



## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА СИСТЕМЫ Fe–Cr–C

К. Б. ШАХ, С. КУМАР (Нац. технолог. ин-т, Хамирпур, Индия),  
Д. К. ДУИВЕДИ (Инд. технолог. ин-т, Рурки, Индия)

Приведены результаты исследования структуры и оценки стойкости против абразивного изнашивания наплавленного металла системы Fe–Cr–C. Показано, что наибольшей износостойкостью отличается однослойный наплавленный металл. Увеличение количества слоев способствует повышению твердости наплавленного металла, но одновременно и снижению его прочности, что приводит к пониженной износостойкости.

*Ключевые слова:* дуговая наплавка, наплавленный металл, многослойная наплавка, абразивный износ, микроструктура

При наплавке, как правило, на сравнительно недорогой основной металл наносят стали и сплавы, стойкие против различных видов износа. При этом необходимо контролировать проплавление основного металла, поскольку перемешивание основного и наплавленного металла может существенно изменить свойства последнего [1–5].

Известно, что стойкость наплавленного металла против абразивного изнашивания в значительной степени зависит от его микроструктуры, а именно, состава и количества упрочняющих фаз — карбидов, боридов и др. [3, 6]. За последние годы выполнены исследования влияния химического состава сплавов [5, 7–9], их термической обработки [10], параметров режима наплавки [2, 4], условий испытания [3, 5, 10–13], микроструктуры [10] на степень абразивного изнашивания наплавленного металла Fe–Cr–C. В работе [4] показано, что при повышении тока наплавки увеличивается разбавление основным металлом низкоуглеродистого низкохромистого наплавленного металла и снижается износостойкость последнего при абразивном изнашивании.

В данной работе приведены результаты исследования влияния количества наплавленных слоев на микроструктуру, твердость и абразивный износ наплавленного металла системы легирования Fe–Cr–C.

**Методики проведения экспериментов.** Экспериментальную дуговую одно-, двух- и трехслойную наплавку выполняли на пластинах из низкоуглеродистой стали вручную электродами промышленного производства диаметром 4 мм на токе 160 А (полярность прямая). Химический состав основного и наплавленного металла (третий слой) приведен в таблице.

Микроструктуру наплавленного металла исследовали с помощью оптического микроскопа Райхерта Юнга (MEF-3), а изношенную поверхность образцов — с помощью сканирующего электронного микроскопа Leo-435-VP. На установке TR-20L, DUCOM исследовали износостойкость образцов в виде штифтов размером 6×6×40 мм при трении скольжения по закрепленному абразиву (рис. 1). В качестве абразива использовали

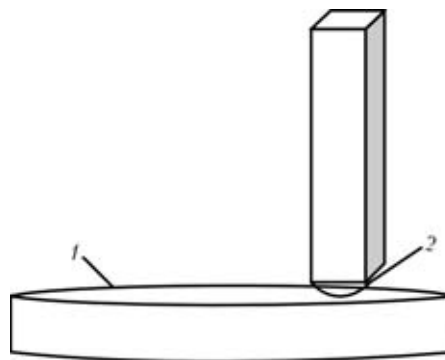


Рис. 1. Принципиальная схема испытаний на абразивное изнашивание: 1 — наждачная бумага марки 320; 2 — наплавленный образец

### Химический состав (мас. %) наплавленного (третий слой) и основного металла

Металл	C	Si	Mn	S	P	Cr	V	Mo
Наплавленный	3,00...4,00	0,5...0,7	0,4...0,6	—	—	30...32	0,10...0,15	0,18...0,24
Основной	0,15...0,20	0,8...1,2	0,8...1,2	0,04	0,05	—	—	—

Примечание. Основа — железо.

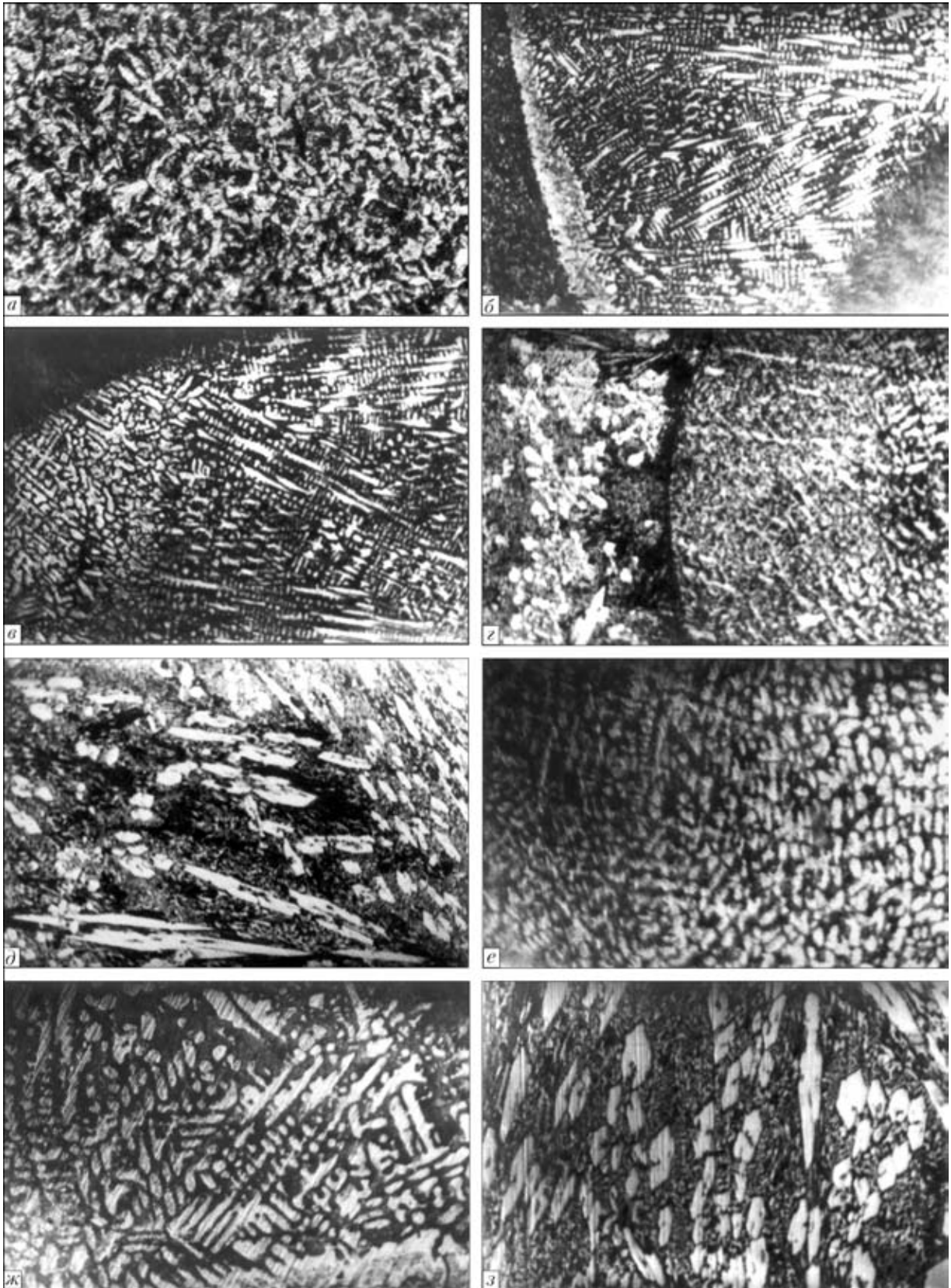


Рис. 2. Микроструктура основного и наплавленного металла: *а* — основной металл (×200); *б* — граница сплавления основного металла и первого наплавленного слоя (×100); *в* — граница сплавления первого и второго слоя (×100); *г* — граница сплавления второго и третьего слоя (×100); *д* — третий наплавленный слой (×100); *е-з* — соответственно первый–третий слой (×250)

наждачную бумагу марки 320 (абразив — карбид кремния). Испытания проводили при нагрузке 2 и 10 Н, образцы перемещали по поверхности тре-

ния с постоянной скоростью 1 м/с, путь трения составлял 200 м. Износостойкость оценивали по потере массы образца в результате изнашивания.



Взвешивание выполняли через каждые 50 м пути трения. Точность взвешивания — 0,1 мг. До и после испытаний на изнашивание образец очищали ацетоном. При каждом испытании использовали новую наждачную бумагу.

**Результаты исследований и их обсуждение.**

В качестве основного металла взята низкоуглеродистая сталь с ферроперлитной структурой (рис. 2, а). На границе сплавления основного и наплавленного металлов, а также между слоями последнего дефектов не было (рис. 2, б-г). Исследования микроструктуры на границе сплавления первого (рис. 2, б), второго (рис. 2, в) и третьего слоя наплавленного металла (рис. 2, г) при небольшом увеличении свидетельствует о постепенном уменьшении в структуре последнего содержания остаточного аустенита и повышении объемной доли карбидов и карбидной эвтектики. В наплавленных слоях вблизи границы сплавления наблюдали наличие столбчатой дендритной структуры. Микроструктура третьего слоя наплавленного металла значительно отличается от первых двух: в карбидной эвтектике присутствует большое количество первичных карбидов удлиненной и полиэдрической формы (рис. 2, д).

На рис. 2, е-з представлена микроструктура трех слоев наплавленного металла при большом увеличении. По сравнению со вторым слоем наплавленного металла (рис. 2, ж) структура первого слоя более тонкая (рис. 2, е), в ней присутствует больше остаточного аустенита. При большом увеличении в микроструктуре третьего слоя наблюдается значительное количество первичных карбидов и карбидной эвтектики и практически отсутствует остаточный аустенит (рис. 2, з). Такие различия вызваны изменением химического состава металла наплавленных слоев. Максимальное (до 50 %) разбавление наплавленного металла основным имеет место в первом слое, в случае дуговой наплавки только в третьем-четвертом слое удается получить состав наплавленного металла, соответствующий электродному. Определенное влияние оказывает скорость охлаждения напла-

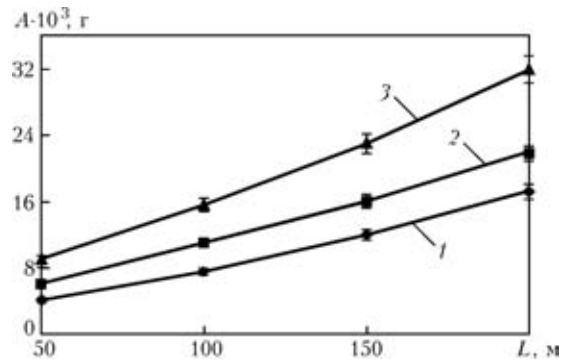


Рис. 4. Потеря массы образца *A* в зависимости от пути трения *L* при нагрузке 2 Н: 1-3 — соответственно первый, второй и третий слой

ленных слоев — для второго и третьего слоя по сравнению с первым она может быть ниже.

Как и следовало ожидать, твердость металла наплавленных слоев (рис. 3) повышается при удалении от границы сплавления, т. е. по мере уменьшения доли основного металла в наплавленном. Износостойкость при абразивном изнашивании в определенной степени зависит от твердости наплавленного металла, но не является единственным параметром, определяющим его износостойкость. Структурные особенности наплавленного металла также имеют важное значение и могут оказывать существенное влияние на степень его абразивного изнашивания [14].

Изменения износостойкости отдельных наплавленных слоев в зависимости от нагрузки и пути трения показано на рис. 4 и 5. Установлено, что увеличение пути трения при нагрузке 2 Н приводит к возрастанию потери массы испытуемых образцов, полученных при одно-, двух- и трехслойной наплавке (рис. 4). При нагрузке 10 Н износ образца выше, чем при 2 Н (рис. 5). Износостойкость однослойной наплавки при обеих указанных нагрузках довольно высокая, трехслойная наплавка характеризуется минимальной износостойкостью (рис. 4 и 5).

Для выявления изменения износостойкости наплавленных образцов их изношенные поверхности после испытаний исследовали на сканирующем электронном микроскопе (рис. 6). Материал в условиях абразивного изнашивания удаляли микрорезанием и многократным пластическим пе-

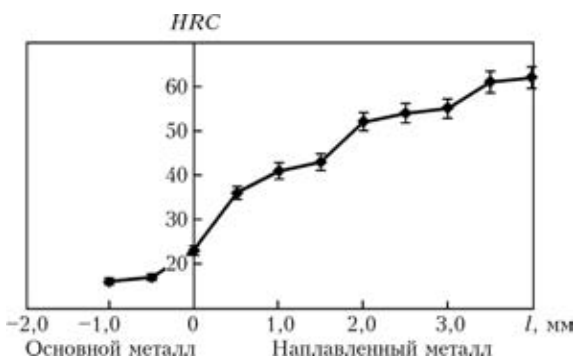


Рис. 3. Твердость *HRC* трехслойного наплавленного металла (*l* — расстояние от границы сплавления)

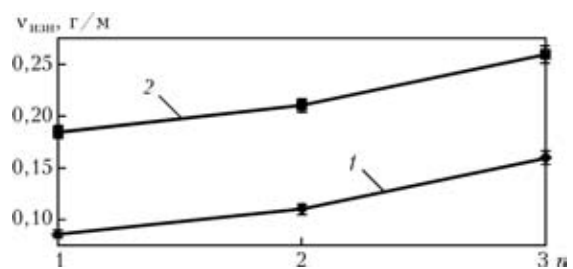


Рис. 5. Изменение скорости изнашивания  $v_{изн}$  образца при нагрузке 2 (*1*) и 10 Н (*2*) (*n* — количество наплавленных слоев)

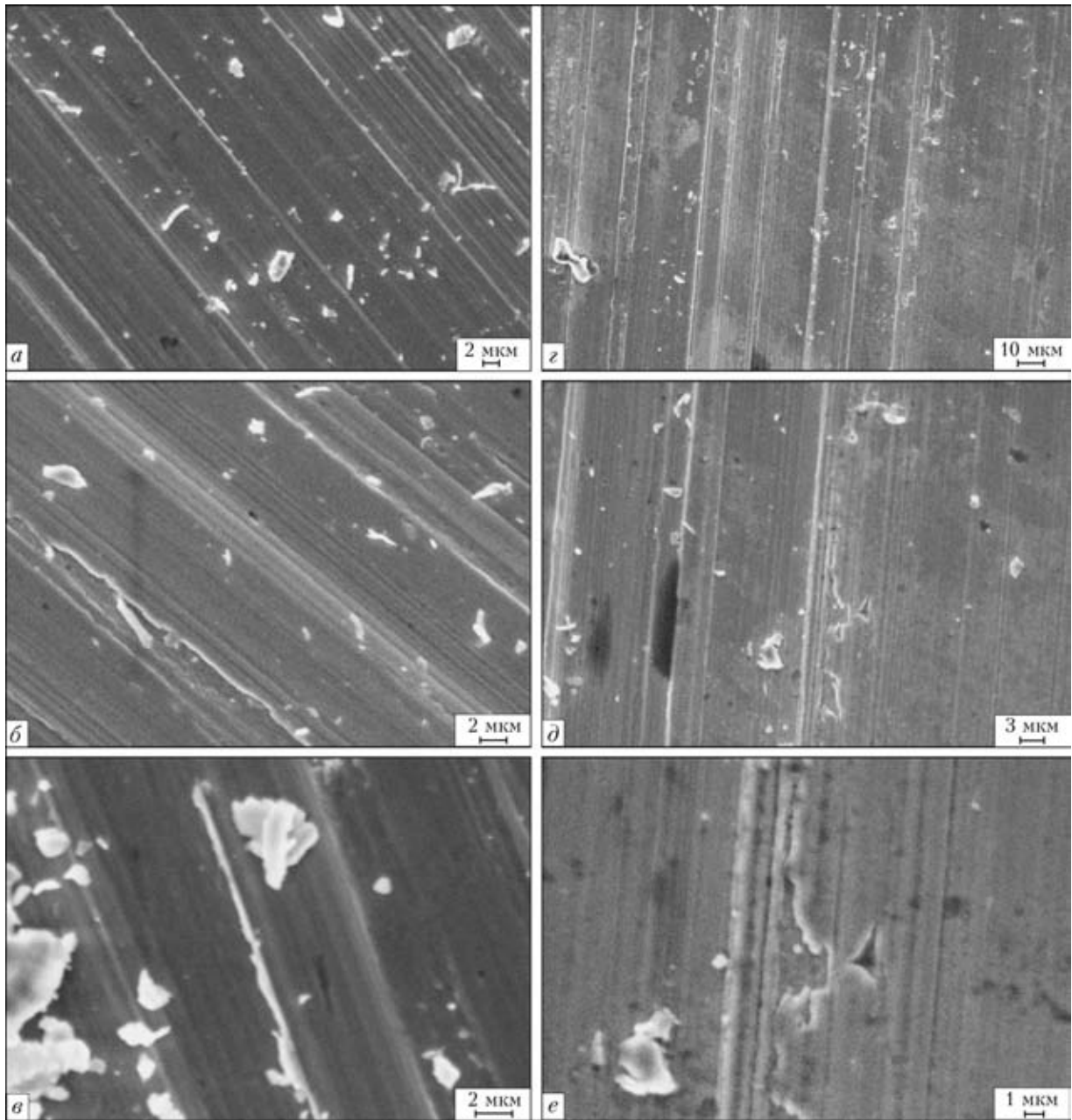


Рис. 6. Микроструктура изношенной поверхности наплавленных образцов, полученная при нагрузке 10 Н: *a–b* — однослойная наплавка; *c–e* — трехслойная

редеформированием. При этом твердые абразивные частицы внедряли в наплавленный металл на глубину, зависящую от его твердости.

Исследования изношенной поверхности образцов показали, что увеличение количества слоев и их твердости снижает глубину внедрения абразивных частиц в наплавленный металл. На поверхности однослойной наплавки видны непрерывные полосы, прорезанные или выдавленные абразивными частицами, на поверхности трехслойной наплавки такие полосы прерывистые их значительно меньше. Если наплавленный металл отличается удовлетворительной пластичностью, то гребешки вытесненного металла по краям полос разрушаются после многократного пластичес-

кого передеформирования. При пониженной пластичности в наплавленных слоях может происходить хрупкое разрушение гребешков, особенно в случае большой нагрузки, которая снижает износостойкость трехслойной наплавки.

Значительное разбавление основным металлом металла первого наплавленного слоя уменьшает содержание в нем углерода и легирующих элементов и соответственно количество первичных карбидов и карбидной эвтектики в структуре наплавленного металла, что влияет на его твердость и износостойкость. Более высокая износостойкость металла первого наплавленного слоя объясняется высокой пластичностью аустенитной матрицы, способной хорошо удерживать при изна-



шивании твердые карбиды. Кроме того, как указывалось выше, для разрушения гребешков, образующихся при микрорезании и микровыдавливании полос в пластичной матрице, требуется их многократное пластическое передеформирование, что также положительно влияет на износостойкость.

Изложенное выше находит подтверждение в работах [10, 11], где установлено, что низкоуглеродистые высокохромистые пластичные материалы отличаются большей износостойкостью, чем материалы с более высоким содержанием углерода, но с меньшим содержанием хрома. Углерод является очень важным легирующим элементом, определяющим твердость и микроструктуру наплавленного металла на основе железа, а следовательно, и его износостойкость. Как следует из работы [2], стойкость против абразивного изнашивания не только связана с твердостью металла наплавленных слоев, но в значительной мере определяется его вязкостью, особенно, если абразивные частицы имеют большие размеры.

### Выводы

1. Исследована микроструктура, наплавленного металла системы Fe–Cr–C, полученного при одно-, двух- и трехслойной наплавке. Структура первого слоя наплавленного металла состоит из карбидов, а также незначительной объемной доли карбидной эвтектики и остаточного аустенита. Во втором слое наплавленного металла увеличивается содержание карбидов и карбидной эвтектики и уменьшается количество остаточного аустенита. Микроструктура третьего слоя наплавленного металла значительно отличается от первых двух: здесь наблюдается большое количество первичных карбидов удлиненной и полиэдрической формы в карбидной эвтектике, объемная доля остаточного аустенита незначительна.

2. Исследования износостойкости наплавленного металла системы Fe–Cr–C, полученного при од-

но-, двух- и трехслойной наплавке при абразивном изнашивании, показали, что наилучшей износостойкостью отличается наплавленный металл первого слоя, а наихудшей — третьего. Высокая износостойкость первого наплавленного слоя объясняется тем, что легирующая аустенитная матрица отличается высоким уровнем сопротивляемости абразивному износу и благодаря высоким пластическим свойствам способна эффективно удерживать в процессе износа твердые карбиды. Третий наплавленный слой имеет высокую твердость, в его структуре очень мало пластичного остаточного аустенита, поэтому в процессе абразивного изнашивания может происходить вырывание карбидных частиц из хрупкой матрицы сплава, что снижает износостойкость трехслойной наплавки.

1. Ghosh P. K., Kaushal O. P., Sharma S. K. // ISIJ. — 1992. — 32, № 2. — P. 250.
2. Chatterjee S., Pal T. K. // Wear. — 2003. — 255, № 1. — P. 417–425.
3. Su Y. L., Chen K. Y. // Ibid. — 1997. — N 209. — P. 160–170.
4. Dwivedi D. K. // Surface Eng. — 2004. — 20, № 2. — P. 87–92.
5. Dwivedi D. K. // Mater. Sci. and Technol. — 2004. — 20, № 10. — P. 132.
6. Berns H., Fischer A. // Mater. Characterization. — 1997. — 39, № 2/5. — P. 499–527.
7. Dasgupta R., Prasad B. K., Jha A. K. et al. // Ibid. — 1997. — 209, № 1. — P. 255–262.
8. Dasgupta R., Thakur Rashmi, Yadav M. S. et al. // Ibid. — 1999. — 236, № 1. — P. 368–374.
9. Lee K., Lee S. H., Kim Y. et al. // Ibid. — 2003. — 255, № 1. — P. 481–488.
10. Jha A. K., Gachake A., Prasad B. K. et al. // J. Mater. Eng. and Perform. — 2002. — 11, № 1. — P. 37–45.
11. Dasgupta R., Prasad B. K., Jha A. K., Modi O. P. // Mater. Transactions, JIM. — 1998. — 39, № 12. — P. 1191–1196.
12. Kumar S., Mondal D. P., Khaira H. K., Jha A. K. // J. Mater. Eng. and Perform. — 1999. — 8, № 6. — P. 711–715.
13. Colaco R., Vilar R. // Wear. — 2003. — 255, № 1/6. — P. 643–650.
14. Francis J. A. // Sci. and Technol. of Welding and Joining. — 2002. — 7, № 5. — P. 331–338.

The paper gives the results of studying the structure and evaluation of abrasive wear resistance of the deposited metal of Fe-Cr-C alloying system. It is shown that single-layer deposited metal has the highest wear resistance. Increase of the number of layers promotes an increase of the deposited metal hardness and lowering of ductility, which is negative for wear resistance characteristics.

Поступила в редакцию 10.07.2005,  
в окончательном варианте 28.02.2006