

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАДИРОСТОЙКОСТИ ТЕРМОДИФфуЗИОННЫХ БОРОСУЛЬФИДИРОВАННЫХ СЛОЕВ НА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ

**В. М. КОНСТАНТИНОВ**, д-р техн. наук, **В. А. ЛЕШОК**  
Белорусский национальный технический университет

*Изучены структурно-фазовый и микродюриметрический состав термодиффузионного боросульфидированного слоя. Установлено аномальное снижение микротвердости в переходной зоне между боридным и сульфидным слоями. Подтверждена эффективность дополнительного сульфидирования термодиффузионного боридного слоя для повышения задиростойкости стального трибосопряжения в условиях сухого трения скольжения. Обнаружено образование мягких и легкоплавких вторичных структур окисульфидного типа, обеспечивающих дополнительное смазывающее действие поверхности трения при жестких режимах.*

**Ключевые слова:** задиростойкость, сухое трение скольжения, сульфидирование термодиффузионного боридного слоя.

## A STUDY OF THE SHEAR RESISTANCE OF THERMODIFFUSION BOROSULFIDATED LAYERS ON CARBON STEEL

**V. M. KONSTANTINOV**, Dr. of Engineering Sciences, **V. A. LESHOK**  
Belorussian National Technical University

*The structural-phase and microdureometric composition of the thermal diffusion boron sulfided layer has been studied. An anomalous decrease in microhardness was found in the transition zone between the boride and sulfide layers. The effectiveness of additional sulfiding of the thermal diffusion boride layer to increase the scuff resistance of a steel tribo-coupling under conditions of dry sliding friction has been confirmed. The formation of soft and low-melting secondary structures of the oxysulfide type, which provide an additional lubricating effect of the friction surface under severe conditions, has been found.*

**Keywords:** scuff resistance, dry sliding friction, sulfiding of the thermal diffusion boride layer.

**Введение.** Существующие тенденции повышения нагрузочных и скоростных показателей работы пар трения обуславливают повышение эксплуатационных, физических и механических характеристик трибологических материалов. Высокие значения контактной усталости и интенсивности изнашивания требуют повышенных значений задиростойкости и износостойкости поверхностей трибологических сопряжений. Вопросы снижения износа и устранения заедания для стальных пар трения, работающих в жестких условиях сухого и граничного трения скольжения, являются в настоящее время одними из актуальных. Известно применение боридных термодиффузионных слоев и борсодержащих наплавов, которые помогают частично устранить вышеописанную проблему. Существуют многочисленные исследования [1–3 и др.], в которых отмечено повышение допустимых режимов работы трибологических пар при наличии в контактной зоне боридов железа. Было обнаружено, что при больших давлениях в зоне контактного взаимодействия ( $p$ ) и высоких скоростей относительного скольжения поверхностей ( $v$ ) наблюдается эффект образования вторичных борсодержащих продуктов трения оксидного типа. Оксидные борсодержащие слои (светло-серого цвета) на поверхности боридной эвтектики, оплаваясь, выполняют роль своеобразной смазки. Описываемый эффект проявляется преимущественно в тяжелых условиях трения скольжения. Также отмечается эффект самосмазывания поверхности трибосопряжения [3, 4].

Известным направлением повышения задиростойкости материалов трибосопряжений является применение термодиффузионного насыщения поверхности серой и фосфором [5–7]. Сульфидирование и фосфорирование позволяют получить на поверхности мягкие сульфидные и фосфидные составляющие [8], которые в процессе трения растираются и размазываются по поверхностям трибосопряжений. Сульфиды и фосфиды железа в таких условиях трения являются твердосмазочными компонентами узла сухого трения скольжения [7], при этом происходит существенное снижение коэффициента трения и повышается задиростойкость. Причиной, согласно которой возрастает задиростойкость трибопары, является изменение сопротивления деформации сдвига поверхностного слоя [9]. По данным исследований авторов [5–8] сульфидирование и фосфорирование обеспечивает повышение сопротивления образо-

вания задигов и увеличение прирабатываемости поверхностей материалов сухих узлов трения. Однако, твердость и несущая способность описываемых термодиффузионных слоев недостаточна. Поэтому актуальна разработка термодиффузионных слоев, сочетающих преимущества боридных и сульфидных на конструкционных сталях.

**Материалы и методы исследований**<sup>1</sup>. Термодиффузионному порошковому борированию подвергали образцы из стали марки 45 и 20 в электропечи СНО 12.15/11 при температуре 920 °С. Средой для борирования являлась порошковая среда «besto-bor», разработанная в НИЛ упрочнения стальных изделий БНТУ. Время выдержки в герметизируемом плавким затвором контейнере составляло 4 ч. Часть образцов была подвержена термодиффузионному насыщению серой. Образцы выдерживались в герметизируемом плавким затвором контейнере при температуре 850 °С в течение 1,5 ч.

Микроструктурный анализ образцов, подверженных термодиффузионному насыщению, проводился на микроскопе Альтами МЕТ 3М, дополнительно оснащенном цифровой камерой и фотоадаптером. Для выявления микроструктуры исследуемых образцов применялись стандартные металлографические реактивы.

ДюрOMETрический анализ проводился на микротвердомере ПМТ-3. Применяемая для микродюрOMETрии нагрузка на индентор составляла 0,02 Н, на одну точку исследования приходилось не менее пяти измерений.

Для исследований трибологической направленности использовали машину трения 2070 СМТ-1, материалом контртела в машине трения являлась сталь 65Г.

**Результаты и их обсуждение.** Из всех видов сухое трение наиболее подвержено процессам микросхватывания, которое в дальнейшем переходит в заدير при высоких скоростях скольжения и давления на контактных поверхностях. Проведенный ранее анализ позволил сформулировать гипотезу повышения задиростойкости термодиффузионных слоев, согласно которой пара трения должна состоять из двух стальных поверхностей, имеющих сопоставимые значения твердости. Но при этом одна из поверхностей должна иметь зону высокой твердости и локальные участки мягких вклю-

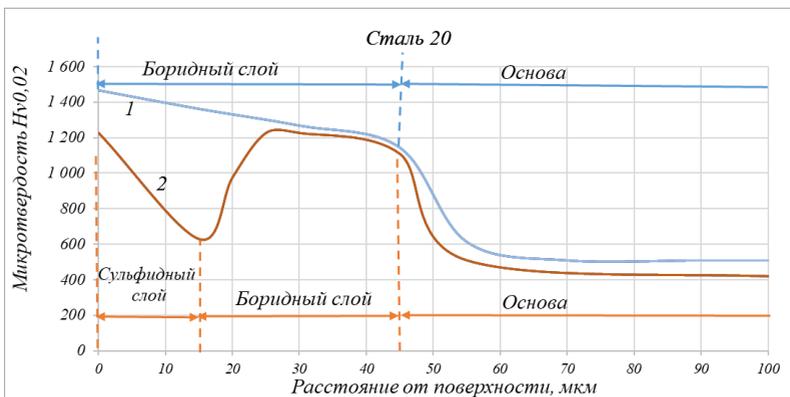
---

<sup>1</sup> Получение термодиффузионных слоев выполнено при участии Судникова М. А.

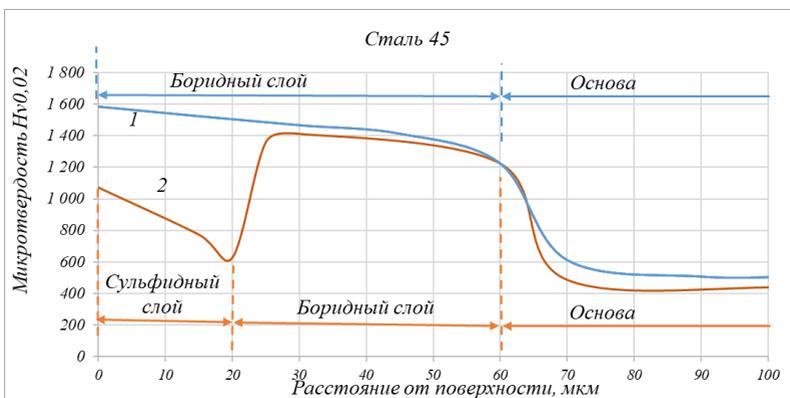
чений, благодаря чему удастся добиться деструкции связей адгезионного типа. Причиной разрушения адгезионных связей поверхностей трибосопряжения при попытке образования микросхватывания является наличие мягких, легкоплавких структурных составляющих. Следует отметить, что твердость этих включений должна быть ниже твердости материала основы. В этом случае процесс трения скольжения при высоких скоростях и давлениях вызывает разрушение и оплавление мягких составляющих по всей поверхности основного материала. Данные микрофрагменты не должны оказать отрицательного воздействия на контртело пары трения, так как обладают существенно меньшими дюрометрическими показателями.

Согласно вышеописанной гипотезе была разработана лабораторная технология последовательной термодиффузионной обработки стальной поверхности трибосопряжений. Первоначально отожженный стальной образец подвергается термодиффузионному борированию, что обеспечивает получение высокотвердого и износостойкого поверхностного слоя. Далее проводится термодиффузионное сульфидирование борированной поверхности. Боридный термодиффузионный слой имеет традиционную микроструктуру и морфологию – иглоподобную форму боридов железа  $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$  [1, 3, 4, 9]. Толщины термодиффузионных боридных слоев по результатам выполненных исследований для образцов стали 20 составляет 30–45 мкм (кривая 1, рисунок 1, а), для стали 45 – 60 мкм (кривая 1, рисунок 1, б). Значение поверхностной твердости боридного слоя для стали 20 составляет 1466  $\text{HV}_{0,02}$ . В свою очередь, твердость боридного слоя на стали 45 ожидаемо выше, чем на стали 20, и составляет 1584  $\text{HV}_{0,02}$ .

После боросульфидирования произошли определенные изменения микроструктуры – металлографически регистрируется наличие слоистой структуры на стальной основе. При изучении поперечного шлифа исследуемых боросульфидных образцов было отмечено наличие трех ярко выраженных зон: на поверхности расположены сульфиды железа, далее – слой боридов железа и переходная зона.



а



б

Рисунок 1 – Сравнительное распределение значений микротвердости на образцах, подверженных термодиффузионной обработке:

а – сталь 20; б – сталь 45;

1 – борирование; 2 – последовательная обработка (бор + сера)

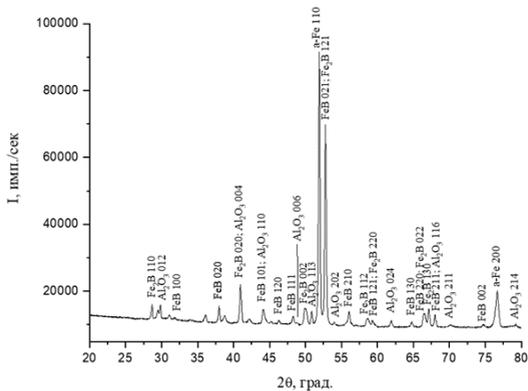
Морфологически сульфиды железа представлены в виде отдельного слоя, расположенного поверх боридного. Ниже собственного слоя сульфидов отмечаются отдельные участки вкраплений и включений внутри приповерхностной части боридного слоя. Таким образом, над и внутри боридного слоя отмечаются зоны столбчатых зерен сульфидов темного и темно-коричневого цветов. Отличительной особенностью морфологии сульфидных включений является их повышенная пористость и несплошность. Толщина сульфидного

слоя на образцах из стали составляет 20–15 мкм (кривая 2, рисунок 1, а), для образцов из стали 45 – 20 мкм (кривая 2, рисунок 1, б). Таким образом, толщина слоя сульфидов железа в среднем составляет 30 % от исходной толщины борированного слоя. Данные микродюрOMETрического анализа показали снижение микротвердости после последовательного сульфидирования: на образцах из стали 20: поверхностная микротвердость составляет 1224 HV<sub>0,02</sub>, а для образцов из стали 45 – 1071 HV<sub>0,02</sub>. Соответственно интервальные значения микротвердости сульфидного слоя для стали 20 и 45 составляют 1224–657 HV<sub>0,02</sub> и 1071–628 HV<sub>0,02</sub>. Характерным является существенное снижение микротвердости в области между боридным и сульфидным слоями (рисунок 1). Следует отметить, что собственно термодиффузионные боридные слои, полученные при борировании и последовательном боросульфидировании, не имеют различий в дюрOMETрии и металлографии.

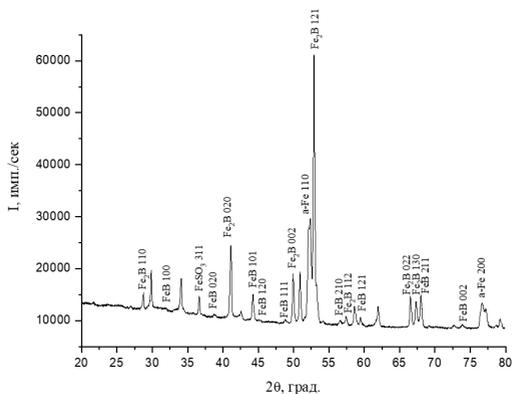
Фазовый анализ позволил установить различия между боридными и боросульфидными слоями: после дополнительного сульфидирования боридного слоя происходит некоторое уменьшение интенсивности традиционных пиков боридов железа и появляется пик оксисульфидной фазы железа (рисунок 2).

Установленные особенности структурно-фазового и микродюрOMETрического состояния термодиффузионных слоев обусловили различия триботехнических показателей (рисунок 3). Из всех трех вариантов стальных пар трения (отожженная, борированная и боросульфидированная сталь) наименьшие значения относительной скорости скольжения и удельного давления ожидаемо может выдерживать отожженная сталь. При увеличении этих показателей и превышения допустимых пределов (кривая 1, рисунок 3, а, б) отмечается образование задиров. Большие нагрузки и скорости скольжения может выдержать материал, представленный борированной сталью (кривая 2, рисунок 3, а, б).

Полученные в этом случае боридные слои сложно поддаются проработке из-за высокой микротвердости боридов железа. Отмечаемое скалывание и растрескивание термодиффузионного боридного слоя вызывается наряду с хрупкостью коэффициентом теплового расширения боридных фаз, который зависит от деформационных воздействий временного и остаточного характера.



*a*



*б*

Рисунок 2 – Рентгеноструктурный фазовый анализ образцов из стали 45, подверженных:

*a* – термодиффузионному борированию; *б* – последовательной термодиффузионной обработке (бор + сера)

Согласно трибологическим исследованиям наилучшим вариантом является применение последовательного борирования и сульфидирования. Получаемый термодиффузионный слой позволяет выдерживать большие удельные нагрузки и относительные скорости скольжения без образования задиrow (кривая 3, рисунок 3, *a*, *б*). Сравнительная характеристика задиrowстойкости материалов из стали 20 и 45 представлена в таблицах 1, 2.

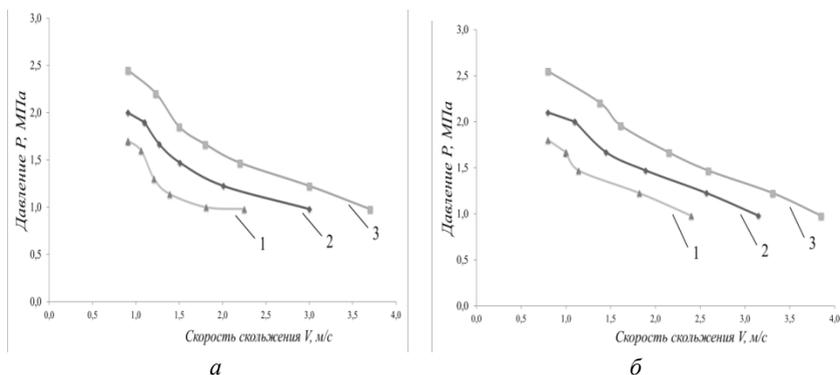


Рисунок 3 – Оценка задиростойкости материалов, подверженных обработке:  
*a* – сталь 20; *б* – сталь 45;  
 1 – отожженная сталь; 2 – борирование; 3 – последовательное борирование и сульфидирование

Таблица 1 – Характеристика задиростойкости материалов для стали 20

Поверхностный слой	Допустимый режим работы		
	$p$ , МПа	$v$ , м/с	Усредненное значение $p v$ , МПа·м/с
Отожженная сталь	1,70	2,25	3,83
Боридный слой	2,00	3,00	6,00
Боросульфидированный слой	2,45	3,70	9,07

Таблица 2 – Характеристика задиростойкости материалов для стали 45

Поверхностный слой	Допустимый режим работы		
	$p$ , МПа	$v$ , м/с	Усредненное значение $p v$ , МПа·м/с
Отожженная сталь	1,80	2,40	4,32
Боридный слой	2,10	3,15	6,62
Боросульфидированный слой	2,55	3,85	9,82

Установлено, что боросульфидированный слой на образцах из стали 45 позволяет выдерживать большие удельные нагрузки и повышенные скорости скольжения (рисунок 4) при одинаковом режи-

ме обработки. Причиной этого, по всей видимости, является более высокое содержание углерода и большая твердость стальной основы для стали 45 по сравнению со сталью 20.

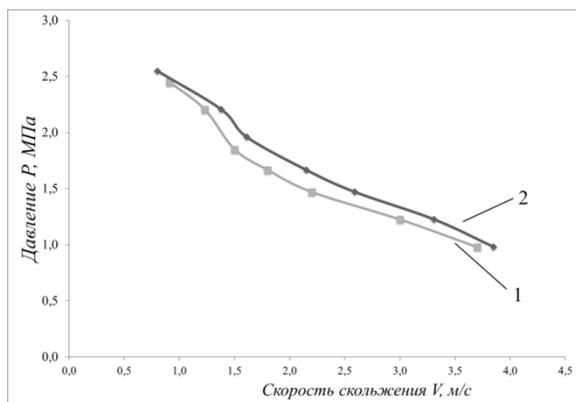


Рисунок 4 – Сравнительный прирост задиристости поверхностей трения, обработанных по композиционной последовательной технологии (борирование + сульфидирование):  
1 – сталь 20; 2 – сталь 45

Одной из причин снижения вероятности формирования задира является наличие легкоплавкой оксисульфидной пленки в зоне контактного взаимодействия, т. к. присутствие пленки позволяет в значительной степени снизить удельные давления. В тяжелых условиях сухого трения скольжения возможно размягчение указанного слоя и кратковременное плавление в зонах фактического контакта.

**Выводы.** Изучены структурно-фазовый и микродюрометрический состав термодиффузионного боросульфидированного слоя. Установлено anomальное снижение микротвердости в переходной зоне между боридным и сульфидным слоями. Подтверждена эффективность дополнительного сульфидирования термодиффузионного боридного слоя для повышения задиристости стального трибосопряжения в условиях сухого трения скольжения. Обнаружено образование мягких и легкоплавких вторичных структур оксисульфидного типа, обеспечивающих дополнительное смазывающее действие поверхности трения при жестких режимах.

## Список литературы

1. **Лабунец, В. Ф.** Износостойкие боридные покрытия / В. Ф. Лабунец, Л. Г. Ворошнин, М. В. Киндрачук. – Киев: Техніка, 1989. – 159 с.
2. **Эпик, А. П.** Новые порошковые и композиционные материалы / А. П. Эпик, К. К. Палеха. – Киев: УМК ВО, 1989. – 166 с.
3. **Пантелеенко, Ф. И.** Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них / Ф. И. Пантелеенко. – Минск: Технопринт, 2001. – 300 с.
4. **Материаловедение: Учебник для вузов** / Б. Н. Арзамасов [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.
5. **Клушин, Д. Н.** Сульфидирование цветных металлов / Д. Н. Клушин. – М.: Металлургия, 1968. – 212 с.
6. **Tribological Properties of Bronze Containing Micro Sized Sulfide-Application of Atomic Force Microscopy** / Sato, Tomohiro & Hirai [et al.]. Tribology Online. 11. 2016. – P. 195–202.
7. **Сульфидирование** поверхностей трения / В. В. Косткин [и др.]. – Минск: Изд. АН БССР, 1954. – 92 с.
8. **Повышение** стойкости деталей машин (сульфидирование): сборник статей / Институт машиноведения Академии наук СССР. – М: Машгиз, 1959. – 128 с.
9. **Минкевич, А. Н.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А. Н. Минкевич. – М.: Машиностроение. – 1965. – 493 с.

## References

1. **Labunec, V. F.** *Iznosostojkie boridnye pokrytiya* [Wear resistant boride coatings] / V. F. Labunec, L. G. Voroshnin, M. V. Kindrachuk. – Kiev: Tekhnika Publ., 1989. – 159 p.
2. **Epik, A. P.** *Novye poroshkovye i kompozicionnye materialy* [New powder and composite materials] / A. P. Epik, K. K. Palekha. – Kiev: UMK VO Publ, 1989. – 166 p.
3. **Panteleenko, F. I.** *Samoflyusuyushchiesya diffuzionno-legirovannye poroshki na zheleznoj osnove i zashchitnye pokrytiya na nih* [Self-fluxing diffusion-alloyed iron-based powders and protective coatings on them] / F. I. Panteleenko. – Minsk: Tekhnoprint Publ., 2001. – 300 p.

**4. Materialovedenie:** Uchebnik dlya vuzov [Materials Science: Textbook for Universities] / B. N. Arzamasov [et al.]. – Moscow: Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman, 2003. – 648 p.

**5. Klushin, D. N.** *Sul'fidirovanie cvetnyh metallov* [Non-ferrous metal sulfiding] / D. N. Klushin – Moscow: Metallurgiya Publ., 1968. – 212 p.

**6. Tribological Properties of Bronze Containing Micro Sized Sulfide-Application of Atomic Force Microscopy** / Sato, Tomohiro & Hirai [et al.]. Tribology Online. 11. – 2016. – P. 195–202.

**7. Sul'fidirovanie poverhnostej treniya** [Sulfiding of friction surfaces] / V. V. Kostkin [et al.].– Minsk: Izdatel'stvo Akademii nauk BSSR Publ., 1954. – 92 p.

**8. Povyshenie stojkosti detalej mashin (sul'fidirovanie): sbornik statej** [Improving the durability of machine parts (sulfiding): a collection of articles] / Institut mashinovedeniya Akademii nauk SSSR. – Moscow: Mashgiz Publ., 1959. – 128 p.

**9. Minkevich, A. N.** *Himiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemical-thermal treatment of metals and alloys] / A. N. Minkevich. – Moscow: Mashinostroenie Publ , 1965. – 493 p.

*Послына 25.11.2022*  
*Received 25.11.2022*