

лиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

4. Kirichek A.V., Soloviev D.L. and Altuhov A.Yu. Deformation Wave Hardening of Metallic Materials // Journal of Nano and Electronic Physics, Vol. 6, No 3, 03069 (4pp) 2014.

5. Kirichek A.V., Soloviev D.L. and Silant'ev S.A. Effect of the structure heterogeneously hardened by impact deformation waves upon impact strength of the material // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012157 (5 pp).

6. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки. / В.Н. Беляев, В.П. Иванов, А.Р. Ингеманссон, А.Н. Исаев, А.В. Киричек и др. – М.: Изд. дом «Спектр», 2014. – 403 с.

7. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Тарасов, Д.Е. Упрочнение железоуглеродистых сплавов комбинированной обработкой волной деформации и цементацией // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 12. – С. 36-39.

8. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Тарасов, Д.Е. Повышение долговечности деталей машин комбинированной упрочняющей обработкой. // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 2 (50). С. 52-58.

9. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Силантьев, С.А. Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 8(74). – 2017. – С. 30-35.

10. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Хандожко, А.В., Федонина, С.О. Технологическое обеспечение параметров несущего слоя деформационным и комбинированным упрочнением // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 10(88). – С. 43-48.

REFERENCES

1. Papshev, D.D., Pronin, A.M., Kubyshkin, A.B. Effectiveness of carbonized machinery strengthening // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 1990. – No.8. – pp. 61-64.

2. Lakhtin, Yu.M., Arzamasov, B.N. *Chemical and Thermal Treatment of Metals*. – М.: Metallurgy, 1985. pp. 256.

3. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Lazutkin, A.G. Technology and equipment of static-pulse processing with surface plastic deformation. *Technologist's Library*. – М.: Mechanical Engineering, 2004. – pp. 288.

4. Kirichek A.V., Soloviev D.L. and Altuhov A.Yu. Deformation Wave Hardening of Metallic Materials // Journal of Nano and Electronic Physics, Vol. 6, No 3, 03069 (4pp) 2014.

5. Kirichek A.V., Soloviev D.L. and Silant'ev S.A. Effect of the structure heterogeneously hardened by impact deformation waves upon impact strength of the material // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012157 (5 pp).

6. *Efficient Technologies of Surface Plastic Deformation and Combined Processing* / V.N. Belyaev, V.P. Ivanov, A.R. Ingemansson, A.N. Isaev, A.V. Kirichek et al. – М.: "Spectrum" Publishers, 2014. – pp. 403.

7. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Tarasov, D.E. Iron-carbon alloy strengthening with combined processing by deformation wave and carbonization // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2013. – No.12. – pp. 36-39.

8. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Tarasov, D.E. Machinery life increase by combined strengthening processing // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2016. No.2 (50). pp. 52-58.

9. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Solantiev, S.A. Technology of combined strengthening with wave carbonization of structural low-alloy steels // *Science Intensive in Mechanical Engineering*. – No.8 (74). – 2017. – pp. 30-35.

10. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Khandozhko, A.V., Fedonina, S.O. Technological support of bearing layer with deformation and combined strengthening // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.10 (88). – pp. 43-48.

Рецензент д.т.н. Е.С. Киселёв

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article_5d2635cb62fb56.07245294

Д.И. Петрешин, д.т.н., А.Г. Суслов, д.т.н., О.Н. Федонин, д.т.н., В.А. Хандожко, к.т.н.
(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: dipetreshin@yandex.ru

Автоматизация управления параметрами качества поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей машин при обработке резанием

Рассмотрен вопрос автоматизации управления параметрами качества поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей машин при обработке резанием. Для этого используются соответствующие автоматизированные системы управления. Приводятся обоснование построения систем управления параметрами качества поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей машин. Описан алгоритм работы систем, приводятся математические модели.

Ключевые слова: система управления; качество поверхностного слоя; эксплуатационные свойства.

D.I. Petreshin, Dr. Sc. Tech.,
 A.G. Suslov, Dr. Sc. Tech.,
 O.N. Fedonin, Dr. Sc. Tech.,
 V.A. Khandozhko, Can. Sc. Tech.
 (Bryansk State Technical University,
 7, October 50-th Anniversary Avenue, Bryansk, 241035)

Control automation of surface layer quality parameters and machinery operation properties at cutting

A problem in the control automation of surface layer quality parameters and machinery operation properties at cutting is considered. For this purpose there are used corresponding control systems. The substantiation for the formation of the control system of surface layer quality parameters and machinery operation properties is shown. An algorithm of systems functioning is described, and mathematical models are shown.

Keywords: control system; surface layer quality; operation properties.

Введение

В настоящее время уровень развития микропроцессорных систем управления, средств измерения и информационных технологий позволяет создавать автоматизированные технологические системы, обеспечивающие контроль и управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин во время механической обработки.

Примером автоматизированных систем, обеспечивающих управление параметрами качества поверхностного слоя (ПКПС) деталей машин во время механической обработки, могут служить системы, приведенные в работах [1 – 3]. Помимо упомянутых систем, известна система, обеспечивающая в автоматическом режиме входной контроль качества заготовок ответственных деталей авиационных узлов перед механической обработкой [4]. Определение дефектов в поверхностном слое заготовки происходит на основе сканирования обработанной поверхности заготовки. Причем обработка и сканирование поверхности заготовки выполняются в автоматическом режиме на одном оборудовании.

Интерес к подобным автоматизированным системам и оборудованию будет только возрастать и не только в наукоемком производстве. Это обусловлено тем, что появляются новые обрабатываемые и инструментальные материалы, для которых отсутствует справочная информация и математические модели по условиям обработки или они не адекватны реальным условиям. Кроме того, повышаются требования к обеспечению заданных ПКПС и, соответственно, соблюдению технологической дисциплины на рабочем месте. Данную задачу можно решить за счет использования соответствующих автоматизированных систем.

Постановка задачи

Для обеспечения заданных ПКПС деталей машин во время механической обработки используют математические модели, предсказывающие их значение в зависимости от режимов обработки. В большинстве случаев используют эмпирические модели, которые имеют узкое, конкретное применение. Эти модели достаточно точно предсказывают выходные параметры процесса только тогда, когда условия механической обработки детали совпадают с условиями, при которых модель была получена. Эти требования в условиях действующего производства, где неизбежно присутствуют изменение жесткости технологической системы, износ инструмента, разброс припуска и твердости заготовок и другие факторы, достаточно сложно обеспечить.

Задача обеспечения заданных параметров качества поверхностного слоя деталей машин существенно осложняется при обработке новых материалов и использовании новых инструментальных материалов, когда справочные данные по ним отсутствуют или они не адекватны реальным условиям. Поэтому при обеспечении ПКПС деталей машин при механической обработке имеется неопределенность, связанная с отсутствием однозначных математических моделей, полученных при данных условиях и предсказывающих ПКПС в зависимости от режимов обработки.

Одним из способов разрешения имеющейся неопределенности является создание самообучающейся технологической системы.

Дальнейшим развитием самообучающейся технологической системы управления ПКПС деталей машин является создание автоматизированных технологических систем для одно-

ступенчатого технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений во время механической обработки [5].

Самообучающаяся технологическая система управления параметрами качества поверхностного слоя

Суть метода самообучения технологической системы заключается в планировании и проведении активного эксперимента непосредственно на рабочем месте, получении и обработке результатов эксперимента, определении математической модели, связывающей условия обработки и ПКПС обработанной поверхности и использовании полученной модели для обеспечения заданных ПКПС деталей машин.

Математические модели, создаваемые для целей управления, могут и не отражать физическую сущность явления. Им достаточно лишь констатировать наличие определенной формальной связи между управляющим входом и управляемым выходом. Характер и особенности этой связи и составляют основу модели. Поэтому для описания параметров качества поверхностного слоя деталей машин в зависимости от режимов обработки (глубина резания, подача, скорость резания) можно использовать стохастические мультипликативные модели. Тогда в качестве математической модели, связывающей ПКПС деталей машин и режимы обработки, можно использовать модель вида:

$$ПК = C_0 t^x s^y v^z, \quad (1)$$

где ПК – параметр качества поверхностного слоя деталей машин, управляемый выходной параметр процесса механической обработки; t , s , v – глубина резания, подача и скорость резания соответственно, входные управляющие воздействия процесса механической обработки; C_0 , x , y , z – коэффициенты модели.

Известно [1, 2, 6], что наибольшее влияние на формирование параметра шероховатости Ra оказывают геометрия режущей части инструмента, продольная подача и скорость резания. Если учесть, что во время механической обработки детали геометрию режущей части инструмента изменять невозможно, то в качестве управляющих воздействий для параметра шероховатости Ra остаются величина продольной подачи и скорость резания. Поэтому связь между параметром шероховатости Ra и величиной продольной подачи s и скоростью

резания v может быть выражена математической моделью вида

$$Ra = C_r s^{x_r} v^{y_r}, \quad (2)$$

где x_r , y_r , C_r – коэффициенты модели; s – подача, мм/об; v – скорость резания, м/мин.

Исследования [1, 2] показывают, что на формирование поверхностной микротвердости и поверхностных остаточных напряжений поверхностного слоя детали значительное влияние оказывают температурное и силовое поле в зоне резания. Их нестабильность во время обработки из-за колебания припуска, твердости материала заготовки, износа инструмента и других факторов, приводит к постоянному изменению силового и температурного режимов обработки. Поэтому в качестве математической модели, связывающей физико-механический параметр (FMP) и переменные состояния процесса резания Pz и T , используется математическая модель вида

$$FMP_c = C_f \cdot Pz^{x_f} \cdot T^{y_f}, \quad (3)$$

где FMP_c – вычисленное значение физико-механического параметра поверхностного слоя; Pz – главная составляющая силы резания, Н; T – температура в зоне резания, °С; C_f , x_f , y_f – коэффициенты модели.

Математическая модель (3) используется для косвенного определения текущего значения физико-механического параметра обработанной поверхности на основе измеренных Pz и T во время механической обработки при адаптивном управлении.

Для адаптивного управления физико-механическим параметром используется модель, связывающая FMP с управляющими переменными s , v и t процесса резания, следующего вида:

$$FMP_c = C_u \cdot s^{x_u} \cdot v^{y_u} \cdot t^{z_u}, \quad (4)$$

где s , v , t – подача, скорость резания и глубина резания соответственно; C_u , x_u , y_u , z_u – коэффициенты модели.

При одновременном обеспечении параметров шероховатости Ra , поверхностной микротвердости и поверхностных касательных остаточных напряжений используется комплексный параметр качества поверхности Cx [2]. Комплексный параметр Cx , используемый для оценки качества поверхности трения, включает в себя параметры шероховатости, волнистости, макроотклонения и физико-механические параметры поверхностного слоя.

В качестве математической модели, связывающей комплексный параметр Sx и режимы обработки, используется модель вида (4), а для косвенного определения параметра Sx во время механической обработки при адаптивном управлении используется математическая модель вида (3).

Параметрическая идентификация матема-

тических моделей (2), (3), (4) выполняется разработанной самообучающейся технологической системой управления (СТСУ) (рис. 1). Разработанная СТСУ предназначена для обеспечения заданных параметров шероховатости Ra , поверхностных остаточных напряжений, поверхностной микротвердости и комплексного параметра Sx .

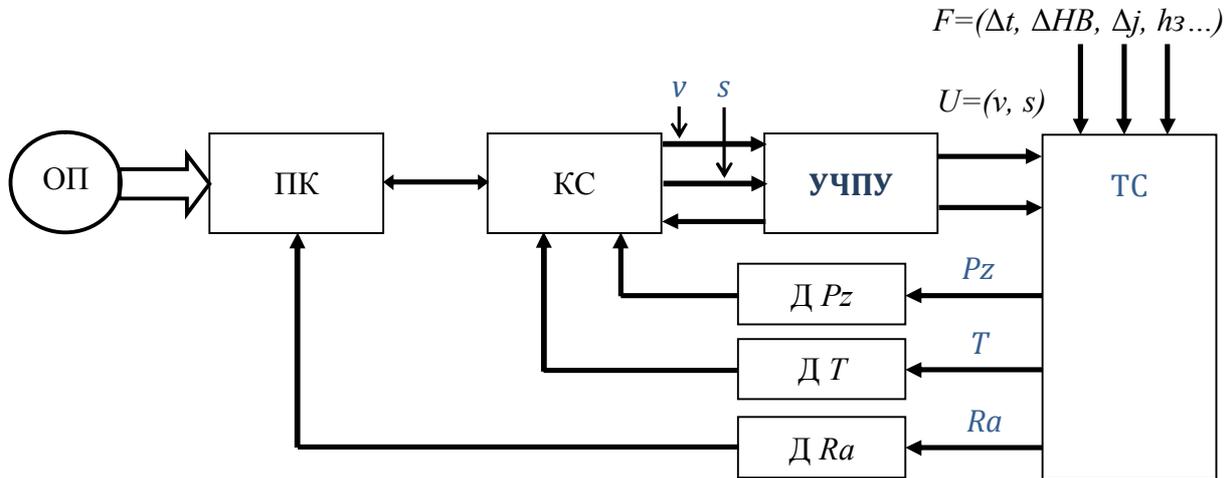


Рис. 1. Самообучающаяся технологическая система управления параметрами качества поверхностного слоя деталей машин:

ОП – оператор; $U = (v, s)$ – управляющее воздействие; $F = (\Delta t, HB, j, h_z \dots)$ – внешние возмущения

Алгоритм работы системы реализуется в виде программного обеспечения, записанного в память устройства управления, в качестве которого используется персональный компьютер (ПК). Исполнительным устройством системы является технологическая система (ТС), управляемая УЧПУ. Связь ПК и УЧПУ осуществляется через контроллер сопряжения (КС), подключаемый к ПК по последовательному интерфейсу RS 232. Управляющими воздействиями U для ТС являются скорость резания v , величина подачи s и глубина резания t . Внешними возмущениями F для ТС являются изменение жесткости технологической системы Δj , износ инструмента h_z , разброс припуска Δt и твердости заготовок ΔHB и другие факторы. Для работы СТСУ необходима исходная информация, вводимая оператором (ОП) перед началом работы.

Для определения физико-механических параметров обработанной поверхности используется косвенный метод, основанный на измерении во время обработки силы резания Pz и температуры T в зоне резания и вычислении на основе измерений физико-механических параметров качества обработанной поверхности. Сила резания Pz и температура T измеряются датчиками, установленными непосред-

венно вблизи зоны обработки. Параметр шероховатости Ra обработанной поверхности измеряется прямым методом с использованием лазерного датчика [2].

В самообучающейся технологической системе предусмотрены два режима работы «Самообучение» и «Работа». Режим «Самообучение» предназначен для определения параметров математической модели и сохранения результата самообучения в базе данных системы. Для параметрической идентификации математической модели в самообучающейся технологической системе проводится активный эксперимент непосредственно на рабочем месте. Полученные в ходе эксперимента данные обрабатываются программным обеспечением и определяются параметры математической модели, которые запоминаются в базе данных системы вместе с исходными данными. Исходными данными для самообучения системы являются: геометрия режущей части инструмента, материал режущей части инструмента, материал обрабатываемой заготовки и его твердость, обеспечиваемый параметр качества поверхностного слоя, величина допуска на обеспечиваемый параметр качества.

Во время проведения эксперимента самообучающаяся технологическая система авто-

математически определяет значения параметра шероховатости Ra прямым методом измерения, значения поверхностной микротвердости и поверхностных остаточных напряжений определяются косвенным методом – на основе измерений главной составляющей силы резания P_z и температуры в зоне резания. Кроме вышеперечисленных параметров качества самообучающаяся технологическая система имеет возможность определения величины комплексного параметра Cx . Параметр Cx используется для комплексной оценки качества поверхностей трения и включает параметры шероховатости, волнистости, макроотклонения, степень наклепа поверхностного слоя и поверхностные остаточные напряжения [5].

Режим «Работа» (адаптивное управление) используется для обеспечения заданного значения параметра качества поверхностного слоя или комплексного параметра Cx . Во время механической обработки неизбежно присутствуют возмущающие факторы $F = (\Delta t, \Delta HВ, \Delta j, hз...)$ (колебание припуска, твердости, изменение жесткости технологической системы, износ режущего инструмента и др.), под воздействием которых параметры качества обработанной поверхности могут выйти за пределы допуска. В этом случае при адаптивном управлении технологической системой по заданному параметру качества вносятся необходимые коррективы в ход процесса обработки за счет изменения величины подачи и скорости резания, используя соответствующие законы управления [2].

Так, при обеспечении заданного параметра шероховатости Ra используется закон управления подачей s при неизменной скорости резания v :

$$\left. \begin{aligned} Ra_{izm} &\geq Ra_{zad} + \Delta Ra_{zad} \\ Ra_{izm} &\leq Ra_{zad} - \Delta Ra_{zad} \\ v &= const \\ CV &= \frac{Ra_{izm}}{s^{xr}} \\ s(Ra_{izm}) &= \left(\frac{Ra_{zad}}{CV} \right)^{\frac{1}{xr}} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где Ra_{izm} – измеренное значение параметра шероховатости обработанной поверхности; Ra_{zad} – заданное значение параметра шероховатости, которое необходимо обеспечить; ΔRa_{zad} – допуск на обеспечиваемый параметр; $s(Ra_{izm})$ – скорректированная величина

продольной подачи; $CV = C_r v^{yr}$; xr, yr, C_r – коэффициенты модели, полученные при самообучении; s – первоначально установленная величина подачи, мм/об.

Закон управления скоростью резания v при неизменной подаче s :

$$\left. \begin{aligned} Ra_{izm} &\geq Ra_{zad} + \Delta Ra_{zad} \\ Ra_{izm} &\leq Ra_{zad} - \Delta Ra_{zad} \\ s &= const \\ CS &= \frac{Ra_{izm}}{v^{yr}} \\ v(Ra_{izm}) &= \left(\frac{Ra_{zad}}{CS} \right)^{\frac{1}{yr}} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где $v(Ra_{izm})$ – скорректированная величина скорости резания; $CS = C_r s^{xr}$; xr, yr, C_r – коэффициенты модели, полученные при самообучении; v – первоначально установленная величина скорости резания м/мин; $v(Ra_{izm})$ – скорректированная величина скорости резания.

Аналогичные законы управления используются и для обеспечения заданных значений физико-механического параметра и комплексного параметра Cx .

При адаптивном управлении обеспечивается один из выбранных параметров качества поверхностного слоя: параметр шероховатости Ra , поверхностная микротвердость или поверхностные остаточные напряжения. Для одновременного обеспечения параметров шероховатости Ra , поверхностной микротвердости и поверхностных остаточных напряжений, в том числе и произвольного их сочетания, следует использовать комплексный параметр качества Cx [7].

Автоматизированная система управления эксплуатационными свойствами деталей машин

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 [2, 9].

Для реализации автоматизированного технологического обеспечения рассматриваемого эксплуатационного свойства необходимы соответствующее алгоритмическое обеспечение и математические зависимости, отражающие взаимосвязь данного эксплуатационного свойства, в частности 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 методикой 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 [8]. В соответствии с требованиями нормы [8] была реализована установка для измерения контактной жесткости в виде автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) контактной жесткости (рис. 2) [6].

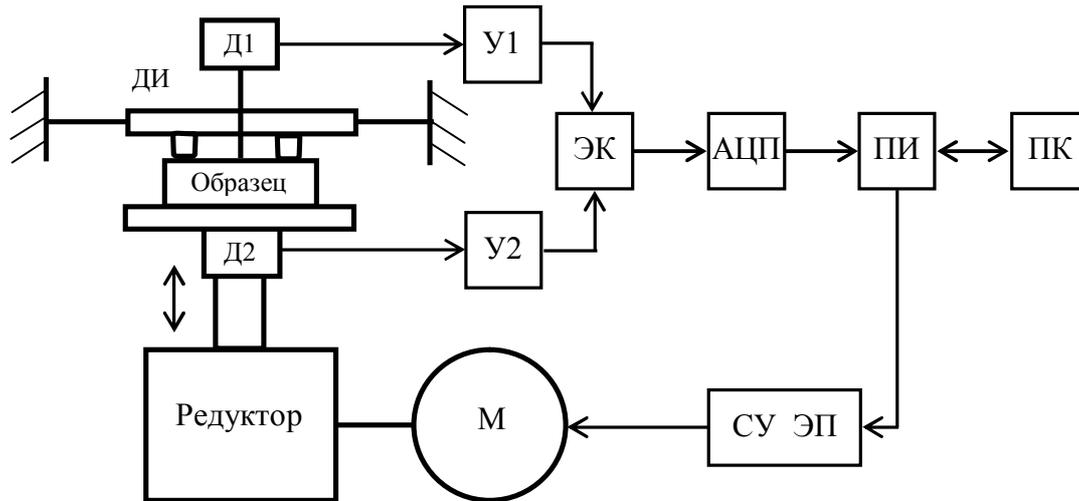


Рис. 2. Схема автоматизированной системы научных исследований контактной жесткости:

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 до 550 НV. 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 [10].

Затем, исходя из заданных параметров Ra или Rz и твердости исследуемых образцов, назначаются минимальная и максимальная нагрузки. 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 образцом для устранения посторонних упругих деформаций и люфтов, не связанных с деформациями в контакте. 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 [9]:

– торцевое чистовое точение при первом нагружении:

$$j_1 = C_{j1} s^{x1} v^{y1} H B^{z1}; \quad (7)$$

– торцевое чистовое точение при повторном нагружении:

$$j_{повт} = C_{jp} s^{x2} v^{y2} H B^{z2}; \quad (8)$$

где j_1 – величина контактной жесткости при первом нагружении, МПа/мкм; $j_{повт}$ – величина контактной жесткости при повторном нагружении, МПа/мкм; s – величина подачи на оборот, мм/об; v – скорость резания, м/мин; НВ – твердость материала по Бринелю, МПа; $C_{j1}, C_{jp}, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ – коэффициенты модели.

Таким образом, алгоритмическое, математическое и программное обеспечение разработанной АСНИ позволяет одноступенчато решать задачу технологического обеспечения контактной жесткости деталей машин и их соединений. При этом АСНИ реализует следующий алгоритм поиска оптимального решения (рис. 3). В качестве целевой функции в алгоритме АСНИ используется минимум технологической себестоимости.



Рис. 3. Алгоритм работы программы для определения режимов механической обработки, обеспечивающих требуемую контактную жесткость с минимальной технологической себестоимостью

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).

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 могут быть использованы для технологического обеспечения контактной жесткости.

В математические модели (7) и (8) входят управляющие факторы – величина подачи s 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 управления контактной жесткостью при механической обработке необходимо использовать косвенный метод контроля. Для этого можно использовать математическую модель вида

$$j = C_j P_z^{x_f} T^{y_f}, \quad (9)$$

где j – величина контактной жесткости; C_j, x_f, y_f – коэффициенты модели; P_z – главная составляющая силы резания, Н; T – температура

в зоне резания, °С.

Таким образом, модели (7) и (8) используются для управления величиной контактной жесткости при механической обработке, а модель вида (9) – для косвенного определения величины контактной жесткости на основании измеренных во время обработки силы резания P_z и температуры T в зоне резания при механической обработке.

Математические модели вида (7) и (8) получаются с использованием АСНИ контактная жесткость. Для определения математической модели вида (9) совместно с АСНИ контактная жесткость необходимо использовать самообучающуюся технологическую систему (см. рис. 1) с режимом адаптивного управления контактной жесткостью.

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.

Совместное использование АСНИ контактная жесткость и самообучающейся технологической системы (рис. 4) предполагает следующую последовательность действий. На основе исходных данных о величине требуемой контактной жесткости в АСНИ определяется, имеются ли для этих данных соответствующие математические модели, связывающие условия механической обработки с требуемой величиной контактной жесткости модели вида (7), (8) и величину контактной жесткости с выходными параметрами процесса резания моделью вида (9). 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 системы 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 (7), (8) и (9). После успешного получения математических моделей их параметры передаются в самообучающуюся технологическую систему для технологического обеспечения контактной жесткости в режиме адаптивного управления.

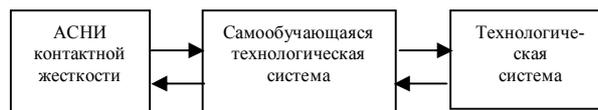


Рис. 4. Автоматизированная система управления эксплуатационными свойствами деталей машин

Аналогичным образом поступают при обеспечении износостойкости, герметичности и т.д. При этом используются АСНИ износостойкость, герметичность и т.д.

Заключение

Совместное использование самообучающейся технологической системы с АСНИ эксплуатационных свойств (контактная жесткость, износостойкость, герметичность и т.д.) в качестве единой автоматизированной системы управления эксплуатационными свойствами деталей машин позволит:

- реализовать одноступенчатое технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений;
- уменьшить влияние человеческого фактора на обеспечение заданных эксплуатационных свойств;
- повысить технологическую дисциплину;
- организовать единую вычислительную сеть;
- пополнять базу условий обработки различных материалов с использованием различного инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Оптимизация** технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / Безязычный В.Ф., Кожина Т.Д., Константинов А.В., Непомилуев В.В. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 184с.
2. **Научно-технические** технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безязычный и др.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

3. **Lasercheck.** URL: <https://optical-dimensions.com/index.html> (дата обращения: 18.04.2019).
4. **SILENOS® – Steel Inclusion Level Evaluation by Numerical Optical Systems.** URL: <https://it.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/solutions/aerospace-defense/files/2017/expo-de/silenos-steel-inclusion-level-evaluation-by-numerical-optical-systems.pdf> (дата обращения: 18.04.2019)
5. **Петрешин, Д.И., Хандожко, В.А.** Автоматизированное обеспечение качества поверхности и контактной жесткости деталей машин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 10(88). – С. 14-19.
6. **Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И.** Обеспечение качества обработанных поверхностей с использованием самообучающейся технологической системы // СТИН. – 2006. – № 1. – С. 21-24.
7. **Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И.** Автоматизированное обеспечение комплексного параметра качества поверхностного слоя Cx при механической обработке // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 2. – С. 34-40.
8. **Метод** определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков: методические рекомендации. – М.: ВНИИМАШ, – 1982.
9. **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.
10. **Инженерия** поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.

REFERENCES

1. *Technological Condition Optimization of Aircraft Engine Parts Machining* / Beziyazychny V.F., Kozhina T.D.,

Konstantinov A.V., Nepomiluev V.V. – M.: MAI Publishers, 1993. – pp. 184.

2. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Beziyazychny et al.; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 528.

3. **Lasercheck.** URL: <https://optical-dimensions.com/index.html> (address date: 18.04.2019)

4. **SILENOS® – Steel Inclusion Level Evaluation by Numerical Optical Systems.** URL: <https://it.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/solutions/aerospace-defense/files/2017/expo-de/silenos-steel-inclusion-level-evaluation-by-numerical-optical-systems.pdf> (address date: 18.04.2019)

5. Petreshin, D.I., Khandozhko, V.A. Automated support of surface quality and machinery contact stiffness // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.10 (88). – pp. 14-19.

6. Suslov, A.G., Pedtreshin, D.I. *Quality Support of Surfaces Worked Using Self-Learning Technological System* // STIN. – 2006. – No.1. – pp. 21-24.

7. Suslov, A.G., Petreshin, D.I. Automated support of Cx surface layer quality complex parameter at machining // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – No.2. – pp. 34-40.

8. *Method for Normal Contact Stiffness Definition of Fixed Joints: methodical recommendations.* – M.: ARRIMACH, - 1982.

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

10. *Parts Surface Engineering* / A.G. Suslov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering. 2008. – pp. 320.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Безъязычный

УДК 678.067621.892

DOI: 10.30987/article_5d2635cb77dfd6.90010587

Ю.М. Зубарев, д.т.н.

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, С.-Петербург, Лоцманская ул., 3),

А.В. Приемышев, к.т.н.

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195651, С.-Петербург, Политехническая ул., 29)

E-mail: iuzubarev@mail.ru ; priemyshev52@mail.ru

Особенности стружкообразования при обработке полимерных композиционных материалов

Приведена схема равновесного состояния составляющих силы резания при ортогональном резании и определена роль каждой составляющей силы в процессе резания. Приведен анализ особенностей стружкообразования при лезвийной обработке полимерных композиционных материалов. Полученные результаты помогут оценить возможности физических моделей при резании заготовок из полимерных композитных материалов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; углепластики; лезвийная обработка; режимы резания; стружка.