

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.7:621.8:621.9:536.75

Академик П. И. ЯЩЕРИЦЫН, А. А. ШИПКО, М. Л. ХЕЙФЕЦ, Л. М. КОЖУРО

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ БАРЬЕРЫ
В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ
ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ**

Детали машин и конструкционные материалы по своим свойствам должны отвечать многим эксплуатационным требованиям, часто противоречивым [1]. С одной стороны, деталь является носителем надежности машины [2], с другой, ее материал имеет нестабильную структуру, а процессы его обработки носят неустойчивый характер [3, 4].

Материал детали обычно "конструируется" на основании физико-химического анализа по диаграммам равновесных состояний [5]. В процессах высокоинтенсивной обработки при использовании концентрированных источников энергии и вещества возникает необходимость изучения открытой термодинамической системы в неравновесных условиях и исследования ее устойчивости [6].

Устойчивость образования структур материала детали, описывающегося фазовым переходом, определяется диффузией компонентов и энергетическим состоянием как самих структур, так и их поверхностей раздела [1, 5]. Поэтому для послойного разграничения свойств материала требуется рассматривать устойчивые при внешних воздействиях поверхности раздела слоев, изолирующие открытую систему.

Анализ высокоинтенсивных воздействий источниками энергии и вещества и исследование кооперативных процессов формирования поверхностных свойств [3, 4] указывают на целесообразность изучения технологической и эксплуатационной наследственности термодинамически неустойчивых структур [7, 8].

Воздействие высокоинтенсивным потоком сообщает обрабатываемой поверхности детали импульс энергии и вещества, при этом скорость и ускорение распространения энергии и вещества фиксируются на всех участках прохождения импульса. Так, о скорости их распространения можно судить по распределению значений параметров упрочнения (рис. 1, кривые 1) и концентрации легирующих элементов (рис. 2, а, б) по глубине поверхностного слоя.

Величина импульса потока энергии и вещества пропорциональна площади, расположенной под кривой упрочнения, которую можно определить графическим интегрированием (рис. 1, кривые 2). Ускорения, т.е. первая производная от скорости или вторая от энергии импульса, получаемые графическим дифференцированием кривой упрочнения (рис. 1, кривые 3), характеризуют величину и положение силы, тормозящей потока энергии и вещества в поверхностном слое.

Согласно определению фазового перехода II рода, при котором теплота перехода равна нулю, первые производные энергии по параметрам состояния непрерывны, а вторые производные меняются скачкообразно [1, 5], рассмотрим вторую производную от импульса энергии Pt по глубине H поверхностного слоя.

Для глубины распространения $H = f(P\tau)$, согласно правилу дифференцирования функции, обратной данной $P\tau = \varphi(H)$,

$$\frac{\partial^2(P\tau)}{\partial H^2} = 1 / \left(\frac{\partial^2 H}{\partial P \partial \tau} \right) = \frac{\partial P \partial \tau}{\partial^2 H},$$

но так как $\partial v / \partial \tau = \partial^2 H / \partial \tau^2$, то $\partial^2 H / \partial \tau = \partial v$, и тогда

$$\frac{\partial^2(P\tau)}{\partial H^2} = \frac{\partial P}{\partial v},$$

т.е. вторая производная от импульса по глубине распространения равна частной производной от необратимой силы по скорости. Однако неравенство

$$\partial P / \partial v \geq 0$$

является условием устойчивости Г. Циглера [9], показывающим, что стационарное состояние открытой системы асимптотически устойчиво по А. М. Ляпунову [10].

Следовательно, вторая производная от импульса потока энергии и вещества по глубине поверхностного слоя характеризует устойчивость условных поверхностей раздела слоев с различными структурами и фазами. Поэтому со-

отношением $\partial^2(P\tau) / \partial H^2$ предложено описывать технологические и эксплуатационные барьеры.

Изучение технологических барьеров показывает, что при упрочнении и разупрочнении они располагаются по разные стороны от оси координат (рис. 1, б), а при достаточной их близости кооперативное действие потоков энергии и вещества может привести к совмещению барьеров (рис. 1, в).

Так, в процессе плазменно-механической обработки (рис. 1) в результате предварительного нагрева увеличивается пластичность поверх-

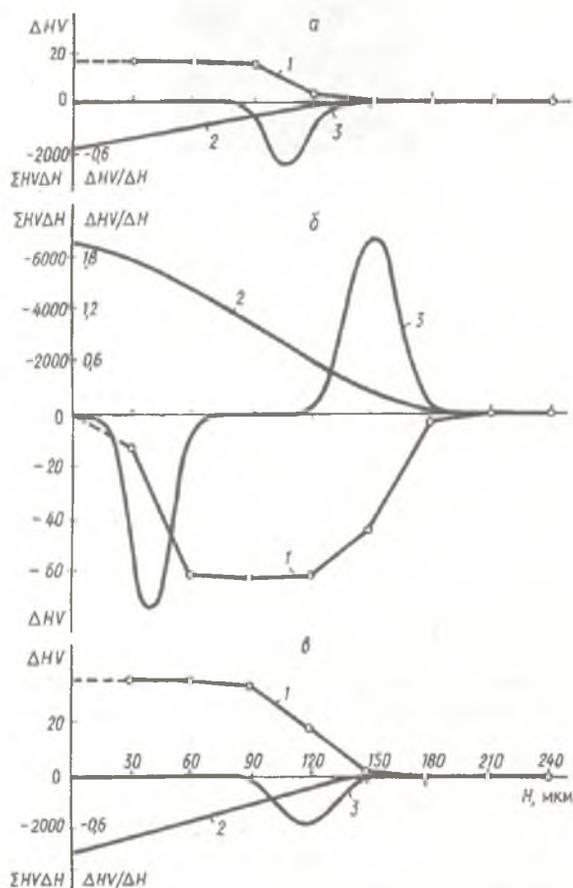


Рис. 1. Зависимости распределения по глубине H поверхностного слоя наплавки порошком ПГ-СР4: 1 - изменений твердости ΔHV , 2 - общего упрочнения $\Sigma HV \Delta H$, 3 - скорости приращения упрочнения $\Delta HV / \Delta H$ после ротационного резания с плазменным нагревом недостаточной (а), избыточной (б) и рациональной (в) интенсивности

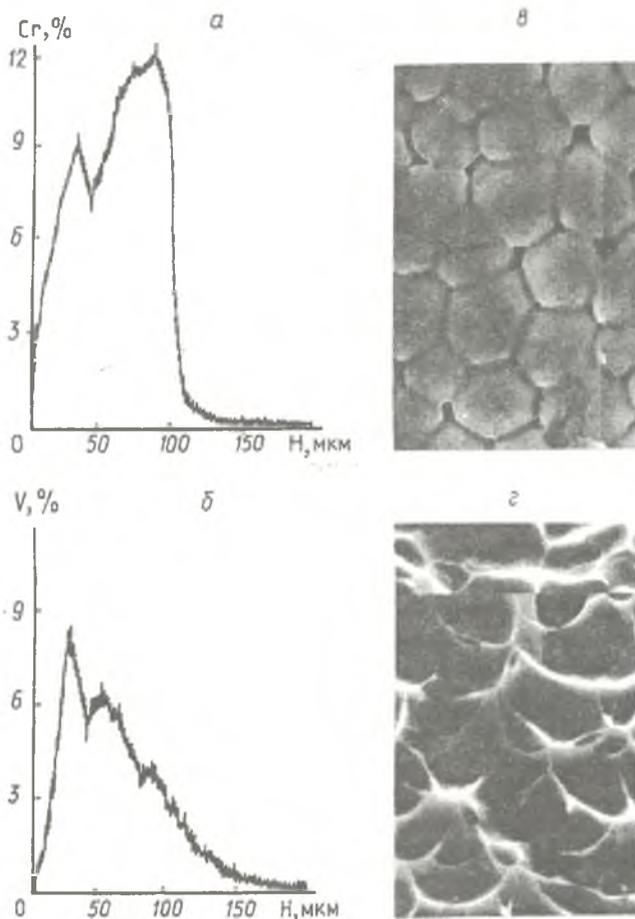


Рис. 2. Зависимости распределения Cr (а) и V (б) по глубине поверхностного слоя ($\times 400$) после электромагнитной наплавки порошком С-300 (а) и после пластического деформирования наплавки порошком Fe-V (б); ячеистые структуры на поверхности (в) и ямки на фактограмме излома (г) сплава ВТ20 ($\times 3000$) после электронно-лучевого нагрева рациональной интенсивности

ностного слоя и деформации проникают на большую глубину. Увеличения зоны и степени деформации, сопровождающиеся усиленным поглощением тепла, препятствуют прохождению и приближают границу распространения теплового потока к поверхности. Результирующее действие динамических и плазменных потоков приводит к термомодеформационному упрочнению по всей глубине комбинированных воздействий (рис. 1, в).

В процессе электромагнитной наплавки с выглаживанием поверхности термомодеформационное упрочнение происходит на глубину, существенно превышающую толщину покрытия, и сопровождается диффузией легирующих элементов покрытия в основу (рис. 2, а, б). Это связано с изменениями тонкой кристаллической структуры упрочняемой детали в результате как тепловых, так и деформационных процессов [11].

Анализ явлений наследственности в технологических и эксплуатационных процессах показал, что условные поверхности раздела слоев, выполняющие функции барьеров на технологических операциях, проявляют себя при эксплуатации детали.

Так, в процессе электронно-лучевого оплавления поверхности в результате фазового перехода II рода [12] термокапиллярная конвекция формирует диссипативные структуры в расплаве, состоящие из вихрей в узком поверхностном слое. При достаточно быстром охлаждении в таком состоянии по фронту кристаллизации образуется регулярная ячеистая структура (рис. 2, в).

Формирование диссипативных структур в жидкой фазе сопровождается интенсивным перераспределением легирующих элементов. У стенок и по углам ячеек скапливаются элементы, понижающие поверхностное натяжение. Интенсивное концентрационное расслоение приводит к появлению мартенсита на границах ячеек [13]. Фрактограммы излома в зоне образования ячеистой структуры (рис. 2, *з*) показывают, что деформация наиболее сильно утончает стенки ямок у самых крупных мартенситных пластин и обеспечивает тем самым высоковязкий характер разрушения.

В процессе модификации поверхности ионной имплантацией и ионным осаждением образуются кластеры из имплантируемых ионов, а затем формируются новые структуры вокруг зародышей интерметаллидов [3, 4]. Последующее осаждение размывает границы между покрытием и подложкой и формирует единую зону комбинированного упрочнения [14]. В модифицированном поверхностном слое зарождается и происходит специфический процесс, тормозящий развитие микропластичности вследствие проявления разностных эффектов в смещениях при движении дислокаций [15]. В результате сформированная при ионной модификации переходная зона образует эксплуатационный барьер, препятствующий выходу микродефектов на рабочую поверхность детали.

Таким образом, описание устойчивых при внешних воздействиях поверхностей раздела слоев технологическими и эксплуатационными барьерами позволяет исследовать открытую термодинамическую систему в неравновесных условиях при проектировании процессов высокоинтенсивной обработки металлов.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Summary

The paper shows expediency of using the technological and operational barriers for laminated differentiation of part material properties. Barriers were proposed to be marked by impulse derivatives of matter and energy in depth of surface layer.

Литература

1. Шмитт-Томас К. Г. *Металловедение для машиностроения: Справочник*. М., 1996.
2. *Надежность и долговечность машин* / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский, А. К. Караулов. Киев, 1975.
3. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Сенчило И. А., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1995. Т. 39, № 1. С. 112–116.
4. Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1995. Т. 39, № 2. С. 109–113.
5. Аносов В. Я., Озерова М. И., Фиалков Ю. Я. *Основы физико-химического анализа*. М., 1976.
6. Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1995. Т. 39, № 6. С. 109–113.
7. Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. *Технологическая наследственность в машиностроении*. Мн., 1977.
8. Хейфец М. Л., Ящерицын П. И. // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1995. № 4. С. 61–72.
9. Циглер Г. *Экстремальные принципы термодинамики необратимых процессов и механика сплошной среды*. М., 1966.
10. Бахарева И. Ф. *Нелинейная неравновесная термодинамика*. Саратов, 1976.
11. Кожуро Л. М., Чемисов Б. П. *Обработка деталей машин в магнитном поле*. Мн., 1995.
12. Эйдельман Е. Д. // *Успехи физ. наук*. 1995. Т. 165, № 11. С. 1279–1294.
13. Шипко А. А., Поболь И. Л., Урбан И. Г. *Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева*. Мн., 1995.
14. Мрочек Ж. А., Эйзнер Б. А., Марков Г. В. *Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных, электродуговых покрытий*. Мн., 1991.
15. Миркин Л. И. *Физические основы прочности и пластичности (Введение в теорию дислокаций)*. М., 1968.

*Физико-технический институт НАН Беларуси,
Институт надежности машин НАН Беларуси,
Полоцкий государственный университет,
Белорусский государственный аграрный технический университет*

Поступило 26.03.97