круг подвергался алмазной правке на выбранных режимах (4 рабочих хода алмазного карандаша с продольной и поперечной подачей 0,1 м/мин и 0,02 мм/ход соответственно). С каждого образца предварительно сошлифовывался слой материала для устранения влияния технологической наследственности и стабилизации термического и силового воздействий в ходе экспериментов. Силовое и термическое воздействия менялись путем варьирования глубины шлифования и времени

---

<sup>1</sup> Отдельные результаты исследований получены при выполнении проекта № 1353 (06/61) в рамках государственного задания на выполнение работ.

выхаживания поверхности. Уровни варьирования указанных факторов определялись с учетом результатов исследований [5].

Второй этап исследований заключался в проведении триботехнических испытаний шлифованных образцов. Испытания проводились с использованием автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) на базе машины трения МИ-1М по схеме «вращающийся диск – невращающийся индентор». Данная АСНИ способна в процессе испытаний регистрировать значения износа поверхности образца и коэффициента трения. Шлифованные образцы диаметром 60 мм и длиной 16 мм имели радиальное биение испытуемых поверхностей относительно базового отверстия 0,005...0,01мм и шероховатость  $Ra=0,35...0,5$  мкм. Для исключения влияния износа индентора на результаты испытаний он был выполнен из твердого сплава ВК8. Ширина индентора составляла 5 мм. Испытания проводили до полного завершения процесса приработки и накопления не менее 2/3 общего пути трения (или времени испытания), приходящегося на период нормального изнашивания. Завершение процесса приработки определялось по стабилизации коэффициента трения и скорости изнашивания (выход кривой изнашивания на линейный участок). Испытания проводились при нагрузке на индентор 150 Н и скорости относительного скольжения 1,3 м/с. В качестве смазочного материала использовалось масло И-20А. Время одного испытания составляло 10 ч. Результаты экспериментов представлены в таблице.

Таблица

Условия эксперимента и износостойкость шлифованных поверхностей

Материал (твердость)	Глубина шлифования, мкм	Время выхаживания, мин	Износ образца, мкм	Интенсивность изнашивания
Сталь 45 (HB 200...220)	20	0	17,0	$8,5 \cdot 10^{-7}$
		5	9,5	$4,7 \cdot 10^{-7}$
	6	0	12,0	$5,5 \cdot 10^{-7}$
		5	6,3	$3,2 \cdot 10^{-7}$
Сталь 12ХН3А (HRC 58...62)	6	0	3,4	$1,7 \cdot 10^{-7}$
		5	2,2	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Сталь 45 (HRC 46...50)	20	0	6,8	$3,4 \cdot 10^{-7}$
		5	3,5	$1,7 \cdot 10^{-7}$
	6	0	3,7	$1,9 \cdot 10^{-7}$
		5	2,9	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Сталь 12Х18Н10Т (HB 190...210)	20	0	37,0	$1,8 \cdot 10^{-6}$
		5	15,5	$7,8 \cdot 10^{-7}$
	6	0	18,0	$9,0 \cdot 10^{-7}$
		5	14,0	$7,0 \cdot 10^{-7}$
Сталь 35ХГСА (HRC 40...45)	20	0	8,2	$4,1 \cdot 10^{-7}$
		5	3,9	$2,0 \cdot 10^{-7}$
	6	0	4,7	$2,3 \cdot 10^{-7}$
		5	3,2	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Сталь 50Х (HRC 48...52)	20	0	6,7	$3,4 \cdot 10^{-7}$
		5	4,1	$2,0 \cdot 10^{-7}$
	6	0	3,5	$1,7 \cdot 10^{-7}$
		5	2,6	$1,3 \cdot 10^{-7}$

Статистический анализ результатов экспериментов позволил выявить следующие значимые и адекватные зависимости для расчета интенсивности изнашивания шлифованных поверхностей из различных конструкционных материалов в период нормального изнашивания:

- сталь 45 (HB 200...220):

$$I_h = 5,5 \cdot 10^{-7} (1+t_B)^{-0,35} (t-5)^{0,15}; \quad (1)$$

- сталь 45 (HRC 46...50):

$$I_h = 1,9 \cdot 10^{-7} (1+t_B)^{-0,20} (t-5)^{0,20}; \quad (2)$$

- сталь 12X18H10T (HB 190...210):

$$I_h = 9,0 \cdot 10^{-7} (1+t_B)^{-0,35} (t-5)^{0,20}; \quad (3)$$

- сталь 12ХН3А (HRC 58...62):

$$I_h = 1,7 \cdot 10^{-7} (1+t_B)^{-0,25}; \quad (4)$$

- сталь 35ХГСА (HRC 40...45):

$$I_h = 2,3 \cdot 10^{-7} (1+t_B)^{-0,25} (t-5)^{0,20}; \quad (5)$$

- сталь 50X (HRC 48...52):

$$I_h = 1,7 \cdot 10^{-7} (1+t_B)^{-0,20} (t-5)^{0,25}. \quad (6)$$

В этих формулах  $t_B$  – время выхаживания (0...5 мин);  $t$  – глубина шлифования (6...20 мкм).

Для оценки износостойкости поверхности детали в узле трения необходимо значение интенсивности изнашивания, рассчитанное по формулам (1-6), разделить на масштабный коэффициент:

$$I_{hd} = \frac{I_h}{k_M}, \quad (7)$$

где  $I_{hd}$  – интенсивность изнашивания поверхности детали;  $k_M$  – масштабный коэффициент [6].

$$k_M = \sqrt[6]{\frac{A_{mo} A_{mco} S_d S_{cd}}{A_{m\partial} A_{m\partial} S_o S_{co}}}, \quad (8)$$

где  $A_{то}$ ,  $A_{тсо}$  – площадь трения соответственно образца и сопряженного образца (индентора);  $A_{тд}$ ,  $A_{тсд}$  – площадь трения соответственно детали и сопряженной детали узла трения;  $S_o$ ,  $S_{co}$  – отношение площади поверхности, не участвующей в трении, к объему соответственно образца и индентора;  $S_d$ ,  $S_{сд}$  – отношение рабочей площади поверхности, не участвующей в трении, к объему соответственно детали и сопряженной детали узла трения.

Для расчета величины  $A_{тсо}$  можно воспользоваться уравнениями теории Герца. В конечном итоге получим

$$A_{mco} = 4 \sqrt{Ns \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}},$$

где  $N$  – нагрузка на индентор;  $s$  – ширина индентора;  $\mu_1, \mu_2, E_1, E_2$  – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов образца и индентора;  $R_1, R_2$  – радиусы соответственно образца и индентора.

Остальные величины в формуле (8), характеризующие образец и индентор, для условий проведенных лабораторных триботехнических испытаний могут быть рассчитаны следующим образом:

$$A_{mo} = 2\pi R_1 s; \quad S_{co} = \frac{2}{R_2} - \frac{A_{mco}}{\pi R_2^2 s}; \quad S_o \approx \frac{2(B-s)}{R_1 B}.$$

В последней формуле величина  $B$  – это ширина образца.

Обычно значения масштабных коэффициентов для серийных машин трения составляют от 5 до 50, т.е. при лабораторных испытаниях ускоряется процесс изнашивания образца по сравнению с эксплуатацией реальной детали.

Если в ходе триботехнических испытаний воспроизводятся элементы эксплуатационных условий, существенно влияющие на износ (например, уровень вибрационных нагрузок или тепловой режим работы пары трения), то значение интенсивности изнашивания, рассчитанное по формуле (7), следует разделить на коэффициент ускорения. Коэффициент ускорения устанавливается анализом соотношений интенсивностей изнашивания в различные периоды работы испытуемого сопряжения в эксплуатационных и лабораторных условиях [7; 8]. Следует отметить, что это довольно трудоемкая и сложная процедура. Еще более затруднен расчет коэффициентов ускорения при варьируемых условиях испытаний.

При оценке износостойкости поверхностей деталей необходимо учитывать, что конструктивная схема сопряжения влияет на распределение износа по поверхности трения [9]. Во многих случаях влияние конструктивных факторов на износостойкость поверхности проявляется в большей степени, чем влияние закономерностей изнашивания материалов и технологических режимов финишной обработки. Поэтому в первую очередь следует провести анализ требований к поверхности трения, конструкции детали и сборочного узла, условий работы детали в узле, базовой технологии изготовления детали, финишных операций по обработке поверхности трения. Если ведущий вид изнашивания поверхности усталостный и она формируется при абразивном шлифовании, то можно, используя представленные результаты исследований, выбрать рациональные условия и режимы финишного шлифования поверхности трения.

Анализируя результаты исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Существенное повышение износостойкости поверхностей трения деталей возможно на стадии их финишной абразивной обработки путем выбора рациональных условий и технологических режимов.

2. Увеличение времени выхаживания и снижение глубины шлифования повышает износостойкость обработанных поверхностей от 1,5 до 3 раз вследствие формирования сильно деформированных поверхностных структур, препятствующих разрушению приповерхностных слоев деталей.

3. Если требуется повышение износостойкости более 3 раз, то следует рассмотреть другие методы конструкторско-технологического обеспечения и повышения износостойкости рассматриваемой поверхности детали, поскольку варьированием режимов шлифования нельзя достичь такого эффекта.

Проведенные исследования позволяют выбрать рациональные условия и режимы финишного шлифования, исходя из необходимости обеспечения требуемой износостойкости поверхности трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бишутин, С.Г. Износостойкость сформированных при шлифовании поверхностных слоев деталей машин: монография/ С.Г. Бишутин, М.И. Прудников; под ред. С.Г. Бишугина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 100 с.
2. Бишутин, С.Г. Качество и износостойкость шлифованных поверхностей деталей автомобилей/ С.Г. Бишутин. – Брянск: Десяточка, 2011. – 100 с.
3. Бишутин, С.Г. Износостойкость деталей машин и механизмов: учеб. пособие/ С.Г. Бишутин, А.О. Горленко, В.П. Матлахов; под ред. С.Г. Бишугина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 112 с.
4. Бишутин, С.Г. Влияние режимов финишного шлифования на износостойкость поверхностей трения/ С.Г. Бишутин// Обработка металлов. – 2011. – №2(51). – С.6-7.
5. Бишутин, С.Г. Структурирование поверхностных слоев деталей при финишной абразивной обработке/ С.Г. Бишутин. – Брянск: БГТУ, 2009. – 100 с.
6. ГОСТ 23.224-86\*. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 28 с.
7. Крайнев, А.Ф. Конструирование машин: справ.-метод. пособие: в 2 т./ А.Ф. Крайнев, А.П. Гусенков, В.В. Болотин [и др.]; под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1994. – Т.2. – 624 с.
8. Скорытин, Ю.В. Ускоренные испытания деталей машин и оборудования на износостойкость/ Ю.В. Скорытин. – Минск: Наука и техника, 1972. – 160 с.
9. Проников, А.С. Надежность машин/ А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 480 с.

Материал поступил в редколлегию 29.08.14.