

УДК 621.7:621.8:621.9:536.75

М. Л. ХЕЙФЕЦ

## О САМООРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

(Представлено академиком П. И. Яцерицыным)

На современном этапе научно-технического прогресса требования, предъявляемые к прочности, твердости, вязкости, износостойкости поверхностей, столь высоки, что традиционные методы обработки в ряде случаев не позволяют достаточно эффективно получить необходимые параметры качества поверхностных слоев. В связи с этим на предприятиях современного производства все чаще используются комбинированные методы обработки [1], использующие плазменные [2], электродуговые [3], лазерные [4], электронно-лучевые [5], ионно-вакуумные [6] и другие концентрированные потоки энергии.

Традиционные методы обработки позволяют с позиций технологической и эксплуатационной наследственности [7] предложить рациональные конструкции модифицированных слоев. Однако взаимозависимость используемых потоков энергии при последовательном или параллельном формировании различных поверхностных слоев требует рассмотрения самих процессов создания рациональных конструкций модифицированных слоев.

Для описания процессов создания поверхностных слоев при воздействии концентрированными потоками энергии необходимо исследовать открытую технологическую систему с дополнительными степенями свободы и рассмотреть формирование диссипативных структур и фаз, рассеивающих избыток подводимой энергии [1]. Для получения модифицированных слоев с определенными структурами или фазами  $\Phi$  требуется рассмотреть связь степеней свободы системы  $S$  с формирующимися фазами  $\Phi$ , определить рациональное число и структуру взаимосвязи степеней свободы  $S$  и в результате этого на основании оптимизации степеней свободы  $S$  сконструировать расположение конкретных фаз  $\Phi$  в поверхностных слоях детали.

Количество однородных структур, фаз  $\Phi$ , под которыми подразумеваются массы, отличающиеся по составу и по термодинамическим свойствам [8]; число компонентов  $K$ , т. е. число веществ, достаточных для того, чтобы определить состав любой фазы [9] и переменных налагаемых полей  $\Pi$  [10], определяется уравнением Гиббса:

$$\Phi = K + \Pi - C. \quad (1)$$

Уравнение (1) получено для замкнутой, равновесной системы исходя из того, что:

$$F = U - TS = \text{const}, \quad (2)$$

или

$$Z = H - TS = \text{const}, \quad (3)$$

где  $F$  — свободная энергия системы,  $U$  — внутренняя энергия,  $T$  — абсолютная температура,  $S$  — энтропия,  $Z$  — термодинамический потенциал,  $H$  — энтальпия.

Вместе с тем условия (2) и (3) выполнимы и для открытой системы, когда дополнительные потоки энергии полностью рассеиваются диссипативными структурами.

Функция диссипации  $\psi$  и производство энтропии  $\sigma$  [11]:

$$\psi = T\sigma = TdS/dt \quad (4)$$

вследствие второго начала термодинамики возрастают:  $\psi \geq 0$ ,  $\sigma \geq 0$  во времени  $t$ .

В замкнутых условиях в процессе эволюции с  $dS \geq 0$  система движется к состоянию равновесия, в котором  $S = \max$ ,  $dS = 0$ ; при этом производство энтропии не возрастает:  $d\sigma \leq 0$ . В открытой системе условие эволюция сохраняется:  $d\sigma \leq 0$ , а условие равновесия предполагает  $\sigma = \min$ ,  $d\sigma = 0$ ; при производной по времени

$$d\sigma/dt \leq 0. \quad (5)$$

Согласно фундаментальной теореме Пригожина—Гленсдорфа, при эволюции во времени  $t$  к стационарному состоянию произвольные системы с неизменяемыми по времени краевыми условиями выполняют:  $d\sigma \leq 0$  — условие эволюции,  $d\sigma = 0$  — условие стационарности и  $\delta\sigma \geq 0$  — условие устойчивости.

Следовательно, условия (2) и (3) выполняются как для замкнутых, так и для открытых равновесных систем, причем для последних появляется дополнительное условие (5), а значит, уравнение Гиббса (1) позволяет рассматривать открытые системы.

На конкретных операциях технологического процесса и стадиях эксплуатации детали при неизменном числе компонентов  $K$  используемых веществ и потоков  $\Pi$  вносимой энергии управлять формирующимися фазами  $\Phi$ , согласно уравнению (1), позволяют степени свободы  $S$  системы.

Вследствие чувствительной зависимости от начальных условий (ЧЗНУ) технологическо-эксплуатационной системы [1] ее рационально представить в виде странного аттрактора, которому достаточно трех степеней свободы для возникновения хаотического режима [12]. Следовательно, во избежание непредсказуемости детерминированных потоков вещества и энергии для их диссипации системе нужно предоставлять не более двух степеней свободы.

В соответствии с делением по концентрации энергий ( $I \rightarrow II \rightarrow III$  и  $III'' \leftarrow II'' \leftarrow I''$ ) (таблица), позволяющим описать взаимодействия потоков энергии с обрабатываемой и эксплуатируемой поверхностью [1], рассмотрим ряд высокоэффективных комбинированных методов, в каждом из которых используется по одному из типов источников, и процесс эксплуатации детали.

1. Объемный источник применяется для нанесения покрытия порошком или проволокой и предварительного нагрева плазменной дугой при резании и деформировании свободно вращающимся ротационным инструментом [2]. Для нанесения использовались однородные материалы, представляющие собой твердый раствор; поэтому число компонентов  $K=1$ . Предварительный плазменный нагрев, нормальные и касательные нагрузки, обеспечивающие как трансляционные, так и ротационные моды деформации [13], определяют число налагаемых полей  $\Pi=3$ . Вращение ротационного инструмента в широком диапазоне скоростей обеспечивает степень свободы  $S=1$  технологической системе и формирует  $\Phi=3$  фазы: покрытие большой толщины (3—5 мм), зоны термического влияния и деформационного упрочнения (таблица, п. I.I'). Для создания дополнительно  $\Phi=4$  зоны термодформационного упрочнения необходимо фиксировать скорость вращения инструмента и лишать технологическую си-

Числа компонентов К вещества, потоков П энергии, фаз Ф и степеней свободы С на различных стадиях технологических операций и эксплуатации детали

Стадии	Зоны энергетического взаимодействия		
Технологических операций:	I. Объемная	II. Множество локализованных	III. Единственная сфокусированная
	$K+P=\Phi+C$	$K+P=\Phi+C$	$K+P=\Phi+C$
	I'. $1+3=3+1$	$2+2=2+2$	$2+2=3+1$
	II'. $1+3=4+0$	$2+2=4+0$	$2+2=4+0$
	III'. $1+3=2+2$	$2+2=3+1$	$2+2=2+2$
	$3+2=3+2$	$3+2=4+1$	$3+2=5+0$
Эксплуатации:	$K+P=\Phi+C$	$K+P=\Phi+C$	$K+P=\Phi+C$
	III". Разрушение	II". Трение	I". Приработка

стему степеней свободы  $C=0$  (таблица, п. I.II'). Из этого неустойчивого состояния ( $C=0$ ) посредством самоорганизации термомеханических процессов при резании и трении, диссипации избытка энергии система стремится к устойчивому состоянию ( $C=2$ ). В результате предварительного нагрева увеличивается пластичность поверхностного слоя и деформации проникают на большую глубину. Увеличение зоны и степени деформации, сопровождающееся усилением поглощения тепла, препятствует прохождению и приближает границу распространения теплового потока к поверхности. В результате совместные действия механических и тепловых потоков  $C=2$  (вращение инструмента и предварительный нагрев) приводят к совмещению технологических барьеров и на всей глубине воздействия происходят термомеханические процессы  $\Phi=2$  (таблица, п. I.III').

II. Множество локализованных источников используется для электромагнитной наплавки с последующим поверхностным пластическим деформированием и выглаживанием [3]. Для наплавки воспользовались ферромагнитными порошками, которые наносили тонким слоем (до 1 мм) на стальную подложку, поэтому  $K=2$ . Электромагнитные поля определяют  $P=2$ . Термомеханические процессы обеспечиваются  $C=2$  степенями свободы системы и формируют  $\Phi=2$  фазы: покрытие и подложку (таблица, п. II.I'). Попытка интенсивным нагревом аморфизировать верхний слой покрытия заканчивается неудачей, так аморфизация, в том числе и частичная, проходит либо по всему покрытию малой толщины при интенсивном теплоотводе в подложку, либо не происходит вообще. При температурных градиентах, необходимых для аморфизации, тепловой поток направляется в подложку, в результате этого появляется новая зона — термического влияния, фаз становится  $\Phi=4$  и система лишается степеней свободы  $C=0$  (таблица, п. II.II'). Аморфизация проходит только по всей глубине покрытия при  $\Phi=3$ , а у формируемого покрытия появляется механическая степень свободы перемещений  $C=1$  (таблица, п. II.III').

III. Единый сфокусированный высокоэнергетичный источник применяется при лазерном или электронно-лучевом нагреве поверхности с покрытием [5], а также при модификации поверхности ионной имплантацией и ионным осаждением [6]. В этих методах используется  $K=2$  компонента: материал подложки и материал имплантируемого или осаждаемого покрытия (толщиной 3—6 мкм). Число потоков энергии  $P=2$ : поток осаждаемых ионов, а также лазерный или электронный, ионный луч. Широкий диапазон интенсивности лазерного или электронно-ионного излучения обеспечивает системе степень свободы  $C=1$  и формирует  $\Phi=3$  фазы: покрытие, подложку и зону термического влияния или имплантации (таблица, п. III.I'). Послойное образование в результате термокапил-

лярной конвекции при лучевом оплавлении поверхности ячеек Бенара гексагонально-цилиндрической формы [4] или образование кластеров из имплантируемых ионов формирует в поверхностном слое новую фазу  $\Phi = 4$  и лишает систему степени свободы  $C = 0$  (таблица, п. III.II'). Из этого неустойчивого состояния ( $C = 0$ ) система стремится к состоянию с  $C = 2$  степенями свободы. В процессе образования структур в жидкой фазе происходит интенсивное перемешивание внесенных компонентов; у стенок и по углам ячеек скапливаются компоненты, понижающие поверхностное натяжение расплава [5]. При интенсивном образовании кластеров и последующем осаждении покрытия стираются границы между этими фазами [6]. В результате описанных процессов формируется единая фаза комбинированного воздействия, которая вместе с подложкой образует  $\Phi = 2$  и обеспечивает  $C = 2$  степени свободы системе для интенсивностей как осаждения покрытия, так и лучевой обработки поверхности (таблица п. III.III').

I''. При эксплуатации деталей участвуют два контртела и окружающая среда  $K = 3$ . Процессы носят термомеханический характер  $P = 2$ . В ходе приработки на поверхностях контртел образуются легированные кислородом аморфно-кристаллические сплавы [14] и количество фаз возрастает до  $\Phi = 5$ , что лишает систему степеней свободы  $C = 0$  и делает это состояние неустойчивым (таблица, п. I'').

II''. На стадии установившегося износа в процессе трения образуется единый для контртел легированный кислородом сплав, количество фаз сокращается до  $\Phi = 4$  и появляется степень свободы  $C = 1$ , обеспечивающая поступательное взаимоперемещение сопрягаемых тел (таблица п. II'').

III''. При разрушении поверхности образуется еще одна степень свободы  $C = 2$  вследствие вращения выкальвываемых частиц [15], а число фаз  $\Phi = 3$  становится равным числу компонентов (таблица, п. III'').

Проведенные исследования формирующихся в открытых технологическо-эксплуатационных системах с дополнительными степенями свободы диссипативных структур и фаз позволяют сделать следующие выводы:

1. В технологических системах наследственность складывается от источников вещества и энергии через процессы формирования к фазам поверхностного слоя:  $\Phi = K + P - C$ .

2. Структурная устойчивость процессов комбинированной обработки определяет фазы формируемого поверхностного слоя и зависит от используемых источников вещества и энергии:  $C + \Phi = K + P$ .

3. Дополнительные степени свободы технологической системы посредством источников вещества и энергии позволяют управлять структурной устойчивостью процессов формирования фаз поверхностного слоя:  $C = K + P - \Phi$ .

4. На стадиях эксплуатации фазы поверхностного слоя накладывают ограничения на степени свободы системы, определяют последовательность воздействий на технологических операциях и возможность их совмещения или разъединения:  $\Phi + C = K + P$ .

Таким образом, исследование управления комбинированными потоками энергии с учетом устойчивости процессов формирования наследуемых структур и фаз технологической системы позволяет не только рекомендовать рациональные конструкции модифицированных поверхностных слоев, но и проектировать технологические процессы комбинированных методов обработки для их формирования.

## Summary

Open technological and operating system is transition to a stationary state is analyzed on the basis of Gibbs equation. Main statements offering a rational design of technological processes and stages of part operation are formulated.

## Литература

1. Хейфец М. Л. // Вестник машиностроения. 1994. № 2. С. 22—25.
2. Ящерицын П. И., Борисенко А. В., Попок Н. Н., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1992. Т. 36, № 5. С. 429—432.
3. Ящерицын П. И., Деев Г. А., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1993. Т. 37, № 4. С. 114—117.
4. Астапчик С. А., Царев Г. Л., Береза Н. А., Чеботько П. С. // Вестн. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1987. № 2. С. 13—18.
5. Шипко А. А. // Материаловедение и термическая обработка материалов. 1987. № 10. С. 45—49.
6. Сенчило И. А., Смирнов А. М., Власов В. Б., Барышников В. В. // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении. Л., 1990. С. 40—43.
7. Ящерицын П. И., Скорынин Ю. В. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин. Минск, 1978.
8. Гиббс Дж. В. Термодинамические работы. М., 1950.
9. Гуггенгейм Е. А. Современная термодинамика. М., 1941.
10. Травин О. В., Травина Н. Т. Материаловедение. М., 1989.
11. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. М., 1973.
12. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминистическом подходе к турбулентности. М., 1991.
13. Лихачев В. А., Хайров Р. Ю. Введение в теорию дисклинаций. Л., 1975.
14. Грипачевский А. Н., Верещак А. В., Горский В. В. // Трение и износ. 1992. Т. 13, № 4. С. 647—653.
15. Алексеев Н. М., Кузьмин Н. Н., Транковская Г. Р., Шувалова Е. А. // Трение и износ. 1992. Т. 13, № 1. С. 161—171.

*Полоцкий государственный университет*

*Поступило 15.02.94*