

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СТАЛИ, УПРОЧНЕННОЙ ПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ WC-Co

В.Г. Буров, А.А. Батаев, А.Г. Тюрин, С.В. Буров, С.В. Веселов, И.А. Батаев

Введение

Качество твердого сплава в большой степени определяется количеством связанного и свободного углерода в порошковой смеси, а так же режимами формирования материала (температурой спекания, скоростью нагрева и охлаждения, наличием внешнего давления или вакуума и др.). Формирование металлокерамических твердых сплавов, имеющих металлическую матрицу и упрочняющую фазу из карбидов тугоплавких металлов, осуществимо при условии обеспечения перехода матричного материала в жидкое состояние. Появление жидкой фазы инициирует диффузионные процессы и реакции с растворением частиц карбида и образованием новых твердых фаз. Образовавшиеся при нагреве фазы могут сохраняться или распадаться при затвердевании матричного материала в зависимости от содержания связанного и свободного углерода, условий и режимов спекания.

Формирование покрытий нанесением твердых сплавов на стальные поверхности также должно сопровождаться появлением жидкой фазы. Процессы взаимодействия компонентов порошковой смеси с материалом основы сложнее, а требования к химическому составу в зоне расплава жестче, чем при спекании твердых сплавов. Высокие показатели характеристик качества поверхностного слоя с покрытием (высокая прочность сцепления, благоприятное распределение напряжений, усталостная прочность) могут быть обеспечены при формировании развитой переходной зоны. Настоящая работа посвящена результатам исследований износостойкости спеченных на стальной поверхности покрытий «карбид вольфрама – кобальт» и механических свойств композиции в зависимости от режимов предварительного борирования стали. С целью обеспечения условий физико-химической совместимости компонентов порошковой смеси и основы в работе изменяли химический состав спекаемой композиции следующими способами:

- в состав порошковой смеси вводили порошок бора аморфного;
- осуществлялась цементация поверхностного слоя основы;
- осуществлялось борирование поверхностного слоя основы.

Материалы и методика исследования

В качестве материала основы использовалось техническое железо, углеродистые и легированные стали (20, 45, У8, У 10, Р6М5, Р18, 20Х23Н18, 7ХНМ). Исходными материалами для формирования покрытий служили твердосплавные порошковые смеси ВК6, ВК8, ВК15. Покрытия наносились на образцы толщиной 3...10 мм из стали 20, 45 и У8, предварительно борированные в порошковой запылке, состоящей из частиц V_4C зернистостью 250...300 мкм и 2...4% NH_4Cl при температурах от 850 до 1000 °С в течение 1, 2, 4 и 6 часов.

Процесс формирования покрытия состоял из двух стадий: электрофоретического осаждения порошковой смеси и спекания полученного осадка при температуре появления жидкой фазы. Спекание проводилось радиационным нагревом в вакуумной печи СШВЭ-1,25. Время спекания в вакуумной печи минимизировалось по наблюдению за зеркалом оплавленной поверхности и составляло 5...30 с.

Металлографические исследования проводились с использованием оптического микроскопа NU-2E. Для проведения фрактрографических исследований поверхностей изломов поверхностных слоев со спеченными покрытиями применяли растровые электронные микроскопы Tesla BS-350 и LEO 420.

Характер распределения химических элементов по глубине упрочненного слоя оценивали на растровом электронном микроскопе JEOL JXA-5A, оснащенный энергодисперсионным спектрометром типа KEVEX. Исследование образцов проводили в режиме, основанном на использовании вторичных электронов (режим SEI) при ускоряющем напряжении 15 кВ и силе тока электронного пучка $10^{-10} \dots 10^{-7}$ А, а также в режиме обратно рассеянных электронов (режим COMPO) при ускоряющем напряжении 20 кВ. Определение фазового состава покрытия и переходного слоя осуществлялось методом рентгеновской дифрактометрии на установках ДРОН-3М и ДРОН-SEIFERT-RM4 (R=192 мм, $CuK\alpha$ -излучение, Ni-фильтр, счетчик сцинтилляционный, фокусировка Брэгга-Брентано), а также с помощью синхротронного излучения в Международном центре синхротронного излучения при Институте ядерной физики име-

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СТАЛИ, УПРОЧНЕННОЙ ПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ WC-Co

ни А.М. Будкера СО РАН. Идентификацию фаз, присутствующих в исследуемых материалах, проводили с использованием банка данных International Centre for Diffraction Data.

Для предварительной оценки механических свойств поверхностных слоев с покрытием использовалось измерение микротвердости на приборе ПМТ-3. Прочностные характеристики композиции «основной металл - переходная зона - покрытие» определялись при одноосном растяжении плоских гантелеобразных образцов с применением машины растяжения – сжатия 2167 Р-50. Во время испытаний скорость перемещения подвижной траверсы составляла 10 мм/мин с записью диаграмм растяжения с помощью тензометрической системы на самописце ПДП4-002 в координатах «нагрузка Р – удлинение Δl ».

Оценка усталостной трещиностойкости осуществлялась по методике, основанной на построении кинетических диаграмм разрушения.

Испытания на ударную вязкость разрушения проводились с использованием маятникового копра КМ-5Т с максимальным запасом энергии 50 Дж.

Результаты исследований

В поперечном сечении стальных образцов после насыщения поверхностного слоя бором наблюдается структура, состоящая из трех характерных зон: зоны, содержащей бориды железа FeB и Fe₂B, зоны аномально грубой феррито-перлитной структуры стали (с размерами зерен до 1,6 мм) и зоны исходной структуры (рисунок 1).

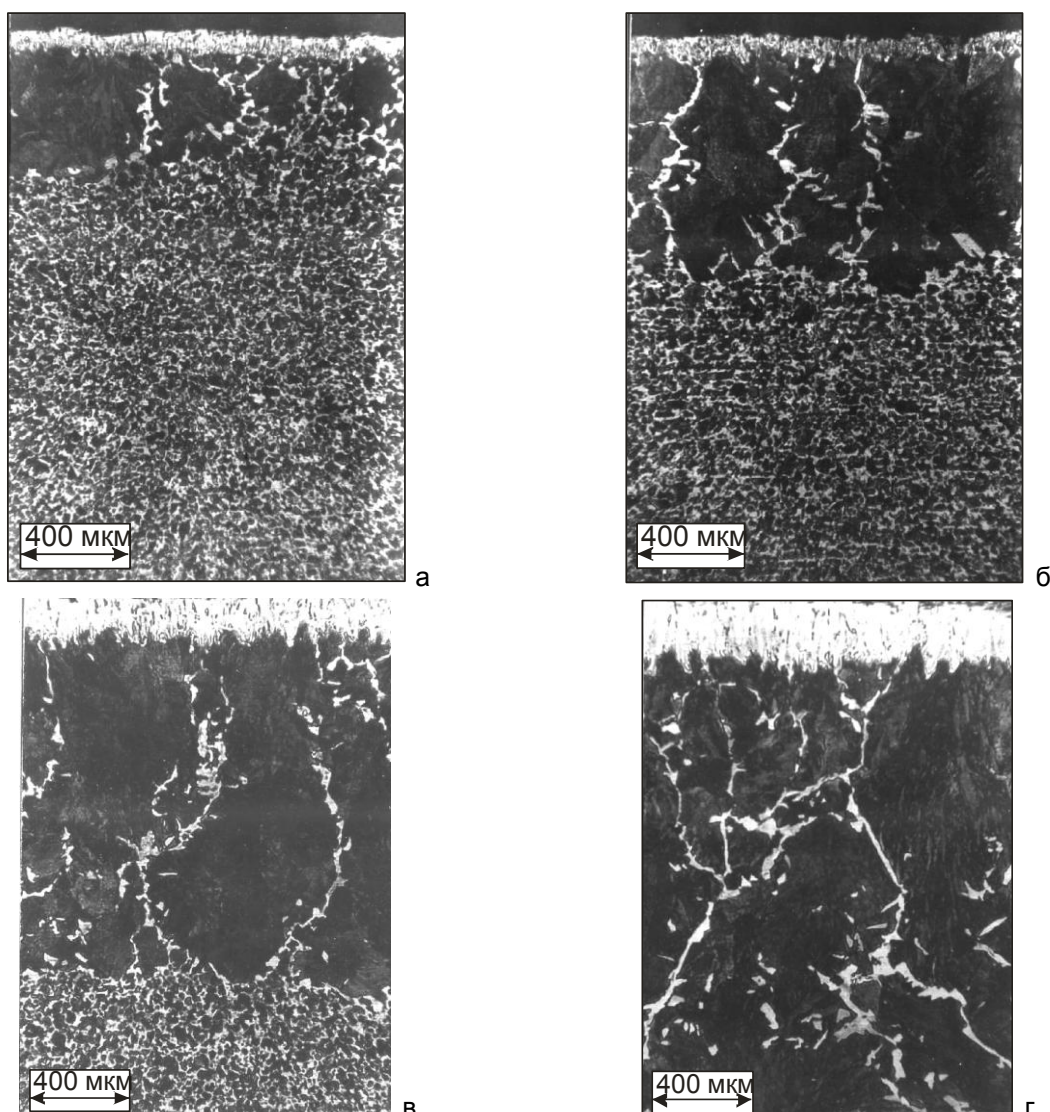


Рисунок 1 – Структура стали 45 после борирования в течение 6 часов при температуре 850 °C (а), 900 °C (б), 950 °C (в), 1000 °C (г)

Зона крупных зерен увеличивается с ростом температуры борирования. Насыщение поверхностного слоя бором приводит к снижению температуры плавления и температуры рекристаллизации стали и, как следствие, к быстрому росту зерна в зоне, прилегающей к борированному слою. Время борирования от 1 до 6 часов не оказывает существенного влияния на величину зерна.

Температура борирования основы определяет структуру и свойства поверхностного слоя после спекания порошковой смеси WC-Co. Так, например, толщина переходного слоя с увеличением температуры борирования от 850 до 1000 °С увеличивается от 25 до 150 мкм. С увеличением толщины борированной зоны поверхностного слоя возрастает количество жидкой фазы, образующейся в процессе спекания покрытия. Структура поверхностного слоя с покрытием (рисунок 2) состоит из:

- покрытия, содержащего частицы карбида вольфрама, связанные материалом связи (Co – Co₂B и Fe – Fe₂B);
- переходного слоя, состоящего из разветвляющихся дендритов эвтектик Fe – Fe₂B и Co – Co₂B;

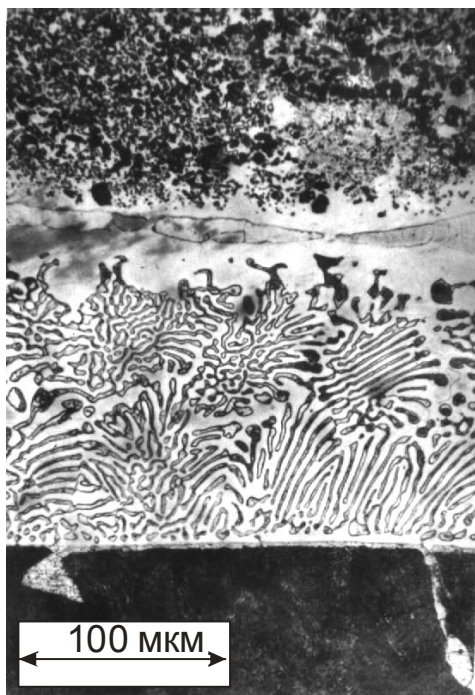


Рисунок 2 – Структура переходного слоя между спеченным покрытием и борированной сталью 45. Время борирования 6 часов, температура борирования 1000 °С, температура спекания 1175 °С

- материала основного металла (стали 45).

Оптимизация температурно-временных режимов спекания покрытий на предварительно борированной стали не позволяет полностью исключить образование сложных карбидов Fe₃W₃C (не более 5 % от объема). Это становится возможным при введении в твердосплавную порошковую смесь бора аморфного в виде порошка. Однако, при спекании на стальной поверхности порошковой смеси WC-Co-B образуется переходная зона, толщина которой соизмерима с толщиной твердосплавного слоя (рисунок 3). Кроме того, существенное влияние на качество поверхностного слоя оказывает равномерность распределения бора и кобальта. Недостаток бора приводит к локальному образованию сложного карбида, его избыток – к образованию пор. Как поры, так и сложные карбиды снижают механические свойства поверхностного слоя и являются нежелательными. Увеличение времени спекания приводит к увеличению объемной доли частиц сложного карбида Fe₃W₃C независимо от количества бора, введенного в порошковую смесь или в химический состав предварительно борированной стали.



Рисунок 3 – Поперечный шлиф покрытия на основе порошковой смеси WC-Co(BK15)+2%B после жидкофазного спекания на подложке из стали У10

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА СТАЛИ, УПРОЧНЕННОЙ ПОКРЫТИЕМ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ WC-Co

Температура борирования стальной основы, определяя структуру поверхностного слоя, влияет на износостойкость и ударную вязкость композиции «борированная сталь – твердосплавное покрытие». В то же время, продолжительность процесса борирования, от которой также зависит толщина борированного слоя, не оказывает существенного влияния на указанные характеристики конструктивной прочности композиции. Увеличение температуры предварительного борирования от 850 до 1000 °С позволяет повысить износостойкость покрытия при трении о закрепленные частицы абразива от 4,9 до 7,6 раз в сравнении с эталоном из отожженной стали 45. В сравнении с износостойкостью металлокерамического твердого сплава ВК20 износостойкость полученных покрытий составляет 0,8...0,9. Исследования поверхности трения показали, что в материале покрытия преобладает селективный износ, т.е. имеет место изнашивание материала связки покрытия и последующее выкрашивание частиц упрочняющей фазы (рисунок 4).

Измерение твердости связки спеченного покрытия позволило сделать вывод о ее корреляции с износостойкостью. Увеличение температуры борирования приводит к увеличению твердости связки спеченного покрытия. Испытания вольфрамкобальтовых покрытий в условиях трения скольжения по схеме диск - плоскость показали, что скорость изнашивания покрытия в 5 раз меньше скорости изнашивания быстрорежущей стали Р18 и соизмерима со скоростью изнашивания твердого сплава.

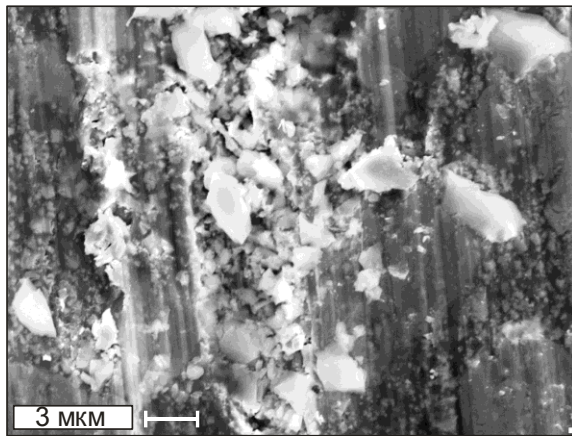
Динамические испытания образцов из стали 45 с вольфрамкобальтовыми покрытиями на основе ВК6 толщиной 200 мкм свидетельствует о том, что ударная вязкость полученных композиций снижается с увеличением температуры предварительного борирования от 39 до 6 Дж/см² (рисунок 5а). Увеличение продолжительности борирования от 1 до 6 часов при 900 °С не приводит к резкому снижению ударной вязкости (рисунок 5б). Следовательно, данная характеристика определяется в большей степени структурным состоянием основного металла, чем толщиной переходного слоя.

На основании фрактографических исследований изломов композиций "сталь 45 (предварительное борирование) – покрытие на основе вольфрамкобальтовой порошковой смеси" можно сделать вывод о том, что основной металл разрушается по механизму скола с ярко выраженным ручьистым изломом. Анализ результатов проведенных исследований свидетельствует о незначительной доле пластической деформации материала (рисунок 6).

Проведенные исследования влияния режимов предварительного борирования основы на способность композиции сопротивляться распространению трещины при циклическом нагружении также показали отрицательное влияние повышения температуры (рисунок 7). На поверхности излома композиции «сталь 45 (борирование 850 °С, 6 часов) – вольфрамкобальтовое покрытие» наблюдаются бороздки усталостного разрушения под углом 45° (рисунок 8). Также видно, что разрушение переходного слоя развивалось позднее, чем разрушение основы и покрытия.

При проведении прочностных испытаний было обнаружено, что растягивающие напряжения вызывают поперечное растрескивание покрытия. Отслоения покрытий от основного металла не наблюдается. Такой результат объясняется высоким уровнем адгезионной прочности покрытий. Увеличение температуры предварительного борирования стали 45 от 850 до 1000 °С приводит к снижению предела прочности образцов с покрытиями от 640 до 460 МПа, а относительного удлинения - от 5,5 до 1,2%.

Испытания образцов из стали 45 после борирования без нанесения покрытий выявили аналогичные зависимости предела прочности и относительного удлинения от температуры борирования. Нанесение покрытий не отражается на прочностных свойствах борированной стали 45, однако приводит к значительному снижению характеристик пластичности. Термическая обработка образцов с вольфрамкобальтовыми покрытиями (закалка от 850 °С в масло, отпуск 300 °С) позволяет повысить предел прочности на 20 % и относительное удлинение примерно на 30 %.



а



б

Рисунок 4 – Поверхность покрытия после изнашивания о закрепленные частицы абразива. Износ связи (а), выкрашивание частиц карбида вольфрама (б)

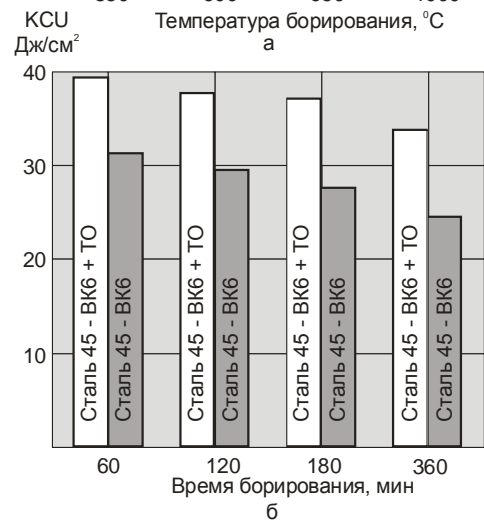
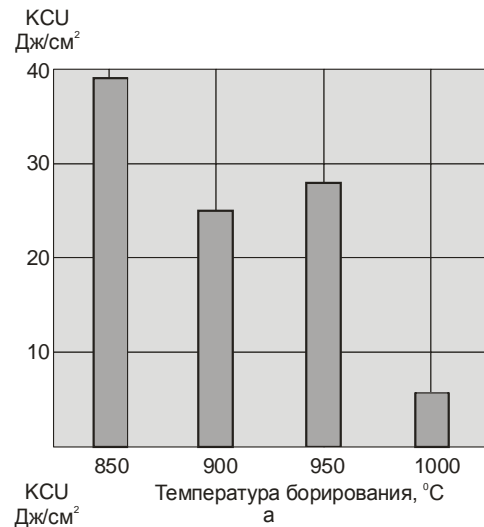


Рисунок 5 – Ударная вязкость композиции «сталь 45 – покрытие». Серые поля – композиция до термообработки (ТО). Время борирования 6 часов (а), температура борирования 900 °С (б)

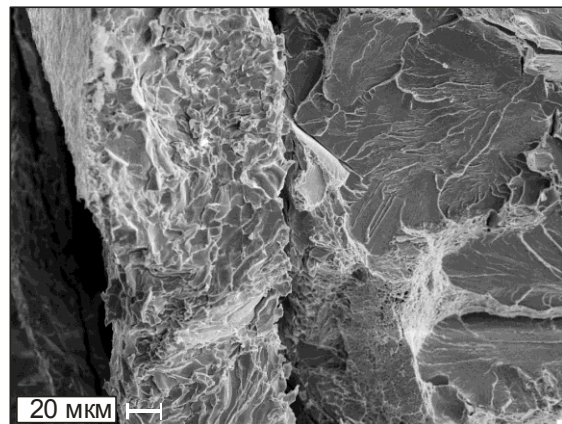
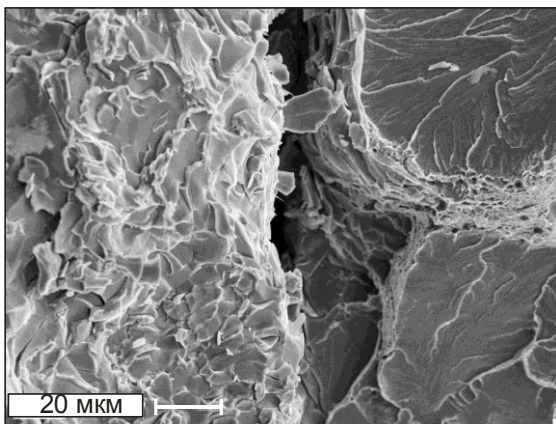


Рисунок 6 – Фрактограммы излома композиции «сталь 45 – покрытие»

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА СВОЙСТВА СТАЛИ, УПРОЧНЕННОЙ ПОКРЫТИЕМ
НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ WC-Co**

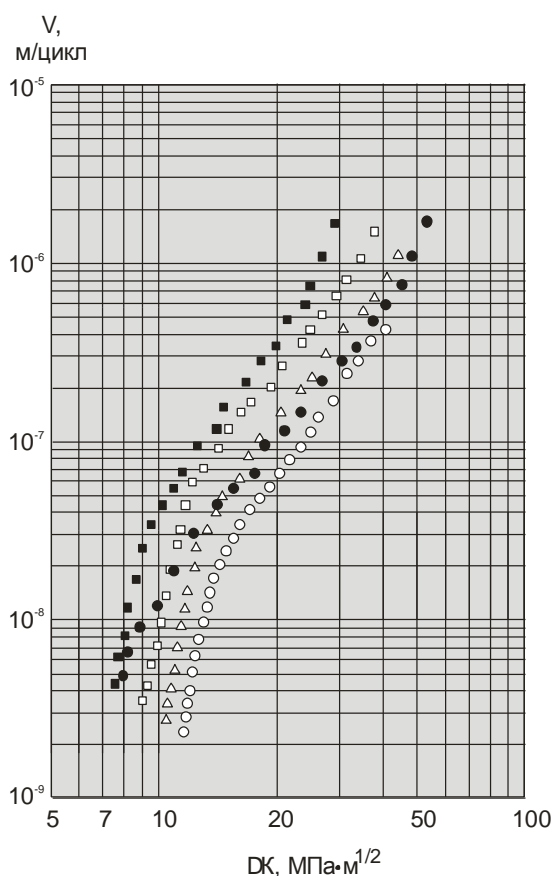


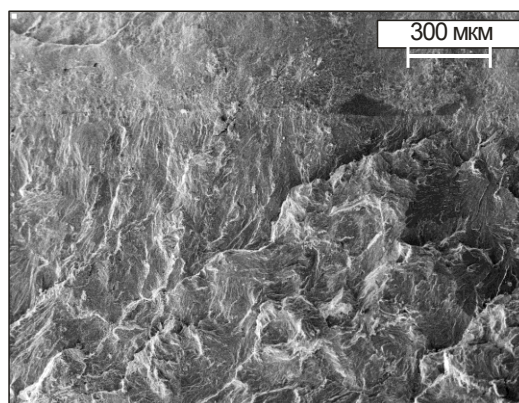
Рисунок 7 – Кинетические диаграммы разрушения стали 45 после предварительного борирования и спекания покрытия.

- – отжиг 900 °С без покрытия;
- – борирование 850 °С, 6 часов;
- △ – борирование 900 °С, 6 часов;
- – борирование 950 °С, 6 часов;
- – борирование 1000 °С, 6 часов;

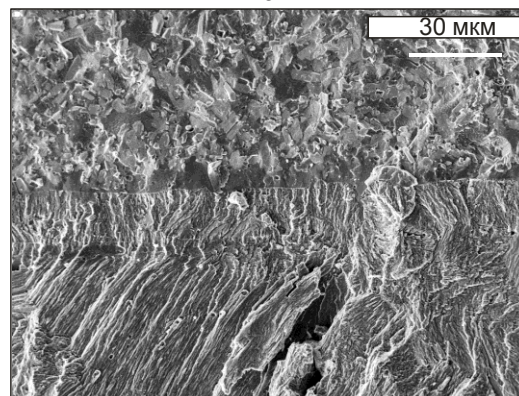
Выводы

1. Получены зависимости структуры и свойств формируемых покрытий от параметров предварительного борирования основного металла. Установлено, что рост температуры предварительного борирования стали 45 от 850 до 1000 °С приводит к увеличению толщины переходного слоя между покрытием, спеченным на оптимальных режимах, и основным металлом от 25 до 150 мкм, повышению значений микротвердости покрытий от 11700 до 15500 МПа, относительной износостойкости покрытия в условиях трения о закрепленные частицы абразива от 4,9 до 7,6. В сравнении с металлокерамическим твердым сплавом ВК20 износостойкость полученных покрытий составляет 0,8...0,9.

2. Ударная вязкость стальных образцов с вольфрамкобальтовыми покрытиями снижается с увеличением температуры предварительного борирования от 39 до 6 Дж/см². Анализ поверхностей изломов динамически ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2 (ч. 2) 2005



а



б

Рисунок 8 – Фрактограммы излома композиции при усталостном циклическом нагружении. Направление распространения трещины справа налево.

разрушенных образцов свидетельствует о проявлении квазихрупкого скола, характерно для перегретой стали. Термическая обработка композиции «сталь - вольфрамкобальтовое покрытие» позволяет увеличить долю пластической составляющей в основном металле и переходном слое, что повышает значения ударной вязкости в 1,5 раза.

3. Увеличение температуры предварительного борирования стали 45 от 850 до 1000 °С приводит к снижению предела прочности образцов с покрытиями от 640 до 460 МПа, а относительного удлинения - от 5,5 до 1,2 %. Нанесение вольфрамкобальтовых покрытий на сталь 45 (после борирования) не ухудшает прочностные показатели (σ_B , σ_T) в сравнении с борированной сталью 45, однако приводит к снижению характеристик пластичности.

Новосибирский государственный технический университет