

УДК 621.791.92: 620.178

ОСОБЕННОСТИ ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПАРЫ БОРОСОДЕРЖАЩИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ — ДЕТАЛЬ*

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО⁺, А. С. СНАРСКИЙ

Проведено моделирование процесса резания металлов и изучено взаимодействие боросодержащего инструментального материала и материала детали в условиях трения скольжения. Установлено комплексное положительное воздействие легирования бором как с точки зрения создания материала оптимальной микроструктуры, так и реализации режима самосмазывания при трении без СОЖ за счет образования вторичных структур на основе оксида бора.

Ключевые слова: боросодержащий инструментальный материал, инструмент, деталь, вторичные структуры, самосмазывание.

Введение. Покрытия, полученные наплавкой самофлюсующимися боросодержащими порошками на железной основе, уже хорошо зарекомендовали себя как при восстановлении, так и при упрочнении деталей машин [1, 2]. Сочетание высоких эксплуатационных свойств последних: твердости, износостойкости, теплостойкости, позволяет применять эти покрытия в качестве инструментальных.

Если анализировать процесс резания с учетом контактного взаимодействия, то инструмент и обрабатываемую деталь можно рассматривать как пару трения [3], которая работает в особо жестких условиях. Срок ее службы зависит от целого ряда факторов: как от нагрузки и скорости скольжения, так и от структуры и свойств материалов пары, а также от процессов возникающих в зоне контакта.

Целью данной работы являлось моделирование процесса резания металлов и изучение процесса взаимодействия пары боросодержащий инструментальный материал—деталь с точки зрения реализации механизма изнашивания в условиях трения скольжения.

Методика испытаний. Покрытия получали методом газопламенной наплавки порошкового материала на подложку из углеродистой стали. Исследовались боросодержащие покрытия инструментального назначения на основе композиции сталь 10P6M5 + бор. Выбор покрытия такого типа обусловлен его эксплуатационными свойствами: высокие твердость, износостойкость и, в первую очередь, теплостойкость. Испытания проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме “колодка—диск”, которая близка к схеме испытания на износостойкость по методу Шкоды—Савина. В качестве контртела использовался шлифованный диск из закаленной стали 45. Данный выбор связан с тем, что данная сталь используется в качестве эталона при определении обрабатываемости резанием различных групп конструкционных материалов. Нагрузка вычислялась как геометрическая сумма составляющих P_x и P_y силы резания, рассчитанной согласно моделируемым условиям резания: скорость, шероховатость, свойства обрабатываемого и инструментального материалов и др. В результате расчетов получили нагрузку $P = 200$ Н. При моделировании процесса резания не учитывалась главная составляющая сил резания P_z , которая идет, главным образом, на отрыв стружки от детали. Данное допущение связано с анализом выхода из строя инструментов. По статистическим данным [3] более 80% причин выхода из строя инструментов связано с износом рабочих

* Работа проводилась при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований РБ (МФ 95-48).

Полоцкий государственный университет, кафедра ТКМ. Беларусь, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

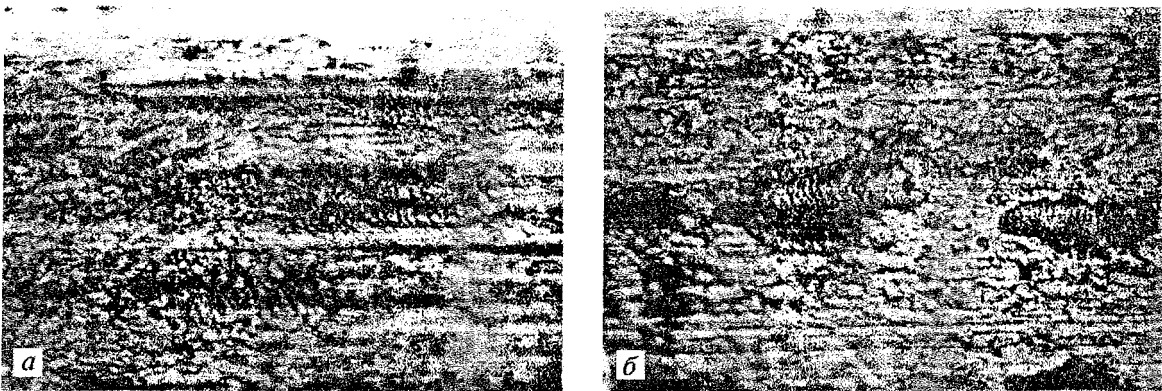
поверхностей при нормальных условиях работы под влиянием составляющих силы резания P_x и P_y , т. е. при трении скольжения пары инструмент—деталь, и лишь 1—5% металлорежущего инструмента выходит из строя из-за поломок или скалывания режущей кромки, т. е. от воздействия составляющей силы резания P_z .

Данная методика позволяет моделировать процессы, протекающие в зоне контакта между деталью и задней поверхностью инструмента. При проведении испытаний имелась возможность реализации процесса трения как без смазочного материала, так и при использовании СОЖ. В качестве СОЖ применялся 5%-ный водный раствор полусинтетической СОЖ Аквол-11, который подавался в зону контакта. Время испытания выбиралось с точки зрения возможности качественного визуального контроля лунки износа и составляло 15 мин. В качестве эталонной была выбрана пара быстрорежущая сталь 10P6M5 (колодка, 678НВ) — закаленная сталь 45 (диск).

Результаты эксперимента и их обсуждение. Проводилось два вида испытаний: 1) испытания при трении скольжения без смазочного материала; 2) с использованием СОЖ.

При трении закаленного диска по колодке из боросодержащего инструментального материала кроме сильного износа контртела (что очевидно), из-за высоких контактных давлений и температур происходит также значительный износ и инструментального материала. При этом массовый износ как диска так и колодки за цикл испытания примерно одинаков и составляет 0,004 г.

Сопоставлять данные износных испытаний инструментальных материалов трудно из-за различного износа контртела для каждой конкретной пары трения. Однако такие испытания позволяют оперативно оценивать состояние реальной трибопары “инструмент—деталь” по виду изношенной поверхности: есть ли схватывание, или же имеет место эффект самосмазывания. В результате наших исследований были установлены особенности трения пары боросодержащий инструментальный материал — деталь. Оказалось, что высокая износостойкость определяется не только повышенной твердостью, теплостойкостью и оптимальной структурой, но и возможностью образования вторичных структур (ВС), реализующих режим самосмазывания. В результате анализа лунки износа было замечено наличие на поверхности трения инструментального материала тонкопленочных ВС светло-серого цвета (рис. а, б).



Характерный вид вторичных структур образующихся на поверхности трения боросодержащего инструментального материала: трение без смазочного материала ($\times 600$)

Наиболее отчетливо такие структуры наблюдаются для эвтектического типа покрытий, что согласуется с ранее проведенными исследованиями [2, 4]. Данное явление можно объяснить с учетом особенностей микроструктуры указанных боросодержащих материалов. Это связано, в первую очередь, с ее гетерогенностью: твердые боридные включения ($H_{\mu} = 1,2...2,2 \cdot 10^4$ МПа) расположены в более мягкой матрице ($H_{\mu} = 0,7...0,9 \cdot 10^4$ МПа).

Существует два уровня гетерогенности микроструктуры: 1) боридные или бороцементитные включения, имеющие размеры 10—40 мкм; 2) гетерогенность самой эвтектической матрицы с размерами избыточных фаз в эвтектических колониях 1—5 мкм, причем матрица—эвтектика может быть как веероподобной так и зернистой.

Отмеченные особенности микроструктуры вызывают уменьшение реальной площади контакта, что способствует значительному повышению давления (до 10^3 МПа) и температуры в зоне трения до 1000 °С, и приводит к возрастанию вероятности образования ВС.

ОСОБЕННОСТИ ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПАРЫ

По мнению ряда исследователей [5], при работе трибопары без смазочного материала важную роль играют оксиды, образующиеся на поверхностях трения. Было сделано предположение, что обнаруженные ВС представляют тонкие оксидные пленки. Ранее проведенные исследования трения несмазанных пар показали, что химический состав ВС близок к стехиометрическому [6]. Для более точного установления природы ВС были произведены термодинамические расчеты, с учетом реакций взаимодействия инструментального материала как с кислородом воздуха, так и с водой (табл. 1). Установлено, что в зоне контакта

Таблица 1. Относительная вероятность образования различных типов ВС

Условия трения	Основные вещества и соединения в покрытии	Основные вещества и соединения во внешней среде	Наиболее вероятные образующиеся соединения	Относительная вероятность образования ВС (при 700 °С)
Без смазочного материала	FeB, Fe ₂ B, Fe	O ₂	Fe ₃ O ₄	1,0
			Fe ₂ O ₃ +BO ₂	1,2
			FeO+B ₂ O ₃	1,4
			Fe ₃ O ₄ +B ₂ O ₃	2,3
С использованием СОЖ	FeB, Fe ₂ B, Fe	O ₂ , H ₂ O	Fe ₃ O ₄ +B ₂ O ₃ +H ₂	2,0

среда—инструмент—деталь при трении без смазочного материала наиболее вероятно образование ВС, основой которых является оксид бора B₂O₃. Согласно классификации Б. И. Костецкого такие структуры следует отнести ко второму типу — вторичные образования на основе оксидов [7].

Для повышения эффекта благоприятного воздействия ВС применяется их модифицирование. Наиболее широко используемый способ — это химическое модифицирование путем изменения состава ВС [7]. В качестве естественного модификатора выступает кислород воздуха. Перспективным является введение активного элемента в смазочный материал. Но наиболее эффективным является введение модификатора в материал самой пары трения методом легирования. Бор, входящий в состав разработанного инструментального материала, не только повышает твердость и теплостойкость, но и является основной причиной образования ВС. При трении эталона из стали 10P6M5 (бор отсутствует) образования ВС не обнаружено.

Аналогичные процессы наблюдались и при исследовании закономерностей спекания указанных боросодержащих композиций, проведенного в лаборатории фирмы SIEMENS AG (Германия). Процесс спекания проводили в различных средах: аргон, азот, воздух. При работе в кислородосодержащей среде (воздухе) достигалась наилучшее качество изделия. Бор, имеющийся в инструментальном материала активно взаимодействует с кислородом воздуха и другими оксидами будучи более легкоплавкими и легкими в виде B₂O₃ перемещается на поверхность спекаемого материала. В дальнейшем эта пленка B₂O₃ защищает его от окисления. Таким образом, наибольший положительный эффект от легирования бором достигается только при наличие мощного модификатора — кислорода воздуха.

Введение бора в материал способствует изменению типа и состава вторичных структур, что резко повышает его триботехнические свойства. Структуры на основе оксидов железа ($T_{пл} = 1300\div 1500$ °С), характерные для эталонной трибопары, заменяются другими: на основе B₂O₃ ($T_{пл} = 450\div 470$ °С [8]). При повышенных температурах, которые имеют место при резании, данный оксид плавится и работает как жидкий смазочный материал, что приводит к значительному снижению коэффициента трения и повышению износостойкости.

О перспективности применения бора в качестве эффективного модификатора свидетельствуют исследования, в которых установлено, что ВС на основе оксида бора обладают хорошими триботехническими свойствами и выдерживают высокие рабочие температуры в зоне трения (650 °С) [5]. Таким образом оптимальной с точки зрения образования ВС являются боросодержащие материалы с многоуровневой гетерогенностью микроструктуры. Данные выводы и результаты проводимых экспериментов полностью согласуются с известными исследованиями по самоорганизации трибосистем [6, 7].

Результаты испытаний при тех же параметрах моделирования, но при использовании СОЖ, представлены в табл. 2. Контрольные испытания, проведенные с инструментальными материалами, имеющими различную износостойкость, показали незначительный износ

Таблица 2. Влияние микроструктуры наплавленных покрытий на износостойкость при трении скольжения

Номер покрытия	Твердость HV	Износостойкость $E_{отн}$	Тип и особенности микроструктуры
1	678±28	1,00	Эталон — сталь 10P6M5
2	826±47	2,50	Доэвтектическая (около 50 мас.% ферритных включений в эвтектической матрице)
3	894±34	5,48	Эвтектическая (около 1–2 мас.% ферритных включений и зернистая матрица (1–3 мкм))
4	958±34	4,52	Заэвтектическая 1-го типа (бороцементит и зернистая матрица)
5	1122±69	4,30	Заэвтектическая 2-го типа (избыточные бориды и зернистая матрица)

контртела из закаленной углеродистой стали, что позволяет говорить о сопоставимости данных по износостойкости различных типов покрытий.

Как видно из табл. 2, при трении скольжения о закаленную сталь и при использовании в качестве инструментального — разработанного боросодержащего материала, износостойкость возрастает по сравнению с эталонной сталью 10P6M5 в 2,5–5,0 раз. Повышение износостойкости характерно для всех типов исследуемых покрытий. Причем, как можно заметить, нет строгой зависимости между твердостью и износостойкостью. Наиболее высокой износостойкостью обладает покрытие 3 эвтектического типа с мелкозернистой микроструктурой. Вероятнее всего это связано с наиболее равномерным изнашиванием данного типа покрытия. Из-за отсутствия резких перепадов микротвердости, характерных для заэвтектического типа покрытия — твердые и довольно крупные (10–40 мкм) бориды в более мягкой матрице, градиент контактных давлений мал. Объяснение этого факта требует дополнительных исследований.

Данные выводы подтверждаются и другими исследованиями [5], в которых установлено, что при режимах трения, не вызывающих значительного повышения температуры в зоне контакта, наблюдается хрупкое разрушение и выкрашивание боридов. Это обуславливает более высокое значение износа заэвтектического типа покрытия по сравнению с эвтектическим. При этом, чем больше градиент твердости структурных составляющих, тем ниже износостойкость. Износостойкость покрытия 4 с упрочнением бороцементитом ($H_{\mu} = 1,0...1,3 \cdot 10^4$ МПа) выше, чем у покрытия 5 с упрочнением боридами ($H_{\mu} = 1,4...2,2 \cdot 10^4$ МПа).

Положительный эффект от самосмазывания, характерный для структур заэвтектического типа с многоуровневой гетерогенностью при трении без смазочного материала, здесь отсутствует. Это же подтверждается микроскопическим анализом контактных поверхностей. При изучении лунок износа на поверхностях трения, работавших с СОЖ, оптически различимых ВС на поверхности инструментального материала обнаружено не было. Это связано с изменением целого комплекса условий работы пары “инструмент—деталь”. Применение СОЖ снижает температуру в зоне контакта. Вода, составляющая основу СОЖ, изменяет характер протекания химических реакций, что негативно влияет на возможность образования ВС на основе оксида бора. Термодинамические расчеты показали значительное снижение вероятности образования оксида бора в присутствии воды (табл. 1). Это же подтверждается и литературными данными [8], согласно которым ВС на основе B_2O_3 активно растворяются водой уже при 20 °С.

Заключение. Таким образом, для условий максимально близких к условиям эксплуатации реального инструмента, установлено комплексное положительное воздействие бора на триботехнические характеристики пары “боросодержащий инструментальный материал — деталь”. При этом наибольший положительный эффект достигается при трении скольжения без смазочного материала за счет образования ВС на основе B_2O_3 . Высокая износостойкость и склонность к образованию ВС позволяют говорить о перспективности применения боросодержащих композиций в качестве инструментального материала.

Обозначения

HV — твердость по Виккерсу; H_{μ} — микротвердость, МПа; P_x, P_y, P_z — составляющие силы резания; $T_{пл}$ — температура плавления, °С; $E_{отн}$ — относительная износостойкость.

Литература

1. **Пантелеенко Ф. И., Любецкий С. Н.** Самофлюсующиеся порошки на железной основе для защитных покрытий // *Весті АН БССР, серія ф.т. навук* (1991), № 3, 22—27
2. **Пантелеенко Ф. И., Константинов В. М.** Исследование износостойкости эвтектических покрытий из ДЛС-порошков // *Трение и износ*, **15** (1994), № 2, 243—247
3. **Бельский С. Е., Тофпенец Р. Л.** Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. Минск: Наука и техника (1984)
4. **Пантелеенко Ф. И., Ворошнин Л. Г., Любецкий С. Н.** Влияние структуры защитных покрытий на их износостойкость // *Трение и износ*, **12** (1991), № 2, 310—314
5. **Лабунец В. Ф., Ворошнин Л. Г., Киндрачук М. В.** Износостойкие боридные покрытия. Киев: Техніка (1989)
6. **Костецкая Н. Б.** Механизмы деформирования, разрушения и образования частиц износа при механическом трении // *Трение и износ*, **11** (1990), № 1, 108—115
7. **Костецкий Б. И.** Эволюция структурного и фазового состояния при внешнем трении // *Трение и износ*, **14** (1993), № 4, 773—783
8. **Физико-химические свойства окислов:** Справочник / под ред. Г. В. Самсонова. Москва: Металлургия (1978)

Поступила в редакцию 20.06.96.

Panteleenko F. I., Snarskii A. S. Features of tribological behavior of boron-containing tool—blank tribosystem.

Simulation of metal cutting process is shown when using the boron-containing tool at sliding friction. Boron alloying is shown to be favorable from the point of view of microstructure optimization and lubrication by boron oxide.