

Таким образом, температура прессования в пределах 1700–1750 °С не оказывает влияния на параметры оптимизации (плотность и прочность при изгибе).

### Литература

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 277 с.

УДК 621.785.539, 620.178.2 + 519.23

**В.М. КОНСТАНТИНОВ**, д-р техн. наук,  
**В.Г. ДАШКЕВИЧ**, канд. техн. наук,  
**А.В. КОВАЛЬЧУК** (БНТУ)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК ХРУПКОСТИ БОРИДНЫХ СЛОЕВ НА СТАЛЯХ У8А И 9ХС ПО НАПРЯЖЕНИЮ СКОЛА НА МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕ

**Введение.** Определяющую роль в стойкости деталей к изнашиванию играют их поверхностные слои [1–3]. В этой связи перспективным для повышения эксплуатационной стойкости деталей является инженерия их поверхностей с использованием различных способов. Одним из наиболее эффективных путей повышения стойкости стальных изделий в условиях граничного трения и абразивного изнашивания является получение диффузионных слоев в результате диффузионного борирования [4–8].

Упомянув борирование, нельзя не отметить неоценимый вклад в становление и развитие представлений об этом процессе доктора технических наук, профессора Л.Г. Ворошнина, который на протяжении многих лет исследовал закономерности насыщения бором различных материалов. Результаты этих исследований отражены во множестве научных работ, написанных им лично и в соавторстве с Л.С. Ляховичем, В.Ф. Лабунцом, А.А. Алиевым, Г.В. Борисенком, М.В. Киндрачуком, Е.И. Бельским, Б.С. Кухаревым, М.Г. Круковичем и другими, например, [9, 10].

При внедрении процесса борирования в производственный цикл необходимым условием является воспроизводимость результатов, а именно получение требуемого уровня свойств боридных слоев для каждой детали, а также статистическая управляемость процесса насыщения в рамках технологии упрочнения при определенных граничных условиях: температуре насыщения, времени изотермической выдержки, толщине боридного слоя. В этой связи актуальными и представляющими значительный практический интерес является статистическая управляемость получаемых свойств боридных слоев по необходимым критериям качества.

Для научных работников, специализирующихся в химико-термической обработке, и производителей, занимающихся внедрением борирования, одним из важнейших критериев, имеющих решающее значение для эффективного применения, является хрупкость полученных диффузионных слоев. Подтверждением тому являются многочисленные исследования вышеназванных авторов. Оценку хрупкости боридных слоев в настоящее время проводят различными методами [11–13]. Вместе с этим известные способы оценки качества боридных покрытий и в частности их пластичности (хрупкости) являются достаточно трудоемкими, многие из методов не имеют единых параметров проведения испытаний и являются сугубо качественными сравнительными. Вышеуказанные недостатки являются серьезным препятствием для их использования в условиях производственных и исследовательских лабораторий и для экспресс-контроля в производственном цикле при оперативной корректировке параметров процесса и обеспечения воспроизводимости его результатов. В связи с этим актуальными являются исследования достоверности результатов оценки хрупкости боридных слоев с определением однородности результатов оценок и их равномерности.

Один из наиболее простых методов – определение микрохрупкости на межфазной границе ( $\text{FeB} - \text{Fe}_2\text{B}$ ), которая реализуется с помощью микротвердомера. В основу методики положено определение вероятности появления трещины на межфазной границе двухфазного боридного слоя при воздействии индентора в форме алмазной пирамиды. Уколы проводятся с шагом, близким к двойной длине диагонали предыдущего отпечатка. Нагрузка выбирается исходя из требований возможности визуального контроля и регист-

рации нарушения сплошности, то есть появления трещины. После нанесения отпечатков они анализируются с фиксированием характера возникшей при нагружении трещины, производится расчет напряжения скола.

В настоящей работе исследована однородность статистических оценок показателя хрупкости компактного двухфазного боридного слоя – напряжение скола на межфазной границе при микроиндентировании на инструментальных сталях У8А и 9ХС.

**Материалы и методики.** Борирование сталей У8А и 9ХС для статистического анализа показателя хрупкости боридных слоев по напряжению скола на межфазной границе проводили по следующему режиму: 950 °С, 1 ч, скорость нагрева не более 200 °С/ч с принудительной изотермической выдержкой 750 °С в течение 1 ч и скоростью охлаждения не более 100 °С/ч. Такой режим обеспечивает получение боридного слоя толщиной не менее 100 мкм с поверхностной микротвердостью 16–18 ГПа. Диффузионное насыщение проводили в порошковой среде besto-bor [14] в контейнерах, герметизируемых плавким затвором.

Исследования микроструктуры проводились на микроскопе Neophot-2, для выявления структуры использовали стандартные металлографические реактивы. Хрупкость борированного слоя оценивали по методике [15]. Измерения микротвердости проводили по методу восстановленного отпечатка на приборе DuraScan 20 (Austria).

Исследования однородности статистических оценок напряжения скола на межфазной границе борированных образцов сталей У8А и 9ХС проводили согласно методике [16]. Для получения выборок хрупкость оценивали только по напряжению скола  $\zeta$  (МПа) слоя, которое в совокупности учитывает фазовый состав и морфологию слоя, микротвердость и модули упругости фаз, напряженное состояние слоя и запас его пластичности [17]:

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

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

**Результаты и их обсуждение.** Были получены по 10 выборок для сталей У8А и 9ХС, по каждой из которых проводили по пять параллельных измерений (рисунок 1).

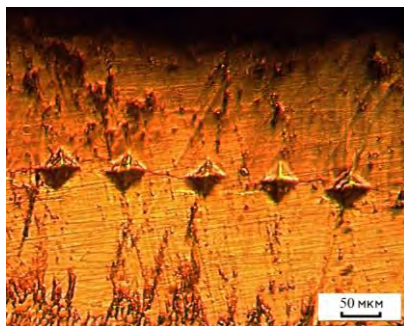


Рисунок 1 – Микроструктура двухфазного боридного слоя с отпечатками индентора

В таблице 1 представлены результаты статистической обработки данных напряжения скола боридного слоя для стали У8А.

Таблица 1 – Статистическая обработка данных напряжения скола боридного слоя на межфазной границе на стали У8А

№ выборки	Оценка среднего значения выборки	Оценка рассеянности выборки
1	130,5	0,82
2	128,5	0,50
3	133,5	0,75
4	129,5	0,84
5	131,0	1,02
6	128,0	0,80
7	129,0	0,86
8	132,5	1,20
9	131,5	0,88
10	129,5	0,96
$\Sigma$	$\bar{X}_{\max} = 133,5$ $\bar{X}_{\min} = 128,0$	$S_G = 0,880$ $\sum_1^n S_i^2 = 7,7465$

Проверку однородности средних значений результатов определения напряжения скола на межфазной границе проводили по критерию Стьюдента:

$$|\bar{G}| \leq t \cdot S_G, \quad (2)$$

где  $t$  – критерий Стьюдента при степени свободы 5 и доверительной вероятности 0,999 ( $t = 8,6$ )

$$\bar{G} = |\bar{X}_{\min} - \bar{X}_{\max}|; \quad (3)$$

$$S_G = \sqrt{\frac{\sum_1^{10} S_{\bar{X}_{\max}}^2}{n}}. \quad (4)$$

Утверждение об однородности средних значений выборки принимается в случае выполнения условия (2). Результаты статистической обработки данных напряжения скола боридного слоя для стали 9ХС представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Статистическая обработка данных напряжения скола боридного слоя на межфазной границе на стали 9ХС

№ выборки	Оценка среднего значения выборки	Оценка рассеянности выборки
1	101,0	0,92
2	98,5	0,88
3	100,5	0,62
4	99,5	0,90
5	102,0	0,86
6	103,0	0,75
7	102,5	0,80
8	101,5	1,04
9	99,5	0,86
10	98,0	0,78
Σ	$\bar{X}_{\max} = 103,0$ $\bar{X}_{\min} = 98,0$	$S_G = 0,848$ $\sum_1^n S_i^2 = 7,1869$

Для стали У8А получили: по формуле (3)  $\bar{G} = 5,5$ , по формуле (4) –  $S_G = 0,880$ . По условию (1)  $5,5 < 8,6 \cdot 0,880 = 7,57$ .

Для стали 9ХС получены следующие значения:  $\bar{G} = 5,0$ ,  $S_G = 0,848$ . По условию (1)  $5,0 < 8,6 \cdot 0,848 = 7,29$ . Следовательно, утверждение об однородности средних значений напряжения скола боридного слоя выборки для сталей У8А и 9ХС нет оснований отвергать.

Проверку равномерности выборок проводили по критерию Кохрена

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_1^{10} S_i^2}, \quad (5)$$

где  $S_{\max}^2$  – максимальное значение среднеквадратичного отклонения;  $\sum_1^{10} S_i^2$  – сумма всех значений среднеквадратичных отклонений.

Утверждение об однородности дисперсий принимается, если значение критерия, полученное по экспериментальным данным, не превышает табличного значения. Табличное значение критерия Кохрена при доверительной вероятности 0,95, степени свободы 4 и числе выборок 10 составляет 0,3311.

Расчетное значение критерия Кохрена (по формуле (5)) для выборки средних значений напряжения скола боридного слоя на стали У8А составило 0,186, для стали 9ХС – 0,150, что меньше табличного значения критерия. Следовательно, подтверждается однородность дисперсий в выборках как для стали У8А, так и для стали 9ХС.

**Заключение.** Исследована однородность и равномерность результатов оценки хрупкости компактных двухфазных боридных слоев по показателю напряжения скола на межфазной границе на сталях У8А и 9ХС и показано, 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. По полученным результатам можно сделать вывод, что хрупкость компактных двухфазных боридных слоев на сталях У8А и 9ХС, оцениваемая по напряжению скола на межфазной границе, является статистически управляемой при определенных температурно-временных параметрах процесса борирования и толщине боридного слоя, а использованный метод оценки хрупкости позволяет получать статистически достоверные результаты.

### Литература

1. **Ворошнин, Л.Г.** Борирование стали. / Л.Г. Ворошнин, Л.С. Ляхович. – М.: Металлургия, 1978 – 126 с.

2. **Химико-термическая** обработка металлов и сплавов: Справочник / Под ред. Л.С. Ляховича. – Москва: Металлургия, 1981 – 424 с.

3. **Эффективные технологии** поверхностной обработки изделий из стали / В.Г. Дашкевич [и др.]. // Научные технологии и инновации : сб. докл. Юбилейной Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. – Ч. 4. – С. 229–233.

4. **Восстановление деталей машин:** Справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2013. – 672 с.

5. **Low-temperature boriding of high-carbon steel** / X. Hea [et al.]. / Surface and Coatings Technology, 2015. – Vol. 263. – P. 21–26.

6. **Mechanical behavior** of borides formed on borided cold work tool steel / S. Sen [et al.] // Surface and Coatings Technology, 2001. – Vol. 135. – № 2, 3. – P. 173–177.

7. **Особенности формирования** боридных покрытий из композиционных металлотермических порошковых сред / Н.А. Галынская [и др.] // Вестник БНТУ: научно-технический журнал. – 2011. – № 4. – С. 15–20.

**8. Matijevic, B.** Evaluation of boride layer growth on carbon steel surfaces / B. Matijevic // Metal science and Heat treatment, 2014. – Vol. 56. – № 5–6. – P. 269–273.

**9. Константинов, В.М.** Применение борирования в порошковой среде для упрочнения стальных деталей различного назначения / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич, А.В. Ковальчук // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр.: в 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. – С. 33–38.

**10. Иваницкий, Н.И.** Л.Г. Ворошнин – основатель белорусской научной школы химико-термической обработки / Н.И. Иваницкий, В.М. Константинов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 1. – С. 3–4.

**11. Твердость и хрупкость** металлоподобных соединений / Г.В. Самсонов [и др.] // Физика металлов и материаловедение. – 1959. – Т. 8. – Вып. 4. – С. 622–630.

**12. Глазов, В.М.** Микротвердость металлов / В.М. Глазов, В.Н. Вигдорович. – М.: Металлургиздат, 1962. – 224 с.

**13. Григоров, П.К.** Методика исследования хрупкости борированного слоя / П.К. Григоров, Б.Б. Катханов // Повышение надежности и долговечности деталей машин: труды НИИТМа. – Ростов-на-Дону. – 1972. – Вып. XVI. – С. 97–99.

**14. BESTO** (Белорусские среды для термодиффузионной обработки) [Electronic resource] – Mode of access : <http://besto.by/vidy-obrabotok/borirovanie>. – Date of access : 09.09.2015.

**15. Григоров, П.К.** Методика определения хрупкости борированного слоя / П.К. Григоров, Б.Б. Катханов // В кн.: Повышение надежности и долговечности деталей машин. – Ростов-на-Дону, 1972. – Вып. 16. – С. 97–98

**16. Аладьев, В.З.** Курс общей теории статистики / В.З. Аладьев, В.Н. Харитонов – United States: Fultus Books, 2006. – 255 с.

**17. Крукович, М.Г.** Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.