

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article\_5ad8d291cddcd8.06334386

**А.Г. Суслов**, д.т.н.

(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, 115409, Каширское шоссе, 31)

**Д.М. Медведев**, к.т.н., **Д.И. Петрешин**, д.т.н., **О.Н. Федонин**, д.т.н.

(Брянский государственный технический университет,  
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)

E-mail: atsys@tu-bryansk.ru

## **Система автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием**

*Рассмотрены особенности реализации алгоритмического и математического обеспечения системы автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при их обработке резанием. При этом используется адаптивная система управления качеством обрабатываемых поверхностей деталей на станках с ЧПУ. Данная система позволяет снизить себестоимость изготовления деталей и обеспечить требуемую их долговечность.*

**Ключевые слова:** автоматизация; износостойкость; детали машин; обработка резанием; станок с ЧПУ; адаптивная система управления.

**A.G. Suslov**, D. Eng.,

(National Research Nuclear University "MIFI", 31, Kashirskoye Highway, 115409 Moscow)

**D.M. Medvedev**, Can. Eng., **D.I. Petreshin**, D. Eng., **O.N. Fedonin**, D. Eng.

(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Avenue, Bryansk, 241035)

## **System for automated wear-resistance technological control of machinery at cutting**

*The peculiarities in the realization of algorithmic and mathematical software for technological control of machinery wear during machine parts cutting are considered. At the same time the adaptive system of quality control of parts surfaces machining on NC machines is used. This system allows decreasing cost price of manufacturing parts and ensuring their required life.*

*The system developed allows choosing a method and modes of part surface finish cutting ensuring a value of its wear intensity at operation not exceeding permissible one with minimum technological cost price.*

*It allows carrying out finish cutting a part surface with the optimum method and in optimum modes on a machine, possibly, equipped with NC systems with the adaptive wear-resistance control of the part under machining.*

**Keywords:** automation; wear-resistance; machinery; cutting; NC machine; Adaptive control system.

### **Введение**

Одним из основных эксплуатационных свойств деталей машин является износостойкость, так как установлено, что до 70 % машин выходит из строя вследствие износа трущихся деталей. При эксплуатации износостойкость определяет долговечность деталей и их соединений в изделиях, которая, в свою

очередь, характеризует надежность машин. Система автоматизированного технологического управления износостойкостью позволит снизить себестоимость изготовления деталей, обеспечивая при этом требуемую надежность машин.

Износостойкость деталей машин оценивается величиной интенсивности их изнашивания при эксплуатации и зависит от состояния

поверхностного слоя деталей, которое формируется на окончательных операциях технологических процессов их обработки. Для окончательной обработки трущихся поверхностей деталей машин наиболее широко используются методы лезвийной и абразивной обработки резанием: точение и шлифование.

**Алгоритмическое обеспечение системы.** Алгоритм работы системы автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием представлен на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм работы системы автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием

Сначала вводятся данные о поверхности детали: материал и размеры, режимы эксплуатации, допустимая величина интенсивности изнашивания. Затем проводится поиск методов и наиболее производительных режимов

окончательной обработки резанием, обеспечивающих величину интенсивности изнашивания поверхности детали при эксплуатации, не превышающую допустимую. Производительность обработки резанием  $Q_v$  определяется как объем удаленного с поверхности детали слоя материала  $V$  за время  $T$ :

$$Q_v = \frac{V}{T}.$$

Далее среди найденных вариантов выполняется выбор метода, обеспечивающего окончательную обработку поверхности детали резанием с минимальной технологической себестоимостью. Расчет себестоимости проводится нормативным способом. Сущность этого способа заключается в определении суммы основной части косвенных затрат (связанных с содержанием и эксплуатацией оборудования), необходимых для выполнения обработки и нормативной заработной платы основных производственных рабочих (основной и дополнительной) с отчислениями на социальное страхование [6]:

$$C = (C_{сз} K_{мч} + C_{зп}) T_0,$$

где  $C_{сз}$  – средние затраты на содержание и эксплуатацию оборудования в течение 1 мин работы;  $K_{мч}$  – коэффициент машино-часа;  $C_{зп}$  – норматив заработной платы станочника;  $T_0$  – основное (машинное) время.

Значения коэффициентов для расчета себестоимости [6] и расчетные формулы основного времени обработки точением и шлифованием приведены в табл. 1.

После этого будут получены и выведены результаты: метод и режимы окончательной обработки резанием поверхности детали, обеспечивающие величину интенсивности ее изнашивания при эксплуатации, не превышающую допустимую, с минимальной технологической себестоимостью. В итоге это позволяет выполнить окончательную обработку резанием поверхности детали оптимальным методом и на оптимальных режимах на станке, по возможности, оснащенной системой ЧПУ с адаптивным управлением износостойкостью обрабатываемой детали.

**Математическое обеспечение системы.** В системе автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием возможно использование как эмпирических, так и теоретических зависимостей интенсивности изнашивания поверхностей деталей машин при эксплуатации от режимов их окончательной обработки резанием.

**1. Значения коэффициентов для расчета себестоимости и расчетные формулы основного времени обработки точением и шлифованием**

Метод обработки	$C_{сз}$ , коп/мин	$K_{мч}$	$C_{зп}$ , коп/мин	$T_o$ , мин
Точение	6,65	1	23,86	$T_o = \frac{bi}{ns\lambda}$
Шлифование		0,7	26,39	$T_o = \frac{a}{ns\lambda}$
<p><i>Примечание:</i> <math>b</math> – ширина обрабатываемой поверхности; <math>i</math> – число ходов режущего инструмента; <math>n</math> – частота вращения детали; <math>s</math> – величина подачи режущего инструмента; <math>\lambda</math> – коэффициент резания; <math>a</math> – припуск на сторону.</p>				

При эмпирическом моделировании устанавливается непосредственная функциональная взаимосвязь между режимами окончательной обработки детали резанием и интенсивностью ее изнашивания при эксплуатации путем проведения специально поставленных опытов в определенных условиях. В результате обработки опытных данных получают эмпирические формулы – обычно в виде степенных функций.

Недостатки эмпирического моделирования: частный характер получаемых формул, отсутствие в них ясно выраженного физического содержания, необходимость проведения большого числа трудоемких опытов. Однако при проведении многофакторного экстремального эксперимента с использованием автоматизированных систем научных исследований последний недостаток теряет актуальность [5].

При теоретическом моделировании часто используется метод подстановки, при котором сначала определяются параметры качества поверхностного слоя детали в зависимости от режимов ее окончательной обработки резанием, затем для найденных параметров качества рассчитывается интенсивность изнашивания при эксплуатации [1]. Получаемые данным методом формулы обладают большей универсальностью, чем эмпирические, так как справедливы для всего диапазона учитываемых в них параметров и условий, но менее точны и достаточно громоздки.

Наиболее целесообразным является использование метода моделирования физической аналогии процессов окончательной обработки резанием и трения при эксплуатации

деталей машин. Его основные преимущества: возможность теоретического исследования физической природы взаимосвязи исследуемых процессов, наглядные и компактные формулы. Суть данного метода моделирования состоит в следующем.

Подавляющее большинство методов обработки основано на определенной кинематике относительных перемещений инструмента и заготовки при силовом, температурном, химическом или их совместном воздействии на обрабатываемую поверхность [1, 6]. В то же время любая изготовленная деталь имеет определенное функциональное назначение. Наряду с первоначальным позиционированием деталей в сборочной единице, определяемым точностью их размеров, в процессе эксплуатации детали имеют новые кинематику относительных движений, силовое, температурное и химическое воздействия. Это приводит к изменению взаимного положения собранных деталей, потере точности, и, иногда, к разрушению машин [3].

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод об идентичности процессов воздействия на деталь, как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации. Поэтому необходимо целенаправленное кинематическое, силовое, температурное и химическое воздействия на детали при изготовлении, исходя из их дальнейшего функционального назначения. Например, для повышения долговечности пар трения необходимо максимально уменьшить их приработку при эксплуатации. Этого добиваются окончательной обработкой деталей, моделирующей ускоренный процесс их приработки, который представляет собой микрорезание и пластические деформации микронеровностей поверхности [3].

В рамках энергетического подхода [2, 7, 8, 9] численным показателем, отражающим параметры процессов физического воздействия на деталь при окончательной обработке резанием и при трении в ходе эксплуатации, служит удельная энергоёмкость  $w$ , то есть энергия  $W$ , затрачиваемая на удаление единицы объема  $V$  материала детали:

$$w = \frac{W}{V}$$

При этом взаимосвязь между удельными энергоёмкостями при трении в ходе эксплуатации поверхностей деталей машин  $w_{тр}$  и при их окончательной обработке резанием  $w_{рез}$  описывается при помощи однофакторной статистической модели:

$$w_{тр} = b_0 w_{рез}^{b_1}$$

где  $b_0$  и  $b_1$  – коэффициенты.

В системе автоматизированного технологического управления износостойкостью деталей машин при обработке резанием наиболее целесообразно использовать следующие теоретические зависимости, полученные на основе энергетического подхода [2].

Зависимость величины интенсивности изнашивания  $I_h$  поверхностей деталей машин при эксплуатации от условий их механической обработки (продольное точение) определяется по формуле

$$I_h = 0,024 \frac{fN}{\pi db} \left( \frac{st}{P_z} \right)^{1,34}, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $N$  – величина нормальной нагрузки на трущуюся поверхность;  $d$  – диаметр трущейся (обрабатываемой) поверхности;  $b$  – ширина трущейся (обрабатываемой) поверхности;  $s$  – величина продольной подачи резца на один оборот детали;  $t$  – глубина резания;  $P_z$  – величина касательной составляющей силы резания.

Зависимость величины интенсивности изнашивания  $I_h$  поверхностей деталей машин при эксплуатации от условий их механической обработки (круглое шлифование с радиальной подачей) определяется по формуле

$$I_h = 0,08 \frac{fN}{\pi db} \left( \frac{v_b b s_r}{P_z v_{кр}} \right)^{0,92}, \quad (2)$$

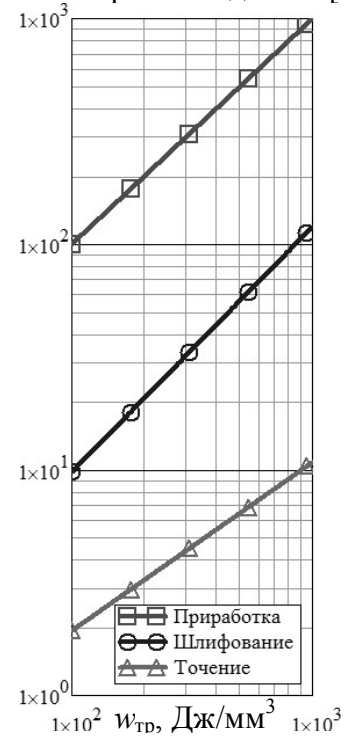
где  $v_b$  – скорость вращательного движения заготовки;  $s_r$  – величина радиальной подачи шлифовального круга на один оборот детали;  $v_{кр}$  – скорость шлифовального круга.

Формулы (1) и (2) содержат управляющие факторы (величину подачи, глубину резания и скорость вращения заготовки), с помощью которых реализуется технологическое обеспечение износостойкости поверхностей деталей машин при их окончательной обработке резанием. Эти же формулы используются для адаптивного управления износостойкостью деталей машин при их окончательной обработке резанием на станках с ЧПУ.

Описываемую данными формулами взаимосвязь между удельными энергоемкостями при трении поверхностей деталей машин в ходе эксплуатации и при их окончательной обработке резанием иллюстрирует рис. 2.

**Система адаптивного управления износостойкостью деталей машин при их окончательной обработке резанием на станках с**

**ЧПУ.** Необходимость применения адаптивной системы управления износостойкостью обоснована тем, что изменение жесткости технологической системы, износ инструмента, разброс припуска и твердости заготовок приводят к рассеянию величины интенсивности изнашивания поверхностей деталей машин при их эксплуатации. Кроме того, для ряда ответственных изделий требуется технологически обеспечивать закономерное изменение величины интенсивности изнашивания на различных участках поверхности детали [4; 10].



**Рис. 2.** Взаимосвязь между удельными энергоемкостями при трении поверхностей деталей машин в ходе эксплуатации и при их окончательной обработке резанием

При адаптивном управлении износостойкостью во время окончательной обработки деталей машин резанием на станках с ЧПУ формулы (1) и (2) могут использоваться для косвенной оценки величины интенсивности изнашивания поверхностей при их эксплуатации на основе измерения величины касательной составляющей силы резания.

В состав адаптивной системы управления износостойкостью входят: датчик, измеряющий величину касательной составляющей силы резания; контроллер сопряжения датчика с системой ЧПУ станка; устройство числового программного управления (УЧПУ) станка, реализующее управление технологической системой за счет изменения величины подачи режущего инструмента или скорости враще-

ния заготовки. Обычно УЧПУ станков предназначены только для управления процессом обработки деталей. Поэтому для построения адаптивной системы управления износостойкостью деталей машин на базе УЧПУ необходимо дополнительно использовать ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением, реализующим алгоритм адаптивной работы системы.

### Заключение

Разработанная система реализует одноступенчатый подход к управлению износостойкостью поверхностей деталей машин, который основывается на объединении задач конструктора и технолога и определении оптимальных методов и режимов окончательной обработки резанием еще на стадии проектирования машин. Применение разработанной системы позволит получить следующие преимущества:

- снизить себестоимость изготовления деталей и обеспечить требуемую их долговечность;
- сократить время и повысить надежность процесса проектирования машин за счет автоматизации;
- выявить непосредственные технологические пути повышения износостойкости деталей машин;
- реализовать научный подход к выбору метода и режимов окончательной обработки деталей машин резанием, обеспечивающих их износостойкость с минимальной технологической себестоимостью;
- реализовать адаптивное управление износостойкостью деталей машин при их окончательной обработке резанием на станках с ЧПУ.

Математическое обеспечение разработанной системы одновременно используется как для технологического обеспечения износостойкости поверхностей деталей машин, так и для адаптивного управления их износостойкостью на станках с ЧПУ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Инженерия** поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. **Медведев, Д.М.** Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин при механической обработке // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – № 2 (26). – С. 4–9.
3. **Научно-технические технологии в машиностроении** / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.
4. **Петрешин, Д.И.** Технологическое обеспечение параметров качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности // Научно-технические

технологии в машиностроении. – 2012. – № 9 (15). – С. 25–27.

5. **Прудников, М.И.** Метод триботехнических испытаний цилиндрических поверхностей трения // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2008. – № 2 (18). – С. 48–56.

6. **Справочник технолога-машиностроителя**: в 2 т. Т. 2 / А.М. Дальский [и др.]; под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение: Машиностроение-1, 2003. – 943 с.

7. **Суслов, А.Г.** Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин // Вестник машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 54–58.

8. **Суслов, А.Г., Медведев, Д.М., Шоев, А.Н.** Технологическое повышение долговечности поверхностей трения деталей машин на базе энергетического подхода // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 6. – С. 46–48.

9. **Суслов, А.Г., Медведев, Д.М., Шоев, А.Н.** Энергетический подход к технологическому обеспечению износостойкости поверхностей трения деталей машин // Вестник машиностроения. – 2011. – № 10. – С. 56–58.

10. **Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И.** Автоматизированное обеспечение параметров качества поверхностей, получаемых механической обработкой // Вестник машиностроения. – 2013. – № 4. – С. 54–58.

### REFERENCES

1. *Parts Surface Engineering* / A.G. Suslov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.
2. Medvedev, D.M. Single-stage technological support of wear-resistance in cylindrical surfaces of machinery at machining // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2010. – No.2(26). – pp. 4-9.
3. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezъazychny et al.; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 528.
4. Petreshin, D.I. Technological support of quality parameters in parts surfaces of machinery under conditions of uncertainty // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.9(15). – pp. 25-27.
5. Prudnikov, M.I. Method of tribotechnical tests of cylindrical friction surfaces // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2008. – No.2(18). – pp. 48-56.
6. *References Book of Technologist-Machinist*: in 2 Vol, Vol.2 / A.M. Dalsky [et al.]; 5-th edition revised. – M.: Mechanical Engineering: Mechanical Engineering-1, 2003. – pp. 943.
7. Suslov, A.G. Single-stage technological support of wear-resistance in cylindrical surfaces of machine parts // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2010. – No.6. – pp. 54-58.
8. Suslov, A.G., Medvedev, D.M., Shoev, A.N. Technological life increase of in friction surfaces of machine friction parts based on energy approach // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – 2011. – No.6. – pp. 46-48.
9. Suslov, A.G., Medvedev, D.M., Shoev, A.N. Energy approach to technological support of wear-resistance in friction surfaces of machine parts // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2011. – No.10. – pp. 56-58.
10. Suslov, A.G., Petreshin, D.I. Automated quality parameter support of surfaces obtained by machining // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2013. – No.4. – pp. 54-58.

Рецензент д.т.н. С.М. Братан