

УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*доктор техн. наук, профессор Л.М. КОЖУРО,
доктор техн. наук, профессор М.Л. ХЕЙФЕЦ,
В.С. ТОЧИЛО, С.В. ПАЛЬВИНСКИЙ*

Предложено образование неустойчивых структур в процессах электрофизической обработки описывать критериями тепломассопереноса и критериями электромагнитного поля. Показано, что при упрочняющей обработке с формированием рельефа поверхности в технологической системе организуется отрицательная обратная связь. При формировании поверхности сопровождающимся поверхностным упрочнением создается положительная обратная связь.

Для изучения принципов управления устойчивостью технологической системы при электрофизической обработке рассмотрим критерии устойчивости и исследуем процессы формирования и изменения свойств поверхностных слоев. Образование термодинамических неустойчивостей в технологической системе электрофизической обработки целесообразно описывать как критериями тепломассопереноса (Re – Рейнольдса, Pr – Прангля, Pe – Пекле), так и критериями, характеризующими электромагнитные потоки [1, 2].

Выводимый из уравнения энергии критерий показывает соотношение между джоулевой тепловой и кинетической энергией потока:

$$Si = \frac{I^2 R}{\rho v H l^3} = \frac{v}{H'} \cdot \frac{R/l}{\rho v^2} \cdot \left(\frac{I^2}{l} \right), \quad (1)$$

где v – скорость потока; H' – энтальпия, теплосодержание потока; R – электросопротивление; l – характерный линейный размер рабочей зоны; ρ – плотность потока; I – сила тока.

Критерий магнитного взаимодействия важен при обобщении электрических характеристик источников энергии с магнитным управлением электрической дугой. Он получается из уравнения импульсов $\rho v = P \tau$ и раскрывает соотношение между электромагнитной и инерционной силами:

$$Sm = \frac{IB}{\rho v^2 l} = \frac{B}{\rho v^2} \cdot \frac{I}{l} = \frac{B}{\tau(Pv)} \cdot \frac{I}{l}, \quad (2)$$

где B – индукция магнитного поля; τ – текущее время; P – сила.

Критерий напряженности электрического поля вытекает из закона Ома и описывает проводимость рабочей зоны:

$$Se = \frac{E_1 I^2}{IR} = \frac{E_1}{R/l} \cdot \frac{I}{I}, \quad (3)$$

где E_1 – напряженность электрического поля.

Соотношение критериев магнитного взаимодействия Sm (2) и напряженности электрического поля Se (3) дает выражение

$$\frac{Sm}{Se} = \frac{B}{E_1} \cdot \frac{R/l}{\rho v^2} \cdot \left(\frac{I}{l} \right)^2, \quad (4)$$

которое аналогично энергетическому критерию Si (1) связывает отношения удельного электросопротивления рабочего зазора R/l к кинетической энергии потока ρv^2 и силы тока I к длине разрядного промежутка l . Отличие формул (1) и (4) в том, что первая определяет отношение скорости потока v к его теплосодержанию H' , а вторая – отношение магнитной индукции B к напряженности электрического поля E_1 . Напряженность поля E_1 для источников тока (генераторов электрических импульсов) характеризуется напряжением U холостого хода, а для источников напряжения (трансформаторов) – силой разрядного тока I .

Процессы формирования поверхностного слоя в технологической системе электрофизической обработки описываются модифицированными критериями Рейнольдса Re^* , Пекле Pe^* и Прангля Pr^* [3, 4]:

$$\text{Re}^* = \frac{\text{Pe}^*}{\text{Pr}^*} = \frac{\nu' t}{\omega^* \text{Pr}^*} = \frac{\nu' t}{\nu^*} = \frac{\nu' t}{(\sigma_p / \sigma_M)(\nu/S)} = \frac{\sigma_M}{\sigma_p} \cdot \frac{\nu' S t}{\nu}, \quad (5)$$

в которых $\nu' = \nu + S$ – результирующая скорость движений формирования поверхности, главного ν и подачи S ; t – толщина наносимого и деформируемого слоя с учетом изменения его плотности ρ ; ω^* и ν^* – обобщенная проводимость и вязкость технологической среды; σ_p – трансляционная составляющая напряженного состояния технологической среды и сформированного покрытия в направлении силы деформирования P ; σ_M – ротационная составляющая напряженного состояния в направлении вращения на плоскости, образованной P и ν .

Соотношение составляющих напряженного состояния среды (σ_M / σ_p) на микроуровне и скоростей дополнительного и главного движений элементов технологической системы (S/ν) на макроуровне описывает вязкость технологической среды $(1/\nu^*)$, называемую ротационной [3, 4]:

$$\mu^* = \frac{1}{\nu^*} = \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_p} \right) \left(\frac{S}{\nu} \right). \quad (6)$$

Ротационная вязкость $\mu^* = -\tau^* / \text{rot } \nu^*$ характеризует переход объемной вязкости среды $\zeta^* = -\sigma^* / \text{div } \nu$ в динамическую $\eta = -\tau_x / \text{grad } \nu$ при интенсификации технологических воздействий, используя добавочные касательные τ^* и нормальные σ^* напряжения, возникающие при сжатии и растяжении среды наряду с нормальным напряжением давления σ_x и динамическим касательным напряжением $\tau_x = -\eta \sigma_x$ [5], а ν^* описывает турбулентные составляющие вращения в потоке среды, движущемся со скоростью ν [3].

При образовании термодинамически неустойчивых структур целесообразно определять критерием Рейнольдса Re^* (5), описывающим турбулентность поверхностных течений и потоков обрабатываемого материала, волнистость и шероховатость формирующегося рельефа поверхности Ra [3, 4]. Поэтому толщина формируемого слоя t , пропорциональная увеличению или снижению его массы Q , с учетом сплошности или пористости покрытия, которые изменяют относительную твердость $\Delta HRC/HRC$, описывается выражением $Q / (1 - \Delta HRC/HRC)$. Соотношение параметров напряжений σ_p / σ_M в (5) и (6), пропорциональных факторам, определяющим перемещение и вращение частиц порошка и вещества деформируемого материала, согласно критериям Sm (2), Se (3) и Sm/Se (4) представляется отношениями: для магнитодинамических B/τ (2); для термодинамических I/I (3); для термодинамических P/I (2) и для электромагнитных B/E , (4) воздействий. Отношение B/E , может быть заменено на B/U при использовании в качестве источника электрической дуги генераторов импульсов и на B/I – при использовании трансформаторов.

В результате при электрофизической обработке критерии тепломассопереноса будут пропорциональны соотношению

$$Ra \sim \frac{\nu' [Q / (1 - \Delta HRC/HRC)]}{(B/I)(\nu/S)}.$$

Используем полученные критерии и выражения для исследования устойчивости технологической системы. Рассмотрим комбинированный процесс удаления дефектного слоя и изменение свойств поверхностного слоя ротационным инструментом при дополнительном плазменном нагреве, когда вращающийся инструмент пластически деформирует разогретую поверхность [3]. Исследуем процесс в зависимости от основных технологических факторов ν , S , t , входящих в критерии устойчивости и факторов I , L , влияющих на параметры напряжений, входящие в критерии. Рассмотрим показатели качества Ra и HRC , характеризующие критерии устойчивости, и коэффициент $u = \nu' / \nu$, описывающий дополнительное перемещение инструмента и влияющий на критерии через соотношение ν/S .

Проведенные эксперименты [3, 4] показывают (рис. 1, а – д), что изменения показателей качества Ra , HRC и коэффициента u , происходящие при увеличении интенсивности нагрева I , аналогичны изменениям при снижении скорости ν и уменьшении расстояния до источника нагрева L . Изменения Ra , HRC и u с ростом I также подобны (но в меньшей мере) изменениям при увеличении подачи S и глубины резания t вследствие того, что S и t определяют сечение среза, постоянство которого $St = \nu t / (\nu/S) = \text{const}$

в значительной мере обеспечивает неизменность критерия. Отметим также, что на изменение интенсивности нагрева I скорость v оказывает большее влияние, чем подача S , а нагрев больше изменяет вихревую σ_M , чем трансляционную σ_p составляющую напряжений, что позволяет повышать устойчивость резания и деформирования с дополнительным нагревом при использовании ротационного инструмента.

Исследование результатов экспериментов (см. рис. 1, а – д) и проведенная статистическими методами [4] расстановка по степени влияния технологических факторов v, S, t, I, L на показатели устойчивости процесса u и качества поверхности HRC, Ra (рис 1, е) позволяют судить об устойчивости электрофизического процесса.

Формирующиеся при обработке с плазменным нагревом термодинамические неустойчивости типа наростов, термопластических сдвигов, а также структуры поверхности, снижающие ее твердость HRC , с помощью дополнительного перемещения кромки инструмента устраняются. Самоорганизация процессов резания и трения [3] обеспечивает такой показатель u , при котором неустойчивости отсутствуют, а отклонения микрорельефа поверхности Ra минимальны. Так, при формировании рельефа Ra (рис. 1, е) влияние составляющих режима резания v, S, t мало по сравнению с показателями нагрева I, L вследствие образования разнообразных структур в поверхностном слое, о чем свидетельствуют измерения его твердости HRC . Однако дополнительное движение ротационного инструмента, описываемое показателем u (рис. 1, е), обеспечивает в технологической системе обратную связь Ra с HRC и позволяет варьированием S, v и v_r повышать устойчивость системы.

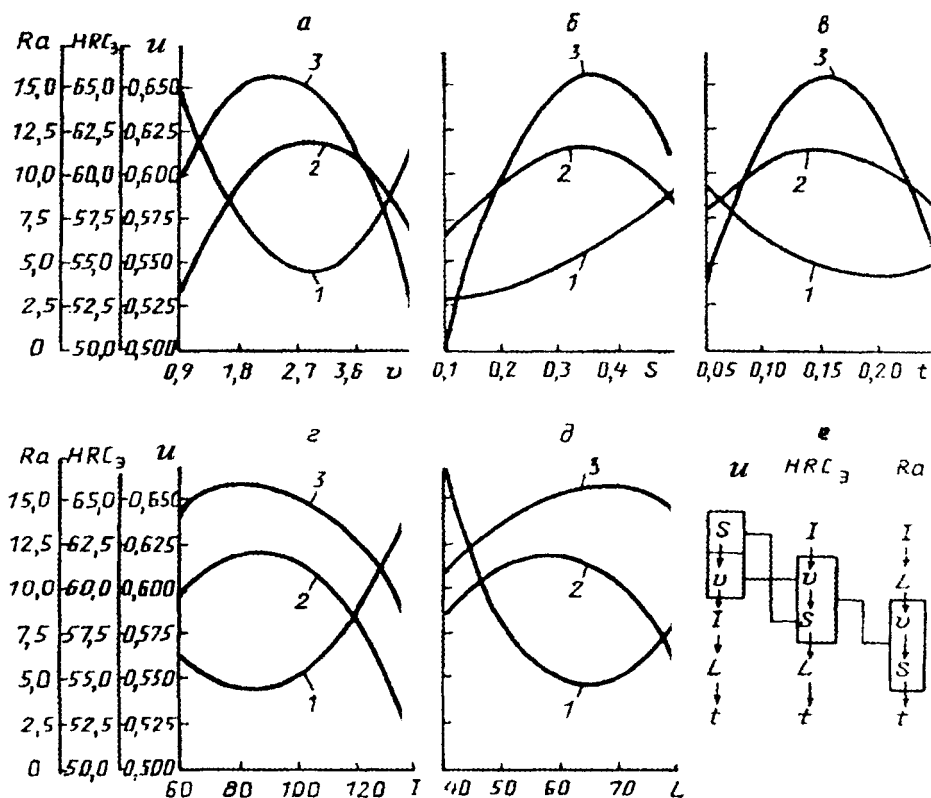


Рис. 1. Параметры качества поверхности при плазменном оплавлении с упрочняющим ротационным резанием покрытия порошком ПГ-СР4: 1 – Ra; 2 – HRC; 3 – u в зависимости от технологических факторов v (а), S (б), t (в), I (г), L (д) и схема степени влияния технологических факторов (е)

Рассмотрим комбинированный процесс нанесения покрытия электромагнитной наплавкой при дополнительном поверхностном пластическом деформировании разогретой поверхности шариком [3, 6]. Изучим процесс в зависимости от основных технологических факторов v, S, I, B , входящих в критерии устойчивости, и фактора P , влияющего на показатели качества и производительность процесса. Рассмотрим показатели качества Ra и HRC и производительность процесса Q .

длительность наплавки Q (см. рис. 2), описываемая производением $S \cdot v$, путем фиксации частиц ферропорошка в электромагнитном поле и дополнительных движений шарика, деформирующего поверхность, осуществляет обратную связь HRC с Ra и позволяет изменением I , B и P повышать устойчивость технологической системы.

Предложенные критерии и рассмотренные процессы электрофизической обработки при формоизменении поверхности, нанесении слоев и изменении их свойств позволяют определить пути управления устойчивостью технологической системы и повышения эффективности электрофизических методов обработки [3]. При удалении дефектного и изменении свойств поверхностного слоя, когда критерий Рейнольдса Re превышает допустимые значения, в деформируемом слое образуются вихревые структуры. Это происходит в результате снижения сопротивления обрабатываемого материала на сдвиг σ_z вследствие высокоинтенсивного разогрева зоны формообразования и структурообразования, когда материал не имеет возможности свободно перемещаться в рабочей зоне ($\sigma_z \rightarrow 0$), либо в результате увеличения скорости обработки v при отсутствии возможности инструменту перемещаться дополнительно в направлении S , не совпадающем с направлением главного движения v . Следовательно, применение инструментов с дополнительными степенями свободы в направлениях v_r , S , не совпадающих с главным движением обработки v , позволяет повысить устойчивость технологической системы в процессах, использующих концентрированные источники энергии.

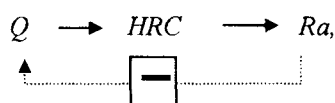
При нанесении покрытия электромагнитной наплавкой образование неустойчивых термодинамических структур определяется электромагнитными и электродуговыми процессами в рабочей зоне. Напряжения σ_p и σ_M в порошковой среде зависят главным образом от магнитной индукции поля B и силы тока I при дуговых разрядах. Следовательно, изменение параметров электромагнитного поля B , I , управляющих фиксацией и плавлением частиц порошка, снижает электросопротивление ρ^* покрытия при наплавке и позволяет повысить устойчивость технологической системы, стабилизируя толщину формируемого покрытия.

При формоизменении поверхности с ростом усилия деформирования P увеличивается твердость HRC обрабатываемой поверхности, вследствие чего возрастают скорости дополнительных перемещений вращающегося ротационного инструмента или шарика. Избыточный нагрев обеспечивает повышение степени деформации, но снижает скорости дополнительных перемещений, что приводит к увеличению отклонения микрорельефа поверхности Ra . Совместные согласованные воздействия на обрабатываемый материал дополнительных перемещений инструмента и нагрева повышают устойчивость технологической системы и обеспечивают наибольшую твердость HRC , наименьшие отклонения микрорельефа поверхности Ra при максимальных скоростях дополнительных перемещений для различных процессов электрофизической обработки.

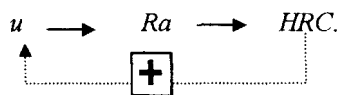
Организация обратной связи в открытой технологической системе через избыточные степени свободы инструментов, частиц наносимого и удаляемого слоя, а также посредством дополнительных воздействий потоками поля и концентрированными источниками вещества и энергии позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя.

В результате анализа обобщенных схем электрофизических процессов (см. рис. 1, е; рис. 2, е) выделены основные принципы организации обратной связи в открытой технологической системе [3]:

– при нанесении слоев



– при формоизменении поверхности



В том случае, когда сначала требуется упрочнить, а в завершение сформировать рельеф поверхности, как, например, при нанесении покрытий, в технологической системе организуется отрицательная обратная связь. При этом дополнительные воздействия источниками вещества и энергии, формируя упорочняющие структуры в поверхностном слое, не допускают развития неустойчивости процессов образования рельефа поверхности, и при повышении эффективности не позволяют поднять производительность процесса обработки.

В случае, когда, в первую очередь, необходимо сформировать поверхность, затем ее упрочнить, как, например, при деформировании и резании, в технологической системе создается положительная обратная связь. При этом избыточные степени свободы инструмента и технологической среды, подавляя рассеяние потоков энергии и вещества в формоизменяемом припуске, создают упрочняющие структуры в поверхностном слое и повышают производительность обработки.

Создание условий для самоорганизации процессов формирования поверхностного слоя, организацией обратных связей в открытых технологических системах при интенсивных воздействиях, позволяет посредством оптимизации производительности повышать эффективность и качество обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1973. – 295 с.
2. Жуков М.Ф., Урюков Б.А. Некоторые проблемы генераторов низкотемпературной плазмы // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. – М.: Наука, 1973. – С. 3 – 14.
3. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
4. Обработка износостойких покрытий / Под ред. Ж.А. Мрочка. – Мн.: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
6. Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.