

Таким образом, во всех рассмотренных в таблице случаях выполняются условия, необходимые для стабильного стружкообразования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шестопал Ю.Т., Скрябин В.А. Условия микрорезания при обработке деталей уплотненным слоем свободного абразива // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Пензен. политехн. ин-т, 1980. – Вып. 9. – С. 77–81. 2. Скрябин В.А. Повышение эффективности процесса микрорезания при обработке поверхностей деталей абразивом, уплотненным инерционными силами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Мн., 1984. – 16 с. 3. Мартынов А.Н. Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами. – Саратов: Изд-во СТУ, 1981. – 212 с. 4. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 318 с.

УДК 621.923.7:621.921.047.7

**В.Н. ЧАЧИН, Е.Я. ГОЛОВКИНА,  
А.С. ЛАЗАРОВ, Л.И. БОНДАРЕНКО**

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ**

В большинстве работ, посвященных моделированию процесса магнитно-абразивной обработки (МАО), затрагиваются отдельные вопросы: расположения керметов в рабочей зоне, структурно-напряженного состояния материала обрабатываемой поверхности, влияния режимов обработки на качество поверхности и т. п. [1–4]. Первое комплексное моделирование операции МАО выполнено Ф.Ю. Сакулевичем [1]. Его концепция основана на том, что динамика и напряженное состояние рабочей зоны при магнитно-абразивной обработке полностью определяются электромагнитным полем. С этим утверждением трудно согласиться, так как эффективное ведение процесса невозможно без применения смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Проведенные нами исследования показали, что физические свойства охлаждающей жидкости оказывают влияние на интенсивность перемещения керметов в рабочем зазоре и параметры шероховатости поверхности обработанной детали. Влияние СОЖ на процесс магнитно-абразивной обработки возрастает при увеличении габаритов обрабатываемых деталей.

Чтобы выявить закономерности влияния магнитных и гидродинамических полей в рабочем зазоре на производительность обработки и качество поверхности деталей, исследовались перемещения керметов под действием полей обоих типов.

В основу физической модели технологии МАО положены следующие закономерности, правомерность которых подтверждена теоретически и экспериментально в работах [5, 6]:

1) ориентация абразивной частицы и усилие ее прижима к обрабатываемой детали определяются электромагнитным полем, а значит, описываются уравнениями Максвелла. Частица ориентируется по силовым линиям магнитного поля;

2) поведение жидкости определяется законами гидродинамики, а керметы перемещаются по линиям тока жидкости;

3) качество обработки поверхности детали определяется взаимодействием электромагнитных и гидродинамических полей. В случае преобладания гидродинамического фактора осуществляется процесс выглаживания, а электромагнитного – процесс резания.

Система уравнений, описывающих технологический процесс MAO, включает:

уравнения Максвелла

$$\nabla \vec{B} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \vec{E} = \rho_l / K_0, \quad (3)$$

$$\vec{j} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B}; \quad (4)$$

уравнения сохранения массы, движения, энергии и индукции

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{v}) = 0, \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} + \nabla p = \vec{j} \times \vec{B} + \vec{\psi}, \quad (6)$$

$$\rho \frac{De}{Dt} = p \nabla \vec{v} - \phi + \nabla (k \nabla T) + \frac{(\nabla \times \vec{B})}{\mu_0 \sigma}, \quad (7)$$

$$\frac{D\vec{B}}{Dt} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) - \frac{1}{\mu_0} \times \frac{\nabla \times \vec{B}}{\sigma} - \nabla \times \left[ \frac{\beta}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} \right], \quad (8)$$

где  $\phi = \frac{2}{3} \eta (\nabla \vec{v})^2 - \eta [\nabla^2 (v)^2 - (\nabla \times \vec{v})^2 - 2\vec{v} \nabla^2 \vec{v}]$ .

В приведенных уравнениях приняты следующие обозначения:  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля;  $t$  – время;  $\rho_l$  – плотность зарядов;  $K_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\vec{j}$  – вектор плотности тока проводимости;  $\rho$ ,  $\vec{v}$ ,  $\eta$ ,  $T$  – плотность, скорость, вязкость и температура рабочей среды (СОЖ + керметы);  $p$  – гидростатическое давление;  $\vec{\psi}$  – сила сопротивления движению жидкости;  $e$  – сумма внутренней и тепловой энергии на единицу массы детали;  $\sigma$  – электропроводность рабочей жидкости;  $\beta$  – постоянная Холла;  $k$  – теплопроводность среды;  $D/(Dt)$  – субстанциональная производная [7].

Уравнения (1)...(8) полностью описывают технологический процесс MAO в предположении отсутствия ударных волн, появление которых практически

невозможно, поскольку описываются медленные течения жидкости. Для решения системы уравнений разработан и реализован на ЭВМ алгоритм, предложенный в работе [8]. В качестве исходных данных при проведении расчетов использовались параметры технологического процесса MAO валков диаметром 400 и длиной 2000 мм на установке с четырьмя полюсными наконечниками [9].

На рис. 1 показано изменение функции тока рабочей среды в зависимости от ее вязкости, свидетельствующее о наличии замкнутых вихрей, которые обеспечивают постоянную циркуляцию керметов. О перемещении керметов, названном "кипением" среды, упоминается и в работе [1]. Полученные теоретические результаты свидетельствуют о наличии в рабочем зазоре вихрей Тейлора [5], возникновение которых обусловлено свойствами рабочей среды (вязкость, плотность и др.), параметрами ведения процесса (рабочий зазор, линейная скорость вращения барабана, параметры магнитного поля и состояние поверхности детали). Ферромагнитные абразивные частицы движутся вдоль линий тока перпендикулярно к магнитным силовым линиям. Их циркуляция обеспечивается автоматически, а ее интенсивность и количество вихрей зависят от параметров технологического процесса и свойств рабочей жидкости. При некоторых условиях возникает неустойчивость большого вихря (рис. 1, а), его разрушение (деление) и образование новой структуры течения (рис. 1, б, в).

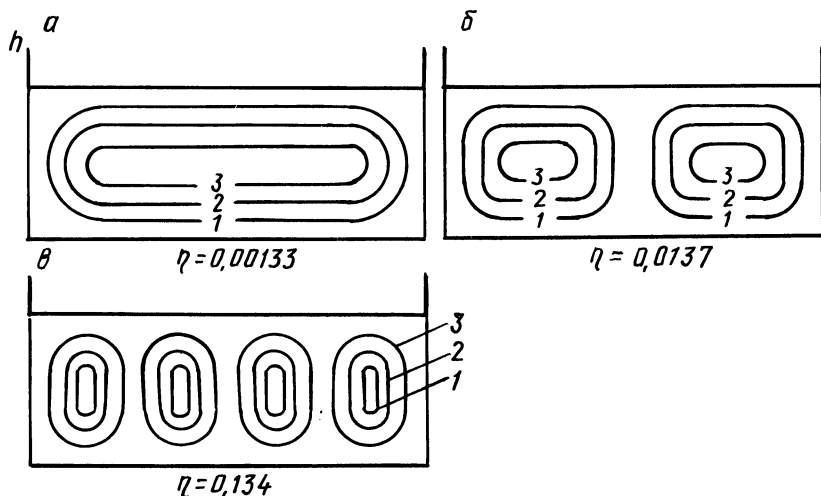


Рис. 1. Изменение функции тока рабочей среды в зависимости от вязкости рабочей среды: 1 -  $4,8 \cdot 10^{-8}$ ; 2 -  $1,3 \cdot 10^{-6}$ ; 3 -  $2,4 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, наряду с  $v_\theta$ ,  $h$ ,  $R$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  ( $v_\theta$  — линейная скорость заготовки,  $h$  — рабочий зазор,  $R$  — радиус детали) управляемыми параметрами системы являются также  $\eta$  и  $\rho$ . Оптимизация операции может быть только дискретно-непрерывной, т. е. для каждой новой структуры набор  $v_\theta$ ,  $h$ ,  $R$ ,  $\eta$ ,  $\rho$ ,  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и параметров, характеризующих состояние обрабатываемой дета-

ли, определяется заново. Система оптимизации должна быть двухуровневой: верхний — определение связи между гидродинамическими характеристиками  $\eta$  и  $\rho$  и геометрическими размерами элементов оборудования и обрабатываемой детали; нижний — определение оптимальных значений управляемых параметров для заданной структуры течения жидкости (количество замкнутых вихрей). Отсюда, в частности, следует, что при изменении одного из параметров (высоты микронеровностей поверхности, структуры материала, биения детали и др.) эффективность процесса резко снижается. Поэтому в производственной практике необходимо обеспечить стабильность физико-механических свойств, макро- и микрогеометрических характеристик обрабатываемой детали. Правомерность этого вывода подтверждается практикой.

Таким образом, физические свойства СОЖ наряду с электромагнитным полем определяют динамику перемещения керметов в рабочем зазоре и качество обрабатываемой поверхности. Заданный оптимальный набор управляемых параметров процесса MAO обеспечивает соответствующее качество поверхности детали. Необходимо управлять технологией обработки путем одновременного изменения всех параметров процесса MAO.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. — Мн.: Наука и техника, 1981. — 273 с.
2. Барон Ю.М. Технология магнитно-абразивной обработки. — Л.: Машиностроение, 1975. — 128 с.
3. Березуб В.Н. и др. Исследование процессов шлифования крупногабаритных листов переменного сечения // Самолетостроение и техника воздуш. флота. — Харьков: Харьков. гос. ун-т, 1967. — Вып. 9. — С. 125–132.
4. Коновалов Е.Г., Сакулевич Ф.Ю. Основы электроферромагнитной обработки. — Мн.: Наука и техника, 1979. — 272 с.
5. Дж. М. Томсон. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. — М.: Мир, 1985. — 255 с.
6. Чжань, Бенерджи. Численное моделирование трехмерных ячейковых вихрей в замкнутых полостях с твердыми непроницаемыми стенками // Конструирование и технология машиностроения. — М.: Мир, 1979. — № 2. — С. 52–57.
7. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. — М.: Наука, 1982. — 471 с.
8. Алалыкин Г.Б., Годунов С.К., Киреева И.Л., Плинер Л.А. Решение одномерных задач газовой динамики в подвижных сетках. — М.: Наука, 1970. — 186 с.
9. Бондаренко Л.И. Исследование и разработка технологического процесса изготовления крупногабаритных тонкостенных валов с низкой шероховатостью поверхности: Дис. ... канд. техн. наук. — Мн., 1983. — 165 с.

УДК 621.923.9

Е.Я. ГОЛОВКИНА, С.Н. ТЕРЕХОВ,  
Ю.В. СИНЬКЕВИЧ, О.И. АВСЕЕВИЧ

### МЕТОД ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Технология электроимпульсного полирования основана на использовании импульсных электрических разрядов, возникающих вдоль всей поверхности обрабатываемого изделия, погруженного в электролит (рис. 1). Ее отличие от обычного электрохимического процесса полирования состоит в том, что около поверхности детали возникает парогазовая оболочка, имеющая по сравнению с электролитом повышенное электрическое и тепловое сопротивление. Совместное воздействие на поверхность детали химически активной среды и электри-