

УДК 621.891; 621.923  
DOI: 10.12737/22018

С.Г. Бишутин, А.Г. Суслов, В.И. Сакало

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ФИНИШНОГО ШЛИФОВАНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Показана возможность существенного повышения износостойкости поверхностей при их финишной абразивной обработке на основе регулирования термического и силового воздействия на

поверхностный слой путем выбора технологических режимов шлифования.

**Ключевые слова:** износостойкость поверхности, финишное шлифование, технологические режимы обработки, триботехнические испытания.

S.G. Bishutin, A.G. Suslov, V.I. Sakalo

## TECHNOLOGICAL MODE EFFECT OF FINISH GRINDING ON TRIBOTECHNICAL INDICES OF SURFACES MACHINED

Grinding is the most common finish stage of friction surface machining. The surface machined is transferred in a non-equilibrium state in consequence of thermal and power effect at grinding. During friction part material strives for a more equilibrium state in micro-contacts of surface layers due to the presence of a considerable share of a defect phase formed at finish grinding. It is evident that the process of the material transition from a non-equilibrium state (after grinding) into a more equilibrium state (at surface running-in) and mainly defines the character of modes and finish grinding effect upon surface tribotechnical indices (wear intensity, running-in period, constant of friction).

The researches were carried out in two stages. In the first stage at the expense of changes of grinding depth and time of surface sparking-out (that is, the intensity and duration of thermal and power effect of grinding on a sample) there were formed surface layers with different parameters on steel samples. In the se-

cond stage of investigations there were carried out tribotechnical tests of grinded samples under the same conditions and, in such a way the effect of grinding modes on surface durability was evaluated.

On the basis of the results there were revealed the dependences of sample wear on test time and also dependences for the computation of wear intensity in grinded surfaces made of different structural materials.

It is shown that at the abrasion there are possibilities for considerable increase (up to several times) of machinery surfaces durability by means of grinding depth changes and time of surface sparking-out, as these technological modes define the intensity and duration of thermal and power effects of abrasion upon a surface layer.

**Key words:** surface durability, finish grinding, technological modes of working, tribotechnical tests.

Как известно, большая часть деталей (до 50%) выходит из строя вследствие интенсивного изнашивания. При этом большинство деталей машин выбраковывается из-за незначительного износа рабочих поверхностей, составляющего не более 1 % исходной массы деталей [1-4]. Поэтому повышение износостойкости деталей путем выбора рациональных режимов их финишной механической обработки является актуальной задачей.

Наиболее часто финишным этапом механической обработки поверхностей трения является шлифование. Обработанная поверхность вследствие термического и силового воздействия при шлифовании переводится в неравновесное состояние. В

процессе трения материал детали в микроконтактах поверхностных слоев стремится к более равновесному состоянию благодаря наличию значительной доли дефектной фазы, сформированной при финишной абразивной обработке. Очевидно, что процесс перехода материала из неравновесного состояния (после шлифования) в более равновесное (при приработке поверхностей) в основном и определяет характер влияния режимов и условий финишной абразивной обработки на триботехнические показатели поверхностей.

Наиболее приемлемым способом формирования неравновесных состояний поверхностных слоев при традиционном шлифовании является изменение глубины

шлифования и времени выхаживания поверхности. Указанные параметры определяют интенсивность и длительность термического и силового воздействия абразивной обработки на поверхностный слой. В этой связи исследования проводились в два этапа.

На первом этапе цилиндрические образцы из различных материалов были подвергнуты шлифованию на круглошлифовальном станке 3Е12 электрокорундовым кругом прямого профиля зернистостью 16. Образцы устанавливались на оправке, которая базировалась в центрах станка (рис. 1). Перед обработкой каждого образца

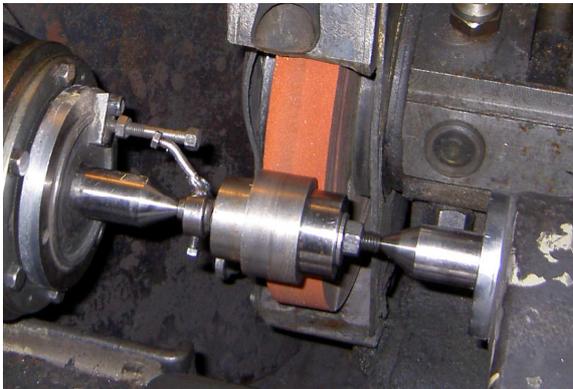


Рис. 1. Шлифование периферией круга: 1 – центр станка; 2 – оправка; 3 – образцы; 4 – шлифовальный круг

круг подвергался алмазной правке. С каждого образца предварительно сошлифовывался слой материала для устранения влияния технологической наследственности и стабилизации термического и силового воздействия при эксперименте. Силовое и термическое воздействие менялось варьированием глубины шлифования и времени выхаживания поверхности. Уровни варьирования указанных факторов определялись с учетом результатов, представленных в [5-7].

Второй этап исследований заключался в проведении триботехнических испытаний шлифованных образцов. Испытания проводились с использованием АСНИ на базе машины трения МИ-1М по схеме «вращающийся диск – невращающийся индентор» (рис. 2). Данная АСНИ способна в процессе испытаний регистриро-

вать значения износа и коэффициента трения. Шлифованные поверхности образцов



Рис. 2. Шлифованный образец в шпинделе машины трения МИ-1М: 1 – индентор; 2 – вращающийся образец

диаметром 60 мм и длиной 16 мм имели радиальное биение относительно базового отверстия 0,005...0,01мм и шероховатость  $Ra = 0,5...0,6$  мкм. Чтобы исключить влияние износа индентора на результаты испытаний, он был выполнен из твердого сплава ВК8 (ГОСТ 19070). Перед каждым испытанием емкость для смазочного материала (масло И-20А) промывалась бензином и высушивалась на воздухе при нормальной температуре. Затем она устанавливалась в испытательную установку и заполнялась новым маслом. 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). Нагрузка на индентор составляла 150 Н, скорость относительно скольжения – 1,3 м/с. Результаты испытаний представлены в таблице.

Таблица

## Триботехнические показатели шлифованных поверхностей

Материал (твердость)	Глубина шлифования, мкм	Время выхаживания, мин	Износ образца, мкм	Интенсивность изнашивания	Период приработки, ч
Сталь 45 (HB 200...220)	20	0	17,0	$8,5 \cdot 10^{-7}$	4,0...4,5
		5	9,5	$4,7 \cdot 10^{-7}$	3,0...3,5
	6	0	11,0	$5,5 \cdot 10^{-7}$	3,0...3,5
		5	6,5	$3,2 \cdot 10^{-7}$	2,7...3,0
Сталь 12ХН3А (HRC58...62)	6	0	3,4	$1,7 \cdot 10^{-7}$	2,0...2,5
		5	2,2	$1,1 \cdot 10^{-7}$	1,5...2,0
Сталь 45 (HRC 46...50)	20	0	4,8	$2,4 \cdot 10^{-7}$	3,5...4,0
		5	3,5	$1,7 \cdot 10^{-7}$	1,5...2,0
	6	0	3,7	$1,9 \cdot 10^{-7}$	2,5...3,0
		5	2,9	$1,2 \cdot 10^{-7}$	1,7...2,0
Сталь 12Х18Н10Т (HB 190...210)	20	0	37,0	$1,8 \cdot 10^{-6}$	3,0...3,5
		5	15,5	$7,8 \cdot 10^{-7}$	2,0...2,5
	6	0	18,0	$9,0 \cdot 10^{-7}$	1,5...2,0
		5	13,5	$6,0 \cdot 10^{-7}$	1,5...2,0

По результатам испытаний выявлялась зависимость износа  $U$  образца от времени  $T$  испытаний, аппроксимированная функцией вида

$$U = AT^B,$$

где  $A$ ,  $B$  – эмпирические коэффициенты.

При глубине шлифования 6 мкм:

Материал	Сталь 45 (HB 200...220)	Сталь 45 (HRC 46...50)	Сталь 12Х18Н10Т (HB 190...210)	Сталь 12ХН3А (HRC 58...62)
A	2,5/3,4	1,3/2,0	7,8/3,2	1,1/1,5
B	0,64/0,28	0,51/0,22	0,41/0,63	0,48/0,23

При глубине шлифования 20 мкм:

Материал	Сталь 45 (HB 200...220)	Сталь 45 (HRC 46...50)	Сталь 12Х18Н10Т (HB 190...210)	Сталь 12ХН3А (HRC 58...62)
A	3,7/5,0	1,3/2,0	13,3/4,0	1,8/2,7
B	0,60/0,3	0,57/0,28	0,47/0,60	0,50/0,26

В числителе представлены данные, полученные при отсутствии выхаживания поверхности шлифовальным кругом, в знаменателе – при выхаживании в течение 5 мин.

Выявленные в результате испытаний некоторые кривые триботехнических показателей представлены на рис. 3 – 7.

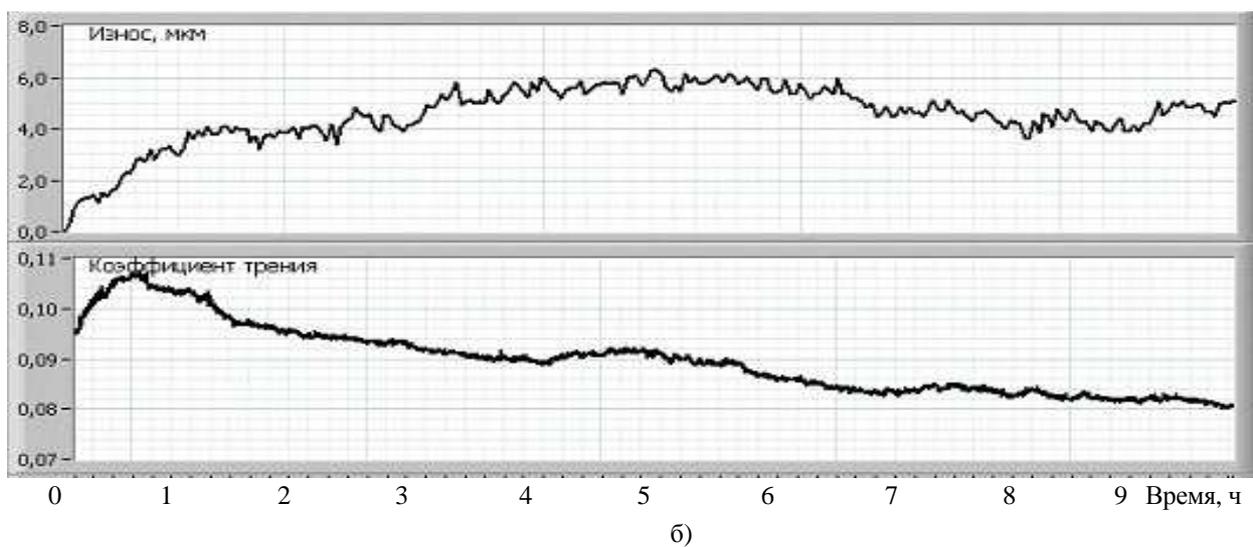
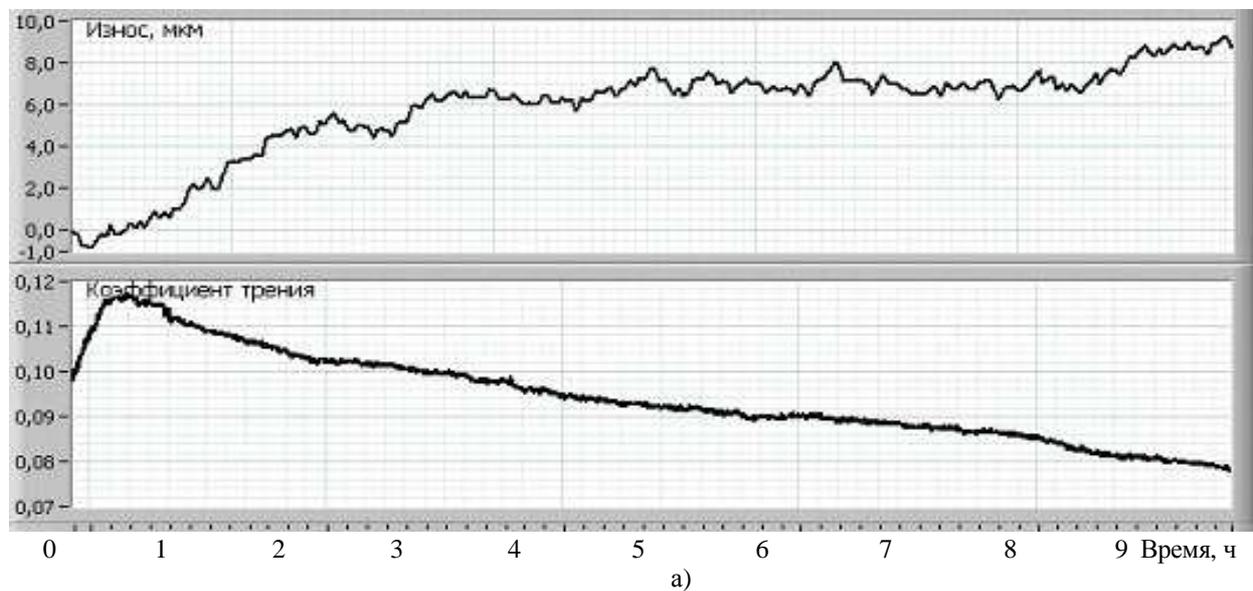


Рис. 3. Характерные кривые изнашивания и изменения коэффициента трения для образцов из стали 45 (НВ 190...220) после обычного шлифования (а) и абразивной обработки с регламентированным термическим и силовым воздействием (б)

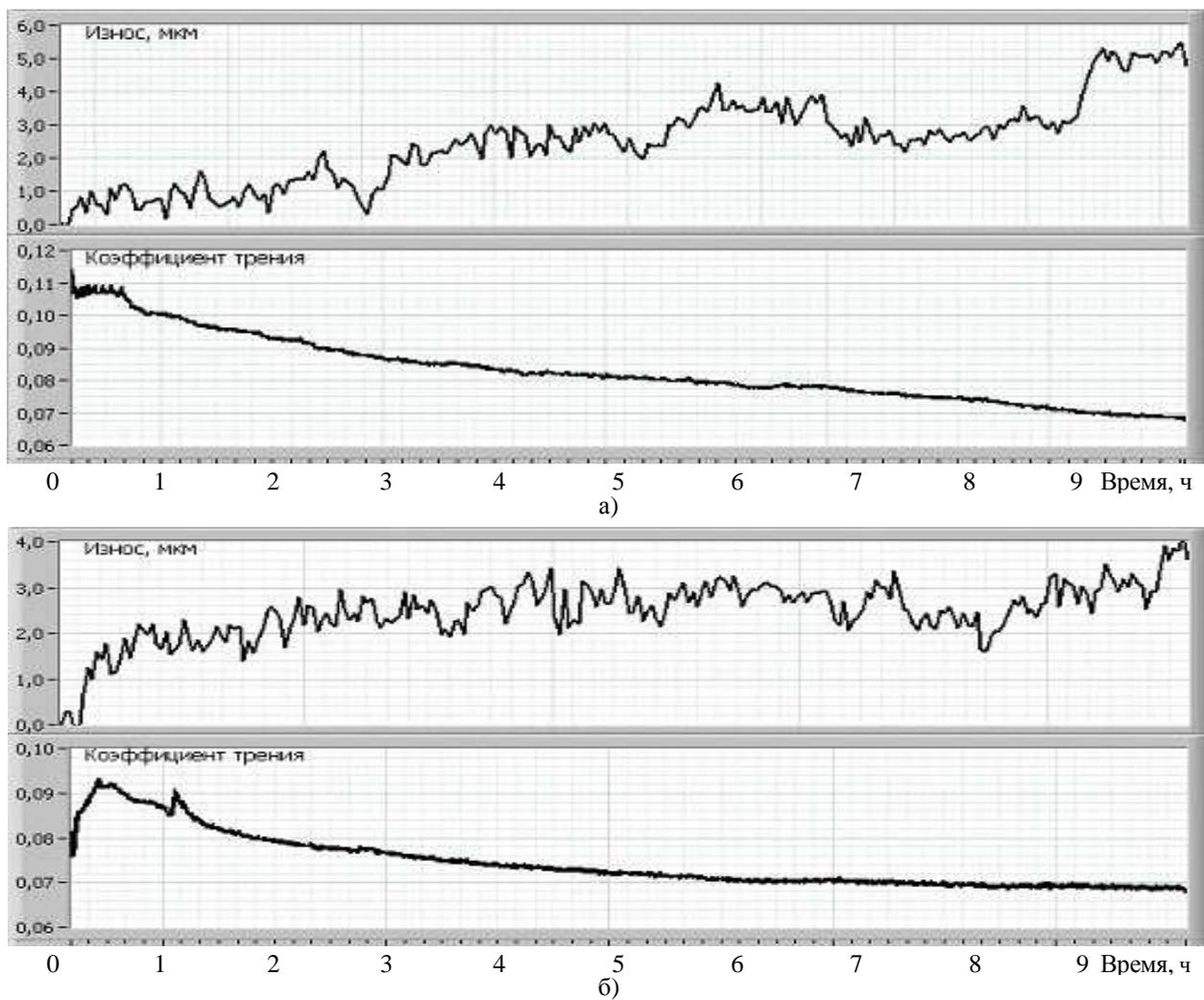


Рис. 4. Характерные кривые изнашивания и изменения коэффициента трения для образцов из закаленной стали 45 после обычного шлифования (а) и абразивной обработки с регламентированным термическим и силовым воздействием (б)

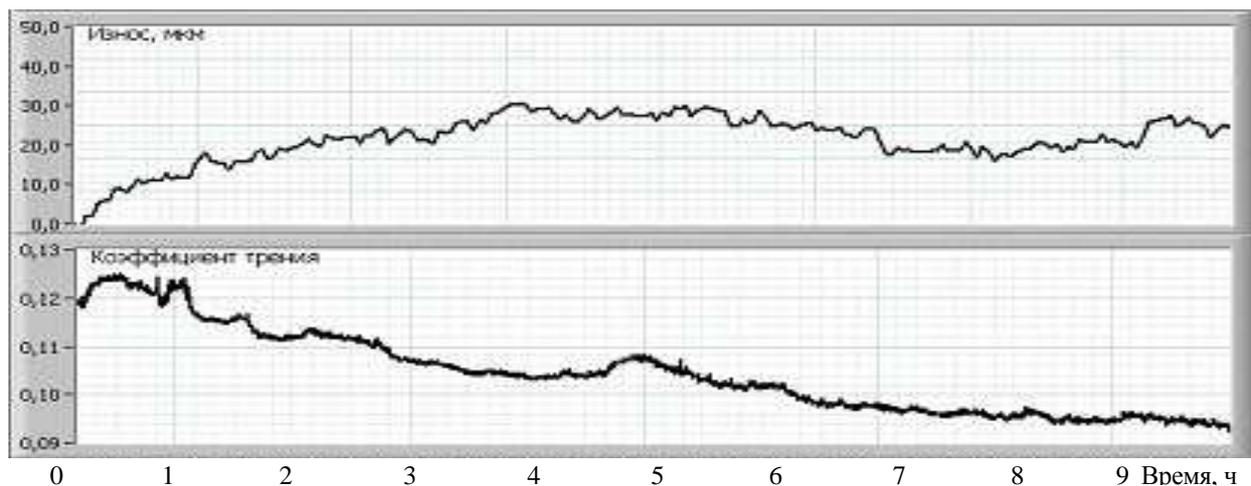


Рис. 5. Характерная кривая изнашивания и изменения коэффициента трения для образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т после шлифования

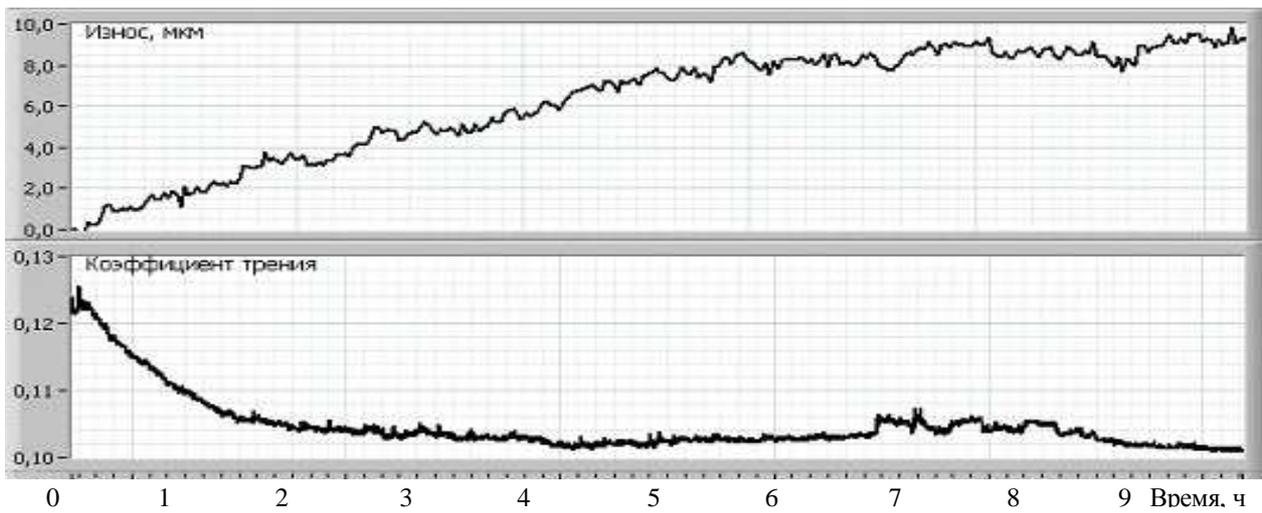


Рис. 6. Характерная кривая изнашивания и изменения коэффициента трения для образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т после абразивной обработки с регламентированным термическим и силовым воздействием

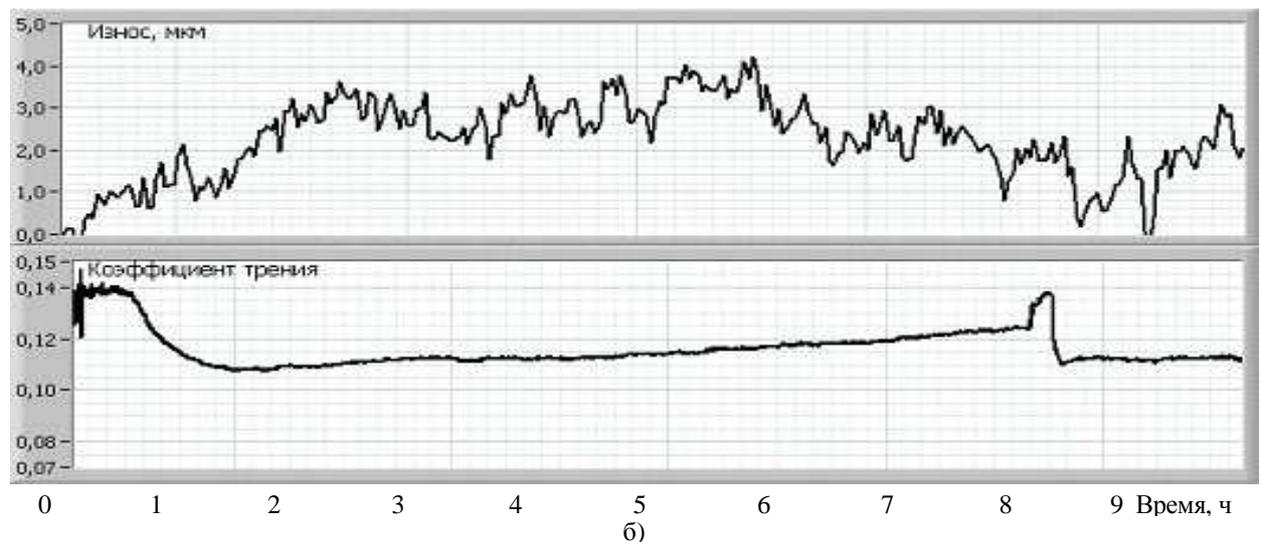
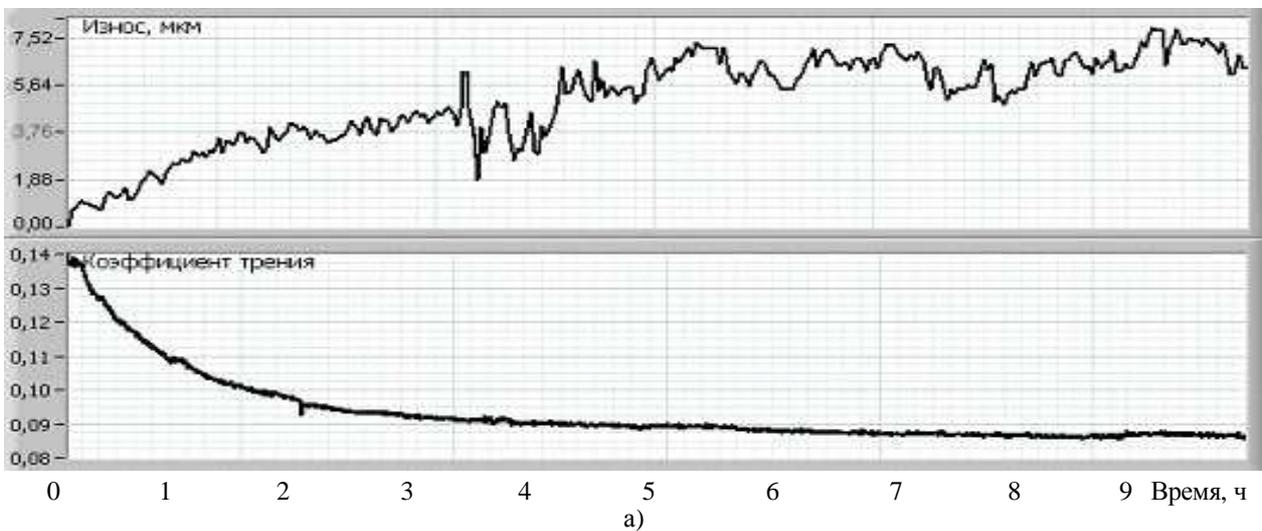


Рис. 7. Характерные кривые изнашивания и изменения коэффициента трения для образцов из закаленной стали 12ХН3А после обычного шлифования (а) и абразивной обработки с регламентированным термическим и силовым воздействием (б)

Также в результате исследований было установлено, что износостойкость поверхностных слоев, подвергшихся пластической деформации при контактировании с вершинами активных зерен абразивного инструмента, зависит от направления вектора скорости скольжения. При совпадении векторов скорости скольжения и главного движения резания наблюдается уменьшение интенсивности изнашивания от 1,2 до 2 раз по отношению к интенсивности изнашивания при разнонаправленности указанных векторов. Это объясняется неравномерной пластической деформацией обрабатываемого материала, сопровождающейся значительным ориентированием твердотельных микро- и наноструктур вдоль вектора главного движения резания. При трении против вектора скорости резания, очевидно, реализуются менее благоприятные условия нагружения материала поверхностного слоя, приводящие к более интенсивному образованию микро-трещин и частиц износа.

Как видно, технологические режимы шлифования оказывают существенное влияние на износостойкость поверхности.

Статистический анализ результатов экспериментов позволил выявить следующие

значимые и адекватные зависимости для расчета интенсивности изнашивания шлифованных поверхностей различных конструкционных материалов в период нормального изнашивания:

- сталь 45 (HB 200...220):

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

- сталь 45 (HRC 46...50):

$$I_h = 3,7 \cdot 10^{-7} (1 + t_B)^{-0,15} (t - 5)^{0,10};$$

- сталь 12X18H10T (HB 190...210):

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

- сталь 12ХН3А (HRC 58...62):

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

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

Таким образом, при финишном шлифовании имеются возможности существенного повышения (до нескольких раз) износостойкости поверхностей деталей машин. Повысить износостойкость деталей пар трения возможно формированием износостойких поверхностных слоев путем регулирования термического и силового воздействия при шлифовании за счет изменения глубины резания и времени выхаживания поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии/ Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.:Физматлит, 2007. – 368 с.
2. Бишутин, С.Г. Повышение износостойкости поверхностей деталей машин при финишной абразивной обработке/ С.Г. Бишутин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – №2. – С.11-15.
3. Бишутин, С.Г. Качество и износостойкость шлифованных поверхностей деталей автомобилей/ С.Г. Бишутин. – Брянск: Десяточка, 2011. – 100 с.
4. Суслов, А.Г. Автоматизация расчета нормальной контактной жесткости стыков плоских поверхностей шлифованных деталей/А.Г. Суслов, С.Г. Бишутин, Д.М. Медведев, В.А. Хандожко//
1. Myshkin, N.K. *Friction, Lubrication, Wear. Physical Fundamentals and Technical Applications of Tribology*/ N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. – M.:Physmathlit, 2007. – pp. 368.
2. Bishutin, S.G. Durability increase of machinery part surfaces at finish abrasion / S.G Bishutin // *Bul-*

Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – №2. – С.135-139.

5. Бишутин, С.Г. Износостойкость сформированных при шлифовании поверхностных слоев деталей машин/ С.Г. Бишутин, М.И. Прудников; под ред. С.Г. Бишутин. – Брянск: БГТУ, 2010. – 100 с.
6. Бишутин, С.Г. Износостойкость деталей машин и механизмов: учеб. пособие/С.Г. Бишутин, А.О. Горленко, В.П. Матлахов; под ред. С.Г. Бишутин. – Брянск: БГТУ, 2010. – 112 с.
7. Бишутин, С.Г. Математическое моделирование формирования микронеровностей поверхности при шлифовании с учетом изнашивания инструмента/ С.Г. Бишутин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – №1. – С.78-82.

*letin of Bryansk State Technical University.* – 2013. – №2. – pp.11-15.

3. Bishutin, S.G. *Quality and Durability in Grinded Surfaces of Motor Car Parts*/ S.G. Bishutin. – Bryansk: Ten, 2011. – pp. 100.

4. Suslov, A.G. Calculation automation of normal contact rigidity in joints of grinded part flats/A.G. Suslov, S.G. Bishutin, D.M. Medvedev, V.A. Khandozhko// *Bulletin of Braynsk State Technical University*. – 2006. – №2. – pp.135-139.
5. Bishutin, S.G. *Durability of Machinery Part Surface Layers Formed at Grinding/* S.G. Bishutin, M.I. Prudnikov; under the editorship of S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2010. – pp. 100.
6. Bishutin, S.G. *Machinery and Mechanism Parts Durability: Manual/*S.G. Bishutin, A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov; under the editorship of S.G. Bishutin. – Bryansk: BSTU, 2010. – pp. 112.
7. Bishutin, S.G. Simulation of surface micro-roughness formation at grinding taking into account tool wear/ S.G. Bishutin // *Mechanical Engineering Problems and Machinery Reliability*. – 2005. – №1. – pp.78-82.

*Статья поступила в редколлегию 15.03.2016.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Киричек А.В.*

#### Сведения об авторах:

**Бишутин Сергей Геннадьевич**, д. т. н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 51-19-97.

**Суслов Анатолий Григорьевич**, д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

**Сакало Владимир Иванович**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Механика, динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-86-37, e-mail: [sakalo@tu-bryansk.ru](mailto:sakalo@tu-bryansk.ru).

**Bishutin Sergey Gennadievich**, D.Eng., Prof. of the Dep. “Motor Transport”, Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 51-19-97.

**Suslov Anatoly Grigorievich**, D.Eng., Prof. Bauman State Technical University of Moscow.

**Sakalo Vladimir Ivanovich**, D.Eng., Prof., Head of the Dep. “Mechanics, Dynamics and Machinery Durability” Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-86-37, e-mail: [sakalo@tu-bryansk.ru](mailto:sakalo@tu-bryansk.ru).