

вальной обработки. Данная технология позволяет достигать шероховатости Ra 0,09 мкм, а также обеспечивает производительный съём поверхностных слоев износостойких покрытий с обеспечением требуемой точности и шероховатости поверхности.

УДК 621.785.5

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА БОРИРОВАНИЯ НА ХРУПКость БОРИДНЫХ СЛОЕВ НА СТАЛЯХ У8А И 9ХС**

*Константинов В.М., Дашкевич В.Г., Ковальчук А.В.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Исследование хрупкости диффузионных боридных слоев является сложной задачей, так как для ее оценки пока нет единых, общепризнанных методов, позволяющих получать абсолютные значения показателей хрупкости боридных слоев на разных сталях. Это связано с изменением хрупкости боридных слоев в широком диапазоне в зависимости от толщины слоя, его морфологии и соотношения фаз, условиями насыщения, состава стали и другим [1]. Поэтому задачи определения хрупкости боридных слоев традиционно решаются в каждом конкретном случае с получением сравнительных результатов. Такие данные имеют значительный практический интерес, так как при внедрении разрабатываемых технологий упрочнения стальных деталей с использованием борирования в производственный цикл, необходимым условием является воспроизводимость результатов обработки (получение низкой хрупкости боридных слоев), а также статистическая управляемость операций технологического цикла при определенных граничных условиях: температуре насыщения, времени выдержки, получаемой толщине боридного слоя.

Наиболее показательной характеристикой хрупкости борированных слоев следует считать минимальное напряжение, приводящее к появлению трещин или скола на различном расстоянии от поверхности образца. Поэтому хрупкость борированного слоя оценивалась по методике [2]. Согласно этой методике хрупкость оценивается по напряжению скола  $\sigma$  (МПа) слоя, которое в совокупности учитывает фазовый состав и морфологию слоя, микротвердость и модули упругости фаз, напряженное состояние слоя и запас пластичности (формула 1):

$$\sigma = 0,174 \cdot P / (2 \cdot l^2 + l \cdot l_c), \quad (1)$$

где  $P$  – нагрузка, Н;  $l$  – минимальное расстояние от центра отпечатка алмазной пирамиды до края образца, мм;  $l_c$  – длина диагонали отпечатка пирамиды, мм.

Оценка хрупкости проводилась при нагрузке 1,0 Н, которая способна образовывать трещину на межфазной границе для всех образцов, что предварительно установлено опытным путем. Вероятность появления трещины оценивалась как

отношение числа уколов индентора, приводящих к появлению трещин на межфазной границе к общему числу уколов.

Для достоверности статистического определения показателей хрупкости и оценки их статистической управляемости проводилось исследование однородности статистических оценок напряжения скола на межфазной границе согласно методикам [3]. При этом определялись однородность и равномерность результатов оценки хрупкости боридных слоев по напряжению скола.

Было установлено, что полученные по эмпирическим данным значения среднеквадратичных и средневыборочных отклонений являются однородными. Исходя из этого, выборки с результатами определения хрупкости боридных слоев по напряжению скола на межфазной границе также являются однородными. То есть хрупкость компактных двухфазных боридных слоев на сталях У8А и 9ХС, оцениваемая по напряжению скола на межфазной границе, является статистически управляемой [4] и может быть использована в качестве параметра оптимизации.

По полученным эмпирическим данным получены уравнения множественной регрессии зависимости хрупкости компактных двухфазных боридных слоев на сталях У8А (формула 2) и 9ХС (формула 3) от температуры насыщения и времени выдержки при борировании в порошковой среде, что позволяет определить параметры проведения процесса борирования, обеспечивающие получение наименее хрупких боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе FeB/Fe<sub>2</sub>B (приложение А):

$$Y = 886.7 - 0.95 \cdot X_1 - 47.1 \cdot X_2 + 1.63 \cdot X_3 \quad (2)$$

$$Y = 404.8 - 0.36 \cdot X_1 - 20.3 \cdot X_2 + 0.53 \cdot X_3 \quad (3)$$

где  $Y$  – напряжение скола на межфазной границе FeB/Fe<sub>2</sub>B, МПа;  $X_1$  – температура насыщения, °С;  $X_2$  – время выдержки, ч;  $X_3$  – общая толщина боридного слоя, мкм.

Построены трехмерные графики, отражающие зависимости толщины боридного слоя и напряжения скола на межфазной границе от режимов борирования для сталей У8А 9ХС (рисунок 1) и позволяющие определить оптимальные диапазоны параметров проведения процесса борирования, обеспечивающие получение наименее хрупких боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе FeB/Fe<sub>2</sub>B для сталей У8А и 9ХС.

Установлено, что наименее хрупкими на стали У8А являются боридные слои, полученные в результате насыщения при 920...950 °С, 1...1,5 ч с предварительной изотермической выдержкой 750 °С, 1 ч.

Для стали 9ХС наименее хрупкими оказываются слои, получаемые при 930...950 °С, 0,8...1,3 ч и 900 °С, 2...2,5 ч с предварительной изотермической выдержкой 750 °С, 1 ч.

Из полученных уравнений множественной регрессии и построенных зависимостей можно сделать вывод, что снижение температуры насыщения или повышение времени выдержки относительно выделенного оптимума для сталей У8А и 9ХС сопровождается повышением их хрупкости – снижается величина

предельной нагрузки, приводящей к появлению сколов и трещин на межфазной границе.

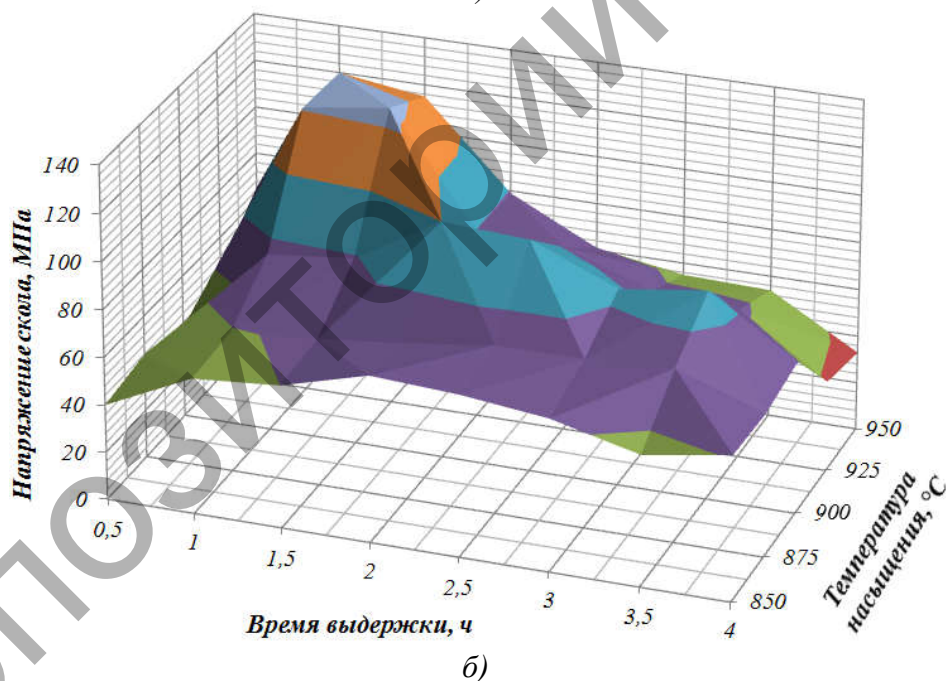
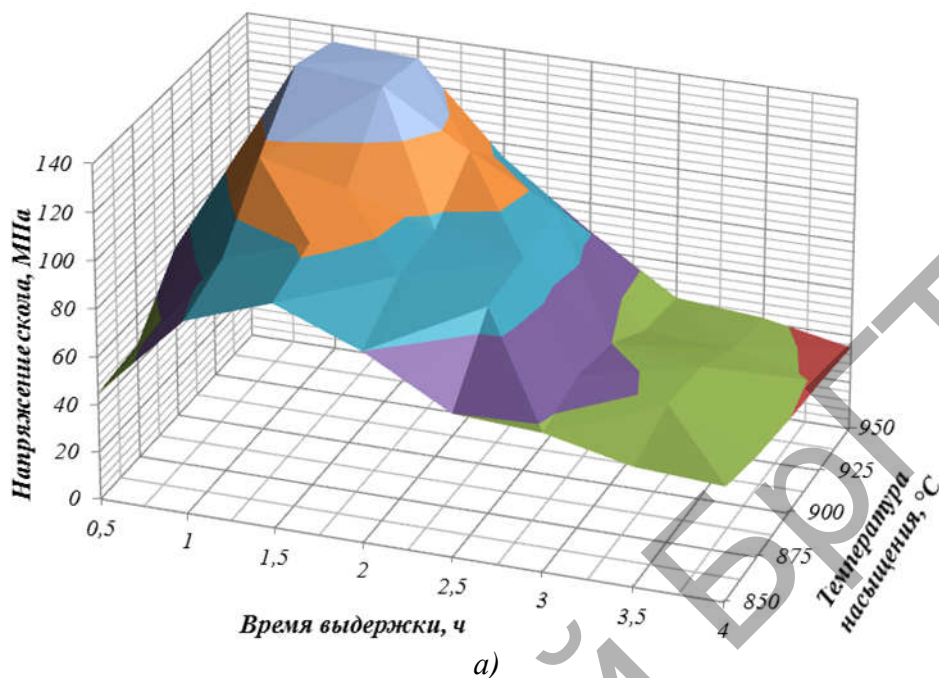


Рисунок 1 – Зависимости напряжения скола на межфазной границе от режимов борирования для сталей У8А (а) 9ХС (б)

По определенным из полученных результатов оптимальным режимам двухфазного борирования были получены образцы сталей У8А и 9ХС с диффузионными боридными слоями толщиной соответственно 125 и 110 мкм и микротвердостью поверхности 16600 и 16850 МПа. Соотношение толщин зон фаз FeV/Fe<sub>2</sub>V в диффузионном слое составило 50/50 для обеих сталей. Величина напряжения скола на межфазной границе FeV/Fe<sub>2</sub>V боридных слоев составила 137 МПа на стали У8А и 124 МПа на стали 9ХС.

Таким образом, получены новые уравнения регрессии зависимости хрупкости компактных двухфазных боридных слоев на сталях У8А и 9ХС от температуры насыщения и времени выдержки при борировании в порошковой среде, что позволило определить параметры проведения процесса борирования, обеспечивающие получение наименее хрупких (более работоспособных) боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе FeV/Fe<sub>2</sub>V на уровне 120...140 МПа.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Konstantinov, V.M. Surface engineering of slider valves of fluid power motors made of tool steels by using boriding saturation mixture / V.M. Konstantinov, V.G. Dashkevich, A.V. Kovalchuk // *Agricultural Engineering*. – 2015. – Vol. 47. – P. 1–6.
2. Григоров, П.К. Методика определения хрупкости борированного слоя / П.К. Григоров, Б.Б. Катханов // В кн.: Повышение надежности и долговечности деталей машин. – Ростов н/Д., 1972. – Вып. 16. – С. 97–98
3. Аладьев, В.З. Курс общей теории статистики / В.З. Аладьев, В.Н. Харитонов – United States: Fultus Books, 2006. – 255 с.
4. Константинов, В.М. Исследование однородности статистических оценок хрупкости боридных слоев на сталях У8А и 9ХС по напряжению скола на межфазной границе / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, А. В. Ковальчук // *Металлургия : республиканский межведомственный сборник научных трудов*. – Минск: БНТУ, 2015. – Вып. 36. – С. 235–242.

УДК 621.785.5

### **УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕМ И ФАКТОР АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ПОРОШКОВЫХ СРЕДАХ**

*Дашкевич В.Г., Ковальчук А.В.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Химико-термическая обработка (ХТО) используется в различных отраслях машиностроения для повышения надежности и долговечности широкого ассортимента деталей машин и инструмента, позволяет получать на поверхности изделия слой, отличающийся от сердцевины и обеспечивающий необходимый комплекс физических, химических и механических свойств.

В настоящее время накоплен огромный опыт по применению различных видов и способов ХТО [1]. Тем не менее, получение специальных диффузионных слоев с особой морфологией слоя по-прежнему является актуальной задачей. Целью настоящей работы являлся поиск предпосылок получения при химико-термической обработке структур, значительно отличающихся от традиционных. В частности для таких процессов как борирование и азотирование.

На примере борирования выделено несколько направлений термодиффузионной обработки в порошковых средах функционально способных изменить структуру диффузионного слоя и получить морфологию отличающуюся от классической: