

УДК 621.9

DOI: 10.12737/article\_5971e872c26d91.93894036

**А.Г. Суслов**, д.т.н.

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

**Д.И. Петрешин**, д.т.н.,

**О.Н. Федонин**, д.т.н.,

**В.А. Хандожко**, к.т.н.

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

E-mail: unti@tu-bryansk.ru

## **Автоматизированная технологическая система обеспечения контактной жесткости деталей машин**

*Одноступенчатое технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений основывается на объединении и автоматизированном решении задач конструктора и технолога для определения оптимальных условий обработки деталей на стадии конструкторско-технологической подготовки производства. Совместное использование самообучающейся технологической системы и автоматизированной системы научных исследований контактной жесткости позволит с заданной точностью обеспечивать требуемое значение эксплуатационного свойства деталей машин и их соединений.*

**Ключевые слова:** автоматизированная система; эксплуатационные свойства; контактная жесткость; параметры качества поверхностного слоя; механическая обработка; адаптивная система управления.

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

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

**D.I. Petreshin**, D. Eng.,

**O.N. Fedonin**, D. Eng.,

**V.A. Khandozhko**, Can. Eng.

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University", 7, 50- Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

## **Automated technological system to ensure contact stiffness of machine parts**

*A single-stage technological support of operation properties of machine parts and their joints is based on the integration and on the automated solution of problems of a designer and technologist for the definition of optimum conditions for machining parts at the stage of design-technological pre-production. A joint use of a self-learning technological system and an automated system of scientific investigations of contact stiffness will allow ensuring a required value of the operation property of machine parts and their units with the specified accuracy.*

**Keywords:** automated system; operation properties; contact stiffness; quality parameters of surface layer; machining; adaptive control system.

Важнейшие показатели, характеризующие качество современных машин и приборов, – точность и надежность в значительной степени зависят от эксплуатационных свойств сопря-

гаемых поверхностей деталей, и в частности контактной жесткости.

Контактная жесткость определяет способность поверхностных слоев деталей, находя-

щихся в контакте, сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать. Контактные перемещения составляют значительную часть в балансе упругих перемещений машин и их узлов. Например, в суппортах токарных станков контактные деформации составляют 80...90 % общих деформаций, в одностоечных координатно-расточных и вертикально-фрезерных станках — до 70 %, в двухстоечных карусельных станках — до 40 % и т.д. [1].

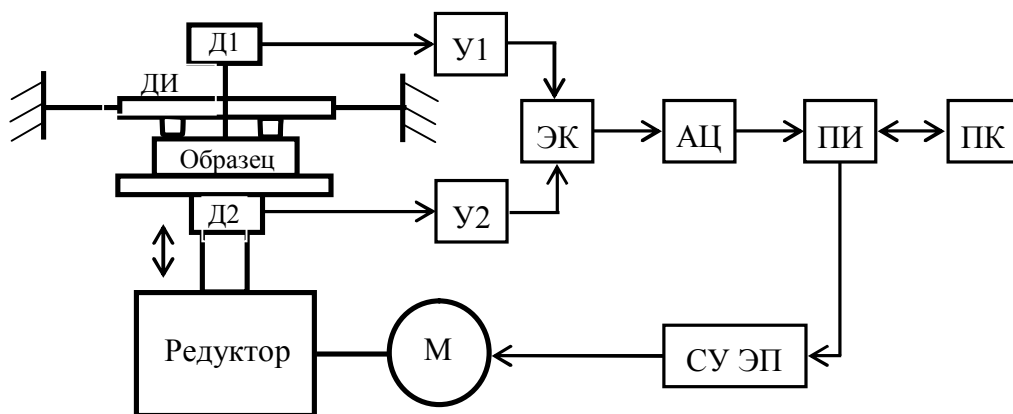
Контактная жесткость зависит от геометрических характеристик качества поверхности (макроотклонения, волнистости, шероховатости) и физико-механических свойств поверхностного слоя (микротвердости) сопрягаемых деталей машин [1, 2, 4]. Контактная жесткость сказывается на точности работы приборов; на точности установки деталей в приспособлениях, на станках; на точности обработки и сборки деталей, т.е. на качестве машиностроительных изделий. Она играет большую роль при определении фактической площади касания, знание которой необходимо для расчета сил трения, оценки влияния предварительной обработки поверхностей на износ деталей, подбора износостойких пар трения, расчета прочности соединений с неподвижными посадками, расчета плотности соединений и т.д. Значение контактной жесткости велико и при изготовлении ответственных деталей с микронной точностью [2].

Анализ работ [2, 4] показывает, что сложилась практика решения задачи технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин, и контактной жесткости в частности, в два этапа. На первом этапе по заданной величине контактной жесткости стыка опреде-

ляются параметры качества контактирующих поверхностей. На втором устанавливают условия обработки, обеспечивающие требуемые параметры качества этих поверхностей.

В настоящий момент развивается новое научное направление в технологии машиностроения – одноступенчатое технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений, которое основывается на объединении и автоматизированном решении задач конструктора и технолога для определения оптимальных условий обработки деталей на стадии конструкторско-технологической подготовки производства [4, 6, 7]. Для реализации автоматизированного технологического обеспечения рассматриваемого эксплуатационного свойства необходимы соответствующее алгоритмическое обеспечение и математические зависимости, отражающие взаимосвязь контактной жесткости с условиями механической обработки различных видов поверхностей деталей машин. Причем при качественном совпадении результатов, приводимых разными исследователями, их количественные оценки контактной жесткости значительно отличаются. В большей степени это связано с различными методами измерения контактной жесткости поверхностей деталей машин.

На сегодняшний момент серийное оборудование для указанных измерений не выпускается, а методически процесс измерения регламентируется только нормалью МР42-82 [3]. В соответствии с требованиями нормы была реализована установка для измерения контактной жесткости в виде автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) контактной жесткости (рис. 1) [5].



**Рис. 1. Схема автоматизированной системы научных исследований контактной жесткости:**

М – электродвигатель; Д1 – индуктивный датчик измерения контактной деформации; Д2 – датчик для измерения нагрузки; ДИ – держатель индентров; У1 и У2 – электронные усилители сигналов с датчиков; ЭК – электронный коммутатор; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПИ – преобразователь интерфейса; ПК – персональный компьютер

Созданная АСНИ предназначена для измерения контактной жесткости плоских, наружных и внутренних цилиндрических поверхностей обработанных с шероховатостью от  $Ra = 0,1$  мкм до  $Ra = 3,2$  мкм и микротвердости образцов от 100 HV до 550 HV. При этом контактная жесткость рабочей поверхности может определяться с учетом только шероховатости или шероховатости и волнистости как при первой, так и при повторной нагрузках.

Перед измерениями в зависимости от формы исследуемой поверхности (плоская, наружная или внутренняя цилиндрическая) и вида контроля (с учетом только шероховатости или шероховатости и волнистости) выбирается соответствующая конфигурация инденторов и схема их расположения [4].

Затем, исходя из заданных параметров  $Ra$  или  $Rz$  и твердости исследуемых образцов, назначаются минимальная и максимальная нагрузка. При этом необходимо, чтобы исследуемый образец был изготовлен из того же материала и теми же технологическими методами, что и реальная деталь.

Исследуемый образец помещается на предметный столик нагрузочного устройства и проводится предварительное контактирование инденторов с исследуемой поверхностью образца для устранения возможных упругих деформаций и люфтов. Затем в автоматическом режиме происходит шестикратное нагружение-разгружение образца и определение математических зависимостей, отражающих взаимосвязь контактной жесткости с условиями механической обработки поверхностей деталей машин, например вида [6]:

– торцевое чистовое точение при первом нагружении:

$$j_1 = C_{j1} S_0^{x1} v^{y1} HB^{z1}; \quad (1)$$

– торцевое чистовое точение при повторном нагружении:

$$j_{повт} = C_{jp} S_0^{x2} v^{y2} HB^{z2}, \quad (2)$$

где  $j_1$  – величина контактной жесткости при первом нагружении, МПа/мкм;  $j_{повт}$  – величина контактной жесткости при повторном нагружении; МПа/мкм;  $S_0$  – величина подачи на оборот, мм/об;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $HB$  – твердость материала по Бринелю, МПа;  $C_{j1}$ ,  $C_{jp}$ ,  $x1$ ,  $y1$ ,  $z1$ ,  $x2$ ,  $y2$ ,  $z2$  – коэффициенты модели.

Таким образом, алгоритмическое, математическое и программное обеспечение разработан-

ной АСНИ позволяет одноступенчато решать задачу технологического обеспечения контактной жесткости деталей машин и их соединений. При этом АСНИ реализует следующий алгоритм поиска оптимального решения рис. 2. В качестве целевой функции в алгоритме АСНИ используется минимум технологической себестоимости.

Исходными данными для функционирования АСНИ являются:

- 1) материал контактирующих деталей;
- 2) размеры контактирующих поверхностей, которые определяют необходимость учета только шероховатости, шероховатости и волнистости или шероховатости, волнистости и макроотклонений;
- 3) нагрузка на контактирующие поверхности деталей.

Косвенно исходными данными является и система технологических ограничений – диапазон варьирования подач, скоростей, силы нагружения при поверхностно-пластическом деформировании и др. По исходным данным определяется требуемое значение контактной жесткости (при первом или повторных нагружениях).



Рис. 2. Алгоритм работы программы для определения режимов механической обработки, обеспечивающих требуемую контактную жесткость с минимальной технологической себестоимостью

На первом этапе выбирается метод обработки и соответствующие математические зависимости. Следующий блок носит сервисный характер и контролирует наличие в среде информации для конкретных материалов, конкретных размеров и т.д.

Далее устанавливается исходный уровень значения входных параметров и выполняется расчет контактной жесткости. Если контактная жесткость получается ниже требуемой, то текущая совокупность условий обработки отбрасывается. При положительных результатах ее включают в область допустимых решений и определяют технологическую себестоимость. Технологическая себестоимость рассчитывается укрупненно на основе машинного времени обработки. Таким образом, перебирается вся область возможных значений входных параметров и формируется область допустимых решений.

На последнем этапе из этой области выбирается сочетание условий обработки, которому соответствует минимальное значение технологической себестоимости. Далее расчет повторяется для всех методов обработки и в конце выбирается вариант с минимальной технологической себестоимостью. Таким образом, полученные математические модели [6] могут быть использованы для технологического обеспечения контактной жесткости.

В математические модели (1) и (2) входят управляющие факторы: величина подачи  $S_0$  и скорость резания  $v$ , с помощью которых можно

управлять величиной контактной жесткости во время механической обработки. Однако во время механической обработки непосредственный контроль величины контактной жесткости невозможен. Поэтому для контроля величины контактной жесткости во время механической обработки, например при адаптивном управлении, необходимо использовать косвенный метод. Для этого можно использовать математическую модель вида

$$j = C_j Pz^{xf} T^{yf}, \quad (3)$$

где  $j$  – величина контактной жесткости;  $C_j$ ,  $xf$ ,  $yf$  – коэффициенты модели;  $Pz$  – главная составляющая силы резания, Н;  $T$  – температура в зоне резания, °С.

Таким образом, модели (1) и (2) используются для управления величиной контактной жесткости при механической обработке, а модель вида (3) для косвенного определения величины контактной жесткости на основании измеренных во время обработки силы резания  $Pz$  и температуры  $T$  в зоне резания при механической обработке.

Математические модели вида (1) и (2) определяют АСНИ контактная жесткость. Для определения математической модели вида (3) совместно с АСНИ контактная жесткость необходимо использовать самообучающуюся технологическую систему [8, 9, 10] (рис. 3) с режимом адаптивного управления контактной жесткостью.

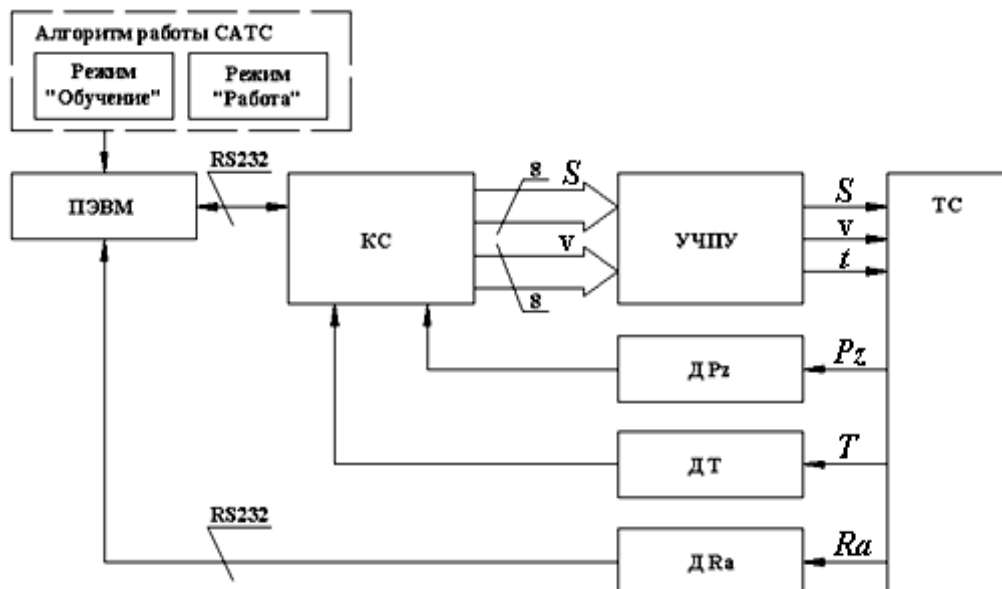


Рис. 3. Структурная схема автоматизированной системы управления параметрами качества поверхностного слоя деталей машин

Необходимость использования самообучающейся технологической системы с режимом адаптивного управления контактной жесткостью обосновывается тем, что изменение жесткости технологической системы, износ инструмента, разброс припуска и твердости заготовок приводят к рассеянию параметров качества поверхностного слоя и, как следствие, к рассеянию эксплуатационных свойств деталей. Кроме того, для ряда ответственных изделий требуется технологически обеспечивать закономерное изменение эксплуатационных свойств на различных участках поверхности детали.

В состав системы входят следующие элементы: технологическая система (ТС); датчик, измеряющий главную составляющую силы резания  $P_z$  ( $D P_z$ ); датчик, измеряющий текущую температуру в зоне резания ( $D T$ ); датчик, контролирующий параметр шероховатости  $Ra$  ( $D Ra$ ); контроллер сопряжения (КС) датчиков с ПЭВМ и ПЭВМ с устройством ЧПУ; устройство числового программного управления (УЧПУ), обеспечивающее управление технологической системой за счет изменения подачи  $S$  и скорости резания  $v$ . В большинстве случаев УЧПУ предназначены только для управления процессом обработки деталей. Поэтому для построения автоматизированной системы управления с режимом самообучения на базе УЧПУ необходимо использовать ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением, реализующим алгоритм работы системы.

Совместное использование АСНИ контактная жесткость и самообучающейся технологической системы предполагает следующую последовательность действий. На основе исходных данных о величине требуемой контактной жесткости в АСНИ определяется, есть ли для этих данных соответствующие математические модели, связывающие условия механической обработки с требуемой величиной контактной жесткости модели вида (1), (2) и величину контактной жесткости с выходными параметрами процесса резания модель вида (3). В случае если такие модели имеются, то параметры данных моделей передаются в самообучающуюся технологическую систему для технологического обеспечения контактной жесткости в режиме адаптивного управления при механической обработке.

В том случае, когда математические модели для заданных исходных данных отсутствуют, АСНИ сообщает оператору о необходимости получить данные модели. После этого с помощью самообучающейся технологической сис-

темы ставится активный эксперимент, причем материал образцов и их твердость должны быть такие же, как и для реальной детали.

Полученные в ходе активного эксперимента результаты и обработанные образцы передаются в АСНИ для измерения контактной жесткости и определения математических моделей вида (1), (2) и (3). После успешного получения математических моделей их параметры передаются в самообучающуюся технологическую систему для технологического обеспечения контактной жесткости в режиме адаптивного управления.

Совместное использование самообучающейся технологической системы с АСНИ контактная жесткость позволит с заданной точностью обеспечивать требуемое значение контактной жесткости деталей машины.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение. 1987. – 208 с.
2. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение. 2000. – 320 с.
3. Метод определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков: методические рекомендации. – М.: ВНИИМАШ, 1982.
4. Инженерия поверхности деталей/ А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.
5. Суслов, А.Г., Захаров, А.Е., Петрешин, Д.И., Финатов, Д.Н., Штепа, А.П., Хандожко, В.А. Автоматизированная система нормализованного определения несущей способности поверхностных слоев деталей машин // Справочник. Инженерный журнал (приложение). – 2003. – №9. – С. 21–24.
6. Медведев, Д.М., Хандожко, В.А. Автоматизированное технологическое обеспечение контактной жесткости шлифованных поверхностей деталей машин и их стыков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (46). – С. 40–49.
7. Суслов, А.Г., Медведев, Д.М. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин // СТИН. – 2010. – № 8. – С. 22–25.
8. Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И. Автоматизированное обеспечение параметров качества поверхностей, получаемых механической обработкой // Вестник машиностроения. – 2013. – №4. – С. 54–58.
9. 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.
10. Suslov, A.G. Control law for an adaptive technological system to maintain surface-layer quality in machining/A.G. Sus-

lov, D.I. Petreshin// Russian Engineering Research. 2010. T. 30. №4. С. 418–423.

## REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Technological Support of Parameter State of Surface Layer in Machine Parts*. – М.: Mechanical Engineering. 1987. – pp. 208.
2. Suslov, A.G. *Surface Layer Quality of Machine Parts*. – М.: Mechanical Engineering. 2000. – pp. 320.
3. *Method for Definition of Normal Contact Stiffness in Fixed Joints: Methodical Recommendations*. – М.: VNIIMASH, 1982.
4. *Parts Surface Engineering/ A.G. Suslov [et al.]*; under the editorship of A.G. Suslov. – М.: Mechanical Engineering. 2008. – 320.
5. Suslov, A.G., Zakharov, A.E., Petreshin, D.I., Finatov, D.N., Shtepa, A.P., Khandozhko, V.A. Automated system for normalized definition of surface layer carrying capacity in machine parts // *Reference Book, Engineering Journal (Appendix)*. – 2003. – №9. – pp. 21–24.

6. Medvedev, D.M., Khandozhko, V.A. Automated technological support of ground surface contact stiffness in machine parts and their joints // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2015. – № 2 (46). – pp. 40–49.

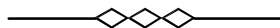
7. Suslov, A.G., Medvedev, D.M. *Single-Stage Technological Support of Cylindrical Surface Wear-Resistance of machine Parts* // STIN. – 2010. – № 8. – pp. 22–25.

8. Suslov, A.G., Petreshin, D.I. Quality parameter automated support of surfaces obtained by machining // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2013. – №4. – pp. 54–58.

9. Petreshin, D.I. Quality parameter technological support of surface layer in machine parts under conditions of uncertainty // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – № 9(15). – pp. 25–27.

10. Suslov, A.G. Control law for an adaptive technological system to maintain surface-layer quality in machining/A.G. Suslov, D.I. Petreshin// *Russian Engineering Research*. 2010. Vol. 30. №4. pp. 418–423.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Безъязычный



Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"  
Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»  
Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru  
Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 30.06.2017. Выход в свет 31.08.2017.  
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.  
Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
"Брянский государственный технический университет"  
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+