

Бороалитирование повышает прочность исследованных сталей на 3–5 %. Закономерности в изменении механических свойств с увеличением толщины диффузионных слоев не обнаружено.

Диффузионное хромирование повышает износостойкость инструментальных сталей в 5–6 раз, бороалитирование – в 10–12 раз.

Следует отметить, что износостойкость углеродистой стали У8 с карбидными покрытиями в 3 раза, а с боридными – почти в 10 раз выше по сравнению с износостойкостью высоколегированной стали Х12Ф1 после термообработки. Таким образом, в ряде случаев для изготовления штампового инструмента можно применять углеродистые стали с износостойкими диффузионными покрытиями.

УДК 539.219.3

Л.Г.ВОРОШНИН, д-р техн.наук,  
Е.М.ХУСИД (БПИ)

### ПРОЦЕССЫ ДИФфуЗИИ УГЛЕРОДА В ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ С ДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ КАРБИДОВ РАЗНОГО ТИПА

Основная особенность диффузионных процессов при цементации высоколегированных сталей состоит в том, что они сопровождаются карбидными превращениями дисперсных частиц. Ранее нами разработана математическая модель цементации низколегированной стали Fe–C–Me, когда в ее исходной структуре и диффузионном слое имеются только частицы легированного цементита [1, 2]. При этом для описания кинетики роста частицы использована ячеистая модель сплава. В данной работе эта модель дополнена кинетикой фазовых превращений дисперсных частиц в диффузионной зоне. Известны два механизма этого явления при термообработке: а) зародыши нового карбида возникают на поверхности частицы и растут, постепенно охватывая всю частицу; б) зародыши возникают в дефектных местах и растут, а частицы карбида старого типа постепенно растворяются. Второй механизм требует сильного пересыщения твердого раствора, что маловероятно при цементации легированных сталей с большим числом дисперсных частиц. Поэтому кинетика фазового превращения описывается на основе первого механизма.

При описании процессов диффузии при цементации сплава с дисперсными частицами используют две группы уравнений: 1) уравнения баланса массы каждого элемента вдоль диффузионной зоны с учетом обмена атомами между твердым раствором и дисперсными частицами; 2) уравнения изменения размера и состава частицы, расположенной на фиксированном расстоянии от насыщаемой поверхности.

Уравнение баланса массы:

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1-V)\bar{C}_i + V\bar{C}_i^c] = \frac{\partial}{\partial x} [(1-V) \sum_{j=1}^2 \tilde{D}_{ij} \frac{\partial \bar{C}_j}{\partial x}], i = 1, 2, \quad (1)$$

где  $V$  – объемная доля частиц;  $V = \frac{4}{3} \pi R^3 N$ ;  $R$  – радиус частицы;  $N$  – число



$$\begin{aligned}
 -(1-V) \sum_{j=1}^2 D_{ij} \frac{\partial \bar{C}_j}{\partial x} &= \sum_{j=1}^2 V_{ij} (\bar{C}_j^n - \bar{C}_j |_{x=0}), \\
 \sum_{j=1}^2 \tilde{D}_{ij} \frac{\partial \bar{C}_j}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} &= 0; \quad \bar{C}_j \Big|_{t=0} = \bar{C}_{j,н}(x); \quad R \Big|_{t=0} = R_н(x); \\
 \varphi \Big|_{t=0} &= \varphi_н(x), \quad (4)
 \end{aligned}$$

где  $\bar{C}_j^n$  — предельные значения концентраций элементов на насыщаемой поверхности;  $R_н(x)$ ,  $\varphi_н(x)$  — начальное распределение размера и состава дисперсных частиц;  $\bar{C}_{j,н}(x)$  — начальное распределение элементов в твердом растворе;  $V_{ij}$  — коэффициенты массопередачи: для цементации  $V_{21} = V_{12} = V_{22} = 0$ .

Для решения уравнений (1)–(4) построена неявная конечно-разностная схема. Программа составлена для ЕС-1022. Численные расчеты выполнены для системы Fe–C–Cr. Рассчитано насыщение при 850, 900 и 1000 °C сталей с содержанием 0,3 и 0,8 % углерода, 4,7 и 10 % хрома (по массе). Углеродный потенциал атмосферы варьировался от 0,6 до 1,8, плотность частиц — от  $10^6$  до  $10^9 \text{ см}^{-3}$ .

Расчеты показали, что практически весь углерод, поступающий в диффузионную зону, переходит в дисперсные частицы. Объемная доля карбидной фазы резко снижается с удалением от насыщаемой поверхности. Содержание хрома в частицах уменьшается по мере приближения к насыщаемой поверхности. Из-за малой подвижности хром, вышедший из частиц, незначительно перераспределяется вдоль диффузионной зоны, поэтому около поверхностных слоев аустенит обогащен хромом. Для углеродных потенциалов выше 0,7–0,8 % точные их значения зависят от содержания хрома и температуры в диффузионной зоне. В дисперсных частицах происходит фазовое превращение: специальный карбид  $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$  превращается в легированный цементит  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ . С увеличением длительности цементации и температуры толщина слоя с частицами легированного цементита увеличивается. Из расчетов видно, что число дисперсных частиц  $N$  в единице объема является одной из наиболее важных характеристик процесса. С увеличением  $N$  резко возрастает содержание углерода в диффузионной зоне и объемная доля карбидных частиц. Пересыщение аустенита несколько снижается. При больших значениях углеродного потенциала около насыщаемой поверхности дисперсные частицы срастаются, образуя сплошной слой легированного цементита. Затем расчет прекращался. С увеличением числа частиц время, необходимое для образования сплошного слоя, резко уменьшается.

В рассмотренном диапазоне состав стали и температур насыщения характеристики процесса качественно не меняются, имеются лишь количественные различия. В сталях с низким содержанием углерода высокотемпературное состояние соответствует однофазной области, а с высоким содержанием углерода — двухфазной области. Поэтому в первом случае в глубине дисперсные частицы отсутствуют, во втором — их объемная доля приближается к значению, соответствующему равновесному состоянию стали.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б о р д Н.Ю., Б л о х Е.М. Кинетика диффузионного массопереноса в многокомпонентных диффузионных системах. — В кн.: Теплофизические процессы в энергетических установках. Мн.: АН БССР, 1982, с. 183—186. 2. В о р о ш н и н Л.Г., Б л о х Е.М. Диффузионные процессы в двухфазной области при цементации легированных сталей. — В кн.: Металлургия. Мн.: Выш. шк., 1983, вып. 17, с. 123—126. 3. В о р о ш н и н Л.Г. и др. Многокомпонентная диффузия в гетерогенных сплавах. — Мн.: Выш. шк., 1984. — 142 с.

УДК 621.536+538:669.14

А.В.БЕЛЫЙ, канд.техн.наук,  
С.К.ШИХ (ФТИ АН БССР)

### ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ УГЛЕРОДОМ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ

Для исследования была выбрана Ст2 в состоянии поставки. Образцы диаметром 16 мм подвергались механической полировке до шероховатости с параметром  $Ra$  0,14. Насыщение поверхности углеродом осуществлялось при помощи пучка ионов с энергией 100 кэВ до доз  $10^{16}$  и  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. Температура образцов в процессе обработки не превышала 350 К.

Износостойкость образцов исследовалась по схеме диск—вращающийся палец со сферическим закруглением радиуса 3 мм на воздухе и в вакууме ( $10^{-4}$  МПа). Палец был изготовлен из стали 45 в состоянии поставки, исходный параметр шероховатости рабочей поверхности пальца составлял 0,64 мкм, скорость вращения 600 об/мин, а среднее номинальное давление 0,6 МПа. Степень изнашивания оценивалась путем сравнения интегральных площадей номинального контакта по профилограммам обработанных и исходных образцов [1].

Из табл. 1 видно, что износостойкость как в вакууме, так и на воздухе увеличивается с ростом концентрации внедренной примеси.

Износостойкость в вакууме легированных дозами  $10^{16}$  и  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> образцов возросла в 1,5 и 1,7 раза, а на воздухе — в 1,2 и 1,7 раза. Следует отметить, что глубина следа изнашивания значительно превышает толщину имплантированного слоя, т. е. изменение свойств происходит на глубине, гораздо большей максимума залегания примеси. Аналогичное явление наблюдалось и на других сталях [2], однако единого мнения о природе явления нет. Выдвигаются гипотезы о миграции атомов примеси в глубь материала в процессе изнашивания, влиянии радиационных дефектов, возникающих во время обработки, сохранении в зоне контакта фрагментов изнашивания, принадлежащих

Т а б л и ц а 1

Доза облучения, ион/см <sup>2</sup>	0	$10^{16}$	$10^{17}$	
Интегральная площадь, см <sup>2</sup>	вакуум	320	210	190
	воздух	250	210	150