

УДК 669.018.9.004.62

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА Fe-C-Cr-Mn-Mo КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКЕ ПО КРИТЕРИЯМ РАЗРУШЕНИЯ

И.Н. МИТЕВ, Й.Р. АТАНАСОВА
(Технический университет, Габрово, Болгария)

Рассмотрена микротвердость как оценка прочностных свойств боридных слоев; исследовано хрупкое разрушение в области внедрения индентора; найдены более точные механические показатели боридных покрытий.

Введение. Борирование сталей и сплавов применяется в промышленности для увеличения срока службы и повышения надежности работы деталей и технологической оснастки. В настоящее время существуют различные способы борирования и составов насыщающих сред. Для оценки технологичности приемов нанесения важное значение имеют механические свойства боридных покрытий: предел прочности, текучести, удлинение и др. Однако их определение оказывается невозможным вследствие хрупкости фаз и недостаточной толщины борированных слоев. В ряде случаев перечисленные характеристики определяются путем использования результатов стандартных механических испытаний борированных стальных образцов, экстраполяцией кривой зависимости свойства толщина покрытия. Такой подход, являясь весьма приближенным, не позволяет определять механические свойства отдельных слоев покрытия. Поэтому в большинстве работ прочность боридных слоев оценивают при низкой жесткости напряженного состояния путем измерения микротвердости на поперечных шлифах в продольном направлении покрытия.

Сравнение микротвердости однотипных покрытий показывает исключительно большой разброс ее значений. Различия в регистрируемых значениях микротвердости боридных слоев обычно связывают с величиной и характером распределения остаточных напряжений в покрытиях и их химическим составом. Известно, что свойства боридов переходных металлов зависят от наличия в них примесных атомов. Однако такая точка зрения часто основывается на данных, находящихся на грани ошибки опыта, а иногда и совсем не бывает подкреплена результатами прямого эксперимента. Кроме того, при упругопластическом характере внедрения индентора микротвердость не может быть показателем напряженного состояния материала.

Цель. Определение применимости такой характеристики, как микротвердость, для оценки прочностных свойств боридных слоев, изучение хрупкого разрушения в области внедрения индентора и нахождение более точных механических показателей боридных покрытий.

Методы исследований. Объектом исследования были образцы из Fe-C-Cr-Mn-Mo конструкционной металлокерамики с плотностью 6,0; 6,2; 6,4; 6,6 и 6,8 г/см³, синтезированные при температуре 1250 °С в течение 2 часов в защитной атмосфере из диссоциированного аммиака.

Насыщение образцов проводили в жидких насыщающих средах по методикам, разработанным в Техническом университете (Габрово) [1 - 3], в течение 4 часов при 950 °С. Испытания на вдавливание индентора проводили на шлифах в направлении, перпендикулярном поперечному сечению покрытия, при нагрузках в диапазоне 0,5...3,0 Н. При каждой нагрузке на приборе «D-32» получали по 10... 15 отпечатков, которые изучали при увеличениях до 1500...2000 раз на микроскопе «Neophot-32».

На базе полученных отпечатков и длин трещин с помощью формулы (1) были вычислены величины коэффициента хрупкого разрушения K_{IC} , для сформированных диффузионных слоев [5]:

$$K_{IC} = \varepsilon \sqrt{\pi C}, \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}, \quad (1)$$

где ε – интенсивность напряжения в вершине трещины; C – длина трещины.

Результаты и их обсуждение. Испытания показали, что экспериментально полученные значения микротвердости боридных покрытий зависят как от плотности соответствующих образцов, так и от вида использованной нагрузки на индентор (рис. 1).

Из графиков видно, что у всех пяти исследованных нами плотностей фиксируются резкие изменения в кривых распределения микротвердости при определенной нагрузке на индентор. Эта нагрузка называется критической. Для всех исследованных нами образцов критическая нагрузка изменяется в интервале от 1,0 до 2,0 Н, при этом для образцов с плотностью меньше 6,0 г/см³ она составляет примерно 1,5 Н и с увеличением плотности плавно сдвигается к более низким величинам, достигая при плотности 6,8 г/см³ величины 1,0 Н. На участках до критической нагрузки величины

плотности $6,8 \text{ г/см}^3$ величины $1,0 \text{ Н}$. На участках до критической нагрузки величины микротвердости в одной плоскости микрошлифа изменяются в достаточно большом интервале от $2000...2500 \text{ МПа}$. После этой критической величины нагрузки значения микротвердости стабилизируются и варьируют в более узком интервале от 500 МПа ; для образцов с плотностью $6,0 \text{ г/см}^3$ - примерно 13000 МПа , а для образцов с плотностью $6,8 \text{ г/см}^3$ - около 18000 МПа .

Это может быть объяснено фактом, что с увеличением плотности уменьшается пористость образцов, что способствует получению более плотного слоя боридной фазы, которая легко заполняет поры, что приводит к повышению микротвердости образцов. Видно, что с увеличением нагрузки на индентор получаются наименьшие рассеивания результатов, что объясняется уменьшением ошибок при измерении диагоналей отпечатков при больших увеличениях ($1500...2000$ раз). Очевидно, что эти ошибки уменьшаются, так как с увеличением нагрузки на индентор, увеличивается величина отпечатка, что приводит к упрощению этого измерения.

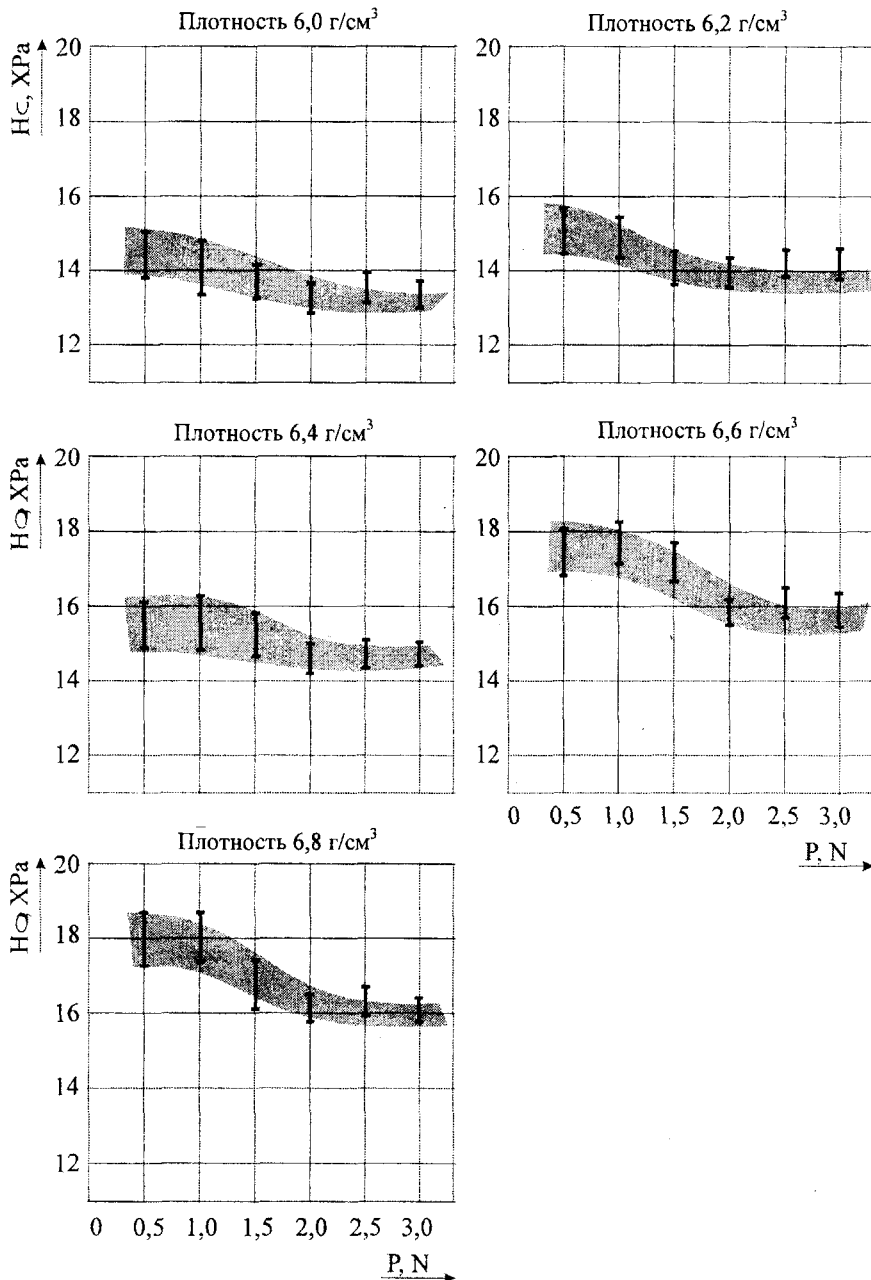


Рис. 1. Изменение микротвердости в боридной зоне в зависимости от плотности исследуемых образцов и от нагрузки на индентор

Изучение образцов в области проникания индентора показывает, что использование нагрузок ниже критической приводит к появлению микротрещин у вершин некоторых отпечатков, которые фиксируются

при увеличениях, больших чем в 500 раз, и их размер превышает размер диагонали. С повышением нагрузки количество отпечатков увеличивается и при достижении критической нагрузки количество отпечатков с трещинами и становится равным количеству сделанных отпечатков N , т.е. все полученные отпечатки имеют трещины 100 % (рис. 2). Для образцов с плотностью $6,0 \text{ г/см}^3$ эта нагрузка совпадает с критической и находится в интервале $1,5...2,0 \text{ Н}$, а для плотных образцов ($6,8 \text{ г/см}^3$) - нагрузка в границах $1,0... 1,5 \text{ Н}$.

Из этого можно сделать вывод, что уменьшение микротвердости при увеличении нагрузки на индентор (см. рис. 1) связано с возникновением разрушений в области отпечатка.

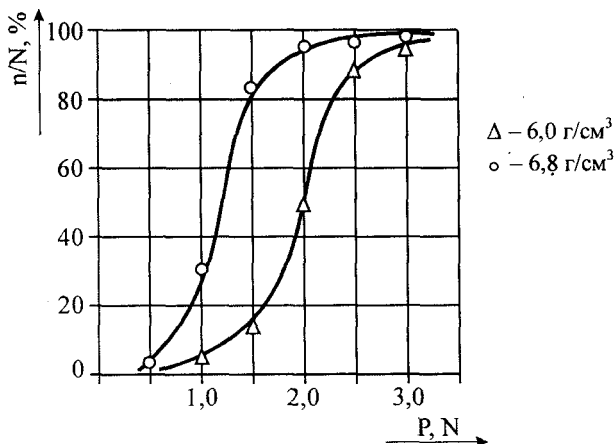


Рис. 2. Относительное количество отпечатков с микротрещинами в зоне Fe_2B у образцов с плотностью от $6,0$ до $6,8 \text{ г/см}^3$, при нагрузке на индентор от $0,5$ до $3,0 \text{ Н}$

Учитывая возникновение большого количества трещин у вершин отпечатков, нами была предпринята попытка использовать процесс хрупкого разрушения покрытий для определения критического коэффициента интенсивности разрушения у вершины трещины K_{IC} , чтобы оценить прочность боридных слоев по этому критерию. Условием определения K_{IC} является наличие плоскодеформированного состояния у вершины трещины, возникающей при разрушении материала. В работах [4 - 6] показано, что такие условия могут быть созданы при внедрении индентора в массивные, хрупкие образцы моно- и поликристаллических материалов. В этом случае при расчете K_{IC} по формуле (1) может быть использована длина трещины у вершины отпечатка. С этой целью отпечатки с трещинами наносили в каждом слое на поперечные шлифы в продольном направлении покрытия и изучали их при увеличении $1500...2000$ раз.

Исследования показали, что у вершин отпечатков образуются от одной до четырех микротрещин, являющихся как бы продолжением диагоналей (рис. 3). При используемых нагрузках трещины всегда были расположены внутри боридных слоев.

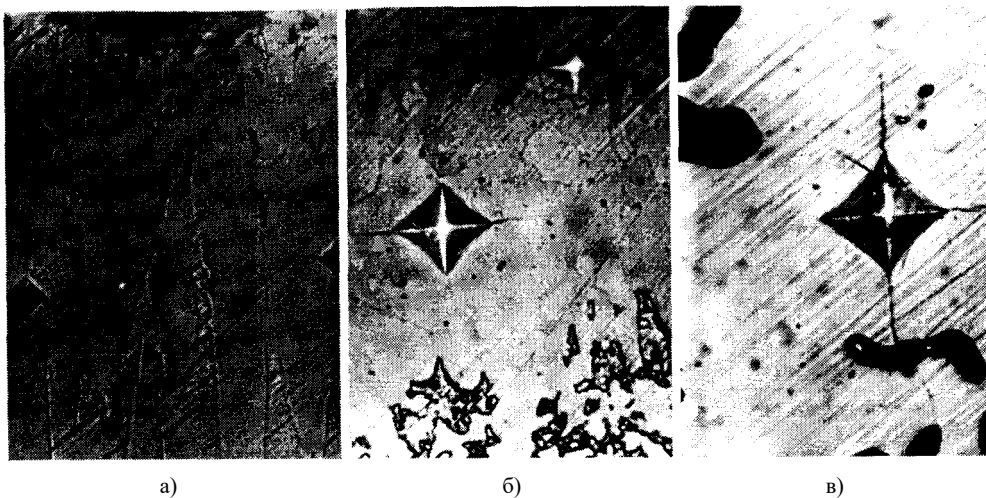


Рис. 3. Отпечатки с трещинами в слое из Fe_2B , сформированные на образцах Fe-Cr-Mo-Mn порошково-металлургических конструкционных материалов с плотностью $6,8 \text{ г/см}^3$: а-увеличение $\times 600$; б- $\times 1600$; в- $\times 2000$

Выявленная стабильность значений микротвердости при нагрузках на индентор выше критической позволяет сделать вывод, что вклад сопротивления разрушению в общую деформацию становится постоянным и во всем диапазоне данных нагрузок имеет место один и тот же механизм разрушения. Вышесказанное может наблюдаться только при достижении хрупкого разрушения и, как это вытекает из теории, в условиях плоской деформации.

Вследствие малой толщины поверхностных боридных слоев можно было ожидать, что на результаты испытаний будет влиять краевой эффект, обусловленный близостью отпечатка к границе поверхности. Для проверки этого нами были проведены исследования на однофазных слоях из Fe_2B большой толщины (см. рис 3, а). Испытания показали, что характер разрушения в области внедрения индентора и вычисленный K_{IC} постоянны по всему сечению покрытия при изменении расстояния отпечатка от края поверхности в пределах до 100 микрометров. Это дает возможность изучать хрупкое разрушение каждого из слоев и выявлять зоны покрытия с минимальной прочностью.

С помощью описанной методики нами был определен коэффициент K_{IC} для боридных слоев, состоящих из Fe_2B и FeB (рис. 3, б), полученных на $Fe-C-Cr-Mn-Mo$ конструкционной металлокерамике (рис. 4). Из приведенных данных видно, что значения K_{IC} изменяются при переходе от одной фазы к другой и характеризуются намного меньшим разбросом данных, чем микротвердость.

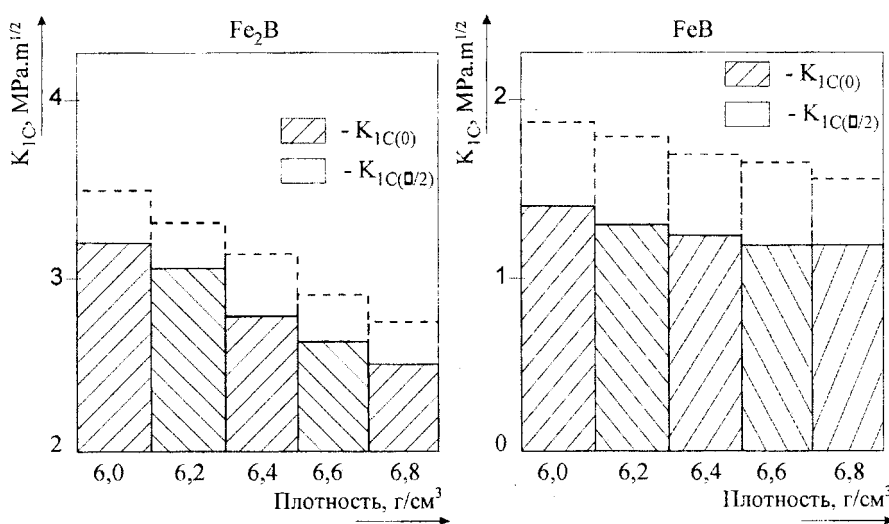


Рис. 4. Изменение коэффициента хрупкого разрушения K_{IC} у двухфазных боридных покрытий, сформированных на образцах конструкционной металлокерамики системы $Fe - C - Cr - Mn - Mo$ с различной плотностью

Из этого рисунка видно, что с уменьшением плотности образцов увеличивается коэффициент хрупкого разрушения как в направлении, параллельном поверхности шлифа, так и в направлении, перпендикулярном этой поверхности. В низкоборидной фазовой области величина коэффициента хрупкого разрушения увеличивается от 2,43 до 3,17 МПа·м^{1/2}, в направлении, параллельном поверхности шлифа, от 2,62 до 3,47 МПа·м^{1/2}, в перпендикулярном направлении с понижением плотности образцов от 6,8 до 6,0 г/см³. В высокоборидной зоне FeB с понижением плотности образцов коэффициент хрупкого разрушения изменяется от 1,28 до 1,37 МПа·м^{1/2} в параллельном и от 1,42 до 1,75 МПа·м^{1/2} - в перпендикулярном направлении.

Более высокие значения $K_{IC(90)}$, в сравнении с значениями $K_{IC(0)}$, показывают, что исследованные диффузионные слои проявляли большую склонность к образованию трещин в направлении, параллельном поверхности слоя, и более устойчивы в перпендикулярном направлении. Это гарантирует большую устойчивость на разрушение сформированных слоев при внешней контактной нагрузке.

При вычислении коэффициента хрупкого разрушения исследованных нами образцов как в параллельном, так и в перпендикулярном направлениях к поверхности шлифа было констатировано, что полученные результаты колеблются в сравнительно узком интервале. В низкоборидной области - Fe_2B , результаты варьируют в пределах от ±0,32 до 0,34 МПа·м^{1/2}, а в высокоборидной зоне в еще более узком интервале от ±0,25 до 0,28 МПа·м^{1/2}

Высокая чувствительность K_{IC} к составу, структурному и напряженному состоянию поверхностных слоев позволяет использовать этот коэффициент в качестве критерия конструкционной прочности боридных покрытий, сформированных на конструкционной металлокерамике с разной плотностью.

Выводы. Из проведенных исследований и полученных при этом результатов можно сформулировать следующих выводы:

- установлено, что при увеличении нагрузки на индентор при определении микротвердости борированного диффузионного слоя, сформированного на образцах конструкционной металлокерамики типа Fe-C-Cr-Mn-Mo, фиксируется критическая нагрузка, после которой рассеивание результатов уменьшается значительно до 500 МПа;
- для исследованных нами образцов эта критическая нагрузка была в пределах от 1,0 до 1,5 Н, при этом более низкие значения наблюдались у образцов с большей плотностью 6,8 г/см³;
- была доказана возможность оценивать прочность сформированных боридных покрытий посредством критерия хрупкого разрушения K_{IC} ;
- наличие пор в металлокерамических образцах приводит к увеличению значений K_{IC} как в параллельном, так и в перпендикулярном направлении на 10.. 20 % в зоне из FeB и на 30.. 35 % в зоне из Fe₂B;
- полученные значения K_{IC} варьируют в очень узком интервале, что дает основание утверждать, что коэффициент хрупкого разрушения может быть использован для оценки прочности боридных покрытий, сформированных на металлокерамических конструкционных материалах типа Fe-C-Cr-Mo-Mn.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атанасова Й.Р., Митев И.Н. Борирание на конструкционни металокерамични материали, Машиностроене, 1996. Кн. 11 - 12. - С. 315-316.
2. Митев И.Н. Приложимост на течни среди за насищане при борирание и навъглеродяване на конструкционна металокерамика, Машиностроене, 1999. Кн. 7 - 8. - С. 32 - 34.
3. Митев И.Н., Атанасова Й.Р. Изнашиване конструкционна металокерамика после проведение ХТО. - Новополоцк, 2001.
4. Evans A.G., Langton T.G. Structural Ceramics. - Los Angeles: Pergamon Press, 1988. - P. 115 -132.
5. Изследване желавостта на разрушаване на боросъдържащи дифузионни покрития / Хр. Д. Иваницков и др. // Научни известия на НТС. - 1994, год. 1, брой 1. - С. 114-118.
6. Митев И.Н. Изследване критерия на крехко разрушаване при борирание на железо - медна металокерамика, Машиностроене, 1997. Кн. 3 - 4. - С. 39 - 40.
7. Mitev I., Influence of Boron-Metal Diffusion Covers on the Rigidity of the Surface of the Constructive Metaloceramics from the System Fe-C-Cr-Mn-Mo // Mechanical Engineering Technologies'01: III International Congress, Sofia, Bulgaria, June 24-26,2001 г. - Sofia, 2001. - P. 356-358.