

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ БЕЗВОЛЬФРАМОГОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА, ШЛИФОВАННОГО КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

В данной статье освещены проблемы создания и эксплуатации безвольфрамового твердого сплава. Показаны причины нестабильности этих сплавов в процессе резания и их разрушения. Исследования выполнены с использованием спектрального и электронноскопического анализов.

Ключевые слова: безвольфрамовый твердый сплав, режущий инструмент, технология затачивания, автоматизированное производство, стойкость, дефектный слой, комбинированная обработка, качество инструмента.

Безвольфрамовые твердые спеченные сплавы (БВТС) появились еще в начале 30-х годов прошлого века, но не получили большого распространения из-за недостаточно высокой прочности и были вытеснены сплавами групп ВК, ТК и ТТК. Нарастающий во всем мире быстрыми темпами дефицит вольфрама заставил в конце 50-х годов вновь заняться поисками твердых сплавов, не содержащих вольфрам.

Проведенные исследования показали, что в качестве заменителя карбида вольфрама можно использовать либо карбиды металлов IVa — VIa групп периодической системы, либо другие твердые тугоплавкие соединения (нитриды, бориды, силициды) этих металлов. С 1973 года в нашей стране выпускаются БВТС на основе карбида титана (МНТ-А2 и сплавы группы ТН) карбо — нитрида титана (группа КНТ) сложного карбида титана и ниобия (группа ТМ) [1].

Появлению сплавов на основе карбида титана способствовали научные исследования, установившие благоприятное влияние на свойства сплавов мелкозернистой структуры, получаемой при добавлении молибдена. При изготовлении сплавов молибден, как правило, вводят в исходную порошкообразную смесь карбида титана с никелем в виде металлического порошка, что послужило основанием характеризовать эти сплавы как сплавы на основе карбида титана с никель-молибденовой связкой. Однако, помимо цементирующей фазы, молибден входит в состав карбидной фазы, и некоторые исследователи, относят эти сплавы к системе $TiC-Mo_2C-N$ [2].

В научной литературе практически отсутствует обоснование причин, по которым в качестве цементирующего металла для карбида титана вместо широко применяющегося в других сплавах кобальта был выбран именно никель. Известно, что в ряду металлов Fe, Co, Ni , никель в большей степени смачивает карбид титана [2].

В том, что касается выбора в качестве составляющей сплавов молибдена, следует заметить, что из исследованных добавок различных металлов к никелю, только молибден снижает краевой угол смачивания карбида титана никелем до нуля. Совершенная же смачиваемость карбида титана сплавом $Ni-Mo$ обеспечивает образование мелкозернистой структуры сплавов [3].

Карбид и карбонитрид титана недефицитны, технология их получения проста, а по твердости они превосходят карбид вольфрама, их окислостойкость выше, причем тонкая окисная пленка, образующаяся на поверхности изделий, выполняет

в процессе эксплуатации инструмента при высоких температурах роль твердой смазки. Благодаря этому сплавы имеют низкий коэффициент трения и хорошо сопротивляются износу.

Несмотря на то, что карбид вольфрама более изнаноустойчив, чем карбид титана, скорость резания при работе с инструментами из этих сплавов ограничивается из-за подверженности его растворению и диффузии при высоких температурах. Карбид титана имеет малую склонность к диффузии, поэтому твердые сплавы, получаемые на его основе, имеют высокую изнаноустойчивость при высоких температурах. Утверждается, что применение, например, сплава МНТА2 вместо ТЗОК4 повышает стойкость инструмента в несколько раз, при этом скорость резания увеличивается в 1,7 раза [3].

Наряду с преимуществами БВТС имеют и ряд недостатков, в числе которых: низкая ударная вязкость и теплопроводность, высокий коэффициент термического расширения, что обуславливает склонность к трещинообразованию при пайке и затачивании.

В качестве режущего инструментального материала БВТС рекомендуется применять при чистовой и получистовой обработке углеродистых и легированных сталей (взамен сплавов ТЗОК4 и Т15К6), а также некоторых цветных металлов и сплавов.

Использование безвольфрамовых твердых сплавов в качестве инструмента является одним из способов сократить применение дефицитного и дорогого вольфрама содержащего сырья. Известно, что только от использования одной тонны сплава КНТ экономится 2 тонны вольфрама.

Кроме того, БВТС имеют ряд преимуществ по сравнению с вольфрамосодержащими твердыми сплавами по параметрам твердости, окислостойкости, износостойкости при высоких температурах. Так, например, применение сплава МНТ-А2 повышает стойкость резцов, изготовленных из него, в 2 раза по сравнению с резцами из Т15К6. Благодаря малой склонности к схватыванию (температура схватывания БВТС со сталью в вакууме примерно на 200 °С выше, чем для сплавов группа ТК) безвольфрамовые твердые сплавы рекомендуют применять для обработки углеродистых и легированных сталей. Так, для обработки стали 45 наиболее перспективными являются сплавы КНТ-16, КНТ-20, КНТ-30; для обработки стали ШХ-15 — КНТ-16 [4].

Но следует заметить, поскольку БВТС обладают иными, чем карбид вольфрама, физико-механическими свойствами (например микротвердость

* — автор, с которым следует вести переписку.

карбида титана при микровдавливании больше в 1,42 раза, а при царапании — в 3,9 раз) шлифовать материал из этих сплавов труднее. Режущая способность алмазных кругов при этом на 15-20% ниже, чем при обработке вольфрамсодержащих сплавов, поэтому шлифование БВТС возможно только при хорошо развитом рельефе круга. Это, как уже отмечалось выше, наиболее эффективно достигается применением комбинированного метода, при котором облегчается съём разупрочненного материала и улучшаются режущие свойства алмазного круга.

Вместе с тем, наряду с положительной ролью, которую играют электрохимические процессы, они оказывают влияние на качество шлифуемой поверхности. Появляется дефект растравливания. Экспериментальные данные свидетельствуют, что увеличению дефектного слоя электрохимической природы, способствует повышение плотности тока травления. Особенно заметно это проявляется в сплавах КНТ-16, что объясняется более высоким содержанием в нем связки (Ni — 19,5 %, Mo — 6,5 %). Поэтому для изучения процесса растравливания, а также достоверности полученных данных, были выбраны и исследованы несколько образцов пластин КНТ-16.

Следует отметить, что применительно к традиционным твердым сплавам зерна карбидов и связка практически не образуют растворов и с точки зрения возможности химических и электролитических взаимодействий с электролитом могут рассматриваться независимо друг от друга. Это упрощает анализ возможных процессов, приводящих к разрушению поверхностного слоя. Неоднородность структуры твердого сплава создает локализацию отдельных физических видов взаимодействий в зоне обработки вследствие различных физико-механических и электрохимических свойств отдельных компонентов обрабатываемого материала. В результате этого возможны неравномерный разогрев отдельных участков поверхности, различная интенсивность протекаемых процессов и неравномерная плотность тока, определяющая эффективность электрохимического воздействия.

Исследования показали, что на шлифуемых поверхностях происходит интенсивное вытравливание компонента связки БВТС — никеля. Причем при малых токах травления ($i_{тр} = 10 \text{ A/cm}^2$) визуально видна граница его вытравливания. Слой, прилегающий к передней поверхности, отличается более темным цветом и проходит всей режущей кромки инструмента (на растровой фотографии он, напротив, светлее, рис.1).

Интенсивное вытравливание происходит на той части заточиваемой поверхности, которая находится под большим влиянием электролита. Как показывает спектрограмма, снятая с растравленной области, уменьшение молибдена здесь очень незначительное (рис.2).

С увеличением тока травления граница раздела пропадает, никель вытравлен по всей обработанной поверхности пластины. На спектрограмме пик никеля находится на уровне фона, количество молибдена в этом случае уменьшается та незначи-

тельно (рис.3).

Рассмотрим распределение никеля по передней поверхности пластин при токе травления, равном 10 A/cm^2 . Анализ спектрограмм показывает уменьшение содержания никеля на передней поверхности твердосплавной пластины, относительно исходного его содержания» примерно в два раза (рис.4).

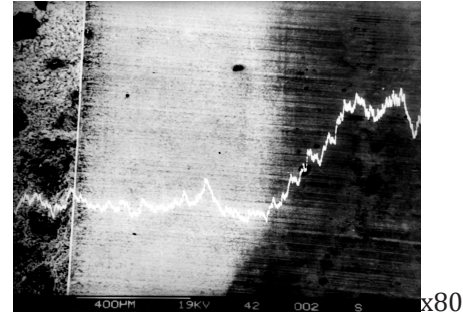


Рис.1. Вид обработанной поверхности пластины сплава КНТ-16; концентрационная кривая по никелю: $V = 35 \text{ м/сек}$, $S_{пр} = 1,25 \text{ м/мин}$, $i_{тр} = 10 \text{ A/cm}^2$; $i_{пр} = 0,2 \text{ A/cm}^2$, $t = 0,03 \text{ мм/дв.ход}$

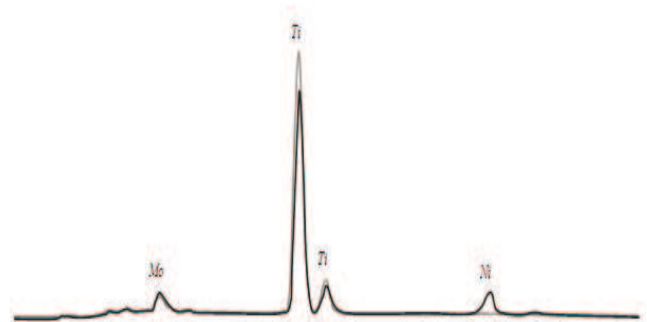


Рис.2. Спектры с обработанной поверхности сплава КНТ-16: — верх обработки ($i = 10 \text{ A/cm}^2$); — нижняя область обработки

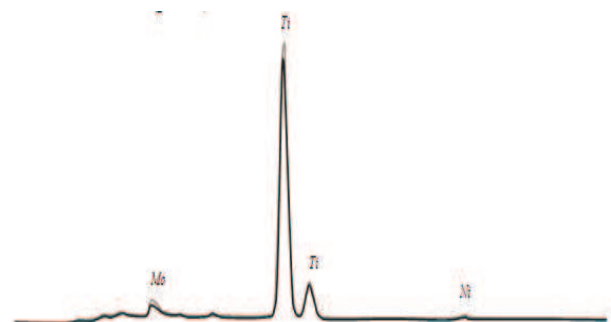


Рис.3. Спектры с заточенной поверхности пластины КНТ-16: — верхняя область обработки; — нижняя область обработки ($i_{тр} = 30 \text{ A/cm}^2$)

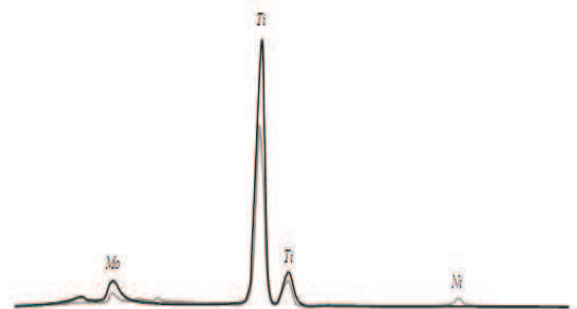


Рис.4. Спектры с передней поверхности сплава КНТ-16: — у кромки ($i_{тр} = 10 \text{ A/cm}^2$); — основа на расстоянии 150 мкм

Но следует отметить, что распределение никеля вдоль поверхности очень неравномерно, а количество его увеличивается по мере приближения к режущей кромке (рис.5). Это объясняется, очевидно, процессом перемещения частиц среды (диффузионное явление).

Так как при малом токе травления ($i_{тр} = 10 \text{ А/см}^2$) преобладает механическое резание, процесс шлифования сопровождается более высокими температурами. Вместе с тем, как было показано выше (рис.1), на верхней части обработанной поверхности, соприкасающейся с исследуемой областью, процесс шлифования сопровождался вытравливанием никеля. В этих условиях диффузия, под действием высоких температур, стремится к установлению равновесного распределения концентраций взаимодействующих элементов.

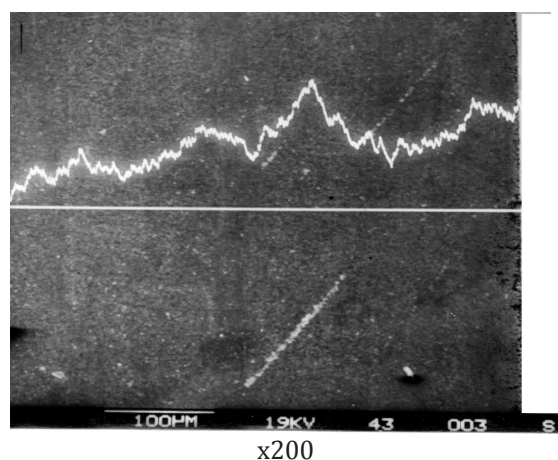
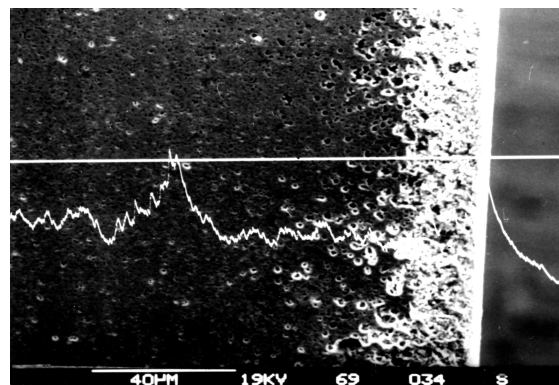


Рис.5. Общий вид передней поверхности пластины КНТ-16, шлифованной на режимах:
 $V_{кр} = 35 \text{ м/сек}$, $S_{пр} = 1,25 \text{ м/мин}$; $i_{тр} = 10 \text{ А/см}^2$; $i_{пр} = 0,2 \text{ А/см}^2$;
 $t = 0,03 \text{ мм/дв.ход}$. Концентрационная кривая по никелю

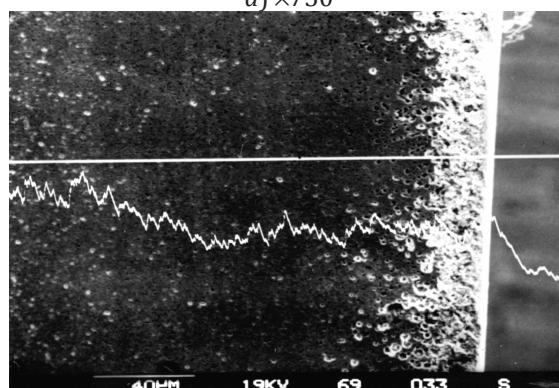
Обедненная никелем область твердосплавной пластины, а, кроме того, поверхность алмазного круга, которая во время обработки находится с ней в тесном контакте, становятся местом сосредоточения переносимого вещества. Это можно наблюдать по концентрационной кривой никеля, на передней поверхности пластины (рис.6) и спектре (рис. 7).

При достижении тока травления 40 А/см^2 растравленный слой заметно увеличивается (рис.8), а спектрограмма показывает изменение содержания молибдена. Принадлежащий ему пик в дефектном слое находится на уровне фона (рис.9).

Для проведения исследований микроструктуры сплава ТН-20 были выбраны пластины, шлифованные на различных режимах резания, которые изменялись в следующих пределах: скорость круга от 17 до 52 м/сек; продольная подача от 0,5 до 2 м/мин; глубина резания от 0,02 до 0,1 мм/дв. ход; ток правки круга от 0,2 до 1,8 А/см²; ток травления инструмента от 10 до 40 А/см².



а) $\times 750$



б) $\times 500$

Рис.6. Общий вид передней поверхности пластины КНТ-16, шлифованной на режимах: $i_{пр} = 0,2 \text{ А/см}^2$; $i_{тр} = 30 \text{ А/см}^2$; $t = 0,03 \text{ мм/дв.ход}$; $V_{кр} = 35 \text{ м/сек}$; $S = 1,25 \text{ м/мин}$. Сканограмма по никелю

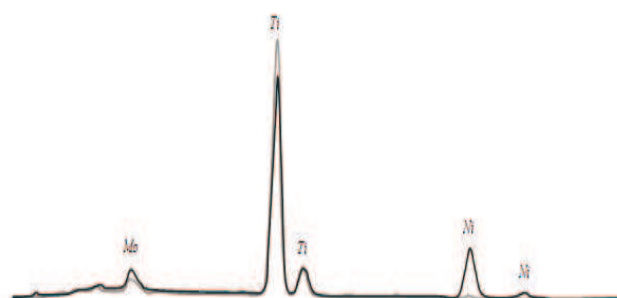


Рис.7. Спектры с поверхности сплава КНТ-16:
— растворенный слой ($i_{тр} = 30 \text{ А/см}^2$); — основа



Рис.8. Вид передней поверхности пластины КНТ-16, шлифованной на режимах:
 $V_{кр} = 35 \text{ м/сек}$; $S = 1,25 \text{ м/мин}$; $i_{тр} = 40 \text{ А/см}^2$;
 $t = 0,03 \text{ мм/дв.ход}$; $i_{пр} = 0,2 \text{ А/см}^2$

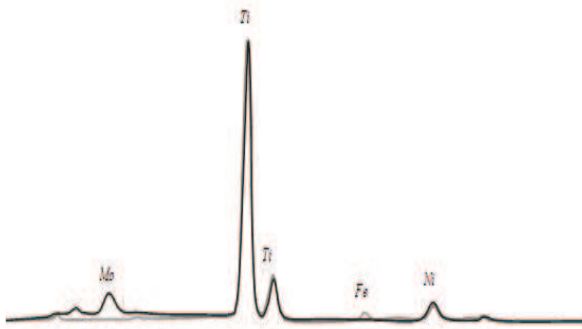


Рис.9. Спектры с передней поверхности пластины КНТ-16:
 — растравленный слой ($i_{\text{тр}} = 40 \text{ A/cm}^2$); — основа

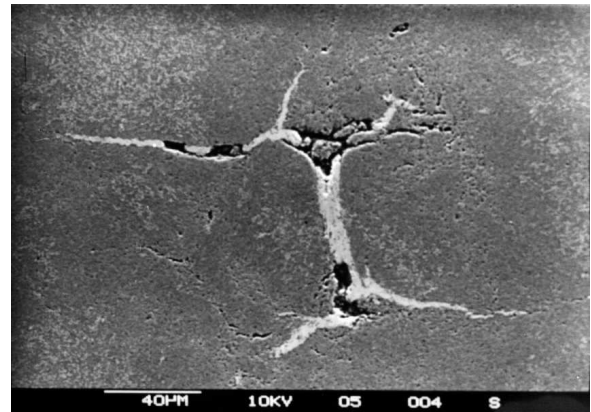
Во время металлографических исследований, с целью выявления наиболее качественно обработанных поверхностей, были обнаружены кривые белые полосы («хвосты»), которые четко выделились на фоне более темной, основной массы пластины (рис.10). В литературе аналогичное явление упоминается как неравномерное распределение цементирующей фазы [5]. Учитывая важность проблемы стабильности свойств БВТС, нами было проведено более углубленное исследование этих «хвостов». При этом, была поставлена задача: выяснить причину их появления, отличия химических и физических свойств материала хвоста. Конечной целью являлось — определить, каково их влияние на качество обработанной поверхности (в нашем случае заточенного инструмента).

Для решения этих задач наряду с металлографическими исследованиями были использованы возможности микроанализатора *Link-860*, позволившие выполнить локальный химический анализ. При исследованиях микротвердости изучаемых поверхностей использованы особенности наконечника Кнуппа твердомера малых нагрузок фирмы «WOLPERT».

При более широком металлографическом исследовании, охватывающем всю переднюю поверхность пластины, было замечено, что характерным месторасположением «хвостов» является область вдоль режущей кромки (рис.11). В середине их, как правило, нет (рис.12), или их количество и размера минимальны.

Необходимо отметить также тот факт, что на образцах, обработанных на разных режимах резания, количество и размеры «хвостов» существенно отличаются. Так как количественный критерий оценки подобрать трудно, то зависимость установленных «хвостов» от режимов резания представлена в виде качественного сравнительного анализа, позволившего сделать следующие выводы:

1. На передней поверхности пластины, шлифованной при скорости резания 26 м/сек , продольной подаче $1,25 \text{ м/мин}$, глубине резания $0,03 \text{ мм/дв.ход}$, токе травления 20 A/cm^2 , токе правки $0,2 \text{ A/cm}^2$, «хвосты» наблюдаются в небольшом количестве, кроме того мелкие и тонкие. На пластине шлифованной при скорости резания 35 м/сек , при неизменных остальных параметрах, они удлиняются, становятся шире, а их количество находится примерно в тех же пределах.

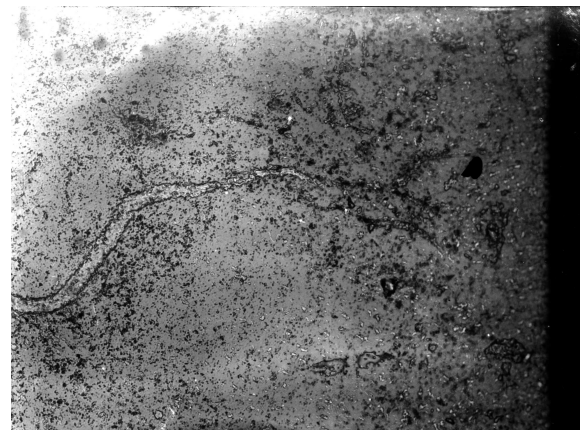


а) $\times 400$

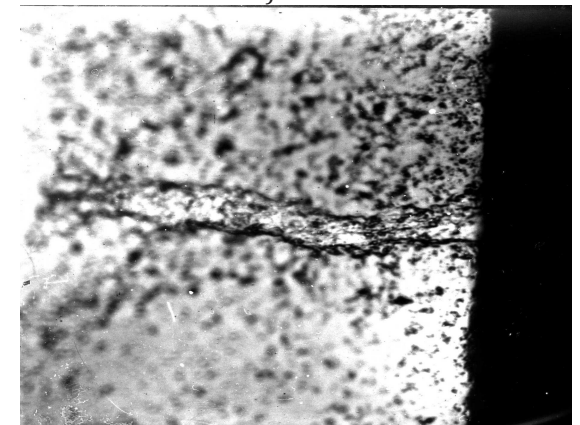


б) $\times 1000$

Рис.10. Внешний вид «хвоста» на передней поверхности шлифованной пластины TH-20 ($V = 35 \text{ м/с}$; $S = 2 \text{ м/мин}$; $i_{\text{тр}} = 20 \text{ A/cm}^2$; $i_{\text{пр}} = 0,2 \text{ A/cm}^2$; $t = 0,03 \text{ мм/дв.ход}$)



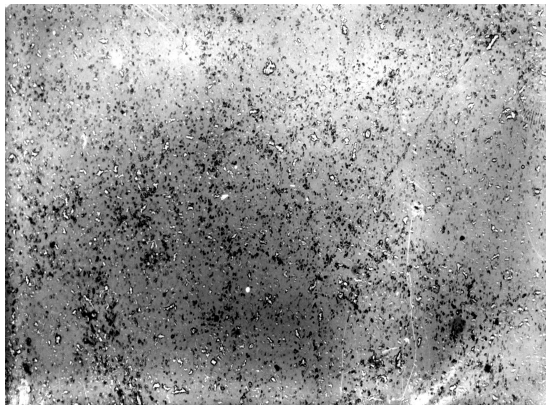
а) $\times 400$



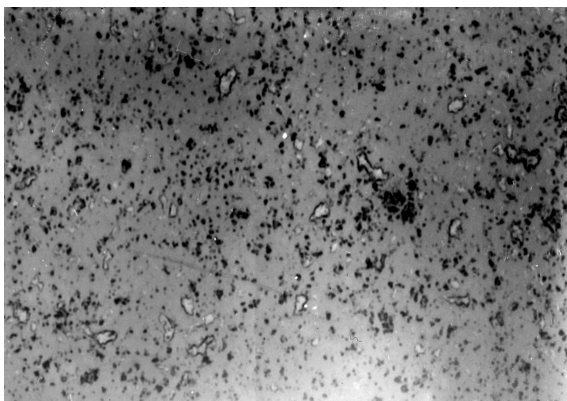
б) $\times 1000$

Рис.11. Передняя поверхность пластины TH-20.
 а – околоромочная область; б – ромочная область.

При дальнейшем увеличении скорости до 52 м/сек явного изменения размеров «хвостов» не замечено, но количество их возрастает, хотя и незначительно.



а) ×400

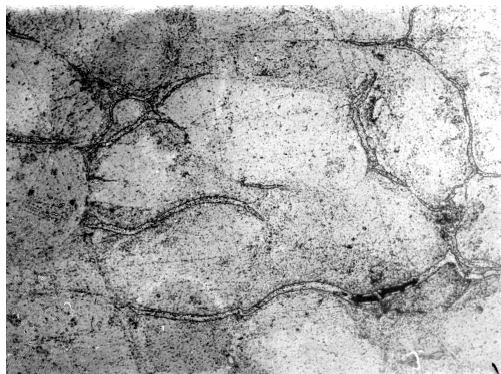


б) ×1000

Рис. 12. Середина передней пластины ТН-20, шлифованной на режимах:

$V_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 1,25$ м/мин; $t = 0,1$ мм/дв.ход;
 $i_{пр} = 20$ А/см²; $i_{пр} = 0,2$ А/см²

2. При скорости круга 35 м/сек и при увеличении глубины шлифования от 0,03 до 0,1 мм/дв. ход наблюдается резкое возрастание концентрации «хвостов» на поверхности пластины. Покрывая околокромочную поверхность этого сплава, они образуют своеобразную сетку (рис.13).



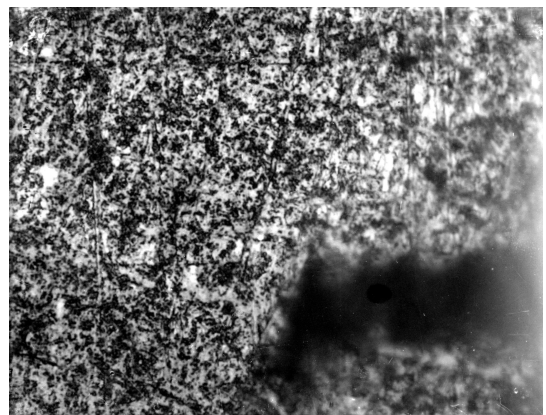
×100

Рис.13. Передняя поверхность пластины ТН-20 (околокромочная область). Режимы шлифования:
 $V = 35$ м/мин; $S = 1,25$ м/мин; $t = 0,1$ мм/дв.ход;
 $i_{пр} = 20$ А/см²; $i_{пр} = 0,2$ А/см²

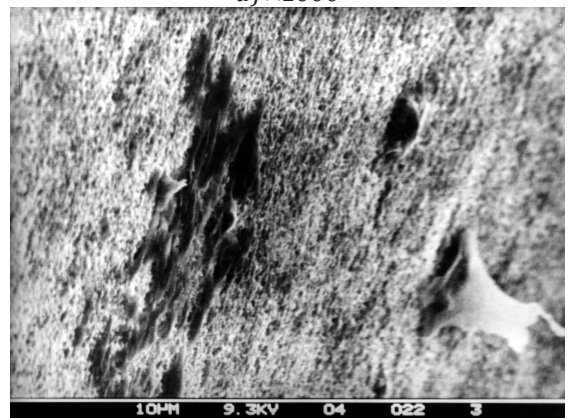
3. Аналогичные изменения на пластинах ТН-20 можно наблюдать и при возрастании продольной подачи до 2 м/мин. В связи с этим следует упомянуть известный факт, что при увеличении параметров шлифования (скорости круга, продольной и поперечной подач) в зоне обработки возрастает контактная температура, играющая роль катализатора в образовании подобного дефекта.

4. Увеличение тока травления пластины не влияет на количественные характеристики «хвостов», но приводит к потемнению их окраски. Это свидетельствует о присутствии здесь в большом количестве элементов, более легко поддающихся растравливанию.

После дополнительного травления образцов смесью плавиковой и азотной кислот «хвосты» растворились, окраска их стала темнее, а контура более четкими (рис.14).



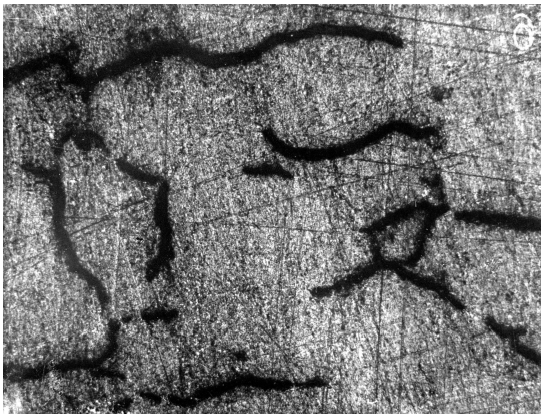
а) ×1000



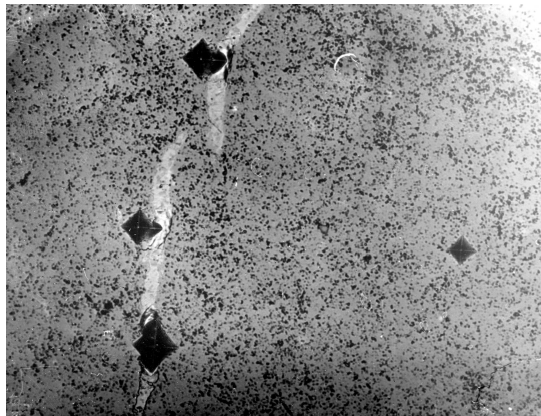
б) ×7500

Рис.14. Передняя поверхность пластины ТН-20 (после применения травителя)

Наряду с отличием в химическом составе, наблюдается значительная разница в микротвердости основного материала пластины ТН-20 и «хвоста». Обычное определение твердости с помощью таблиц производится по числовому значению, полученному путем деления суммы величин обеих диагоналей ромбического отпечатка алмазной пирамиды Виккерса пополам. Но верное значение твердости применение пирамиды Виккерса не дает, так как в материал «хвоста» обе диагонали попасть не могут. Концы одной из них упираются в основу твердого сплава и сдерживают распространение отпечатка (рис. 15).

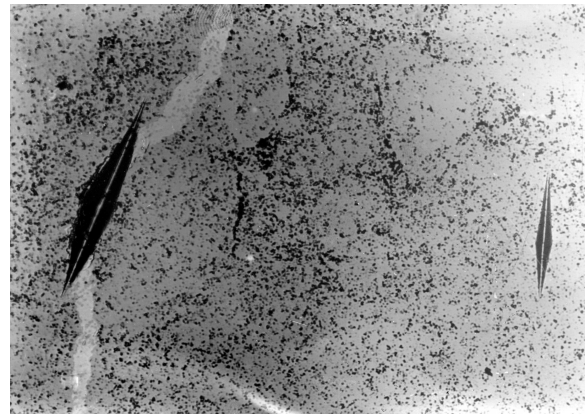


×100



×400

Рис.15. Вид передней поверхности пластины ТН-20, после травления



×400

Рис.16. Отпечатки наконечника Кнуппа на различных участках передней поверхности пластины ТН-20

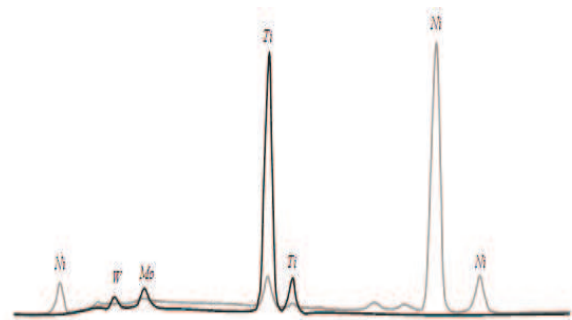


Рис.17. Спектр с поверхности сплава ТН-20: — «хвост»; — основа

Поэтому несмотря на то, что значение твердости по Кнуппу существенно отличаются от общепринятых (по Виккерсу и Бриннелю) измерение микротвердости проводилось с использованием наконечника Кнуппа (рис.16).

Уколы производились на разных образцах пластин и на различных расстояниях от режущей кромки. Обработанные с помощью специальной методики результаты приведены в табл.1. Измерения показали, что твердость материала «хвоста» ниже твердости пластины, более чем в два раза.

Таблица 1

Экспериментальные данные исследования микротвердости передней поверхности пластин ТН-20

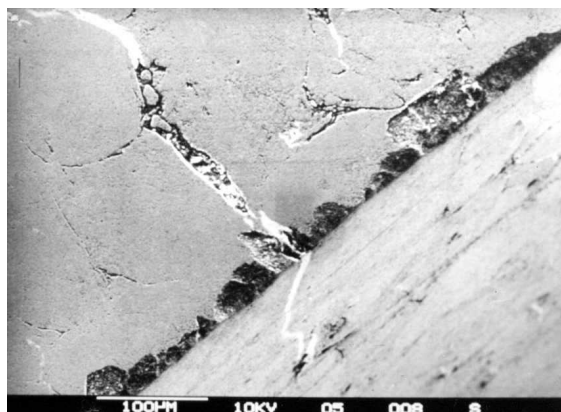
Место укола	Значение твердости по Кнуппу		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
«Хвост»	898	626	1012
Основной материал пластины	1850	1630	выше шкалы

Для определения точного химического состава «хвостов» нами был проведен спектральный анализ, который показал, что их основу составляет компонент связки пластины – никель.

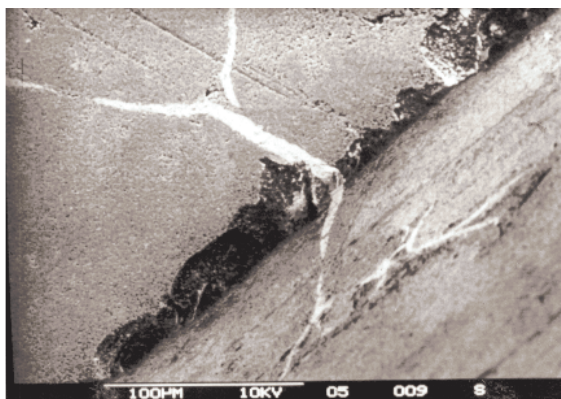
На спектре, снятом с «хвоста», пик никеля поднимается до максимальной, для этого масштаба высоты, линия титана резко падает до уровня обычного содержания молибдена, а количество второго компонента связки — сплава ТН-20, молибдена, вообще снижается до нулевого уровня (рис.17). Нетипичен для этих сплавов и спектр, снятой с соседней с «хвостом» области пластины. Содержание титана и молибдена находится здесь, по всей вероятности, в обычной своей концентрации, количество никеля резко снижено, а на спектрограмме он находится на нулевом уровне.

Таким образом, никель, который должен был служить связкой карбидам титана и частично образовавшимся карбидам молибдена (т.к. некоторые исследователи считают, что молибден помимо цементирующей фазы, входит в состав карбидной) выделился, очевидно, в самостоятельные образования, обеднив при этом близлежащие области, твердого сплава.

Известно, что карбид титана имеет невысокую прочность на скалывание, а инструментальные материалы с высоким содержанием карбида титана хрупки и склонны к излому. Поэтому неравномерное распределения связки по объему пластины в этом случае будет создавать наиболее слабые области, благоприятные для поломки инструмента (рис.18).



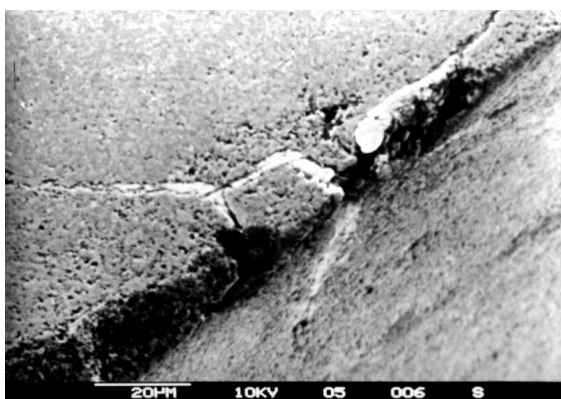
а) ×200



б) ×300



а) ×800



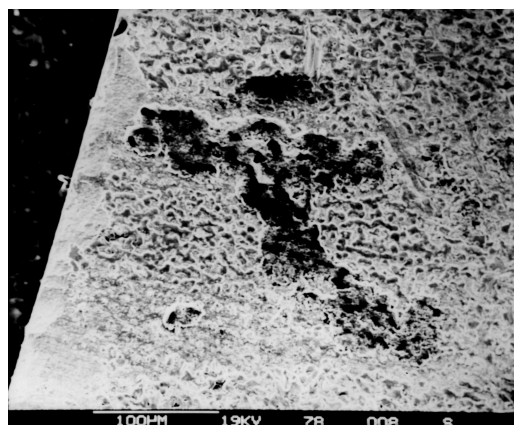
б) ×800

Рис.18. Вид «хвостов» и состояние режущей кромки, отображенных на передней и задней поверхностях:
а - передняя поверхность;
б - задняя шлифованная поверхность

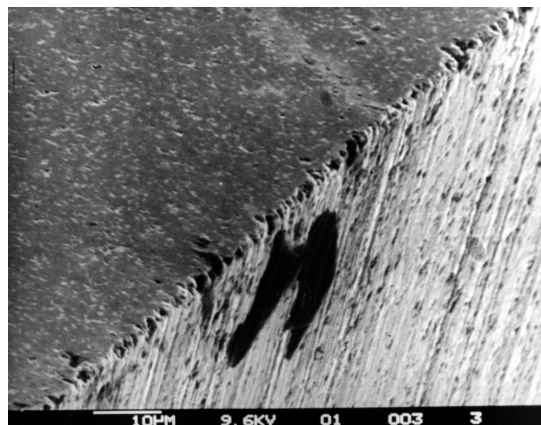
Кроме того, высокие температуры, сопровождающие процесс лезвийной обработки, приводят к возникновению напряжений. Так как коэффициенты линейного расширения карбидов и цементующей фазы различны между собой, возникают объемные изменения по глубине пластины и, как следствие этого, высокие напряжения, могущие стать причиной трещинообразования.

Для выяснения причины возникновения «хвостов» из той же партии пластин БВТС была выбрана пластина, не подвергавшаяся шлифованию. После легкой полировки алмазной пастой образец изучался на металлографическом микроскопе. При этом на поверхности пластины было обнаружено почти сходное явление: здесь «хвосты» имели несколько иную форму (рис.19). Спектрограмма, снятая с поверхности этого образования, показала состав в основном аналогичный полученному ранее с «хвоста» шлифованной пластины.

Таким образом, причина появления «хвостов» кроется, очевидно, также и в технологии изготовления твердосплавных пластин. Считается [6], что прочные и твердые сплавы можно получить только при достаточно длительном размоле смеси.



а) ×250



б) ×1600

Рис.19. Общий вид необработанной поверхности пластины ТН-20

Вероятней всего, причину возникновения описанного выше дефекта следует искать именно на этой стадии технологического процесса.

В связи с этим возникает вопрос о преимущественном расположении скоплений никеля вдоль режущей кромки и больших их количествах на пластинах, шлифованных на повышенных режимах резания.

Можно считать, что если в результате прессования в одной заготовке будут участки с различной плотностью, это не означает различие их свойств в спеченном изделии. В целом такое изделие не должно отличаться по свойствам от получаемого из заготовки с равномерной плотностью. Кроме того, авторы работы показали, что при исследовании микроструктуры участков образца твердого сплава с разной плотностью, различий не наблюдается. Поэтому вероятнее всего, связать полученный факт расположения "хвостов" с процессом шлифования пластин [7].

Очевидно, что области на исходных пластинках сплава ТН-20, которые содержали более значительное количество никеля, во время обработки пластин стали центром, куда в результате действия высоких температур и давлений начал стягивать никель из соседних участков. Это подтверждается тем фактом, что большее количество и размеры хвостов были на пластинках, процесс обработки которых сопровождали более высокие температуры резания. Отсюда и повышенная концентрация никелевых скоплений в околосромочных областях.

Таким образом, исследования поверхностей безвольфрамовых твердых сплавов показывают, что при электроалмазном шлифовании они разрушаются. С одной стороны это облегчает процесс резания, а с другой оставляет на контактирующих поверхностях дефектный слой, в виде растравливания структуры БВТС. Исследования показали, что скопления никеля в пластинках ТН-20

ответственны за работоспособность безвольфрамового твердого сплава. Установлено, что количество этих скоплений под действием высоких температур в зоне резания увеличивается, механическая прочность обработанных поверхностей резко снижена.

Литература

1. Малевский, Н. П. Особенности алмазного шлифования безвольфрамовых твердых сплавов / Н. П. Малевский, С. А. Попов, Н. С. Тарахов // Вестн. машиностроения. — 1976. - № 12. — С. 53 — 55.
2. Захаренко, И. П. Рациональное использование сверхтвердых абразивных материалов в инструментальном производстве / И. П. Захаренко. — Киев : Наукова думка, 1979. — 160 с.
3. Кабановский, Л. Н. Качество поверхности безвольфрамовых твердых сплавов при шлифовании алмазными кругами / Л. Н. Кабановский, Ф. П. Смагленко, Л. И. Александрова // Сверхтвердые материалы. — 1987. — № 5. — С. 60 — 65.
4. Урин, А. М. К вопросу заточки пластин из безвольфрамовых твердых сплавов / А. М. Урин, Я. Л. Фельдштейн // Применение в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении лезвийного инструмента из БВТС и СТМ. — Ташкент, 1977. — С. 53 — 58.
5. Краснощек, Ю. С. Влияние условий шлифования на состояние поверхностного слоя и износостойкости резцов из сплава ТН-20 / Ю. С. Краснощек, Б. М. Свердлова // Резание инструмента : респ. межвуз. науч.-техн. сб. — Харьков : Вища шк., 1989. — Вып. 40. — С. 49 — 52.
6. Лавриненко, В. И. О выборе эффективности состава СОЖ для алмазного шлифования безвольфрамовых инструментальных материалов / В. И. Лавриненко, О. М. Дегтяренко, Е. Т. Удод // Резание и инструмент : респ. межвуз. науч.-техн. сб. — Харьков : Вища шк., 1988. — Вып. 39. — С. 62 — 68.
7. Янюшкин, А. С. Контактные процессы при шлифовании / А. С. Янюшкин, В. С. Шоркин. — М. : Машиностроение, 2004. — 242 с.