

УДК 621.791.92:620.178

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, Л. Г. ВОРОШНИН, С. Н. ЛЮБЕЦКИЙ

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ  
НА ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ**

Известно, что значительного повышения износостойкости деталей можно достичь путем нанесения покрытий, содержащих твердые металлоподобные фазы (бориды, карбиды, нитриды). При этом благоприятной является такая структура покрытия, которая состоит из твердых мелкодисперсных включений, равномерно распределенных в пластичной, но достаточно прочной матрице [1, 2]. Повышенный интерес вызывают покрытия такого типа, имеющие эвтектическую структуру [3].

Цель данной работы — исследование влияния структуры покрытий из наплавленных самофлюсующихся порошковых сплавов железа на их износостойкость.

Предметом исследования были самофлюсующиеся сферические порошки ПР-10Р6М5 и ПЖВ с диаметром частиц 150—170 мкм и с боросилицидными оболочками различной толщины (10—80 мкм). Для сравнения использовали самофлюсующиеся порошки на никелевой основе ПГ-10Н-04 и ПГ-10Н-01. Покрытия на образцах из стали 40 получали путем газопламенной наплавки на установке, разработанной авторами. Микроструктуру покрытий исследовали металлографически. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3, твердость — по Роквеллу. Долю избыточных твердых фаз, их размеры, а также пористость покрытий оценивали методом количественной металлографии на анализаторе Epiquant. Результаты обрабатывали на микроЭВМ «Электроника ДЗ-28». Распределение элементов в покрытиях исследовали с помощью растрового электронного микроскопа с фазовым анализатором Camscan и Nanolab-7 с энергодисперсионной приставкой, а также микроанализатора Camesa MS-46. Фазовый состав определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-ГУМ в  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении.

Испытания на изнашивание в условиях трения скольжения без смазки проводили на лабораторной машине торцевого трения при удельной нагрузке 1 МПа и скорости скольжения 0,5 м/с. Путь трения 6000 м. Контртелом являлся твердый сплав ВК15.

Испытания на абразивное изнашивание проводили по стандартной методике (ГОСТ 17367—71). Абразивом служила шлифовальная шкурка П2Г 43А 20НМ (ГОСТ 6456—82). Обработку результатов осуществляли на ПК ЭВМ «Искра-226».

При наплавлении в покрытие требуемой толщины (в нашем случае 3 мм), образуются три характерные зоны: доэвтектическая, эвтектическая и заэвтектическая. Предварительная оценка износостойкости различных зон при трении скольжения и при абразивном изнашивании показала, как и предполагалось, что наиболее износостойка заэвтектическая зона, наименее — доэвтектическая. Естественно, возникла необходимость более детальной оценки триботехнических характеристик этих зон, ис-

пользуемых в качестве внешнего рабочего слоя. По данным рентгеновского фазового, металлографического, микродюретрического и рентгеноспектрального методов анализа, эвтектика представляет собой мелкодисперсную смесь пластин борного цементита  $Fe_3(B, C)$  и легированного феррита с интегральной микротвердостью  $(8690 \pm 680)$  МПа (рис. 1, а). Количество боридной фазы в эвтектике составляет  $(66,8 \pm 7,7)$  % и повышается до 80% в заэвтектических зонах. Дисперсность боридных пластин в эвтектических колониях —  $(4,7 \pm 0,8)$  мкм. Для по-

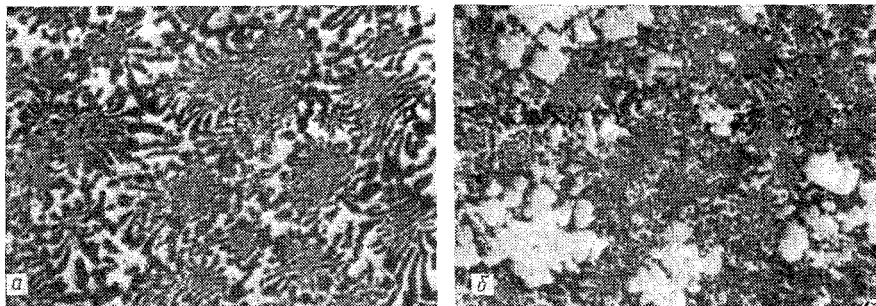


Рис. 1. Микроструктура эвтектической (а) и заэвтектической (б) зон покрытия, полученного наплавкой самофлюсующегося порошка на основе ПР-10Р6М5.  $\times 300$

крытия, полученного наплавкой порошка ПЖВ, эвтектика имеет меньшую микротвердость —  $(5860 \pm 320)$  МПа. Это объясняется отсутствием легирующих элементов (W, V, Mo, Cr) в порошке железа.

Заэвтектическая зона содержит наряду с эвтектикой твердые включения — избыточные боридные фазы (рис. 1, б). Основная часть этих включений — легированный карбидообразующими элементами борид  $Fe_2B$ ,  $H_{\mu} = (1826 \pm 247)$  МПа, по периметру которого располагается бороцементит,  $H_{\mu} = (1320 \pm 206)$  МПа. В фазе  $Fe_2B$  содержится 0,76% Mo; 5,61% Cr; 1,4% V; 4,27% B и 87,96% железа, в бороцементите — 2,0...5,2% бора и повышенное по сравнению с матричным сплавом содержание углерода, достигающее 2,4%. В отдельных случаях встречаются включения фазы FeV с микротвердостью 20 700 МПа. Линейные размеры избыточных боридных фаз составляют чаще всего 10...20 мкм, отдельных включений — до 40 мкм. С увеличением толщины боросилицидного слоя на порошке, естественно, возрастает и доля избыточных боридов в заэвтектической зоне наплавленного покрытия. При этом интегральная твердость покрытия существенно не меняется и составляет 57...58 HRC<sub>с</sub>, поскольку основой материала является эвтектическая структурная составляющая. И только тогда, когда количество избыточных боридных фаз максимально (частица порошка целиком состоит из боридов), твердость возрастает до 64 HRC<sub>с</sub>. Отсутствие в наплавленном покрытии неметаллических включений, невысокая пористость (таблица) свидетельствует о высокой технологичности, самофлюсуемости и качестве порошковых материалов. Естественно, что это положительно сказывается на триботехнических характеристиках покрытия.

Результаты испытаний на изнашивание при трении скольжения, когда рабочей являлась заэвтектическая зона, приведены в таблице.

Для наплавленных покрытий с микротвердостью эвтектики 8,9...9,6 ГПа максимальная износостойкость обеспечивается при содержании избыточных боридов около 50%. Установлено, что отклонение от этого количества боридов вызывает снижение износостойкости. Аналогичный характер влияния структуры защитных покрытий на их износостойкость

Результаты исследования влияния структуры наплавленных покрытий на износостойкость при трении скольжения без смазки

Марка наплавочного порошка	Доля избыточных боридных фаз в заэвтектической зоне, %	Пористость покрытия, %	Микротвердость эвтектики, $H_{\mu}$ , ГПа	Твердость покрытия $HRC_{\Sigma}$	Износостойкость $\epsilon_c \cdot 10^{-4}$ м·м <sup>2</sup> ·кг <sup>-1</sup>
ПР-10Р6М5 с боросилицидной оболочкой	48,17	1,79	8,9—9,6	62—64	7,8
	50,43	1,37	8,9—9,6	64	9,0
	63,26	0,42	7,9—8,3	58	20,8
	65,83	0,99	7,9—8,3	65	16,8
ПЖВ с боросилицидной оболочкой	24,83	1,65	5,3—6,0	45	10,1
ПГ-10Н-01	—	—	—	52	1,8
ПР-10Р6М5	—	—	—	54	1,2

отмечен также в работе [4]. Уменьшение микротвердости эвтектической основы сдвигает область максимальной износостойкости в сторону более высокого (до 63...65%) содержания избыточных твердых включений. Приведенные данные, а также анализ поверхностей трения (рис. 2) свидетельствуют о следующем. Энергия трения аккумулируется в подповерхностном слое, создает поля напряжений, вызывает значительный рост количества дефектов кристаллической решетки, дислокаций в частности.

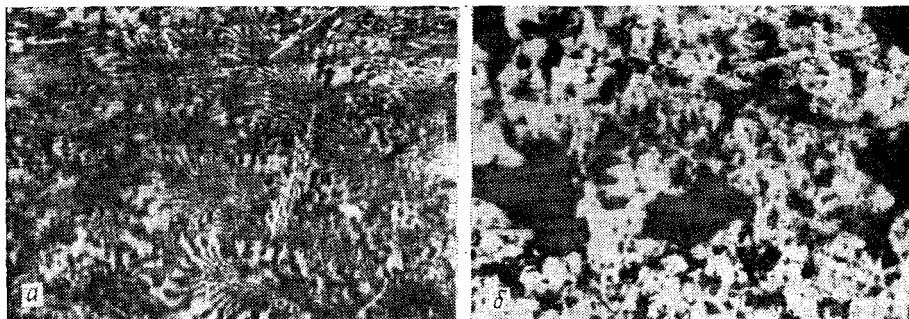


Рис. 2. Поверхности трения заэвтектической зоны наплавленного покрытия. Путь трения: а — 3000 м; б — 6000 м.  $\times 300$

Эти явления развиваются в более пластичной ферритной составляющей эвтектик и приводят к микронаклепу и усталостным процессам. Мелкодисперсные частицы более твердого борного цементита служат препятствиями для перемещающихся при этом дислокаций и не позволяют им скапливаться и трансформироваться в объемные дефекты (поры, трещины). Благодаря высокой степени дифференцированности составляющих эвтектики названные явления локализуются в небольших межпластиночных объемах эвтектики. Это подтверждается дискретностью и незначительными (около 5 мкм, в отдельных случаях до 50 мкм) линейными размерами образующихся на поверхности эвтектических составляющих пленок вторичных структур светло-серого цвета (рис. 2, а). На этом же рисунке отчетливо видно, что на больших включениях избыточных боридных фаз образуются и удаляются при трении вторичные структуры

значительно большей площади. Следует учитывать, что содержащиеся во вторичных структурах при трении боридных покрытий оксиды бора играют роль твердой смазки [3]. При этом, чем более пластичной и мягкой в исследованных пределах является эвтектика, тем большую долю энергии трения она воспринимает и имеет большую способность релаксировать напряжения. Особенно заметно это на примере покрытия из порошка ПЖВ. Следовательно, меньшая доля энергии при трении будет затрачиваться на усталостные процессы в избыточных боридных вклю-

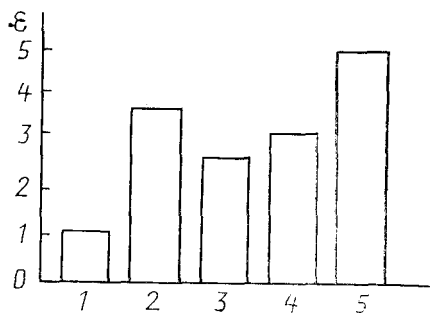


Рис. 3. Сравнительная износостойкость покрытий, полученных наплавкой различных порошковых материалов: 1 — ПГ-10Н-04 (230 НВ); 2 — ПГ-10Н-01 (56 HRC<sub>0</sub>); 3 — ПЖВ с боросилицидным покрытием (45 HRC<sub>0</sub>); 4 — (50% ПГ-10Н-01 + 50% ПГ-10Н-04) + 50% ПЖВ с боросилицидным покрытием (52 HRC<sub>0</sub>); 5 — ПР-10Р6М5 с боросилицидным покрытием (64 HRC<sub>0</sub>)

чениях. В итоге достигается наиболее высокая износостойкость (более чем в 20 раз) по сравнению с покрытиями из самофлюсующихся порошков на никелевой основе.

Поверхность образцов при установившемся режиме трения имеет вид, представленный на рис. 2, б. Коэффициент трения для исследуемых покрытий составлял 0,27...0,33. Предварительные испытания показали, что при увеличении количества избыточных боридных фаз в заэвтектической зоне возрастает абразивная износостойкость. Очевидно, что с повышением твердости покрытия растет его износостойкость (рис. 3). Самофлюсующийся порошковый материал на основе ПР-10Р6М5, обеспечивающий большую твердость покрытий, чем материалы на никелевой основе (ПГ-10Н-04 и ПГ-10Н-01), имеет и максимальную абразивную износостойкость. Статистическая обработка результатов показала, что доверительный интервал значений износостойкости при одном и том же уровне значимости тем меньше, чем выше твердость покрытия.

Результаты испытаний согласуются с классическими положениями теории абразивного изнашивания и свидетельствуют о наличии корреляционной связи между твердостью и износостойкостью покрытий. Известно [1], что стойкость при абразивном изнашивании в отличие от изнашивания при трении скольжения менее структурно чувствительна и зависит главным образом от соотношения твердости абразива и изнашиваемого материала. Износостойкость гетерогенных покрытий, следовательно, может быть высокой при наличии достаточно большого объемного количества твердых избыточных включений и прочной матрице. Демпфирующие способности матрицы при абразивном изнашивании менее важны, чем при трении скольжения. Это подтверждается меньшим расхождением результатов для первого случая.

Таким образом, выявлено влияние структуры наплавленных покрытий на их износостойкость и установлено, что наибольшая износостойкость для изнашивания в условиях трения скольжения характерна для покрытий заэвтектического типа с содержанием избыточных твердых боридных фаз 50...65%. При этом менее твердые покрытия могут иметь более высокую износостойкость. При абразивном изнашивании износостойкость покрытий увеличивается пропорционально твердости.

### Обозначения

НВ, НРС<sub>0</sub> — твердость по Бринеллю, Роквеллу;  $H_{\mu}$  — микротвердость, ГПа;  $\epsilon_c$  — износостойкость при трении скольжения без смазки,  $10^{-4}$  м·м<sup>2</sup>·кг<sup>-1</sup>;  $\epsilon$  — относительная абразивная износостойкость (по ГОСТ 17367—71).

### Summary

It is stated that the greatest wear resistance at wearing in conditions of sliding friction have the deposited coatings of hypereutectic type with the content of excess boride of 50..65%. The wear resistance grows with the increase of coating hardness in the case of abrasive wearing.

### Литература

1. Крагельский И. В. Трение и износ. М., 1968.
2. Спиридонов Н. В., Кобяков О. С., Куприянов И. Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Под ред. В. Н. Чачина. Минск, 1988.
3. Лабунец В. Ф., Ворошнин Л. Г., Киндрачук М. В. Износостойкие боридные покрытия. Киев, 1989.
4. Пантелеенко Ф. И., Кухарев Б. С. // Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Минск, 1977. С. 177—179.

Новополоцкий политехнический институт

24.03.90.