

УДК 621.7:621.8:621.9:536.75

Академик А. И. ГОРДИЕНКО, Л. М. КОЖУРО,
М. Л. ХЕЙФЕЦ, С. В. КУХТА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Физико-технический институт НАН Беларуси,
Белорусский государственный аграрный технический университет,
Полоцкий государственный университет

Поступило 11.02.2004

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

При синтезе комбинированных физико-химических методов необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [2, 3]. Поскольку условия стабилизации формирования параметров качества физико-химической обработки, являются следствием избыточности технологической системы по структурному составу [4], то целесообразно в качестве целевой функции для принятия решений использовать критерии самоорганизации процессов [5].

Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при возрастании мощности воздействий потоками энергии [2, 3, 6]

$$Pe \Rightarrow Re \Rightarrow Mг \Rightarrow Cr \Rightarrow Ra,$$

где Pe — критерий Пекле; Re — критерий Рейнольдса; $Mг$ — критерий Марангони; Cr — критерий Грасгофа; Ra — критерий Рэлея, а также $Pr = Pe/Re = Ra/Cr$ — критерий Прандтля.

Критерии, характеризующие электромагнитные потоки, при физико-химической обработке, взаимосвязаны с последовательностью критериев переноса, поэтому они оказывают существенное влияние на последовательность изменения поверхностных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [2, 7]

$$Sm \Rightarrow Si - \rightarrow Mг \Rightarrow Et \Rightarrow Ra,$$

где Sm — критерий магнитного взаимодействия; Si — энергетический критерий; Et — термоэлектрический критерий, а также $Se = (Sm/Si)(v/H)(E/B)$ — критерий напряженности электрического поля, где B — магнитная индукция; E — напряженность электрического поля; H — энthalпия потока; v — скорость.

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 [3, 7].

Использование последовательностей критериев переноса, анализ режимов перехода и состояний технологической системы многократно сокращает объем экспериментальных исследований при проектировании комбинированных методов физико-химической обработки материалов [2—4].

В соответствии с делением по концентрации энергии [2, 3] рассматривалось проектирование методов формирования поверхности материалов, в каждом из которых применяется

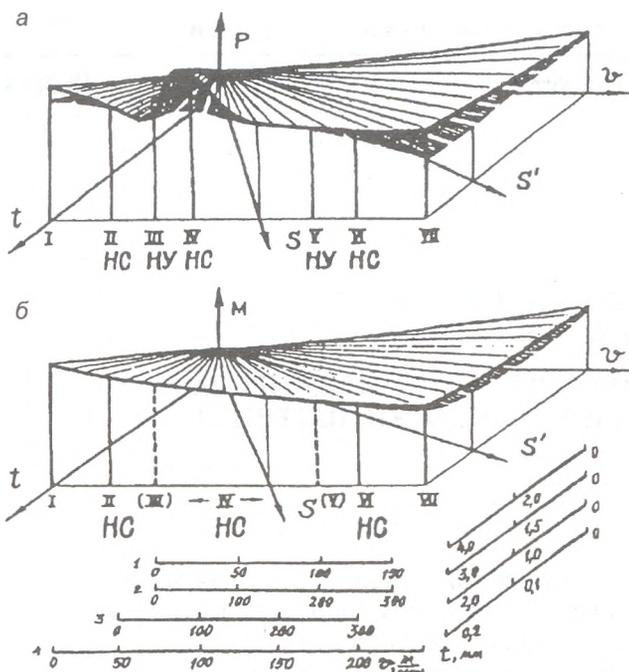


Рис. 1. Отклонения составляющих сил P (а) и моментов M (б) формообразования поверхности на стадиях структурообразования (I—VII) в зависимости от скорости v (м/мин) и глубины t (мм) резания: 1 — титановых сплавов; 2 — конструкционных; 3 — хромоникелевых сталей; 4 — хромоникелевых порошковых покрытий

Результаты исследований показали, что возможны два типа равновесных состояний: неустойчивый узел (НУ) и неустойчивое седло (НС) [2, 3, 8]. При режиме НУ динамические параметры рабочей зоны технологической системы удаляются от положения равновесия. Система совершает аperiодические 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 (рис. 1, а). Эти состояния могут слиться, расширив диапазоны своего существования, при использовании дополнительных перемещений — вращений режущей кромки ротационного инструмента (рис. 1, б).

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 [2, 3, 8].

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 [2, 3, 9].

Электромагнитное поле согласно критерию магнитного взаимодействия Sm изменяет напряженное состояние технологической среды, управляя магнитными потоками и создавая в соответствии с критерием напряженности электрического поля Se необходимую разность потенциалов между частицами порошка, заготовкой и полюсным наконечником. В результате при электромагнитной наплавке обеспечивается тепловое действие тока, описываемое энергетическим критерием Si .

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

определенный вид источника энергии, использовались предложенные последовательности критериев, анализировались режимы обработки и состояния технологической системы.

Объемный источник применялся для нанесения покрытия из порошка или проволоки и предварительного нагрева плазменной дугой при резании и деформировании свободно вращающимся ротационным инструментом [8]. Множество локальных источников использовалось для электромагнитной наплавки порошка с последующим поверхностным пластическим деформированием и выглаживанием нагретой поверхности [9]. Единый сфокусированный источник применялся для электроннолучевого нагрева поверхности с покрытием [10].

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 (рис. 1).

только вращением, но и прецессией деформирующего элемента — шарика. В соответствии с режимом формируется траектория пятна контакта по обрабатываемой поверхности: петлеобразная или волнообразная кривая [2, 3, 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.

Стабильность формирования параметров качества при электронно-лучевом нагреве поверхности определялась по критериям тепломассопереноса Mg , Gr , Ra и по термоэлектрическому критерию Et [10]. При этом значения параметров качества обработки (рис. 2, *a*) сравнивались с количеством формируемых структур, характеризующим относительной площадью модифицированной поверхности (рис. 2, *б*) [2, 3, 11].

Образование ячеистой структуры на модифицируемой поверхности титанового однофазного псевдо- α -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, характеризующая 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 [2, 10, 11]. Термоэлектрический критерий Et характеризует влияние ионизированного жидкого металла на вихревые течения в ванне расплава [2, 10].

Исследование соотношения площади S_0 поверхности с ячеистой структурой и общей площади оплавленного участка в зависимости от удельной мощности q и продолжительности нагрева τ показало (рис. 2, *б*), что наибольшая площадь с регулярной структурой образуется в узком диапазоне интенсивности нагрева [2, 11].

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 [2, 3].

Зависимости изменения микротвердости структур (рис. 2, *a*), характеризующие физико-химическими превращениями в поверхностном слое титановых сплавов с покрытиями, выглядят аналогично зависимостям формирования ячеистых структур (рис. 2, *б*). 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 [2, 11, 12] приводят к изменению микротвердости по глубине поверхностного слоя титанового сплава с хромоникелевым покрытием (рис. 2, *a*).

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 [2, 3, 11].

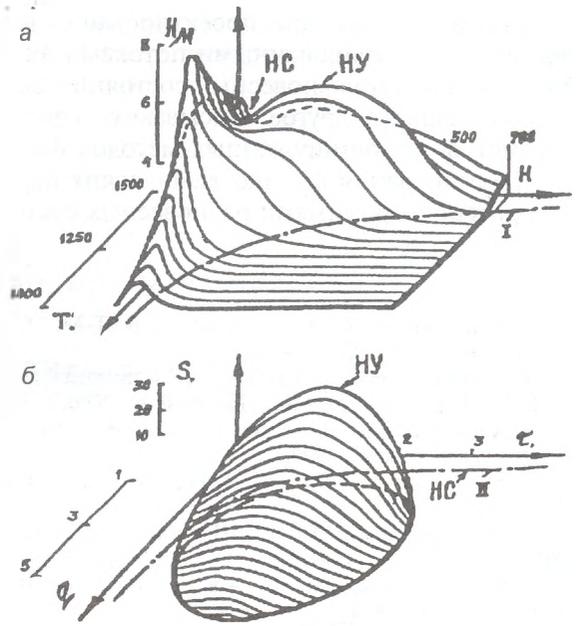


Рис. 2. Распределение микротвердости H_n (ГПа) по глубине H (мкм) поверхностного слоя титанового сплава с хромоникелевым покрытием (*a*) при изменении температуры T (К) и относительная площадь поверхности S (%) с модифицированной структурой в зависимости от удельной мощности q (кВт/см²) и продолжительности τ (с) электронно-лучевого нагрева (*б*), видимая граница модифицированного слоя (I) и граница плавления (II)

Таким образом, при проектировании высокоэффективных технологий обработки поверхностей концентрированными потоками энергии целесообразно использовать критерии подобия для анализа равновесных состояний системы. Переходы технологической системы из одного состояния в другое описываются критериями подобия, характеризующими определяющие параметры комбинированных методов физико-химической обработки материалов. Механизмы формирования физико-химических параметров качества обработки определяются согласно критериям режимами равновесных состояний технологической системы.

Литература

1. Я щ е р и ц ы н П. И., К о ж у р о Л. М., С е н ч и л о И. А., Х е й ф е ц М. Л. // Докл. НАН Беларуси. 1995. Т. 39, № 1. С. 112—116.
2. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / Под ред. А. И. Гордиенко, М. Л. Хейфеца, Б. П. Чемисова и др. Мн., Новополоцк, 2000.
3. Х е й ф е ц М. Л., К о ж у р о Л. М., М р о ч е к Ж. А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель, 1999.
4. А р т о б о л е в с к и й И. И., И л ь и н с к и й Д. Я. Основы синтеза машин автоматического действия. М., 1983.
5. Я щ е р и ц ы н П. И., Ш и п к о А. А., Х е й ф е ц М. Л., П о п о к Н. Н. // Докл. НАН Беларуси. 1996. Т. 40, № 1. С. 118—121.
6. Я щ е р и ц ы н П. И., А в е р ч е н к о в В. И., Х е й ф е ц М. Л., К у х т а С. В. // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45, № 4. С. 106—109.
7. Технологические основы управления качеством машин / Под ред. А. С. Васильева, А. М. Дальского, М. Л. Хейфеца и др. Мн., Новополоцк, 2002.
8. Обработка износостойких покрытий / Под ред. Ж. А. Мрочека. Мн., 1997.
9. А к у л о в и ч Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. Новополоцк, 1999.
10. Э й д е л ь м а н Е. Д. // Успехи физических наук. 1995. Т. 165, № 11. С. 1279—1294.
11. Ш и п к о А. А., П о б о л ь И. Л., У р б а н И. Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. Мн., 1995.
12. Я щ е р и ц ы н П. И., Ш и п к о А. А., Х е й ф е ц М. Л., К о ж у р о Л. М. // Докл. НАН Беларуси. 1997. Т. 41, № 5. С. 110—113.

GORDIENKO A. I., KOZHURO L. M., KHEJFETZ M. L., KOUKHTA S. V.

USE OF ANALOGY PARAMETERS FOR DEVELOPMENT OF COMBINED PHYSICAL-CHEMICAL MATERIALS PROCESSING METHODS

Summary

Criteria describing domination of controllable parameters of technological system are presented. Development of plasma-mechanical, electromagnetic and electron-beam superficial methods of processing of constructional materials is considered.