

УВЕЛИЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПОКРЫТЫХ НИТРИДОМ ТИТАНА ПРИ ОБРАБОТКЕ СПЕЦИАЛЬНО РАСКИСЛЕННЫХ СТАЛЕЙ

З. ПАЛМАИ

Кафедра технологии машиностроения,
Будапештский технический Университет, H-1521 Budapest

Поступило: 15 ноября 1983 г.

Представлено: Проф. Др. М. Хорватх

Summary

Through the use of PVD coating procedure it became possible to increase the life of high-speed steel cutting tool edges, by TiN coating. In addition, the thermal load of the tool can also be increased. This latter fact and the crystal structure of the TiN layer enable in a favourable case the inclusions of the machined steel to form a protective layer on the surface of the tool subject to wear.

This layer consisting of silicates and sulfides results in a further expansion of the tool life and significantly widens the field of application of high-speed steel cutting tools towards the carbides.

Введение

Высокая температура, давление, а также динамический характер нагрузки возникающие при резании в инструменте, выдвигают такие требования для материалов инструмента, которые можно удовлетворять только компромисно. Как правило, чем лучше износостойкость инструмента, тем менее он способен сопротивляться динамическим нагрузкам. Эта способность инструментальных материалов показана на рис. 1, где приведены ведущие группы этих материалов. Видно, что они расположены в такой области, где вязкость и износостойкость обратно пропорциональны.

Давно стремятся приблизить друг к другу свойства быстрорежущей стали и благоприятные свойства твердого сплава, по возможности развивая такие инструментальные материалы, которые сочетают в себе тепло- и износоустойчивость твердого сплава с вязкостью быстрорежущей стали. Это пытаются достичь с одной стороны, увеличением вязкости твердого сплава, с другой стороны повышением горячей износостойкости быстрорежущих сталей.

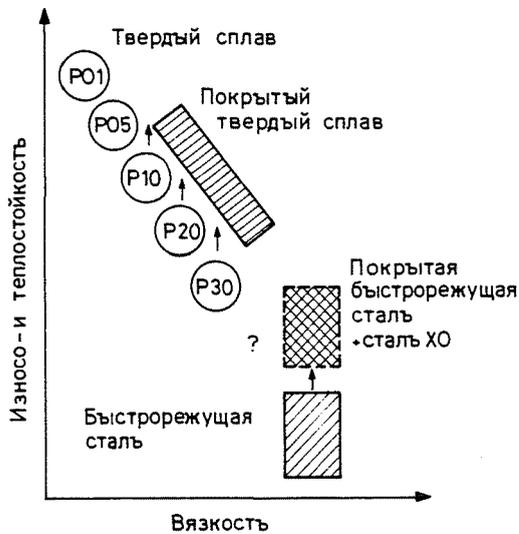


Рис. 1. Связь между износостойкостью и вязкостью инструментальных материалов

Полноценное решение этой проблемы пока не удалось найти [1]. На рис. 1 на это указывает пустое поле, обозначенное вопросительным знаком. Таким образом, в производстве применяются или твердые сплавы, но в этом случае не продуктивно используются ценные, в первую очередь вольфрам- и кобальтосодержащие материалы, или же применяется быстрорежущая сталь, производительность которой намного ниже.

Нашей работой мы хотели способствовать решению этой проблемы.

В начале 1960-х годов большой интерес представили те исследования, с помощью которых обнаружили связь между обрабатываемостью сталей, включениями и продуктами раскисления, находящимися в сталях. Определили, что в благоприятном случае на поверхности твердосплавного инструмента образуется тонкий силикатный слой, который затормаживает износ, благодаря чему стойкость инструмента в несколько раз увеличивается [2—4]. Такой защитный слой показан на рис. 2 (σ).

Стало очевидным, что это положительное, ранее случайно достигавшееся явление, в результате чего стойкость инструмента стала большей [5], можно получить преднамеренно. Условия для этого следующие:

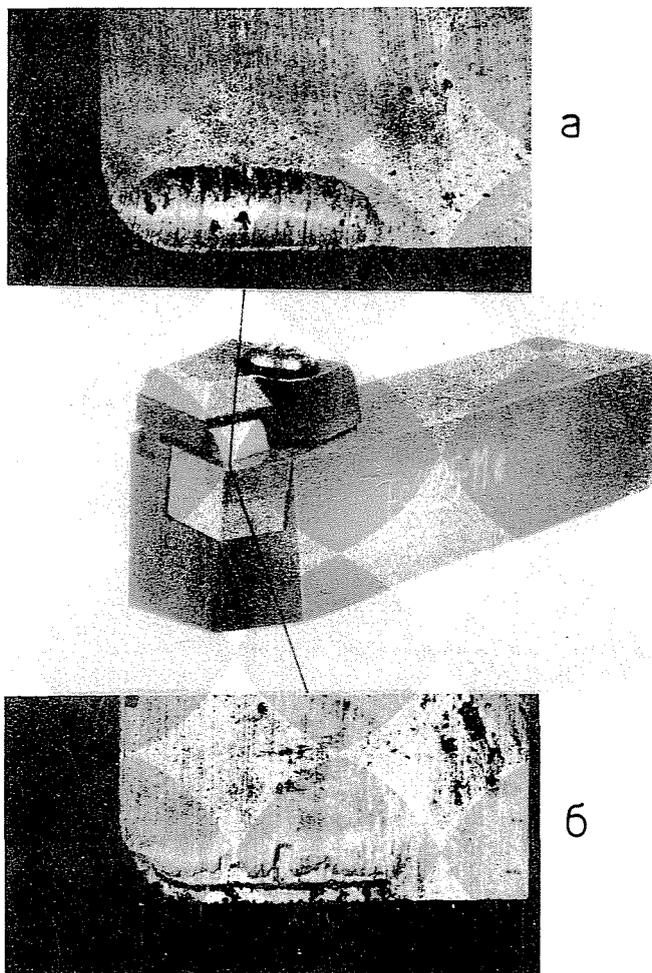


Рис. 2. Передняя поверхность инструмента после точения а) обыкновенной, б) хорошо обрабатываемой стали (ХО), образующей неметаллический нарост

а) При производстве стали надо применять такую специальную технологию раскисления, в результате которой постоянные неметаллические включения в стали были бы пластичными, т. е. такими, которые в условиях горячей деформации, стружкоотделения способны деформироваться и выполнять роль смазки на поверхности инструмента. Удалось разработать такую технологию раскисления [6—9] и получить хорошо обрабатываемые стали (ХО), которые образуют неметаллический защитный слой.

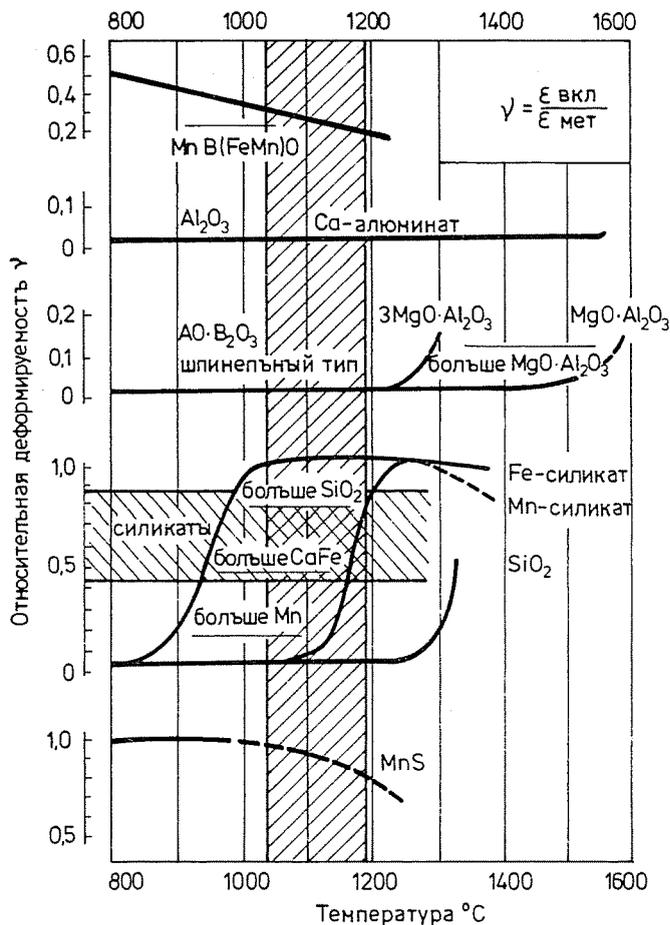


Рис. 3. Влияние температуры на деформируемость включений отнесенной к деформируемости основного металла

Важно, чтобы зависимость между горячей деформируемостью включений и стальной матрицей была соответствующей [10—12]. Не только хрупкие, но и чрезмерно пластичные включения, выжимаясь из стружки, не могут играть роль смазки инструмента.

На рис. 3 на диаграмме Кисслинга [13] показана та область относительной деформации включений, при которой можно ожидать образование защитного слоя. Рис. 4 показывает поведение различных включений в продольном сечении стружки. Защитный слой образуется только в случае б). Очень пластичные включения остаются в стружке, а хрупкие не переходят на поверхность инструмента.

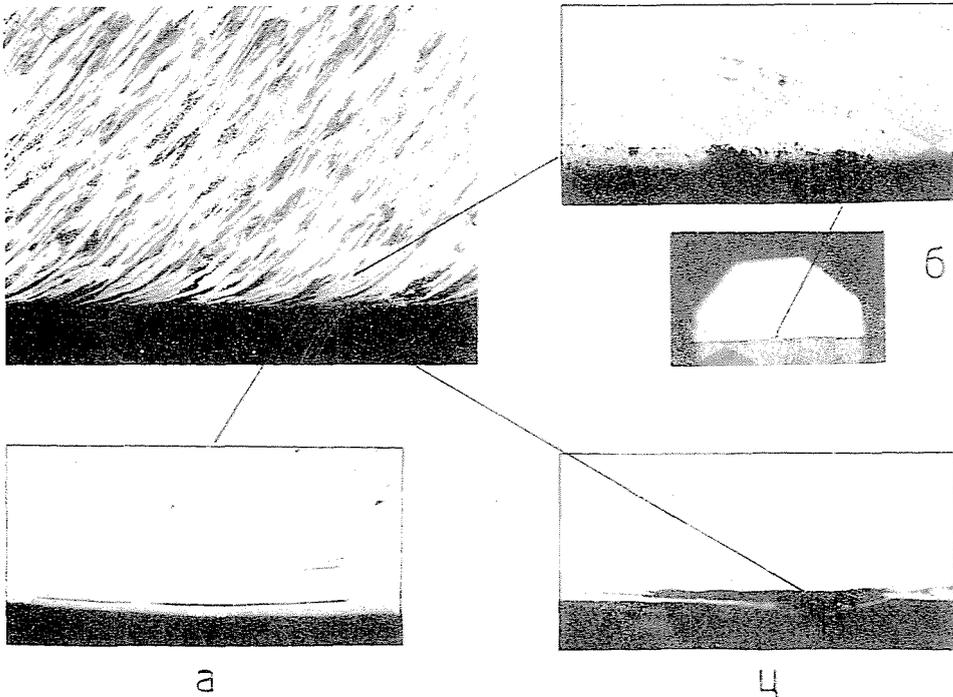


Рис. 4. Включения, имеющие различную пластичность в продольном сечении стружки, в области касания с поверхностью инструмента

б) Как видно на рис. 3., обязательным условием образования защитного слоя является то, чтобы температура, возникающая на поверхности инструмента, во время стружкоотделения находилась в определенном интервале. Ранее, при проведении исследований на твердосплавных режущих инструментах, определили, что минимально необходимая для этого температура приблизительно $950\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это совпадает и с результатами других исследований [3]. Это означает, что например, при среднем значении сечения стружки, твердости стали и т. д., защитный неметаллический слой образуется при скорости резания на передней поверхности $v \geq 70\text{ м/мин}$, на задней поверхности $v \geq 100\text{ м/мин}$ и в последнем случае доминирует сульфид марганца [14].

Раньше, в первую очередь, обращали внимание на верхний предел скорости резания, при котором еще было заметно защитное действие неметаллического слоя. Эту скорость определяет или жаропрочность инструмента или же относительная деформируемость включений,

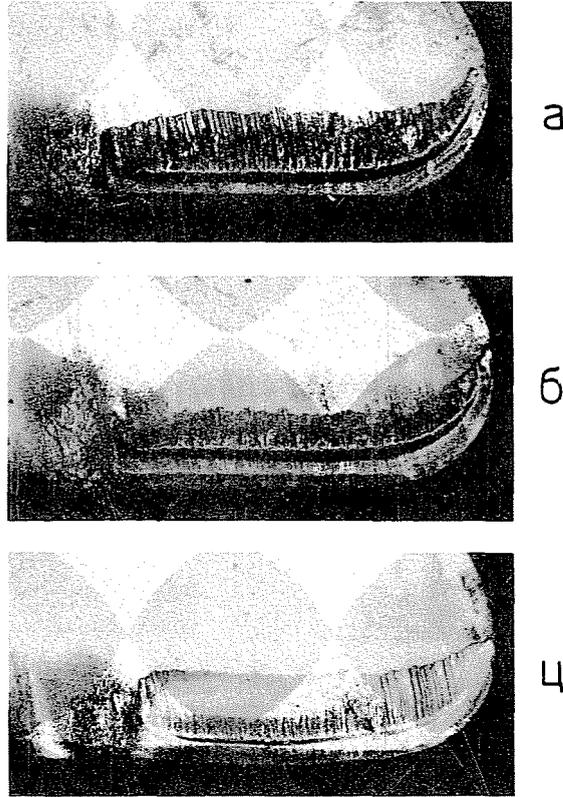


Рис. 5. Неметаллический нарост на керамических пластинках после $t = 5$ мин. точения. Твердость стали $HV = 310$ а) $v = 100$ м/мин; б) $v = 125$ м/мин; ц) $v = 160$ м/мин

показанная на рис. 3. Последнее подтверждают снимки на рис. 5. Эти снимки были получены при проведении опытов на керамических (Al_2O_3) пластинках.

в) Неметаллический защитный слой наблюдается только на тех твердосплавных инструментах, которые содержат карбиды титана и карбиды тантала ($Ti/Ta/C$). Это можно объяснить тем, что параметры решетки окисла титана и его карбида сходны [15] и поэтому кристаллы карбида и окисла могут соединяться. Присутствие неметаллического защитного слоя наблюдается и на твердосплавных режущих инструментах покрытых слоем TiN .

При скорости резания $v \leq 60$ м/мин на твердосплавном инструменте образуется железный нарост [3], этот нарост образуется также и при

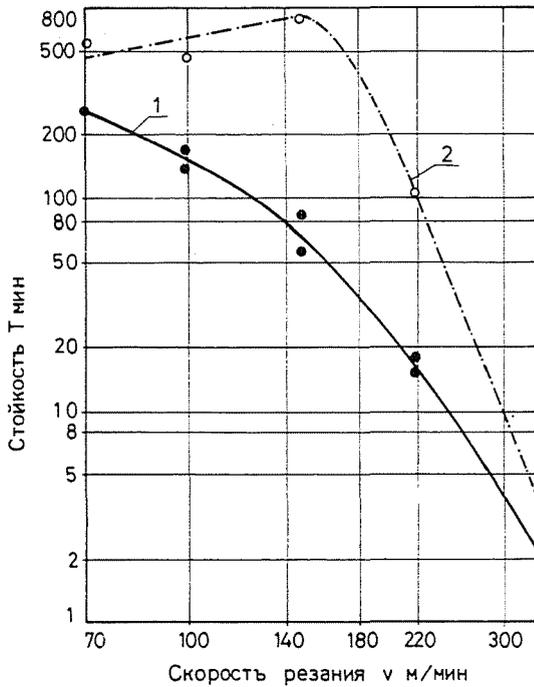


Рис. 6. Влияние скорости резания на стойкость при точении а) обыкновенной, б) хорошо обрабатываемой стали, образующей неметаллический нарост (материал: С 35, инструмент: Р 20)

более высоких скоростях резания. Поэтому в интервале скорости резания $v \leq 60$ м/мин даже не пытались искать неметаллический слой. Благоприятным действием образующегося неметаллического защитного слоя, можно воспользоваться только при больших скоростях резания, как указывает на это рис. 6 [9].

На нижний интервал скорости резания, при котором на передней поверхности образуется неметаллический нарост, до сих пор не обращали особого внимания, так как это не имело никакого практического значения. Твердосплавный инструмент в этом интервале скорости выходит из строя из-за износа задней поверхности, а неметаллический нарост, который затормаживает износ, образуется только на передней поверхности [4]. Напротив, срок службы кромки быстрорежущих инструментов при скорости резания $v \geq 40$ м/мин определяется износом передней поверхности [16], поэтому защита передней поверхности важна.

Проведенные нами эксперименты показали, что образование нароста происходит на твердосплавном инструменте в случае наличия слоя TiN, поэтому предположили, что неметаллический нарост может образоваться и на быстрорежущем инструменте, покрытым таким же слоем.

Это имеет большое практическое значение, потому что использование различных CVD (Chemical Vapor Deposition) и PVD (Physical Vapor Deposition) способов, стало более распространенным и есть надежда на то, что покрывая инструмент нитридом титана и одновременно используя положительное явление образования неметаллического нароста, стойкость инструмента многократно можно увеличить, а также существенным образом можно расширить общепринятый интервал скорости резания быстрорежущих сталей в направлении более высоких скоростей.

Опыты

Для проверки нашего предположения мы обрабатывали обыкновенную и хорошо обрабатываемую сталь быстрорежущим инструментом, покрытым слоем TiN с помощью способа Покрытие наносили на установке ПУСК [17].

Для проведения опыта использовали стали марки С 45, химический состав которых приведен в таблице 1. Результаты механических испытаний приведены в таблице 2., а структура сталей показана на рис. 7. В обеих сталях размер ферритных зерен по ASTM имеет 9 балл. Химический состав сравниваемых сталей приблизительно одинаков, разница наблюдается только для случая марганца и кислорода. Отличие по содержанию марганца привело к некоторой разнице в механических характеристиках материала, что нужно принять во внимание при оценке результатов опыта.

Очень важную, с точки зрения обрабатываемости, оксидную неоднородность исследовали с помощью автоматического анализатора типа Квантимет (таблица 3). С точки зрения распределения включений окислов разница между двумя сталями проявляется в том, что на исследуемой поверхности хорошо обрабатываемых сталей наблюдается большее количество включений относительно большого размера. Принимая во внимание то, что общая поверхность занимаемая окислами практически одинакова (она едва проявляется), отличие заключается только в форме включений. Электронно-микроскопические

Таблица 1

Химический состав обрабатываемой стали

Марки стали	Весовой процент									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	O ₂	N ₂
Обыкновенная	0,42	1,04	0,24	0,016	0,020	0,12	0,08	0,06	0,0076	0,0046
Хорошо обрабатываемая	0,42	0,67	0,21	0,014	0,018	0,05	0,06	0,013	0,0121	0,042

Таблица 2

Механические свойства обрабатываемой стали

Марки стали	R_m	R_{eH}	A_5	Z	HV 2,5/187,5
	N/mm ²		%		
Обыкновенная	690	386	21,2	45,2	232
Хорошо обрабатываемая	605	312	26,2	45,2	207

Таблица 3

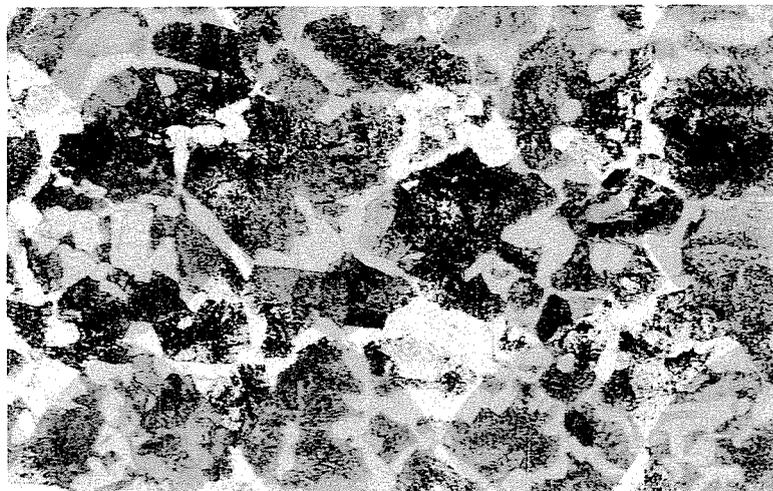
Оксидные включения в обрабатываемой стали по данным прибора Квантитмет

Марки стали	Площадь окислов,	Количество включений*, шт.						
		0—2 мкм	2—5 мкм	5—10 мкм	10—15 мкм	15—20 мкм	20—50 мкм	50 мкм
Обыкновенная	0,0182	420	97	54	13	8	1	—
Хорошо обрабатываемая	0,0194	340	79	58	18	11	11	—

* Анализируемая действительная площадь на каждом образце 18,3 мм².

снимки характерных включений обеих сталей видны на рис. 8. На отмеченных местах снимков показан и количественный химический состав, который был определен с помощью анализатора по распределению энергии. Видно, что включения Al_2O_3 в деформированной стали остаются сферообразной формы (Рис. 8/а). Силикатные включения в хорошо обрабатываемой стали при горячей обработке претерпевают пластическую деформацию и вытягиваются (Рис. 8/б).

В опытах использовали неперетачиваемую быстрорежущую пластинку марки S 6—5—2, на которую наносили слой TiN толщиной 4 мкм. В таком состоянии твердость неперетачиваемой пластинки была



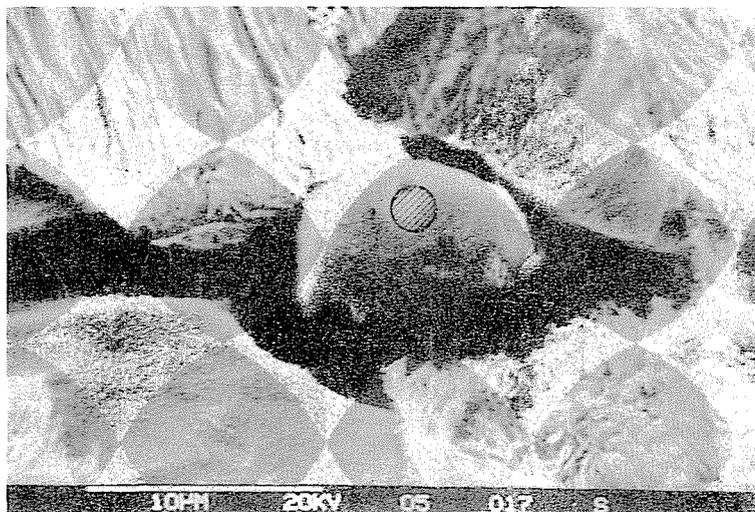
а



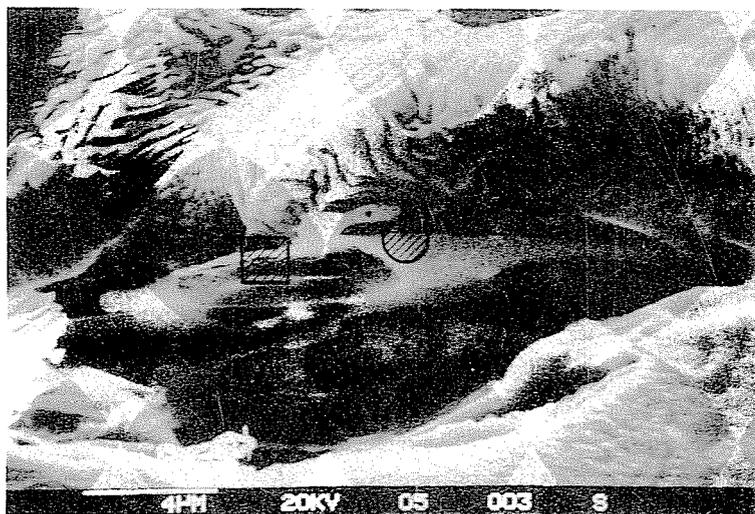
б

0,05 мм

Рис. 7. Структура обрабатываемой а) обыкновенной и б) хорошо обрабатываемой (ХО) стали, применяемой при опыте



а



б

Рис. 8. Электронно-микроскопические снимки характерных включений: а) обыкновенная сталь (○ 49Al—21Si—26Ca), б) хорошо обрабатываемая сталь (XO), (○ 12Al—34Si—7,5Ca—2,5S—9Mn, □ 16Al—40Si—8Ca—13Mn)

HV 80 = 890. Основные параметры пластинки следующие: передний угол $\gamma = +14^\circ$, радиус вершины $r_e = 0,8$ мм, угол в плане $K_r = 70^\circ$. При точении подача была $s = 0,25$ мм/об, а глубина резания $a = 2,5$ мм.

При резании хорошо обрабатываемой стали определили, что на передней поверхности быстрорежущего инструмента, покрытого слоем TiN образовался неметаллический нарост. В интервале скорости резания $v = 70\text{—}40$ м/мин образовывался в основном сплошной слой. Это хорошо видно на снимках передней поверхности режущей кромки резцов, изготовленных из быстрорежущей стали с покрытием TiN (Рис. 9.). На поверхности образца можно заметить следы шлифовального круга, параллельные главной режущей кромке. Эта часть, где стружка соприкасается с передней поверхностью, покрывается слоем, образующимся из включений обрабатываемой заготовки. Часть этой поверхности была исследована на спектральном микроанализаторе и результаты показаны на снимках.

На Рис. 10 представлен фрагмент передней поверхности резца в плане. Наличие титана, свидетельствующее о покрытии, наблюдается только непосредственно вблизи у режущей кромки (нижняя часть рисунка), а также на передней поверхности, уже не соприкасающейся со стружкой (верхняя часть рисунка). Средняя зона покрыта слоем Mn, S и Ca, который содержит также Si и Al. Этой зоне соответствует покрытие TiN такое заключение можно сделать на основании анализа результатов спектрального микроанализа (Рис. 11).

Известно, что при скорости резания $v < 40$ м/мин на быстрорежущем инструменте образуется металлический нарост. При использовании инструмента, покрытого нитридом титана, характерный металлический нарост не образовался. При скорости резания $v = 16$ м/мин на режущей кромке наблюдали только тонкую металлическую полосу. Однако в интервале скорости резания $v = 26$ м/мин обнаружили локальный неметаллический нарост. На снимках Рис. 12 представлена передняя поверхность резцов после резания с различными скоростями. Здесь также наблюдаются следы шлифования, параллельные главной режущей кромке, которые заметны, несмотря на присутствие слоя TiN. Включения располагаются перпендикулярно и наблюдаются в форме размазанных пятен. Видно, что с уменьшением скорости резания уменьшается количество включений, относительная пластичность которых при данной температуре, зависящей от скорости резания, не оптимальна для образования условий прилипания к инструменту. При меньших скоростях резания ухудшаются условия прилипания. И в этих

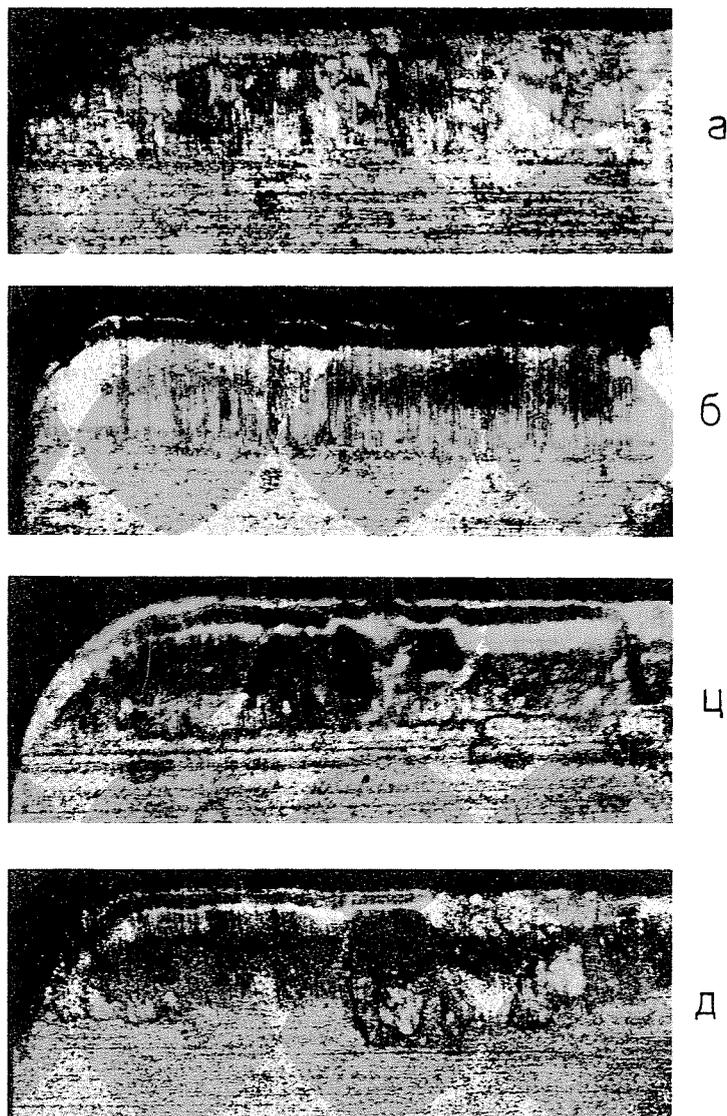


Рис. 9. Неметаллический защищенный слой на передней поверхности быстрорежущего инструмента, покрытого а) $v = 40$ м/мин; б) $v = 45$ м/мин; ц) $v = 55$ м/мин; д) $v = 70$ м/мин

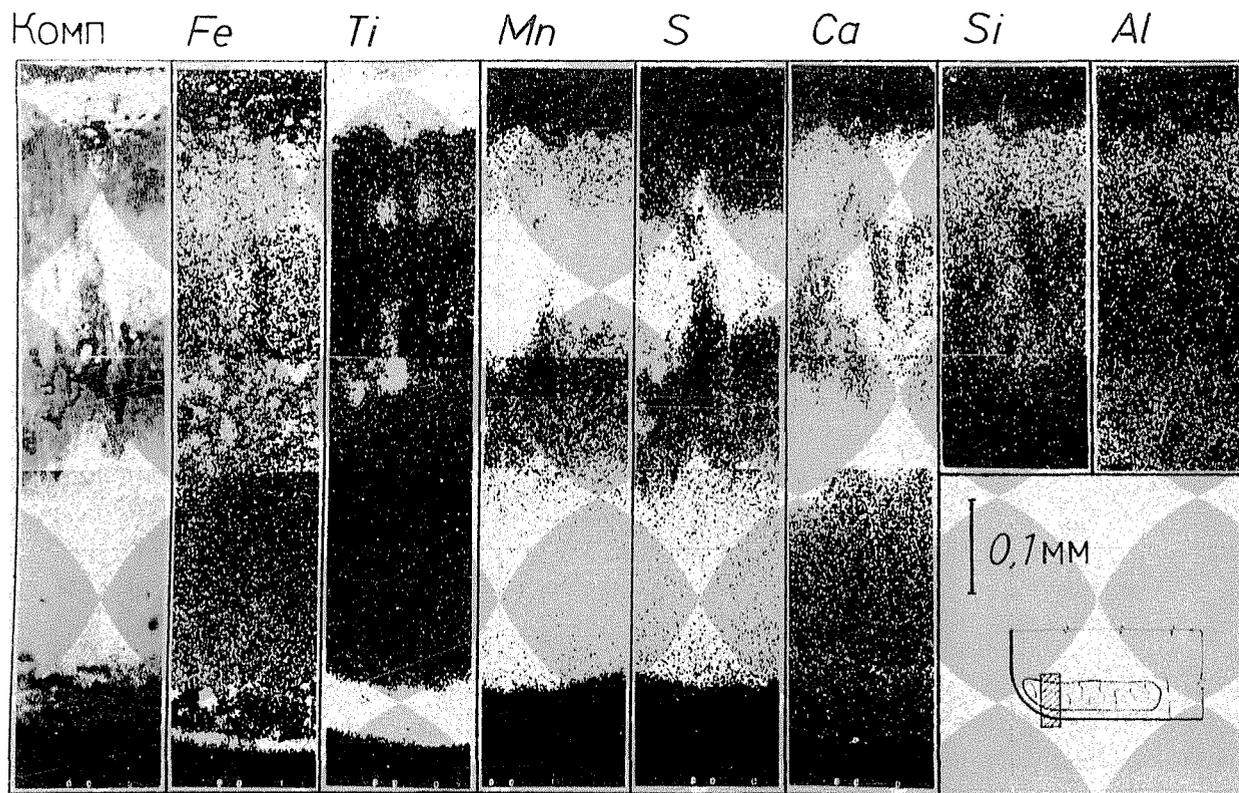


Рис. 10. Распределения химических элементов в части защитного слоя, показанного на рис. 9/6 по результатам микрорентгеноспектрального анализа

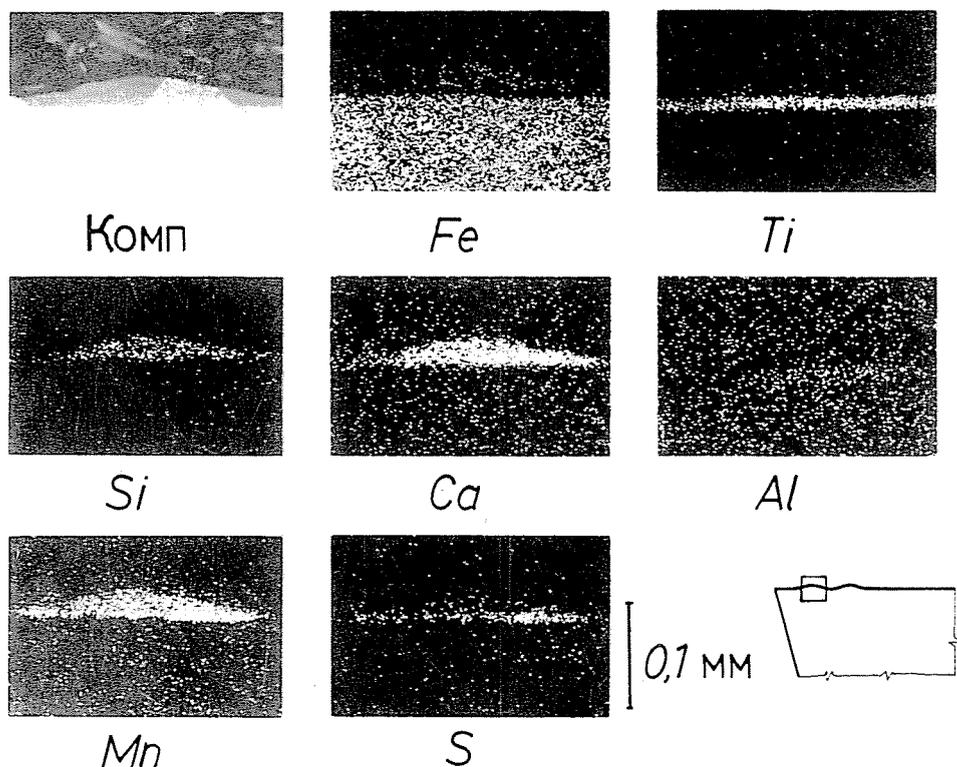


Рис. 11. Результаты микрозондирования защитного слоя, представленного на рис. 9/б, в сечении перпендикулярном главной режущей кромке.

локальных наростах можно было найти химические элементы включений стали, как это показано на Рис. 13.

Местами образовывался неметаллический нарост и на задней поверхности инструмента, как видно на Рис. 14 (скорость резания $v = 55$ м/мин). При большей скорости количество отложившихся включений больше. На Рис. 15 показан инструмент после резания со скоростью $v = 70$ м/мин. На расстоянии 10—20 мкм от режущей кромки виден в основном сплошной нарост, более тёмного цвета, чем покрытая TiN задняя поверхность резца. Исследования на микроспектральном анализаторе показали наличие Si, Ca и Al в наросте. При скорости резания $v = 40$ м/мин этого не наблюдается.

Влияние неметаллического нароста на стойкость инструмента было исследовано в той области скоростей резания, в которой стойкость инструмента определяется образованием кратера износа (Рис. 16).

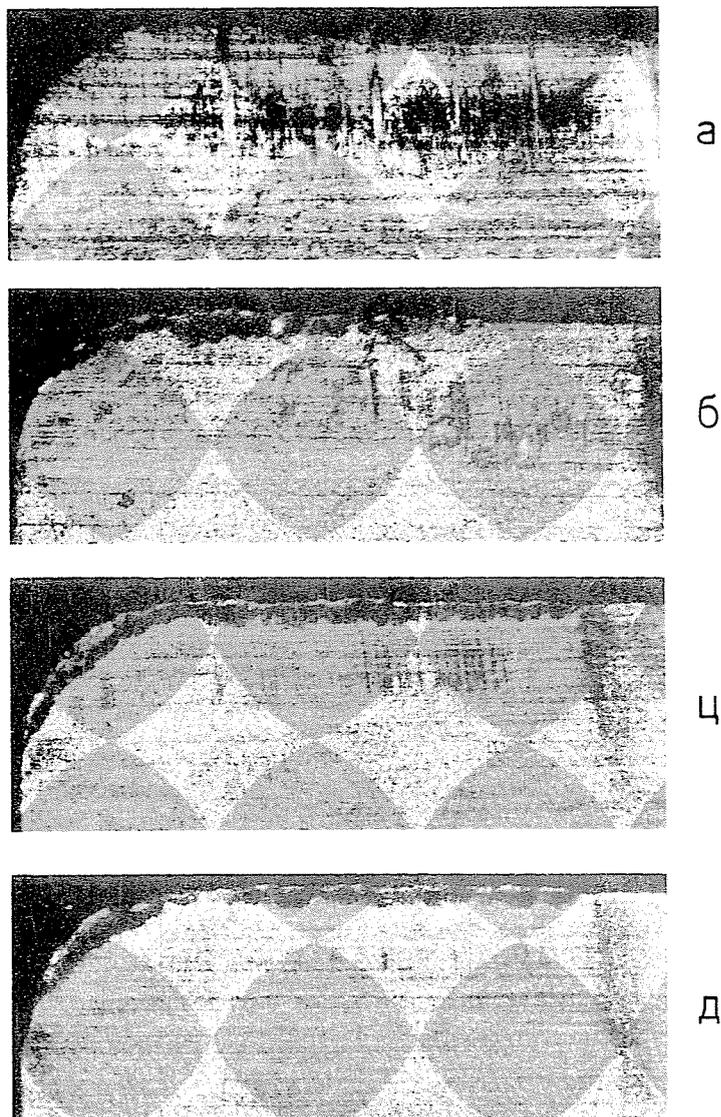


Рис. 12. Локальное образование неметаллического нароста на передней поверхности быстрорежущего инструмента, покрытого TiN а) $v = 36$ м/мин; б) $v = 32$ м/мин; ц) $v = 30$ м/мин; д) $v = 26$ м/мин

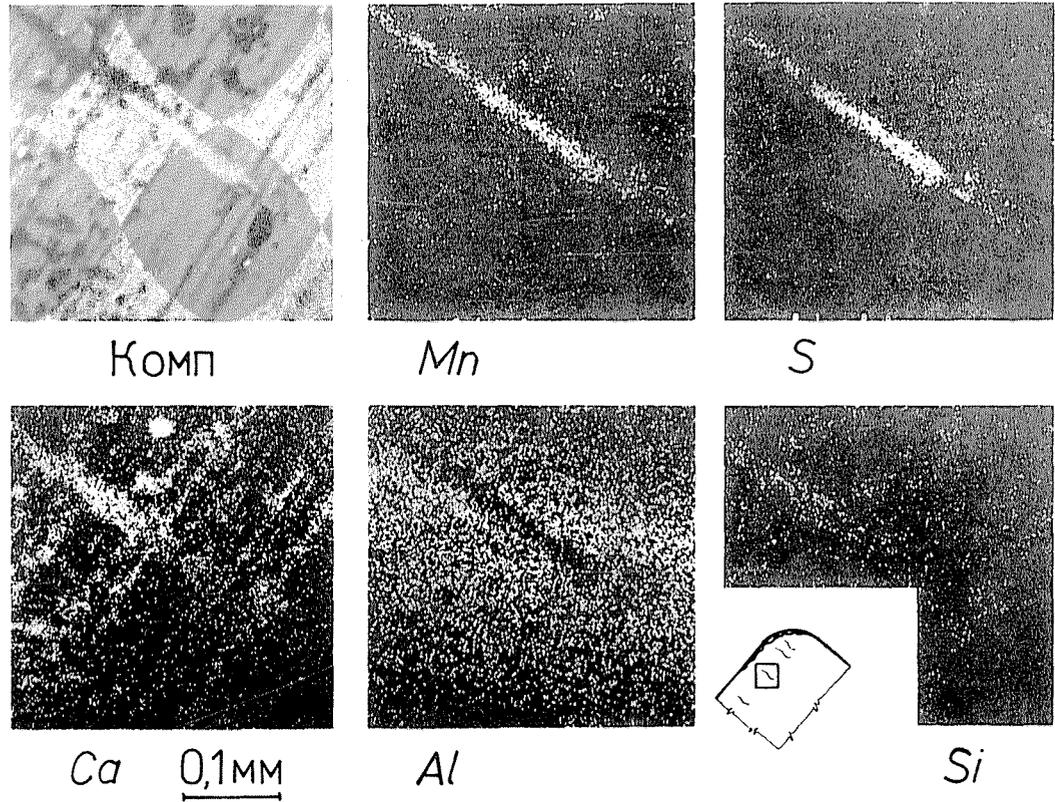


Рис. 13. Распределение химических элементов в локальном образовании неметаллического нароста (См. рис. 12/ц)

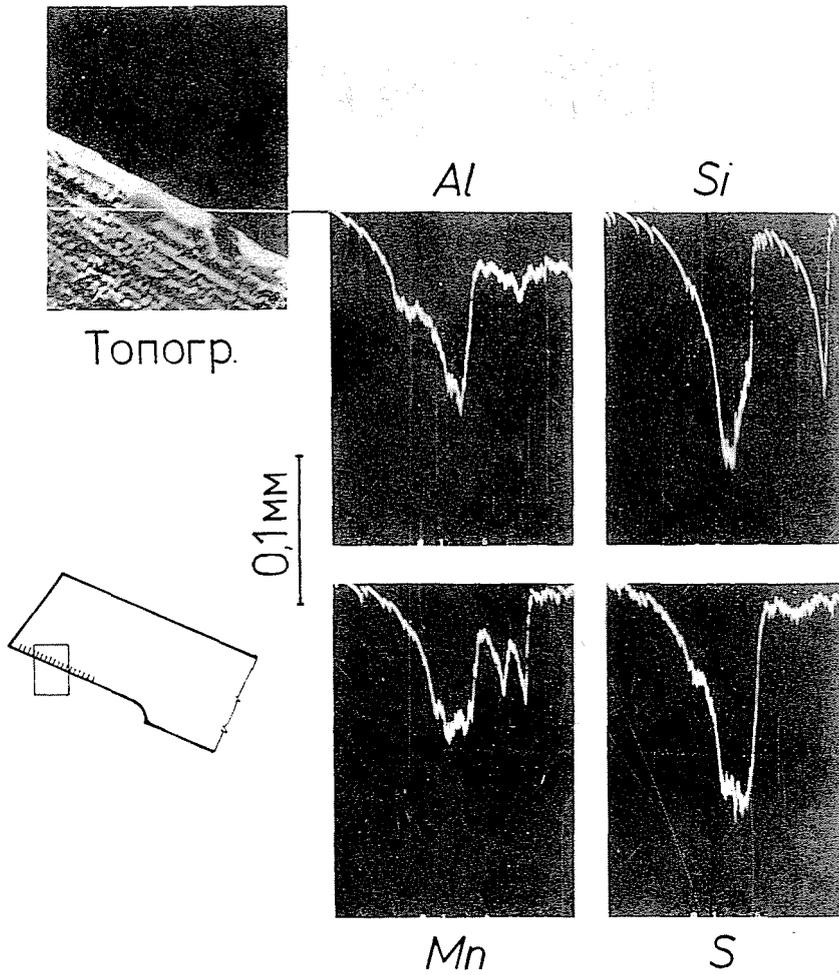


Рис. 14. Локальное образование неметаллического нароста на задней поверхности быстрорежущего инструмента, покрытого TiN ($v = 55$ м/мин)

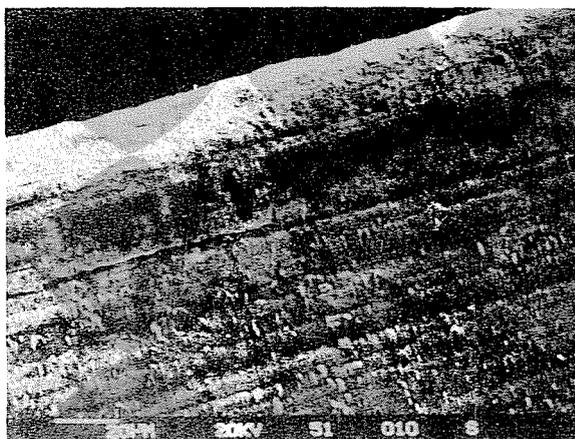


Рис. 15. Сульфидо-окисный слой на задней поверхности инструмента ($v = 55$ м/мин)

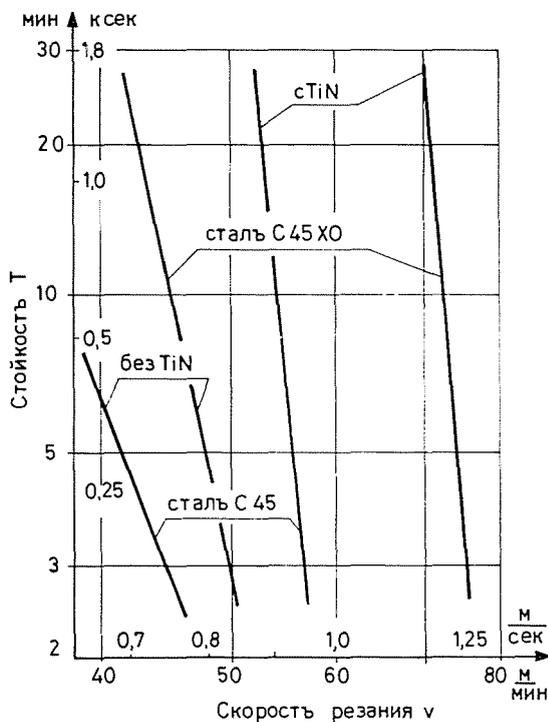


Рис. 16. Исследование стойкости быстрорежущего инструмента, покрытого TiN и инструмента без покрытия при точении обыкновенной и хорошо обрабатываемой (ХО) стали

Дискуссия

Наше предположение, что на передней поверхности быстрорежущего инструмента, покрытого TiN может образоваться неметаллический силикатный слой, как это уже было известно в случае твердосплавных инструментов, подтвердилось. Таким образом, инструмент во время резания защищен двойным слоем: слоем TiN и силикатным слоем.

Ранее считалось общепринятым мнение, что образование такого неметаллического нароста, при определенных технологических параметрах, происходит при минимальной скорости резания равной 63 м/мин. В отличие от этого мы определили, что неметаллический защитный слой образуется и при существенно пониженных скоростях (Рис. 9).

При резании хорошо обрабатываемой стали, которая охарактеризована данными таблиц 1—3, сплошной неметаллический нарост образовался в интервале скорости резания $v=40—70$ м/мин (Рис. 9). Интересно отметить, что даже при более низких скоростях резания можно отметить частичное образование неметаллического нароста (Рис. 12). $v=26$ м/мин была наименьшей скоростью, при которой на передней поверхности еще можно было найти следы неметаллических включений (Рис. 13). Они смешанно содержат сульфиды и силикаты, точно так, как уже раньше было отмечено и на задней поверхности твердосплавного инструмента. Принимая во внимание температуру резания, измеренную на передней и задней поверхности [18, 19], можно отметить что нижний предел температуры образования сплошного неметаллического нароста приблизительно 800 °С. Локальные следы неметаллического нароста уже можно найти при температуре резания 650 °С.

Из наблюдений следует, что ранее сделанные заключения касающиеся области температур с относительно благоприятной деформируемостью включений (в связи с Рис. 3) нужно пересмотреть. По всей вероятности условия напряжения при стружкообразовании и обычной горячей деформации в такой степени отличны друг от друга, что измерения представленные диаграммой Кисслинга на Рис. 3 не могут быть непосредственно применены для случая деформации включений при резании. В целях подтверждения этого предположения в настоящее время проводятся опыты.

Не удивительно, что в случае твердых сплавов в области малых скоростей резания нарост не проявляется. В случае твердосплавного инструмента при скорости резания $v < 63$ м/мин на передней поверхности

инструмента, естественно, при определенных параметрах резания, образуется металлический нарост. А для предотвращения образования неметаллического нароста достаточно, если передняя поверхность инструмента покрыта слоем Fe избыточное количество которого имеется в обрабатываемой заготовке, если толщина этого слоя 1—2 мкм или даже меньше этого значения.

Нами обнаружено, что на инструмента покрытом TiN обыкновенный металлический нарост не образуется (Рис. 12), таким образом поверхность инструмента остается свободной для образования неметаллического нароста.

Это касается и инструментов из твёрдого сплава. Действительно на основании дополнительно проведенных нами опытов оказалось, что при скорости резания $v=45$ м/мин на поверхности твёрдосплавного инструмента с покрытием TiN также образуется неметаллический защитный слой. Эта возможность не привлекла внимание исследователей по той причине, что твёрдые сплавы с покрытиями в основном применяют в области больших скоростей резания. При появлении быстрорежущих сталей с покрытием TiN важной стала также область низких скоростей резания.

Определенный нами ($v \cong 40$ м/мин) нижний предел скорости образования сплошного неметаллического слоя на передней поверхности, совпадает с нижним пределом скорости интенсивного изнашивания передней поверхности у быстрорежущих инструментов, и поэтому влияние неметаллического нароста на стойкость инструмента заметное (Рис. 15). Износ уменьшается также и в том случае, когда образование неметаллического нароста происходит не сплошным слоем на передней поверхности, при этом степень нагрузки поверхностного слоя инструмента уменьшается. Вследствие уменьшения износа передней поверхности меняется характер износа также задней поверхности при скорости резания $v > 40$ м/мин. С точки зрения стойкости инструмента важен тот факт, что локальное образование неметаллического нароста обнаруживается и на задней поверхности, т. е. и износ задней поверхности затормаживается за счет влияния пластичных включений, находящихся в обрабатываемой стали. При этом образуется тонкий защитный слой под режущей кромкой, который показан на Рис. 15.

В заключение следует отметить, что положительное влияние неметаллического нароста на стойкость инструмента, покрытого TiN, сказывается и на быстрорежущих инструментах. Из Рис. 16 видно, что при значительном увеличении скорости резания стойкость увеличивается в несколько раз. В случае совместного использования

покрытия TiN и хорошо обрабатываемой стали, образующей неметаллический слой, быстрорежущая сталь станет способной заполнить пустое поле, обозначенное вопросительным знаком на Рис. 1. Таким образом твердый сплав может быть заменен инструментальным материалом, содержащим малое количество вольфрама.

Заключение

На установке ПУСК способом PVD наносили слой TiN на быстрорежущий инструмент. При точении хорошо обрабатываемой стали установили, что неметаллический силикатный слой, который уже был известен при применении твердосплавных инструментов, образуется и на покрытом быстрорежущем инструменте. Это многократно увеличивает стойкость инструмента и расширяет область применения быстрорежущей стали в направлении твердого сплава. Таким образом возможно увеличение производительности и экономия вольфрама.

Резюме

С помощью способа напыления PVD стало возможным увеличение срока службы кромок режущих инструментов из быстрорежущей стали с помощью покрытия их нитридом титана. Наряду с этим можно увеличить и тепловую нагрузку инструмента. Отмеченный фактор и кристаллическая структура слоя нитрида приводит к тому, что на изнашиваемой поверхности инструмента в благоприятном случае образуется защищенный слой из неметаллических включений обрабатываемой стали.

Этот слой состоит из силикатов и сульфидов и приводит к дальнейшему повышению срока службы кромок инструмента и в значительной степени расширяет область применения режущих инструментов из быстрорежущих сталей в направлении твердых сплавов.

Литература

1. Powder Metallurgy 25, No. 4. (1982).
2. OPITZ, H. —GAPPISCH, M.—KÖNIG, W.—PAPE, R.—WICHER, A.: Arch. Eisenhüttenwesen 841 (1962).
3. KÖNIG, W.: Industrie Anzeiger 1965. p. 463—470, 1033—1038.
4. PÁLMAI, Z.: Metals and Materials No. 6. 326 (1974).
5. SCHAUMANN, R.: Der Maschinenmarkt 47/48, 37 (1956).
6. WICHER, A.: Radex-Rundschau No. 2. 432 (1965).
7. WICHER, A.—PAPE, R.: Stahl und Eisen No. 20. 1169 (1967).
8. PIETIKAINEN, J.—ТОНКА, М.: Jernkontorets Ann. 154 (5), 215 (1970).

9. PÁLMAI, Z.: Stahl und Eisen 91, 1510 (1971).
10. PAPE, R.—BECKER, H.—BERSCH, B.: Stahl und Eisen No. 19. 1045 (1969).
11. TETSURO ITO—TETSUO TAKAHASHI—ATSUYOSHI KIMURA—KIYOICHI YAMANO—DENKI SEIKO: 44, 29 (1973).
12. PÁLMAI, Z.: Wear 38, 1 (1976).
13. KIESSLING, R.: Journal of Metals Okt. p. 49—54 (1969).
14. KÖNIG, W.—DIEDERICH, H.: Arch. Eisenhüttenwesen No. 3. 267 (1970).
15. KIEFFER, R.—BENESOVSKY, F.: Hartstoffe. Springer-Verlag, Wien, p. 93 (1963).
16. OPITZ, H.—KÖNIG, W.: Metals for metal cutting. Conference Scarborough 1970. The Iron and Steel Institute.
17. ГРИГОРОВ, А. Н.—ЕЛИЗАРОВ, О. А.: Ионно-вакуумные износостойкие покрытия, Москва 1979.
18. KÜSTERS, K. J.: Temperaturen im Schneidkeil spanender Werkzeuge. Dissertation. 1956.
19. LOWACK, H.: Temperaturen an Hartmetalldrehwerkzeugen bei der Stahlzerspannung. Dissertation, Aachen 1967.

Dr. Zoltán PÁLMAI H-1521 Budapest