

7. Курбатов П.А. Упрощенный метод расчета магнитных систем с редкоземельными магнитами с тонкой ненасыщенной арматурой // *Электричество*. – 1976. – № 12.

УПРАВЛЕНИЕ СВОЙСТВАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ

В КОМБИНИРОВАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

П.А. Витязь, академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор; Л.М. Кожуро, академик МАНЕ, д-р техн. наук, профессор; М.Л. Хейфец, д-р техн. наук, профессор;

А.В. Миранович, ассистент

НАН Беларуси, УО «БГАТУ», УО «ПГУ»

(г. Минск, Республика Беларусь)

(г. Новополоцк, Республика Беларусь)

Management of the technological environment properties during the combined physical fields processing of ware

At the automated designing methods of processing of ware in the combined physical fields is offered to use the domination of properties of relations of technological decisions. The mathematical model and the criteria describing domination of controllable parameters of technological system is given. Designing electromagnetic surfacing with superficial plastic deformation plasma mechanical and magneto-abrasive processing of ware is considered.

Перспективным направлением является создание новых методов обработки изделий в комбинированных физических полях, основанных на сочетании в одном процессе различных видов энергии или разных способов воздействия на обрабатываемый материал [1].

В общем виде системная модель технологии [2] представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации. Метод обработки целесообразно рассматривать в виде материальной и информационной подсистем. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на заготовку с целью изменения ее физико-химических свойств, снятия или нанесения материала. Она определяется видом процесса обработки. Вторая управляет потоками энергии и вещества, обеспечивая их доставку в необходимом количестве в заданное место рабочего пространства с целью получения определенной формы, размеров и свойств изделия.

В результате под методом обработки понимается совокупность энергетических и информационных процессов, направленных на изменение формы, размеров, качества поверхности и физико-химических свойств материала.

Для формализации условий целенаправленного создания новых методов обработки каждая совокупность одноименных компонентов системы описывается как некоторое множество технологических решений (ТР). Такой подход [3] позволяет любой метод обработки представить в виде кортежа, каждый элемент которого является элементом соответствующего множества ТР.

Полагая, что если два любых компонента метода обработки обладают хотя бы одним свойством, то между ними существует связь по общности свойств. Это дает возможность организовать выбор ТР по эквивалентности и предпочтению [3]. По эквивалентности выбираются равноименные решения, которые по совокупности своих свойств должны соответствовать друг другу. По предпочтению выбираются решения из числа одноименных, обладающих наилучшими значениями необходимых свойств.

Такой подход позволяет формализовать условия выбора по конкретному значению установленного критерия и дает возможность принимать решение по нескольким критериям соответствующим различным свойствам ТР.

Анализ свойств отношений. Принятие ТР в системах автоматизированного проектирования традиционно основывается на анализе эквивалентности ($x \equiv y$) и предпочтения (нестрогого $x \leq y$ или строго $x < y$) решений, заложенных в базу знаний [4]. Это предполагает использование свойств [5]:

- 1) рефлексивности ($x \equiv x$, $x \leq x$ - истинно; $x < x$ - ложно);
- 2) симметричности ($x \equiv y \Rightarrow y \equiv x$ - истинно; $x \leq y$ и $y \leq x \Rightarrow x \equiv y$ - истинно; $x < y$ и $y < x$ - взаимоисключение - несимметрично);
- 3) транзитивности ($x \equiv y$ и $y \equiv z \Rightarrow x \equiv z$, $x \leq y$ и $y \leq z \Rightarrow x \leq z$, $x < y$ и $y < z \Rightarrow x < z$ - истинно).

В результате при помощи свойства транзитивности наиболее предпочтительное из предыдущих решений сравнивается с новым предложенным или выбранным из базы знаний по свойствам симметрии параметров качества.

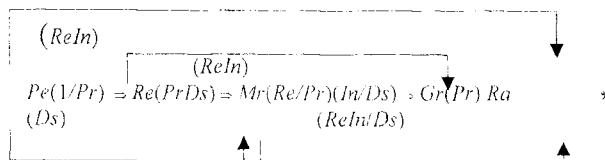
Однако в общем случае разные неэквивалентные ТР наиболее предпочтительны для различных параметров качества и

требуемого комплекса свойств. В этом случае необходимо использовать доминирующее ТР ($x \ll y$), характеризующееся свойствами [5]:

- 1) антирефлексивности ($x \ll x$ – ложно);
- 2) несимметричности ($x \ll y$ и $y \ll x$ – взаимоисключение);
- 3) нетранзитивности (из $x \ll y$ и $y \ll z$ не следует $x \ll z$).

Критерии процессов. При обосновании выбора ТР и синтезе методов обработки в комбинированных физических полях необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [9, 12]. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу, то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов [9].

Критерии термомеханических процессов. Критерии переноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при постепенном (\rightarrow) и резком (\rightarrow) возрастании мощности воздействия потоками энергии [9]:



в которых $Pe = \nu / \omega$ – критерий Пекле, определяющий отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности;

$Pr = \nu / \omega$ – критерий Прандтля, характеризующий способность теплоты распространяться в данной среде;

$Re = \nu / \nu$ – критерий Рейнольдса, описывающий переход движения обрабатываемого материала из ламинарного в турбулентное;

$In = \beta g \nabla T l^2 / \nu^2$ – отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе;

$Da = \lambda \nabla T l / (\rho \nu l)$ – отношение сил капиллярности и вязкости;

$Mr = \lambda \nabla T l^3 / (\rho \omega l)$ – критерий Марангони, определяющий возникновение регулярных поверхностных течений вследствие температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения;

$Gr = \beta g \nabla T l^4 / \nu^2$ – критерий Грасгофа, характеризующий естественную конвекцию при свободном движении обрабатываемого материала внутри формируемого слоя;

$Ra = \beta g \nabla T l^4 / (\omega \nu)$ – критерий Рэлея, описывающий образование силой плавучести пространственно-периодических конвекционных вихрей, где l – характерный размер; ω – коэффициент температуропроводности; ν – коэффициент кинематической вязкости; β – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; T – абсолютная температура; R – коэффициент термодиффузии; ρ – плотность обрабатываемого материала.

Критерии электромагнитных процессов. Критерии, характеризующие электромагнитные потоки, при обработке в комбинационных физических полях взаимосвязаны с последовательными критериями переноса, поэтому они оказывают существенное влияние на последовательности изменения поверхностных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [13]:

$$Sm(Em/Se) \rightarrow Si \rightarrow Mr(Ek) \rightarrow E(Tk/Ek) \rightarrow Ra,$$

в которых $Sm = IB / (\nu^2 \rho l)$ – критерий магнитного взаимодействия;

$Em = \nu E / (H \nu)$ – отношение скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его магнитной индукции;

$Se = E / (\nu \rho l)$ – критерий напряженности электрического поля;

$Si = I^2 R / (\rho \nu l^3)$ – энергетический критерий;

$Ek = \epsilon^* \gamma^2 \nabla T / \lambda$ – отношение термоэлектрической и капиллярной сил;

$E = \epsilon^* \gamma^2 \nabla T l^2 / (\rho \omega l)$ – термоэлектрический критерий;

$Tk = \rho \nu g l^3 / \lambda$ – отношение подъемной силы плавучести к капиллярной силе, где I – сила тока; B – магнитная индукция; E – напряженность электрического поля; H – энтальпия потока; ρ – удельное сопротивление; ϵ^* – диэлектрическая проницаемость; γ – коэффициент термоэлектродвижущей силы.

Совокупность критериев тепло-массопереноса и критериев электромагнитных потоков, описывает взаимное влияние

действие гидродинамических и электродинамических подсистем в открытой технологической системе методов обработки в комбинированных физических полях. Такое взаимодействие осуществляется как на уровне подсистем путем наложения полей и воздействия потоков на технологическую среду, так и на уровне элементов системы, посредством изменения их кинематических, динамических и объемных характеристик [9].

Проектирование методов обработки изделий в комбинированных физических полях. Использование последовательностей критериев переноса, анализа режимов перехода и состояний технологической системы многократно сокращает объем экспериментальных исследований при проектировании методов обработки в комбинированных физических полях [9, 13].

Рассмотрим проектирование методов обработки изделий в комбинированных физических полях: плазменно-механической (рис. 1), электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием (ППД) (рис. 2) и магнитно-абразивной (рис. 3), используя предложенные последовательности критериев, анализируя режимы обработки и состояние технологической системы.

Плазменно-механическая обработка. Для определения режимов устойчивого формирования параметров качества обработки в процессе ротационного резания с предварительным плазменным нагревом (рис. 1) согласно критериям Pe , Pr , Re , описывающим изменения проводимости и вязкости среды при увеличении интенсивности воздействий, рассматривались малые отклонения составляющих сил P и моментов M , формообразования поверхности.

Результаты исследований показали, что возможны два типа равновесных состояний: неустойчивый узел (НУ) и неустойчивое седло (НС) [9, 14]. При режиме НУ динамические параметры рабочей зоны технологической системы удаляются от положения равновесия. Система совершает аperiodические самовозбуждающиеся движения, которые переходят в устойчивые автоколебания предельного цикла (ПЦ). В режиме НС при малых отклонениях динамические параметры системы удаляются от положения равновесия в заданных направлениях.

Анализ образования структур поверхностного слоя в процессе плазменно-механической обработки при исследовании влияния устойчивости динамических характеристик P и M на формирование параметров качества поверхности показал возможность использо-

вания режимов НУ при черновой обработке и позволил рекомендовать режимы НС для чистовой обработки [9, 14].

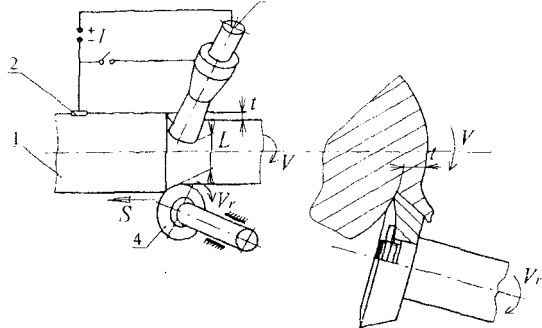


Рис. 1. Обработка ротационным резцом с предварительным плазменным нагревом:

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – скользящий контакт;
3 – плазмотрон; 4 – ротационный резец; V – скорость главного движения; V_r – скорость дополнительного движения; S – скорость подачи; t – глубина резания; L – расстояние от пятна нагрева до инструмента; I – сила тока плазменной дуги

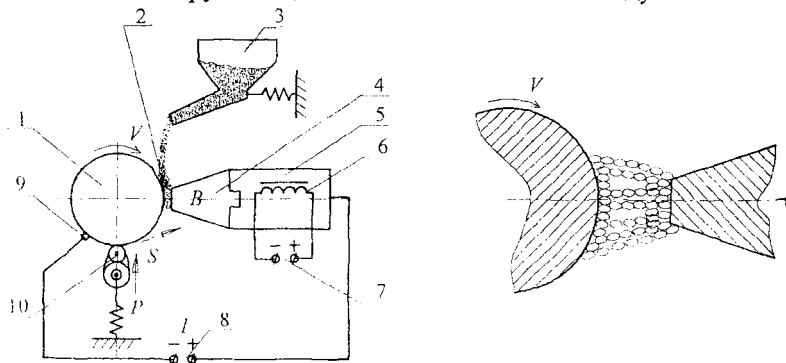


Рис. 2. Электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием:

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – ферромагнитный порошок;
3 – дозирующее устройство; 4 – полюсный наконечник; 5 – сердечник; 6 – электромагнитная катушка; 7 – источник напряжения; 8 – источник технологического тока; 9 – скользящий контакт; 10 – накатное устройство; V – скорость главного движения;
 S – скорость подачи; P – усилие деформирования;
 B – магнитная индукция; I – сила технологического тока

Электромагнитная обработка с ППД. Оптимальные режимы электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием (рис. 2) определялись с использованием критериев тепло-массопереноса Pe , Pr , Re и электромагнитных потоков Sm , Se , Si .

Вязкость и проводимость технологической среды, формируемой в рабочей зоне под воздействием электромагнитного поля частицами ферромагнитного порошка, описываются соотношениями ротационной и трансляционной составляющих напряженного состояния ферропорошковой среды [9].

Электромагнитное поле, согласно критерию магнитного взаимодействия Sm , изменяет напряженное состояние технологической среды через произведение BI , управляя магнитными потоками и создавая, в соответствии с критерием напряженности электрического поля Se , через отношение E_{γ}/I необходимую разность потенциалов между частицами порошка, заготовкой и полюсным наконечником. В результате при электромагнитной наплавке обеспечивается тепловое действие тока I^2R , описываемое энергетическим критерием Si .

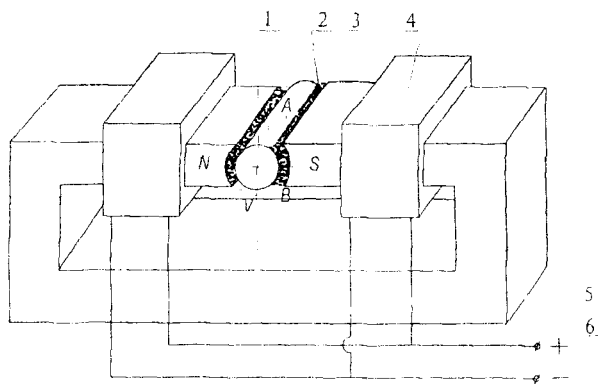


Рис. 3. Магнитно-абразивная обработка:

- 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – магнитно-абразивный порошок; 3 – полюсный наконечник; 4 – электромагнитная катушка; 5 – магнитопровод; 6 – источник напряжения

В процессе поверхностного пластического деформирования нагретой при наплавке обрабатываемой поверхности определены те же типы равновесных состояний НУ и НС, характеризующиеся не

только вращением, но и прецессией деформирующего элемента шарика. В соответствии с режимом формируется траектория пят контакта по обрабатываемой поверхности: петлеобразная или волнообразная кривая [9].

В результате управление процессом формирования поверхностного слоя осуществляется воздействиями потоков энергии и вещества через потоки электромагнитного поля, степени свободы частиц технологической среды и инструментов.

Магнитно-абразивная обработка. В процессе магнитно-абразивной обработки происходит механохимический съем металла и микровыглаживание поверхности заготовки (рис. 3). Отличительными особенностями процесса являются непрерывный контакт магнитно-абразивного порошка с обрабатываемой поверхностью заготовки и отсутствие жесткого крепления зерен в рабочей зоне. При этом появляется возможность управлять жесткостью инструмента, регулировать съем металла с формообразующей поверхности заготовки и обеспечивать возможность резания наиболее острой крошкой зерна порошка. Следует отметить, что при магнитно-абразивной обработке, как и при электромагнитной наплавке, силовым источником и упругой связкой порошка является энергия постоянно действующего магнитного поля. Поэтому исследования устойчивости и стабильности формирования параметров качества обработки (производительность процесса и Ra – шероховатость поверхности) проводились с использованием критериев электромагнитных потоков Sm , Se , Si .

Результаты исследований показали, что параметры качества магнитно-абразивной обработки характеризуются временем обработки (τ), которое вместе с величиной магнитной индукции (B) определяет количество абразивных зерен, участвующих в формировании поверхности. Следовательно, соотношение, характеризующее вязкость технологической среды $(B/\tau)(V/A)$, стремится к постоянству и повышает устойчивость обработки. В результате цепочки абразивных зерен длиной δ , обеспечивают минимальную шероховатость поверхности, равную глубине следов свободно вращающихся зерен абразива.

Рассмотренные выше типы равновесных состояний технологической системы ПУ и ИС характерны и для магнитно-абразивной обработки. Они определяются не только временем обработки (τ) и величиной магнитной индукции (B), амплитудой осцилляции (A) но и скоростью вращения заготовки (V).

Заключение

Математическое моделирование и алгоритмизация принятия решений путем определения вида уравнений, установления критериев подобия и анализа равновесных состояний системы при проектировании высокоэффективных технологий обработки изделий в комбинированных физических полях позволили сделать следующие выводы.

1. Переходы технологической системы из одного состояния в другое описываются критериями переноса, а механизмы формирования физико-химических параметров качества обработки определяются режимами равновесных состояний технологической системы.

2. Установлено, что при оптимальном режиме плазменно-механической обработки наблюдаются два типа равновесных состояний технологической среды, позволяющие получать самовозбуждающиеся движения, которые переходят в устойчивые автоколебания.

3. Выявлено, что при ЭМН с ППД управлением электрической и магнитной энергиями возможно формирование оптимального теплового поля, которое в сочетании с силовым обеспечивает требуемые физико-химические свойства покрытий.

4. Показано, что при МАО управление технологической средой осуществляется магнитной индукцией, что обеспечивает простоту изменения режима, позволяющего получить заданное качество обрабатываемой поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. О самоорганизации в технологическо-эксплуатационных процессах при комбинированных методах обработки материалов / П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, И.А. Сенчило и др. // Докл. НАН Беларуси. – 1995. – Т. 39. – №1.

2. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985.

3. Голоденко Б.А., Смоленцев В.П. Организация целенаправленного формирования новых методов комбинированной обработки // Вестник машиностроения. – 1994 – №4.

4. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / Под ред. А.Г. Раковича. – Мн.: НТК НАНБ, 1997.

5. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики. М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Эбеллинг В. Образование структур при необратимых процессах. – М.: Мир, 1979.
7. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. Киев Техника, 1977.
8. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980.
9. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: ИММ НАНБ, 1999. – 276 с.
10. Олемской А.И., Коплык И.В. Теория пространственно-временной эволюции неравновесной термодинамической системы // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – № 10.
11. Технологическо-эксплуатационные барьеры в поверхностном слое при высокоинтенсивной обработке металлов / П.И. Ящерицын, А.А. Шипко, М.Л. Хейфец и др. // Докл. НАН Беларуси. 1997. Т. 41. – №5.
12. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий на основе многофакторной оптимизации / П.И. Ящерицын, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец и др. // Докл. НАН Беларуси. – 1997. – Т. 41. – № 3.
13. Прямое выращивание деталей машин послойным синтезом с управляемым формированием свойств материала потоками энергии / П.И. Ящерицын, Н.Ф. Лугаков, М.Л. Хейфец и др. // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2000. – №3.
14. Обработка износостойких покрытий / Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек, М.Л. Хейфец и др.; Под ред. Ж.А. Мрочека. – Минск: Дизайн ПРО, 1997.