

межчастичных контактов возникают электрические разряды, которые согласно физике этого процесса должны вызвать образование плазмы, что естественно приводит к очистке и активизации поверхности спекаемых порошков. Очистка поверхности частиц порошка в свою очередь приводит к образованию чистых границ зерен и активации самого процесса спекания. Например, автором [3] обнаружено, что при спекании нанопорошков Al, которые имеют на поверхности неоднородный слой  $Al_2O_3$ , толщиной около 5 нм, этот слой был удален образовавшимся электрическим полем, в результате чего порошок был уплотнен до теоретической плотности данного материала. Следует отметить, что в этом случае применялся импульсный ток высокой частоты.

Таким образом, проведенные исследования позволяют предположить, что относительно высокие физико-механические свойства полученных образцов из нанопорошков монокарбида вольфрама обуславливаются, в первую очередь, высокодисперсными зёрнами и прочными границами между ними, что обеспечивается высокой скоростью подъема температуры до  $1700^{\circ}C$  в процессе горячего прессования в графитовых формах.

Данные исследования позволяют предположить, что метод горячего прессования нанопорошков при нагревании прямым пропусканием переменного тока ускоряет поток вакансий на поверхности пор, а быстрое уменьшение пористости на границах зерен ведет к термически активированному скольжению нанозерен друг относительно друга, что в конечном итоге, вместе с наложением переменного электрического поля, обеспечивает лучшую укладку зерен, и, следовательно, обеспечивает их более быстрое уплотнение. В то же время, наблюдения за усадкой нанопорошковых образцов при горячем прессовании с прямым пропусканием тока при температурах до  $900-1000^{\circ}C$  позволяют предположить, что первоначальным механизмом уплотнения (консолидации) является механизм ползучести.

Список литературы: 1. Райченко А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока – М.: Металлургия, 1987. – 128 с. 2. Кислый П.С., Боднарук Н.И., Горичок Я.О. и др. Физико-химические основы получения тугоплавких сверхтвердых материалов – Киев: Наук. думка, 1986. – 208 с. 3. Groza J.R. International Developments in Rapid Consolidation Techniques and Commercial Status. Fine, Ultrafine and Nanopowders, 98, New York, November 8-9, 1998. 4. Скороход В.В., Уварова А.В., Рагуля А.В. Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах. – Київ, 2001. – 180 с. 5. Kodash V.Y., Gevorkian E.S. Tungsten carbide cutting tool materials. United States Patent No.6617271.

*Поступила в редколлегию 15.05.2008*

**УДК 621.924**

*В.А. ЗАЛОГА, К.А. ДЯДЮРА, В.В. НАГОРНЫЙ*

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ МЕТОДАМИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

В роботі розглянуті питання прогнозування фактичного ресурсу різального інструменту та управління на основі цього параметрами режиму різання. Показано, що з цією метою можна успішно використати методи, що застосовуються в технічній діагностиці.

Effectively to manage the cutting mode it is possible to carry out due to the use of method of technical diagnostics of machines for determination of actual resource of instrument.

**Введение.** Конкурентоспособность машиностроительного производства в современных условиях международной интеграции и глобализации мировой экономики все в большей степени определяется применением новейших технологий, способных обеспечить сокращение времени разработки нового изделия, освоения его производства и вывода на рынок.

Получение изделий, отвечающих требованиям потенциальных потребителей, во многом будет зависеть от нетрадиционных конструкторских и технологических решений, использования последних достижений в различных областях науки, техники, информатики и материаловедения.

Наличие целого ряда признаков, отражающих достижения различных отраслей знаний, приводит к объединению усилий на этапах жизненного цикла (ЖЦ) изделия все более широкого круга предприятий, каждое из которых концентрируется на своей основной компетенции.

За прошедшее десятилетие в современном машиностроении произошли значительные изменения, которые связаны в первую очередь с компьютеризацией производственных процессов и использованием микропроцессорных систем для управления процессами резания. В настоящее время при резком сокращении количества высококвалифицированных рабочих-станочников это становится весьма актуальным.

Введение в станок дополнительных управляющих функций позволяет с помощью специальных датчиков получать информацию о состоянии заготовки (обрабатываемой детали), инструмента, станка и непрерывно использовать ее для адаптивного управления процессом резания. Этим сразу разрешается несколько проблем, в частности, повышается производительность процесса обработки, точность и качество поверхностей изготавливаемых деталей. Все это приводит к снижению издержек машиностроительного производства и позволяет, в конечном итоге, решать одну из важнейших задач управления ЖЦ изделия на этапе его изготовления: выпуск конкурентоспособной продукции.

Оптимальное управление производством начинается на «атомарном уровне» с комплекса «процесс-оборудование-инструмент», где ключевой проблемой является надежность инструмента, как наиболее слабого элемента этой системы [1, 2].

Как инструмент, так и заготовка – будущая деталь – обладают в элементарных объемах непредсказуемыми прочностными свойствами. Последнее обусловлено неминуемым разбросом свойств материалов на их молекулярном уровне. Именно это обстоятельство в определяющей мере обуславливает относительно большой разброс эксплуатационных свойств практически любого изделия. Так, например, следуя статистике, нормируемая стойкость резцов изменяется от 30 до 120 мин. [3]. Согласно закону «шесть сигма», при средней стойкости 75 мин это означает, что среднее квадратическое отклонение равно 15 мин, что соответствует коэффициенту вариации ( $v$ ), равному 0,2. Данная величина коэффициента вариации достаточно велика и свидетельствует о некорректности использования среднестатистического подхода к назначению стойкости режущего инструмента. На практике это приводит либо к неожиданному выходу его из строя, либо к преждевременному прерыванию процесса его эксплуатации.

Выходом из данной ситуации является эксплуатация инструмента на основе адекватного прогнозирования его фактического ресурса. В противном случае компьютеризация производственных процессов, в том числе и станочного оборудования, не приведет к желаемому результату.

Ресурс работы режущего инструмента может быть выражен [4]: интервалом времени, массой или объемом снятого материала, длиной пути резания, площадью обработанной поверхности или количеством деталей, изготовленных с заданной точностью размера. Для определения фактического ресурса инструмента можно воспользоваться методами, применяемыми с этой же целью в технической диагностике машин.

### 1. Оценка степени износа и ресурса реза методами технической диагностики

Техническая диагностика определяет состояние объекта диагностирования по косвенным признакам, в частности, вибродиагностика оценивает состояние объекта по характеру акустического излучения (звука, шума) или вибраций, сопровождающих его работу [5, 6, 7]. Это основывается на корреляции между структурными параметрами  $r_i$ , характеризующими сборочное и прочностное состояние объекта диагностирования, и их диагностическими признаками  $u_j$ , которые регистрируются в процессе диагностирования технического состояния объекта.

С точки зрения математики функционирующий объект диагностирования можно рассматривать как некий преобразователь  $G$  параметров его технического состояния в диагностические признаки:

$$\{U\} = G \{R\}, \quad (1)$$

где  $\{U\} = \{u_1^{(i)}, u_2^{(i)}, \dots, u_n^{(i)}\}$  - вектор диагностических признаков технического состояния объекта в  $n$ -мерном признаковом пространстве;  $\{R\} = \{r_1^{(i)}, r_2^{(i)}, \dots, r_m^{(i)}\}$  - вектор структурных параметров, описывающих техническое состояние в  $m$ -мерном пространстве.

Задачей же диагностики является получение зависимости, обратной зависимости (1), т. е.

$$\{R\} = G^{-1}\{U\}, \quad (2)$$

где  $G^{-1}$  - оператор, обратный оператору  $G$  в выражении (1).

Традиционно, выражение (2) получается в процессе проведения, так называемых, «обучающих» экспериментов. В простейшем случае, к которому, как правило, стремятся, зависимость (2) может быть функциональной:

$$r_i = F_i(u_1, u_2, \dots, u_n), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Причем наибольшие упрощения достигаются в том случае, когда каждому параметру состояния  $r_i$  удастся поставить в соответствие только один характерный диагностический признак  $u_j$ :

$$r_i = F_i(u_j) \quad (4)$$

Для инструмента структурным параметром является величина износа его режущих кромок. Интенсивность изнашивания принято описывать, так называемым, относительным износом

$$\Delta = \frac{h}{L}, \quad (5)$$

где  $h$  - величина износа инструмента (величина площадки износа по задней поверхности лезвия), мм;  $L$  - путь, пройденный инструментом, мм

В период установившегося резания (без учета времени приработки и времени катастрофического изнашивания) выражение (5) можно записать в следующем виде

$$\Delta = \frac{h - h_1}{(t - t_1) \cdot v} = \frac{h_{max} - h}{(T - t) \cdot v}, \quad (6)$$

где  $h$ ,  $h_1$ ,  $h_{max}$  - величина износа лезвия инструмента, соответственно: первоначальная, зафиксированная на момент времени  $t$ ; текущая - после работы в течение времени  $t_1$ ; максимальная после резания в течение времени  $T$ , при которой процесс резания прекращается;  $v$  - скорость резания.

В данном случае параметр  $T$  характеризует ресурс лезвия инструмента, т.е. время работы его до отказа. Под отказом, как правило, понимают нарушение работоспособного состояния режущего инструмента - отклонение от установленных значений, хотя бы одного из его параметров, требований или характеристик обработки, выполняемой этим инструментом. К характеристикам обработки относят: силу резания, температуру резания, уровень вибраций и др.

Выражение (6) можно переписать следующим образом:

$$\frac{h-h_1}{h_{\max}-h} = \frac{t-t_1}{T-t}. \quad (7)$$

Изменение с течением времени диагностического параметра (уровня акустического излучения), генерируемого процессом резания, описывается следующим выражением, отражающим механику разрушения инструмента

$$A = A_1 + \Delta A \cdot \left( \frac{t-t_1}{T-t} \right)^n, \quad (8)$$

где  $\Delta A = A_{\max} - A$  - разница между максимальным и уровнем акустического излучения на момент времени  $t$ ,  $A_1$  - уровень акустического излучения после работы лезвия инструмента в течение времени  $t_1$ .

Под максимальным уровнем акустического излучения понимается уровень звука, при возникновении которого процесс резания прекращается, из-за недопустимой степени износа лезвия инструмента.

Параметры:  $\Delta A, T, n$  определяются в процессе аппроксимации изменения во времени диагностического параметра  $A$  графиком аналитической зависимости (8).

Выражение (8) можно преобразовать следующим образом:

$$\left( \frac{A-A_1}{A_{\max}-A} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{t-t_1}{T-t}. \quad (9)$$

Видно, что правые части выражений (7) и (9) совпадают, следовательно, можно допустить, что их левые части так же равны между собой, т.е.

$$\frac{h-h_1}{h_{\max}-h} = \left( \frac{A-A_1}{A_{\max}-A} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (10)$$

При этом в знаменателе значения износа  $h$  и уровня акустического излучения  $A$  заменяем величинами, соответственно  $h_1$  и  $A_1$ . Это позволяет на основании анализа характера изменения уровня акустического излучения оценить за время резания  $t_1$  величину относительного износа инструмента. Относительный износ количественно характеризует степень износа инструмента и изменяется от нуля до единицы или в процентах от нуля до 100%.

Между износом, возникающим в процессе резания и уровнем акустического излучения, сопровождающим этот процесс, существует тесная корреляция, что позволяет использовать данный диагностический параметр для оценки работоспособного состояния инструмента.

## 2. Управление процессом резания металлов посредством контроля за возникающим при этом акустическим излучением

Скорость износа  $\gamma$  пропорциональна произведению усилия прижатия  $P_{np}$ , действующего в трущейся паре, и скорости их относительного скольжения  $V_{ск}$  [13].

$$\gamma \approx P_{np} \cdot V_{ск}. \quad (11)$$

В данном случае трущейся парой является «резец – обрабатываемая заготовка». Действующее в ней усилие определяется по следующей формуле [3]

$$P_{рез} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \quad (12)$$

где  $P_{x,y,z}$  – составляющие силы резания в  $H$ , определяемые в свою очередь по следующей эмпирической формуле [3]

$$P_{x,y,z} = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot v^n \cdot K_p, \quad (13)$$

где  $t$  - глубина резания, мм;  $S$  - подача, мм/об;  $v$  - скорость резания, м/мин;  $C_p$  - постоянная для данного вида обработки, обрабатываемого и инструментального материалов;  $K_p$  – поправочный коэффициент.

Скорость резания (относительная скорость скольжения  $V_{ск}$ ) определяется по эмпирической формуле [3]

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot t^\beta \cdot S^a}, \quad (14)$$

где  $C_v$  – поправочный коэффициент.

Значения поправочных коэффициентов и показателей степени, содержащихся в этих формулах, так же как и периода стойкости  $T$  инструмента, применяемого для данного вида обработки, приводятся в соответствующих справочниках, например, в [3].

Для изменения степени износа инструмента необходимо изменять скорость износа  $\gamma$ , следовательно, необходимо изменять величину множителей  $P_{np}$  и  $V_{ск}$ . Это в свою очередь требует изменения параметров резания:  $S, v$  и  $t$ .

Скорость, жестко связанная с частотой вращения, и подача зависят от кинематики станка и изменяются в геометрической прогрессии. Глубина резания  $t$  является свободно варьируемой величиной, поэтому для удобства дальнейшего рассмотрения необходимо выразить ее через жестко задаваемые величины  $S$  и  $v$ .

$$t = \beta \sqrt{\frac{C_v}{T^m \cdot v \cdot S^a}}. \quad (15)$$

Далее, для того, чтобы избавиться от поправочных коэффициентов, являющихся «коэффициентами неопределенности» в формулах (13) и (15) следует перейти к безразмерным величинам.

$$\bar{P}_{x,y,z} = \left( \frac{t}{t_0} \right)^x \left( \frac{S}{S_0} \right)^y \left( \frac{v}{v_0} \right)^n, \quad (16)$$

где  $t_0, S_0, v_0$  - расчетные (исходные) значения параметров режима резания, задаваемые традиционным способом в начале обработки детали.

С учетом (15) выражение (16) представим в следующем виде

$$\bar{P}_{x,y,z} = \left( \left( \frac{T_{TP}}{T_\phi} \right)^m \left( \frac{V_0}{V} \right) \left( \frac{S_0}{S} \right)^\alpha \right)^{\frac{x}{\beta}} \left( \frac{S}{S_0} \right)^y \left( \frac{V}{V_0} \right)^n, \quad (17)$$

Или в более компактной форме

$$\bar{P}_{x,y,z} = \left( \frac{T_{TP}}{T_\phi} \right)^{\frac{m \cdot x}{\beta}} \left( \frac{S}{S_0} \right)^{y - \frac{\alpha \cdot x}{\beta}} \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n - \frac{x}{\beta}}, \quad (18)$$

где  $T_{TP}$  - необходимый (требуемый) для выполнения данного технологического процесса ресурс лезвия инструмента;  $T_\phi$  - фактический (прогнозируемый) ресурс лезвия инструмента.

Под фактическим ресурсом  $T_\phi$  понимается параметр  $T$  функции (8), определяемый при аппроксимации результатов диагностического контроля состояния трущейся пары «резец – обрабатываемая заготовка» графиком этой функции.

Алгоритм управления резанием основывается на уменьшении скорости износа резца до величины, обеспечивающей реализацию на практике требуемого ресурса. Выше было показано, что между износом резца и уровнем акустического излучения, сопровождающего процесс резания, существует тесная корреляция. В соответствии с этим принималось, что степень изменения скорости износа пропорциональна отношению фактического уровня акустического излучения и  $A_\phi$  к требуемому  $A_{mp}$ . При этом под требуемым уровнем акустического излучения понимается предельно допустимый уровень звука, который не должен превышать в процессе резания. При выполнении этого условия инструмент сможет проработать требуемое до затупления время  $T_{TP}$ .

$$A_{mp}(t) = A_1 + \Delta A \cdot \left( \frac{t - t_1}{T_{TP} - t} \right)^n. \quad (19)$$

Управление процессом резания выполняется в следующей последовательности:

- по принятой методике [3] рассчитывается режим резания (параметры  $t_0, S_0, v_0$ );
- контролируется фактический уровень акустического излучения ( $A_\phi$ ), генерируемый процессом резания;

- результаты контроля (зависимость уровня акустического излучения от времени резания  $A_\phi(t)$ ) аппроксимируются графиком функции (8), при этом определяются параметры:  $\Delta A, n$  и  $T$ ;

- если параметр  $T$  превышает требуемое для обработки детали (деталей) время, т.е. выполняется условие  $T_\phi > T_{TP}$ , то резание продолжается на том же режиме; если нет, то проводится изменение режима резания таким образом, чтобы условие  $T_\phi > T_{TP}$  выполнялось;

- требуемые параметры резания определяются путем минимизации следующего функционала

$$U = \left( \bar{P}_{рез} \cdot \bar{v} - \frac{A_{mp}(t)}{A_\phi(t)} \right)^2, \quad (20)$$

где  $\bar{P}_{рез} = \sqrt{\bar{P}_x^2 + \bar{P}_y^2 + \bar{P}_z^2}$  - относительная величина силы резания;

$$\bar{v} = \frac{v(t)}{v_0}, \quad \bar{V} = \frac{v(t)}{v_0}, \quad \text{где } v(t) \text{ - регулируемая скорость резания, которая}$$

выбирается в соответствии с кинематикой станка.

Выводы

Оптимальное управление производством начинается с комплекса «процесс-оборудование-инструмент», где ключевой проблемой является непредсказуемая заранее фактическая стойкость инструмента. Как инструмент, так и заготовка – будущая деталь – обладают, в общем-то, непредсказуемыми прочностными свойствами. Последнее обусловлено неминуемым разбросом свойств материалов на их молекулярном уровне. Выходом из данной ситуации является эксплуатация инструмента на основе прогнозирования его фактического ресурса, иначе компьютеризация станочного оборудования не приведет к желаемому результату. В статье показано, что для прогнозирования фактического ресурса резца и управления на основе этого режимом резания можно успешно воспользоваться методами, применяемыми в технической диагностике.

Список литературы: 1. Старков В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. -М: Машиностроение, 1989. -296с. 2. Юркевич В. В. Прогнозирование точности изготовления деталей// Техника машиностроения. -М: Машиностроение, 2000.- №4 (26). -С.46-52. 3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 /Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова.— 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1986. 496с. 4. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. -М: Высш. шк., 1975. -304 с. 5. Нахапетян Е. Г. Контроль и диагностирование автоматического оборудования. -М: Наука, 1990. -272с. 6. Кибальченко А.В. Применение метода акустической эмиссии в условиях гибких производственных систем. - М. ВНИИТЭМР, 1986, 56 с. 7. Акустика: Справочник/ А.П. Ефимов, А.В. Никонов, М.А. Сапожков, В.И. Шоров/ под ред. М.А. Сапожкова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1989- 336 с.

Поступила в редакцию 15.05.2008