

8. Детали машин. Учебник для студентов машиностроительных специальностей /Под ред. О.А.Ряховского.- М.: МГТУ им. Баумана, 2002.- 496 с.
9. Айрапетов Э.Л. О расчетной оценке контактных разрушений на зубьях зубчатых колес //Вестник машиностроения, 1999, №8, с.3-21.

10. Руденко С.П. Сопротивление контактной усталости цементованных зубчатых колес //Вестник машиностроения, 1999, №4, с.13-15.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

Ящерицын П.И., Хейфец М.Л., Кухта С.В., Пальвинский С.В.

*It is offered to use the criteria describing controllable parameters of technological system at the automated designing physical and chemical methods of processing. Designing plasma-mechanical, electromagnetic and electron-beam superficial processing of constructional materials is considered.*

*It is shown, that transitions of technological system from one condition in another are described by criteria of carry which characterize determining parameters of the combined methods of physical and chemical processing of materials. Mechanisms of formation of physical and chemical parameters of quality of processing are determined by modes of equilibrium conditions of technological system.*

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

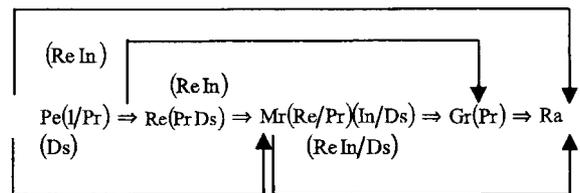
Под методом обработки понимается совокупность энергетических и информационных процессов, направленных на изменение формы, размеров, качества поверхности и физико-химических свойств конструкционного материала [2, 3].

Для формализации условий целенаправленного создания новых методов обработки каждая совокупность одноименных компонентов системы описывается как некоторое множество технологических решений (ТР) [3, 4].

При обосновании выбора ТР и синтезе комбинированных физико-химических методов необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [5, 6]. Поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества физико-химической обработки, являются следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу [7], то целесообразно в качестве целевой функции вместо конкретных зна-

чений совокупности критериев выбора использовать критерии самоорганизации процессов [8].

**Критерии термомеханических процессов.** Критерии переноса устанавливают последовательности структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при постепенном ( $\Rightarrow$ ) и резком ( $\rightarrow$ ) возрастании мощности воздействий потоками энергии [5, 10]:



в которых  $Pe = vt/\omega$  — критерий Пекле, определяющий отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности;  $Pr = \nu/\omega$  — критерий Прандтля, характеризующий способность теплоты распространяться в данной среде;  $Re = vt/\nu$  — критерий Рейнольдса, описывающий переход движения обрабатываемого материала из ламинарного в турбулентное;  $In = \beta g \nabla T t^2 / \nu^2$  — отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе;  $Ds = \lambda \nabla T t / (\nu \rho \nu)$  — отношение сил капиллярности и вязкости;  $Mr = \lambda \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu)$  — критерий Марангони, определяющий возникновение регулярных поверхностных течений вследствие

температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения;  $Gr = \beta g \nabla T t^4 / \nu^2$  — критерий Грасгофа, характеризующий естественную конвекцию при свободном движении обрабатываемого материала внутри формируемого слоя;  $Ra = \beta g \nabla T t^4 / (\omega \nu)$  — критерий Рэлея, описывающий образование силой плавучести пространственно-периодических конвекционных вихрей, где  $t$  — характерный размер;  $\omega$  — коэффициент температуропроводности;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости;  $\beta$  — коэффициент объемного расширения;  $g$  — ускорение свободного падения;  $T$  — абсолютная температура;  $\lambda$  — коэффициент термокапиллярности;  $r$  — плотность обрабатываемого материала.

#### Критерии электромагнитных процессов.

Критерии, характеризующие электромагнитные потоки, при физико-химической обработке взаимосвязаны с последовательностями критериев переноса, поэтому они оказывают существенное влияние на последовательности изменения поверхностных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [8, 9]:

$$Sm (Em/Se) \Rightarrow Si \quad \text{---} \rightarrow$$

$$Mr (Ek) \Rightarrow E (Tk/Ek) \Rightarrow Ra,$$

в которых  $Sm = IB / (\nu^2 \rho t)$  — критерий магнитно-го взаимодействия;  $Em = \nu E_1 / (HB)$  — отношение скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его магнитной индукции;  $Se = E_1 t^2 / (IR)$  — критерий напряженности электрического поля;  $Si = I^2 R / (\nu \rho H t^3)$  — энергетический критерий;  $Ek = \epsilon^* \gamma^{*2} \nabla T / \lambda$  — отношение термоэлектрической и капиллярной сил;  $E = \epsilon^* \gamma^{*2} \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu)$  — термоэлектрический критерий;  $Tk = \rho \beta^* g t^2 / \lambda$  — отношение подъемной силы плавучести к капиллярной силе, где  $I$  — сила тока;  $B$  — магнитная индукция;  $E_1$  — напряженность электрического поля;  $H^1$  — энтальпия потока;  $R$  — электросопротивление;  $\epsilon^*$  — диэлектрическая проницаемость;  $\gamma^*$  — коэффициент термоэлектродвижущей силы.

Совокупность критериев тепломассопереноса и критериев, характеризующих электромагнитные потоки, описывает взаимодействие гидродинамических и электродинамических подсистем в открытой технологической системе физико-химической обработки. 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 [5, 10].

Использование последовательностей критериев переноса, анализ режимов перехода и состояний технологической системы многократно сокращает объем экспериментальных исследова-

ний при проектировании комбинированных методов физико-химической обработки материалов.

Рассмотрим проектирование плазменно-механического, электромагнитного и электронно-лучевого методов формирования поверхности материалов, 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 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) [5, 11]. 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. Всегда существуют два новых стабильных состояния, к которым приближается система. Эти состояния могут слиться, расширив диапазоны своего существования, при использовании дополнительных перемещений — вращений режущей кромки ротационного инструмента.

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 использования режимов НУ при черновой обработке и позволил рекомендовать режимы НС для чистовой обработки [5, 11].

**Электромагнитная обработка.** Оптимальные режимы электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием определялись с использованием критериев тепломассопереноса  $Pe$ ,  $Pr$ ,  $Re$  и электромагнитных потоков  $Sm$ ,  $Se$ ,  $Si$ .

Вязкость и проводимость технологической среды, формируемой в рабочей зоне под воздействием электромагнитного поля частицами ферромагнитного порошка, описывается соотношениями ротационной и трансляционной составляющих напряженного состояния ферропорошковой среды [5, 12].

Электромагнитное поле согласно критерию магнитного взаимодействия  $Sm$  изменяет напря-

женное состояние технологической среды через производство ВІ, управляя магнитными потоками и создавая, в соответствии с критерием напряженности электрического поля  $Se$ , через отношение  $E_1/I$  необходимую разность потенциалов между частицами порошка, заготовкой и плюсным наконечником. В результате при электромагнитной наплавке обеспечивается тепловое действие тока  $I^2R$ , описываемое энергетическим критерием  $Si$ .

В процессе поверхностного пластического деформирования нагретой при наплавке 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 пятна контакта по обрабатываемой поверхности: петлеобразная или волнообразная кривая [5, 12].

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

**Электронно-лучевая обработка.** Стабильность формирования параметров качества при электронно-лучевом нагреве поверхности определялась по критериям тепломассопереноса  $Mg$ ,  $Gr$ ,  $Ra$  и по термоэлектрическому критерию  $E$ . При этом значения параметров качества обработки сравнивались с количеством формируемых структур, характеризующим относительной площадью модифицированной поверхности [5, 10, 13].

Образование ячеистой структуры на модифицируемой поверхности титанового однофазного псевдо-а-сплава происходит путем формирования вихревых диссипативных структур в жидком состоянии. Вначале зарождаются, а затем отодвигаются на периферию узкие ячейки, формируемые термокапиллярной силой, описываемой критерием  $Mg$ . С ростом интенсивности электронно-лучевого воздействия в центре зоны нагрева естественная конвекция, характеризующаяся критерием  $Gr$ , размывает вихревые диссипативные структуры. Широкие тороидальные вихри, создаваемые силой плавучести, описываемой критерием  $Ra$ , при электронно-лучевом воздействии наблюдаются только при глубоком оплавлении поверхности. Термоэлектрический критерий  $E$  характеризует влияние ионизированного жидкого металла на вихревые течения в ванне расплава [10 13].

Исследование соотношения площади  $S_0$  поверхности с ячеистой структурой и общей площади оплавленного участка в зависимости от удельной мощности  $q$  и продолжительности нагрева  $t$ , что наибольшая площадь с регулярной структурой об-

разуется в узком диапазоне интенсивности нагрева [5, 13].

Рассмотренные типы равновесных состояний технологической системы НУ и НС наблюдаются также при электронно-лучевой обработке. Так, образование ячеистой структуры на максимальной площади характеризуется режимом НУ, трансформирующимся в предельный цикл. Ограничением цикла являются процессы перехода обрабатываемого материала из твердого состояния в жидкое. Формирование поверхности раздела — границы плавления — описывается режимом НС. Движения от поверхности раздела в противоположных направлениях путем теплопроводности и конвекции тепловых потоков стабилизируют состояние различных фаз системы [5, 10].

Зависимости изменения микротвердости структур, характеризующие физико-химическими превращениями в поверхностном слое титановых сплавов с покрытиями, выглядят аналогично зависимостям формирования ячеистых структур. Химические реакции, растворение в твердом состоянии элементов покрытия, образование фаз эвтектического состава, оплавление поверхности покрытия с образованием регулярной структуры, подплавление основы с образованием переходной зоны, формирование диффузионной зоны при электронно-лучевых воздействиях [5, 13] приводят к изменению микротвердости по глубине поверхностного слоя титанового сплава с хромоникелевым покрытием.

Следовательно, для управления прочностью сцепления покрытия с основой и улучшения физико-химических параметров обрабатываемых поверхностей необходимо ограничивать диапазон интенсивности электронно-лучевого воздействия в соответствии с химическим составом и толщиной покрытия.

**Выводы.** Математическое моделирование и алгоритмизация принятия решений путем определения вида уравнений, установления критериев подобия и анализа равновесных состояний системы при проектировании высокоэффективных технологий обработки поверхностей концентрированными потоками энергии [14] позволили сделать следующие выводы:

1. Переходы технологической системы из одного состояния в другое описываются критериями переноса, характеризующими определяющие параметры комбинированных методов физико-химической обработки материалов.

2. Механизмы формирования физико-химических параметров качества обработки определяются режимами равновесных состояний технологической системы.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. О самоорганизации в технологическо-эксплуатационных процессах при комбинированных методах обработки материалов / П.И.Ящерицын, Л.М.Кожуро, И.А.Сенчило, М.Л.Хейфец // Доклады АН Беларуси. — 1995. — Т. 39. — № 1. — С. 112 — 116.
2. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. — М.: Машиностроение, 1985. — 264 с.
3. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. — Киев: Наукова думка, 1989. — 192 с.
4. Голоденко Б.А., Смоленцев В.П. Организация целенаправленного формирования новых методов комбинированной обработки // Вестник машиностроения. — 1994. — № 4. — С. 25 — 28.
5. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. — Гомель: ИММС НАНБ, 1999. — 276 с.
6. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий на основе многофакторной оптимизации / П.И.Ящерицын, Л.М.Кожуро, М.Л.Хейфец, Б.П.Чемисов // Доклады АН Беларуси. — 1997. — Т. 41. — № 3. — С. 121 — 127.
7. Артоболевский И.И., Ильинский Д.Я. Основы синтеза машин автоматического действия. — М.: Наука, 1983. — 280 с.
8. Совершенствование производственных систем на основе создания условий для самоорганизации технологических процессов и объектов / П.И.Ящерицын, А.А.Шипко, М.Л.Хейфец, Н.Н.Попок // Доклады АН Беларуси. — 1996. — Т. 40. — № 1. — С. 118 — 121.
9. Дружинин В.В., Жонторов Д.С. Проблемы системологии: проблемы теории сложных систем. — М.: Сов. радио, 1976. — 296 с.
10. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И.Гордиенко, М.Л.Хейфец, Б.П.Чемисов и др. — Мн.: ФТИ НАНБ; Новополоцк: ПГУ, 2000. — 172 с.
11. Обработка износостойких покрытий / Под ред. Ж.А.Мрочка. — Мн.: ДизайнПРО, 1997. — 208 с.
12. Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. — Новополоцк: ПГУ, 1999. — 240 с.
13. Шипко А.А., Поболь И.Л., Урбан И.Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. — Мн.: Наука и техника, 1995. — 280 с.
14. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / Под ред. М.Л.Хейфеца и Б.П.Чемисова. — Новополоцк: ПГУ, 2002. — 268 с.

## ОЦЕНКА И СРАВНЕНИЕ НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ КРУЧЕНИЯ

Кондратюк В.Ф., Вербило И.Н., Эльхади Саид

*Simple formulas, that give satisfactory results, of tension calculation of torsion of arbitrary section rods are presented here.*

В настоящее время в расчетах конструкций широко используются универсальные компьютерные комплексы на базе методов теории конечных элементов с мощной сервисной поддержкой. Не потеряли своего значения и «прозрачные» методы сопротивления материалов (одномерные модели) и аналитические приближенные методы теории упругости, в частности, вариационные. С помощью последних можно получать решения с достаточной для практических целей точностью по сильно усеченным математическим моделям — по первому приближению. Это дает возможность оперативно оценить различные конструктивные решения на ранних стадиях проектирования, а также при модернизации конструкции, позволяет выполнить тестирование приобретаемых компьютерных программ, а учитывая, что на практике принимаются значительные коэффициенты запаса, полу-

ченные приближенные решения могут оказаться достаточными.

Рассматриваем задачу кручения конструкции с произвольным поперечным сечением и возможно переменным по ее длине.

В работе [1] рассмотрен расчет кручения рамы автомобиля от воздействия дороги заданием кинематической связи — имитация неровности проезжей части. Упругие перемещения по трем координатам аппроксимировались степенными рядами. Обобщенные перемещения вычислялись на основе вариационного уравнения Лагранжа (метод Треффтца) в результате решения 37 линейных алгебраических уравнений (24 вариационных, 12 уравнений внутренних связей, одно уравнение кинематической связи, задающее перемещение некоторой точки).

В работе [2] показано, что аналогичная задача может быть сведена к нахождению только двух