

рости скольжения 0,333 м/с. Износ определялся при помощи профилографа-профилометра модели 252.

Ускоренные испытания на износостойкость предварительно показали, что износ образцов, обработанных лазером, примерно в 1,5...2 раза ниже, чем у образцов, не проходивших лазерную обработку. Это позволяет предположить, что обработка лазером способствует лучшему схватыванию покрытия с основой и улучшению его физико-механических свойств. Кроме того, очевидно, образованные лазером канавки являются своеобразным накопителем продуктов износа, оказывающих наиболее сильное влияние на интенсивность изнашивания, и одновременно смазочными карманами, что значительно повышает износостойкость покрытия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карпинос Д.М., Зильберберг В.Г. Повышение прочности сцепления плазменных покрытий с деталью. — Порошковая металлургия, 1972, № 3, с. 106—107.
2. Карпинос Д.М., Зильберберг В.Г., Клименко В.С. Плазменные армированные керамические покрытия. — В сб.: Защитные высокотемпературные покрытия. Л., 1972, с. 100—106.
3. Messbacher A. Thermisches Spritzen im Fludtriebwerkbaue. — Werkstattstechnik, 1975, № 10, p. 619—624.
4. Randa swamy S., Her man H., Sa fa i S. Thermal expansion study of plasma-sprayed oxide coatinds. — Thin Solid Films, 1980, № 1, p. 43—52.

УДК 621.785

О.С.КОБЯКОВ, канд. техн. наук,  
Е.Г.ГИНЗБУРГ, Н.Я.ШЛЯХТЕНКО (БПИ)

### ЗОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Современные источники нагрева, такие как: лазерный, плазменный, электронный позволяют концентрировать значительную тепловую мощность на ограниченной поверхности упрочняемых деталей. Интенсивный отвод тепла от малой массы нагретого металла способствует большим скоростям охлаждения (до  $10^4 \dots 10^7$  °С/с) через теплопроводящую подложку, что приводит к возникновению ряда фазовых, структурных и аллотропических превращений, обуславливающих резкое повышение прочностных и износостойких свойств металла.

Нами исследован процесс упрочнения поверхности сталей путем зонной закалки в твердой фазе и из жидкого состояния с помощью газового разряда, формирующего локальную зону нагрева диаметром  $(1 \dots 1,5) 10^{-3}$  м. При упрочнении наибольший интерес представляют процессы, основанные на фазовых превращениях, происходящих при резком охлаждении металла и приводящих к образованию мартенситной структуры.

Игольчатое строение мартенсита, его высокая твердость (HRC<sub>3</sub> 63...67) являются одной из причин повышенной износостойкости мартенситного слоя. Сильная взаимная разориентация межатомных плоскостей кристаллов мартенсита затрудняет их взаимное перемещение и оказывает большое сопротивление пластической деформации. Кроме того, разориентация плоскостей соз-

дает мозаичную структуру, нарушающую регулярность решетки и равновесное взаимодействие между атомами, что препятствует перемещению дислокаций. Большое число „закрепленных“ дислокаций способствует повышению прочности металла.

Оптимальные режимы зонного нагрева получены в результате математического планирования эксперимента. В качестве комплексной характеристики  $Y$  приняты параметры упрочняемой поверхности, включая значения микротвердости, глубины, упрочненного слоя и получаемого рельефа поверхности. За параметры, влияющие на характеристику  $Y$ , приняты:  $X_1$  – ток дугового разряда (А),  $X_2$  – скорость перемещения зоны нагрева (м/с),  $X_3$  – расход разрядного газа (м<sup>3</sup>/ч),  $X_4$  – расход защитного газа (м<sup>3</sup>/ч). Обозначив область определения параметров буквой  $D$ , а границу области буквой  $\Omega$ , выразим  $D$  в виде:

$$\left\{ \begin{array}{ll} 5A \leq X_1 \leq 25A; & 1 \leq X_3 \leq 10; \\ 0,00017 \text{ м/с} \leq X_2 \leq 0,014 \text{ м/с}; & 0 \leq X_4 \leq 100. \end{array} \right\}$$

Для нахождения максимума функции  $Y$  исследовали ее на экстремум внутри области  $D$  и на ее границе  $\Omega$ . Затем выбирали наибольший из максимумов, которого достигает  $Y$  внутри  $D$  и на  $\Omega$ . Решение задачи осуществлялось с привлечением планирования многокомпонентного эксперимента, а выполнение опытов – с учетом матрицы планирования полного факторного эксперимента ( $2^4$ ), что позволило построить математическую модель процесса вида:

$$\begin{aligned} Y = & 12,0432 - 0,4856 X_1 - 0,0008 X_2 - 0,6672 X_3 - 0,012 X_4 + \\ & + 0,0007 X_1 X_2 + 0,041 X_1 X_3 + 0,002 X_1 X_4 - 0,0001 X_2 X_3 - \\ & - 0,0001 X_2 X_4 + 0,0077 X_3 X_4 - 0,00001 X_1 X_2 X_3 - 0,0005 X_1 X_3 X_4 + \\ & + 0,000004 X_2 X_3 X_4 + 0,000002 X_1 X_2 X_4. \end{aligned}$$

Проверка согласия теоретических значений характеристики с опытными данными показывает, что модель адекватно описывает эксперимент с 5%-ным уровнем значимости. Дальнейшее решение задачи оптимизации сводится к построению и исследованию системы уравнений вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Y}{\partial X_1} = 0; \\ \frac{\partial Y}{\partial X_2} = 0; \\ \frac{\partial Y}{\partial X_3} = 0; \\ \frac{\partial Y}{\partial X_4} = 0. \end{array} \right.$$

В результате ее решения получены следующие данные:  $X_1 = 3,5$  А,  $X_2 = 0,00897$  м/с,  $X_3 = 2,128$ ,  $X_4 = 15,76$ ,  $Y_1 = 9,3735$ , где  $Y_1$  – максимальное значение  $Y$  в области  $D$ .

Рассчитав значения  $Y$  на  $\Omega$ , получим, что  $Y_2 = 15,375$  есть максимальное значение  $Y$  на  $\Omega$ , при  $X_1 = 25$  А,  $X_2 = 0,0142$  м/с,  $X_3 = 1$ ,  $X_4 = 100$ . Из двух значений  $Y_1$  и  $Y_2$  выбираем наибольшую величину  $Y = 15,375$ , а в качестве оптимальных параметров процесса – следующие значения: ток дугового раз-

Таблица 1

Сталь	Химический состав (по массе) , %						Микротвердость, МПа	
	C	Si	Mn	Cr	W	V	исходная	после закалки
10	0,07 0,14	0,17 0,37	0,35 0,65	—	—	—	2400	5000
45	0,42 0,50	0,17 0,37	0,50 0,80	—	—	—	2800	13000
40X	0,46 0,54	0,17 0,37	0,50 0,80	0,80 1,10	—	—	3500	8240
40X13	0,36 0,45	до 0,80	до 0,80	12 14	—	—	4000	5000
У8	0,75 0,85	0,15 0,35	0,20 0,40	до 0,20	—	—	3220	13000
9ХС	0,85 0,95	1,00 1,60	0,30 0,60	0,95 1,25	—	—	3600	13000
ХВГ	0,95 1,05	0,15 0,35	0,60 0,90	0,60 1,00	0,50 0,80	0,05 0,15	3600	10000
Х12	2,00 2,20	0,15 0,35	0,15 0,40	11,5 13,0	—	—	4500	8240

ряда — 25 А, скорость перемещения зоны нагрева — 0,0142 м/с, расход защитного газа — 0,13 м<sup>3</sup>/ч, расход разрядного газа — 0,01 м<sup>3</sup>/ч. На основании математического планирования эксперимента исследован процесс закалки ряда сталей (табл. 1). Замерами микротвердости на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1 Н и времени выдержки 5 с показано, что микротвердость закаленного слоя не однородна как по глубине, так и по ширине упрочняемых дорожек. Как видно из графика (рис. 1, а), микротвердость по глубине закаленного слоя имеет максимальное значение у поверхности, а затем происходит плавный спад до минимального значения с небольшим последующим возрастанием. Распределение микротвердости по ширине упрочняемой дорожки (рис. 1, б) носит симметричный характер и может быть описано нормальным законом распределения.

Процесс закалки приводит к возникновению перемещающегося температурного фронта с резко изменяющимся температурным градиентом (от расплава к подложке) с наличием ярко выраженного фронта плавления и кристаллизации. Высокие скорости охлаждения (до 10<sup>4</sup>...10<sup>5</sup> °С/с) малой массы расплава создают условия для переохлаждения металла, что может приводить к неравномерности процессов кристаллизации, периодичности физико-механических и структурных свойств металлов [1]. Однако периодичность кристаллизации при использовании газового дугового разряда может вызываться неравномерностью перемещения анодного пятна. Наличие ряда структурных зон, полученных в результате упрочнения, хорошо прослеживается с помощью металлографического анализа, проведенного с использованием микроскопов МИМ-8 и „Epiгnost“. Тонкая структура поверхности исследована при увеличении (х 1800) с помощью электронного сканирующего микроскопа фирмы „Jeols“. Как видно из рис. 2, на поверхности металла сформировалась структура мелкодисперсного игольчатого мартенсита с размером отдельных кристаллов порядка 2 мкм, а ниже участки, со-

стоящие из мартенсита и ферритно-цементитных включений. Структура зоны, расположенной еще ниже, состоит в основном из зернистого перлита, а основа — из перлитно-ферритной фазы.

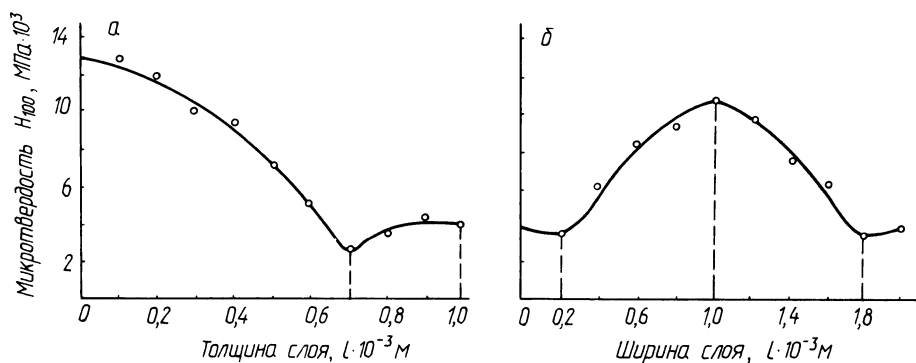


Рис. 1. Характер распределения микротвердости в упрочненном слое: а) по глубине слоя; б) по ширине слоя

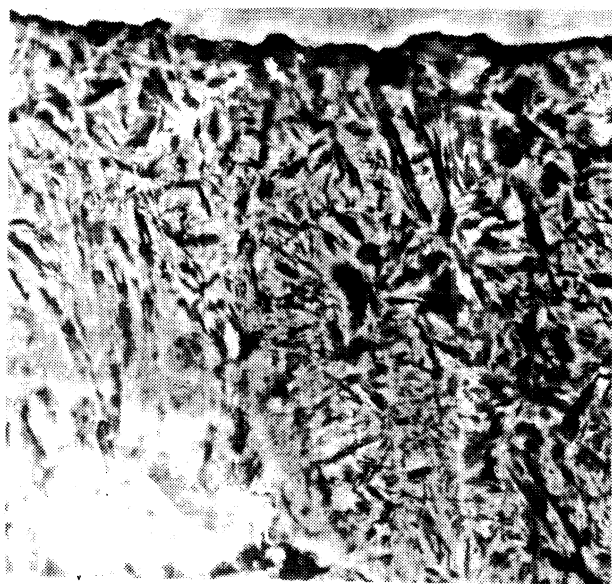


Рис. 2. Структура поверхностного слоя стали 45 после зона-дугового упрочнения (x1800)

Топография оплавленной и упрочненной поверхности, исследованная с помощью „профилографа-профилометра 220“, представляет рельеф, состоящий из чередующихся гребней и впадин с перепадом 0,0001 м. Среднее значение микротвердости лежит в пределах 11000...13000 МПа, причем, максимальной твердостью обладают гребни. При упрочнении без оплавления значение микротвердости не превышает 10000 МПа, однако шероховатость поверхности соответствует Ra 0,32.

Как видно из табл. 1, с повышением содержания углерода до 0,45 % (по массе) значение микротвердости возрастает от 5000 до 13000 МПа. Дальнейшее увеличение содержания углерода не приводит к существенному росту микротвердости. Введение легирующих элементов, таких как Cr, Mn, W, снижает микротвердость. В случае легированных сталей большое значение при упрочнении играют вводимые примеси, которые приводят к повышению или понижению критических скоростей закалки, а следовательно, к различным значениям микротвердости.

Сравнительная оценка износостойкости упрочненных сталей показала, что зонно-плазменное упрочнение, например стали 45, позволяет в 2...3 раза повысить износостойкость по сравнению с объемно-закаленной сталью.

Таким образом, использование локального дугового нагрева при зонной закалке стали из жидкого состояния или в твердой фазе позволяет многократно увеличить прочностные свойства и износостойкость стали и использовать микродуговой нагрев при упрочнении деталей машин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К о б я к о в О.С., М и х а й л о в С.М., П е т у ш к о в Е.Е. Исследование примесной неоднородности в молибденовых монокристаллах. — В сб.: Монокристаллы тугоплавких и редких металлов, сплавов и соединений. М., 1977, с. 23—27.

УДК 621.793

Е.А. БОНДАРЕВ, Н.И. ЛУЦКО,  
Е.С. ЛЕКАРЧИК (БПИ)

### ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРОШКА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГОРЕЛКИ ДЛЯ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Применение пропан-бутана в качестве энергообразующего газа накладывает повышенные требования к соблюдению технологических параметров процесса газопламенного напыления. Это связано с тем, что мощность пропан-кислородного пламени ниже, чем ацетиленокислородного, и отклонение от номинальных режимов напыления оказывает более выраженное влияние на коэффициент использования порошкового материала и производительность процесса.

В предлагаемой статье приводятся результаты экспериментов, позволяющие продемонстрировать влияние некоторых факторов, нарушение которых приводит к снижению эффективности процесса газопламенного напыления.

Для проведения исследований использовалась термораспылительная горелка ТРГ-БПИ. В качестве рабочих газов применялись пропан-бутан и кислород, а для транспортировки порошка — сжатый воздух.

Напыление образцов из конструкционной стали 45 проводили отсеянным до грануляций 50, 100 и 150 мкм порошком марки ПГ-Ср40М, ГОСТ