

уменьшается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Проников А.С. Надежность машин. - М.: Машиностроение, 1978. - 590 с. 2. Джеломанова Л.М. Прогрессивные методы нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент: Обзор. - М.: НИИмаш, 1979. - 46 с. 3. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А.И. Кострицкий, В.Ф. Карпов, М.П. Кабанченко, О.Н. Соловьева. - М.: Машиностроение, 1991. - 176 с. 4. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. - Мн.: Изд-во НПО «Интеграл», 1998. - 285 с. 5. Крагельский И.В., Добытин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.

УДК 621.9+536.75

**Ж.А.Мрочек, С.Л.Кожуро, М.Л.Хейфец, Л.М.Кожуро**

### **УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

*Белорусский национальный технический университет*

*Белорусский государственный аграрный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Полоцкий государственный университет,*

*Новополоцк, Беларусь*

Критерии устойчивости электрофизических процессов обработки поверхностей. Образование термодинамических неустойчивостей в технологической системе процессов электрофизической обработки целесообразно описывать как критериями тепломассопереноса: Re – Рейнольдса, Pr – Прантля, Pe – Пекле, так и критериями, характеризующими электромагнитные потоки [1].

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

$$Si = \frac{I^2 R}{\rho v H T^3} = \frac{v}{H'} \cdot \frac{R/l}{\rho v^2} \cdot \left( \frac{I^2}{l} \right), \quad (1)$$

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

Критерий магнитного взаимодействия важен при обобщении электрических ха-

рактических источников энергии с магнитным управлением электрической дугой. Он определяется 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;  $\tau$  – текущее время;  $P$  – сила.

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

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

где  $E_1$  – напряженность электрического поля.

Соотношение критериев магнитного взаимодействия  $Sm$  (2) и напряженности электрического поля  $Se$  (3) показывает, что

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

которое аналогично энергетическому критерию  $Si$  (1) связывает отношения удельного электросопротивления рабочего зазора  $R/l$  к кинетической энергии потока  $\rho v^2$  и силы тока  $I$  к длине разрядного промежутка  $l$ . Отличие зависимостей (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 поверхности в технологической системе электрофизической обработки описываются модифицированными критериями Рейнольдса  $Re^*$ , Пекле  $Pe^*$  и Прандтля  $Pr^*$  [2, 3]

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

в которых  $v' = v + S$  – результирующая скорость движений формирования поверхности, главного  $v$  и подачи  $S$ ;  $t$  – толщина формируемого и деформируемого слоя поверхности изделия с учетом изменения его плотности  $\rho$ ;  $\omega^*$  и  $v^*$  – обобщенная проводимость и вязкость технологической среды;  $\sigma_p$  – трансляционная составляющая напряженного состояния технологической среды и сформированного покрытия в направлении силы деформирования  $P$ ;  $\sigma_M$  – ротационная составляющая напряженного состояния в направлении вращения на плоскости, образованной  $P$  и  $v$ .

Соотношение составляющих напряженного состояния среды  $(\sigma_M/\sigma_p)$  и скоростей дополнительного и главного движений элементов технологической системы  $(S/v)$  на макроуровне описывает вязкость технологической среды  $(1/v^*)$ , называемую ротационной [4]

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

Ротационная вязкость  $\mu^* = -\tau^*/\text{rot}v^*$  характеризует переход объемной вязкости среды  $\zeta^* = -\sigma^*/\text{div}v$  в динамическую  $\eta = -\tau_g/\text{grad}v$  при интенсификации технологических воздействий, используя добавочные касательные  $\tau^*$  и нормальные  $\sigma^*$  напряжения, возникающие при сжатии и растяжении среды наряду с нормальным напряжением давления  $\sigma_g$  и динамическим касательным напряжением  $\tau_g = -\eta\sigma_g$  [5], а  $v^*$  описывает турбулентные составляющие вращения в потоке среды, движущемся со скоростью  $v$  [2, 4].

При образовании термодинамически неустойчивые структуры целесообразно определять критерием Рейнольдса  $Re^*$  (5), описывающим турбулентность поверхностных сечений и потоков обрабатываемого материала, волнистость и шероховатость формирующегося рельефа поверхности  $Ra$  [2, 6]. Поэтому толщина формируемого слоя  $t$ , пропорциональная увеличению или снижению его массы  $Q$ , с учетом сплошности или пористости покрытия, в результате которых изменяется относительная твердость  $\Delta HRC/HRC$ , описывается зависимостью  $Q/(1 - \Delta HRC/HRC)$ . Соотношение параметров напряжений  $\sigma_p/\sigma_M$  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  $B/\tau$  (2) для термодинамических  $I/I$  (3), для термомодеформационных  $P/I$  (2) и для электромагнитных  $B/E_1$  (4) воздействий. Отношение  $B/E_1$  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 электромагнитной наплавке критерии тепломассопереноса будут пропорциональны соотношению

$$Ra \sim \frac{v^*[Q/(1 - \Delta HRC/HRC)]}{(B/I)(v/S)}$$

Используем полученные критерии и зависимости для исследования устойчивости технологической системы в процессе электромагнитной наплавки.

**Процессы формирования покрытий с использованием электромагнитной наплавки.** Рассмотрим процесс нанесения покрытий электромагнитной наплавкой при дополнительном поверхностном пластическом деформировании разогретой поверхности шариком [2]. Проанализируем процесс зависимости от основных технологических факторов  $v$ ,  $S$ ,  $I$ ,  $B$ , входящих в критерий устойчивости, и фактора  $P$ , влияющего на показатели качества и производительность процесса. Рассмотрим показатели качества  $Ra$  и  $HRC$  и производительности процесса  $Q$ . Результаты проведенных экспериментов [7] показывают (рис. 1, а-д), что скорость  $v$  и подача  $S$  при наплавке влияют на  $Ra$ ,  $HRC$  и  $Q$  аналогично силе тока  $I$  и магнитной индукции  $B$ , от

куда следует, что изменение  $v$  и  $S$  попарно взаимосвязаны и пропорциональны изменениям  $I$  и  $B$ . На основании этого можно заключить, что соотношение  $(v/I)/(B/S) = (B/I)(v/S) = v^*$  стремится к постоянству и обеспечивает устойчивость наплавки при фиксации частиц ферропорошка в электромагнитном поле. Вместе с тем необходимо отметить, что производительность  $Q$  увеличивается пропорционально уменьшению  $\Delta HRC/HRC$  – относительного приращения твердости, в результате чего зависимость  $Q/(1-\Delta HRC/HRC) \sim t$  стабилизируется и при электромагнитной наплавке формируется покрытие определенной толщины  $t$ .

Результаты исследований (рис. 1) и проведенная статистическими методами [7] расстановка по степени влияния технологических факторов  $v, S, P, I, B$  на показатели производительности процесса  $Q$  и качество поверхности HRC, Ra позволяют оценить устойчивость электромагнитной наплавки.

Термодинамические неустойчивости, формирующие пики и кратеры при электромагнитной наплавке, изменения структуры наплавленной поверхности,

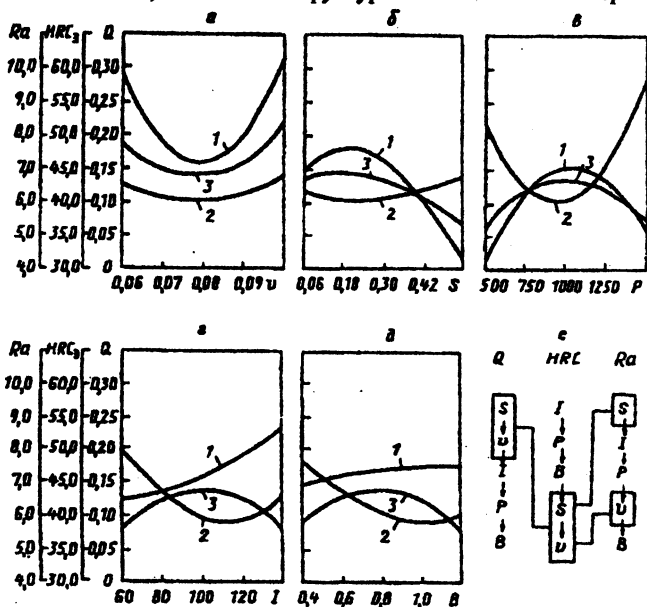


Рис. 1. Параметры качества поверхности при электромагнитной наплавке ферропорошка Fe-2 % V с поверхностным пластическим деформированием: 1 – Ra, 2 – HRC, 3 –  $Q$  в зависимости от технологических факторов:  $v$ (а),  $S$ (б),  $I$ (г),  $B$ (д) и схема степени влияния технологических факторов (е)

снижающие твердость покрытия в результате падения производительности обработки устраняются. Самоорганизация процесса электромагнитной наплавки обеспечивает минимальную производительность  $Q$ , формирующую покрытие определенной толщины  $t$ , при которой неустойчивые структуры не образуются, твердость покрытия возрастает, а отклонения микрорельефа поверхности  $Ra$  минимальны. Так, при наплавке покрытия, вследствие образования разнообразных структур, влияние технологических факторов, определяющих производительность, мало по сравнению с факторами электромагнитного поля и последующими усилиями деформирования. Формирование рельефа поверхности  $Ra$  определяется как движениями поверхности детали при наплавке  $S$ ,  $v$ , так и характеристиками  $I$ ,  $B$  электромагнитного поля. Производительность наплавки  $Q$ , описываемая произведением  $Sv$ , путем фиксации частиц ферропорошка в электромагнитном поле и дополнительных движений, деформирующих поверхность, осуществляет обратную связь HRC с  $Ra$  и позволяет изменением  $I$ ,  $B$  и  $P$  повышать устойчивость технологической системы.

Управление устойчивостью процесса электромагнитной наплавки. Предложенные критерии и рассмотренные процессы электрофизической обработки при формоизменении поверхности и изменении ее свойств позволяют определить пути управления устойчивостью технологической системы и повышения эффективности электрофизических методов обработки [2, 8].

При удалении дефектного слоя и изменении свойств поверхности, когда критерий Рейнольдса  $Re$  превышает допустимые значения, в деформируемой поверхности образуются вихревые структуры. Это происходит в результате снижения сопротивления обрабатываемого материала на сдвиг  $\sigma_z$  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. Следовательно, использование инструментов с дополнительными степенями свободы в направлениях  $v$ ,  $S$ , не совпадающих с главным движением обработки  $v$ , позволяет повысить устойчивость технологической системы в процессах, использующих концентрированные источники энергии.

При нанесении покрытия с использованием электромагнитной наплавки образование неустойчивых термодинамических структур определяется электромагнитными и электродуговыми процессами в рабочей зоне. Напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_n$  в порошковой среде зависят главным образом от магнитной индукции поля  $B$  и силы тока  $I$  при дуговых разрядах. Следовательно, изменения параметров электромагнитного поля  $B$ ,  $I$ , управляющих фиксацией и плавлением частиц порошка снижают электросопротивление  $\rho^*$  покрытия при наплавке и позволяет повысить устойчивость технологиче-

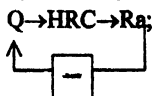
ской системы, стабилизируя толщину формируемого покрытия.

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

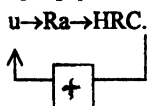
Организация обратной связи в открытой технологической системе через избыточные степени свободы инструментов, частиц материала покрытия, а также посредством дополнительных воздействий концентрированными источниками энергии вещества и энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхности.

В результате анализа обобщенных схем электрофизических процессов выведены основные принципы организации обратной связи в открытой технологической системе [2]:

- при формировании покрытия



- при формоизменении поверхности



В том случае, когда вначале требуется упрочнить поверхность, а в завершении сформировать ее рельеф, как, например, при нанесении покрытий в технологической системе, организуется отрицательная обратная связь. При этом дополнительные воздействия источников вещества и энергии, формируя упрочняющие структуры в поверхностном слое, не допускают развития неустойчивости процессов образования рельефа поверхности и не позволяют увеличить производительность процесса обработки.

В случае, когда 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 формоизменением припуске, создают упрочняющие структуры и повышают производительность обработки.

Создание условий для самоорганизации процессов формирования поверхности 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. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. – Гомель: Изд-во ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
3. Кожуро Л.М., Хейфец М.Л. Исследование устойчивости технологических систем при комбинированных процессах термомеханической обработки // Инженерно-физический журнал. 1995.- Т. 68, № 4. – С. 606-612.
4. Хейфец М.Л. Цикличность состояний и свойств поверхностного слоя при комбинированных методах обработки металлов // Доклады АН Беларуси.-1996.-Т. 40, № 4. – С. 109-113.
5. Лойтянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
6. Обработка износостойких покрытий / Под ред. Ж.А.Мрочка. – Мн.: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.
7. Мрочек Ж.А., Кожуро Л.М., Филонов И.П. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин. – Мн.: УП “Технопринт”, 2000. – 268 с.
8. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И.Гордиенко, М.Л.Хейфец, Б.П.Чемисов и др. Мн.: Изд-во ФТИ НАНБ, 2000. – 172 с.

УДК 621.791.92

**Ж.А. Мрочек, С.Л. Кожуро, Л.М.Кожуро, Т.К.Романов**

### **УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОРОШКОВ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ**

*Белорусский национальный технический университет*

*Белорусский государственный аграрный технический университет*

*Минск, Беларусь*

При восстановлении и упрочнении поверхностей деталей машин, с использованием электромагнитной наплавки (ЭМН) и стальных порошков [1] обеспечиваются повышенные эксплуатационные свойства (износостойкость, установленная проч