ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ

Методы нанесения покрытий оказывают существенное влияние на свойства инструментального материала (ИМ). Высокие температуры, характерные для методов ХОП (химическое осаждение покрытий) вызывают изменение не только поверхностных свойств инструментального материала (микротвердость, стойкость против окисления, сопротивляемость микроразрушению), но и свойства, которые проявляются в объеме всего инструментального материала (прочность, микроползучесть, вязкость разрушения и т, д.). Процесс нанесения покрытия методом ФОП (физическое нанесение покрытий) протекает при значительно низких температурах и поэтому он оказывает влияние только на поверхностные структуры и микрогеометрию поверхностного слоя контактных площадок инструмента.

Изменение свойств инструментальной матрицы после нанесения покрытия отражается на эксплуатационных свойствах режущего инструмента и повышает его работоспособность.

Взаимосвязь между свойствами инструментального материала, характеристиками процесса резания и эксплутационными характеристиками режущего инструмента представлена на рис.1. Из рисунка видно, что фрикционные свойства инструментального материала оказывают влияние на контактные процессы, пластические деформации в зоне резания, на физико-химические процессы, протекающие на контактных площадках инструмента. В свою очередь данные характеристики процесса резания определяет сопротивляемость режущего инструмента изнашиванию в условиях адгезионно-усталостных процессов и граничной диффузии. Окисляемость и высокотемпературная коррозия инструментального материала влияет на активность окислительных и коррозионных процессов на контактных площадках инструмента, которые определяют сопротивляемость инструмента микроразрушениям при выраженных окислительных коррозионных процессах. Горячая твердость инструментального материала сказывается на контактных процессах, структурно-фазовых превращениях в локальных слоях инструментального материала, которые в свою очередь определяют сопротивляемость режущего клина инструмента пластическому разрушению. Процессы макро- и микроразрушения контактных площадок инструмента, которые связвны с прочностью на изгиб инструментального материала, оказывают влияние на сопротивляемость режущего инструмента хрупкому микро- и макроразрушению.

Нанесение покрытий на контактные площадки режущего инструмента изменяет характеристики процесса резания, что в свою очередь отражается на эксплуатационных характеристиках режущего инструмента.

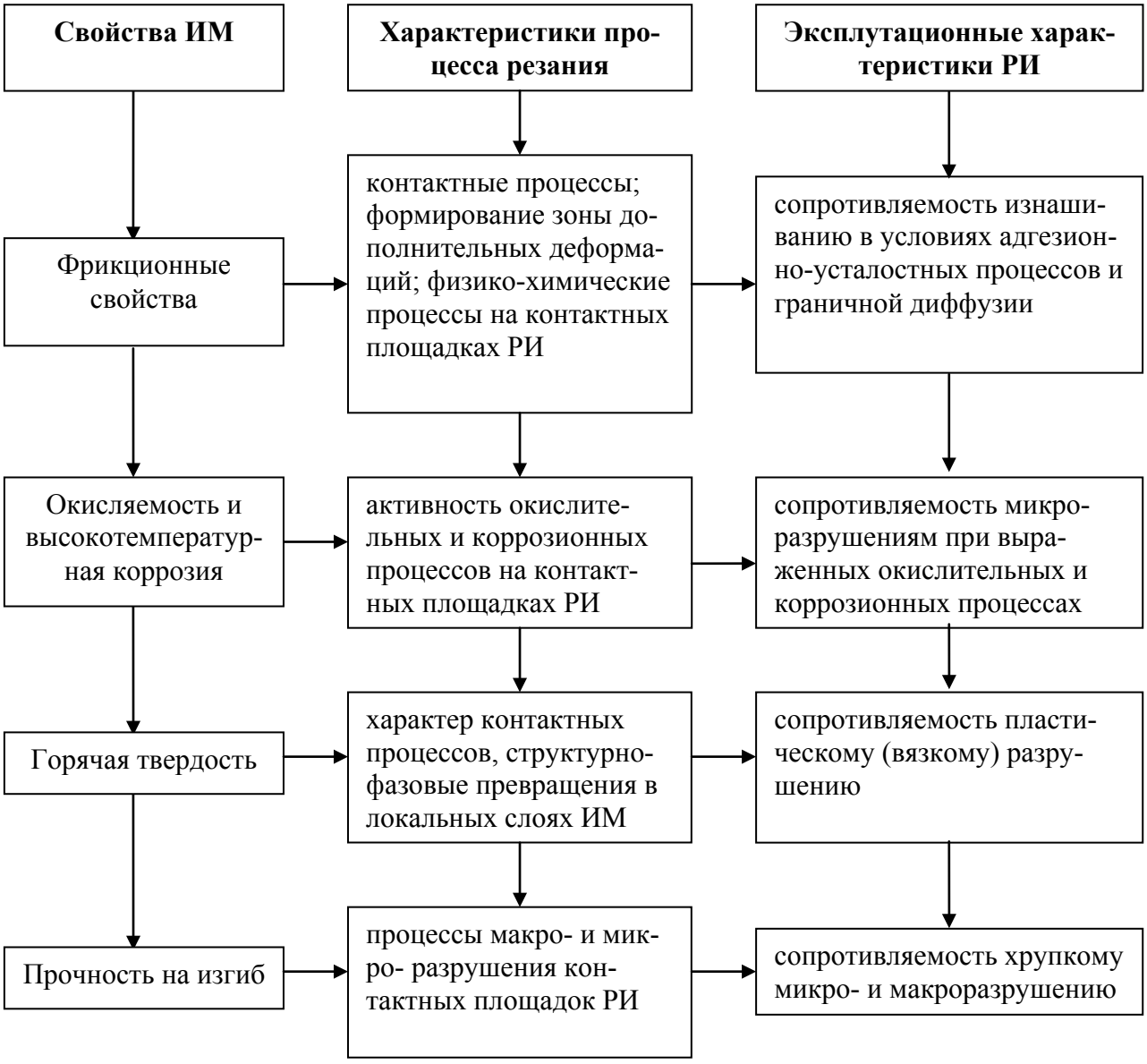


Рис. 1. Взаимосвязь между свойствами инструментального материала, характеристиками процесса резания и эксплуатационными характеристиками режущего инструмента

Влияние покрытий на свойства инструментального материала

Прочность на изгиб инструментальных материалов с покрытиями

Прочность на изгиб инструментального материала является его важнейшей характеристикой, определяющей способность контактных площадок режущего инструмента сопротивляться микро- и макроразрушению. Недостаточная изгибная прочность режущей части инструмента может привести к хрупкому разрушению в виде скалывания режущей части и выкрашивания режущих кромок (при недостаточном запасе хрупкой прочности) или пла-

стической деформации и последующего среза (при недостаточном запасе пластической прочности).

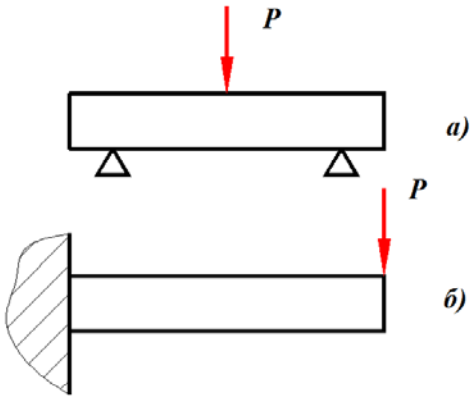


Рис. 2. Схемы изгиба сосредоточенной нагрузкой (а) и консольного изгиба (б)

Оценку влияния покрытия на прочностные характеристики композиции «покрытие – инструментальная основа» («П – ИО) обычно проводят по двум параметрам: $\sigma_{изг.\ ср.}$ - среднее значение предела прочности на изгиб и m - коэффициенту однородности, характеризующий разброс величины $\sigma_{изг.\ ср.}$ (чем он выше, тем меньше разброс величины $\sigma_{изг.\ ср.}$). Определение прочностных характеристик композиции «П – ИО» производят при изгибе сосредоточенной нагрузкой (рис. 2, а), при консольном изгибе (рис. 2, б) и при изгибе с ударно - циклической нагрузкой.

Рассмотрим влияние покрытия на прочностные характеристики композиции «П – ИО» при изгибе сосредоточенной нагрузкой (рис. 3 и табл. 1) .

Нанесение ИП изменяет прочностные характеристики композиции «П – ИМ), при этом существенное влияние на изменение прочностных характеристик инструментального материала оказывает метод нанесения покрытия.

1. Предел прочности на изгиб и коэффициент вариации инструментального материала

ИМ	$\sigma_{изг.ср.}$, МПа	m
ВК6	1550	3,3
ВК6+И.Б.	1600	5,0
ВК6+TiN	1620	5,0
ВК6+TiCrN	1680	6,0

Нанесение покрытий методом КИБ вызывает повышение и стабилизацию величины $\sigma_{изг.\ ср.\ и}$. При этом, наибольший вклад в изменение прочностных характеристик вносит ионная бомбардировка. Дальнейшее нанесение покрытия незначительно изменяет прочностные характеристики $\sigma_{изг.\ ср.}$ и m (табл. 1).

Многоэлементные покрытия, полученные методом КИБ, несколько больше повышают и стабилизируют прочностные характеристики по сравнению с одноэлементными покрытиями (табл. 1).

При нанесении покрытий ХОП, в частности ГТ (газотермическое осаждение), характерно снижение $\sigma_{изг.\ ср.}$, которое достигает (20-30)%. Снижение величины $\sigma_{изг.\ ср}$ связано с образованием η-фазы при нанесении данных покрытий. Несмотря на снижение предела прочности на изгиб, коэффициент вариации m при этом увеличивается.

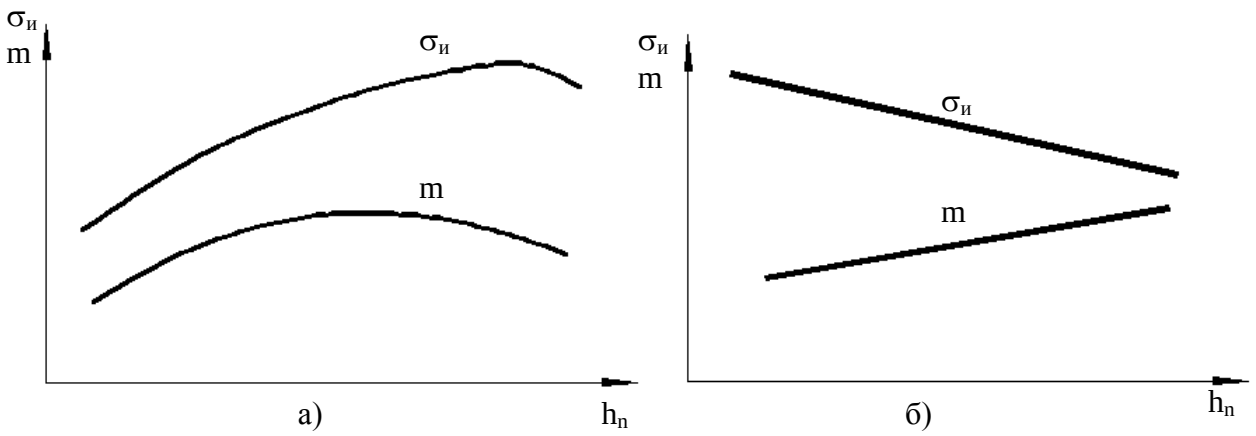


Рис. 3. Влияние толщины покрытия h_n на величину $\sigma_{изг.}$ и коэффициент вариации m инструментального материала с покрытиями КИБ (а) и ГТ (б)

Существенное влияние на прочностные характеристики инструментального материала оказывает толщина покрытия h_n (рис. 3)Зависимость $\sigma_u=f(h_n)$, для покрытий, полученных методом КИБ, носит экстремальный характер. При нанесении покрытий методом КИБ имеет место оптимальная толщина покрытия, при которой наблюдается максимальная стабилизация прочностных свойств инструментального материала. Для покрытий ГТ и ДТ с увеличением толщины покрытия величина $\sigma_{изг.\ ср.}$ снижается, при этом коэффициент m несколько повышается. **(См. примеры из табл. 3.3 из учебного пособия стр. 79).**

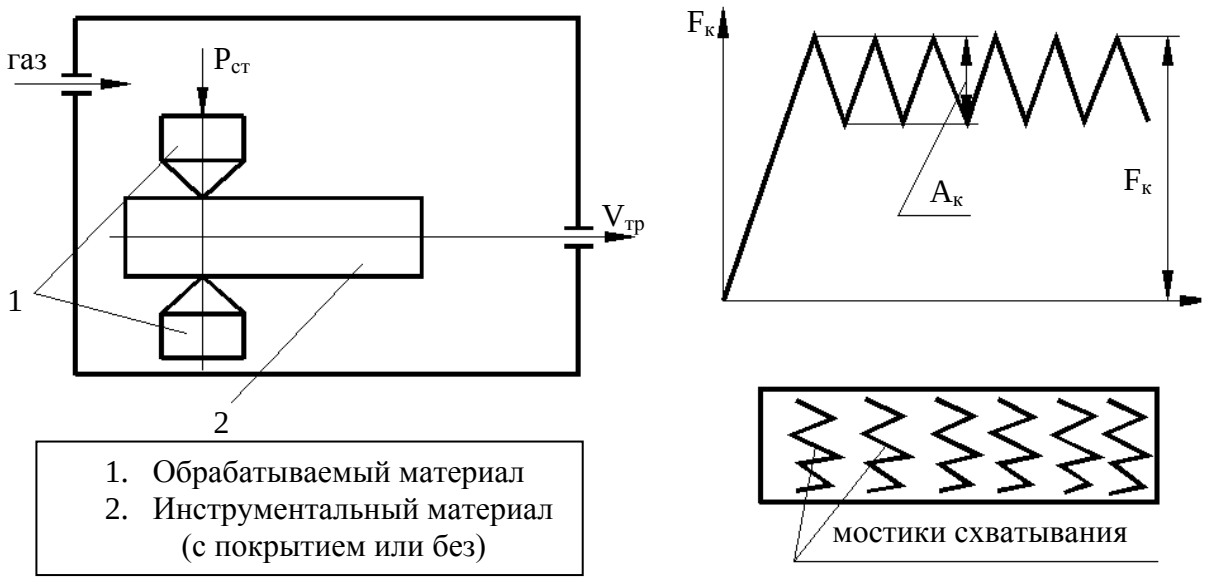
Увеличение толщин покрытий TiC, получаемых высокотемпературными методами ДТ и ГТ, приводит к заметному снижению прочности твердых сплавов и росту разбросов прочности (снижение коэффициентов m). Это обусловлено отмеченной выше декарбидизацией локальных объемов твердого сплава, непосредственно примыкающих к границе раздела инструментального материала и покрытия, и увеличением толщины хрупкой η-фазы.

При консольном изгибе и ударно-циклическом нагружении методы нанесения покрытий аналогично влияют на прочностные характеристики инструментального материала.

Фрикционные свойства инструментального материала с покрытием

Влияние износостойких покрытий на фрикционные свойства инструментального материала можно оценить по склонности его к схватыванию с обрабатываемым материалом. При этом критерием оценки схватывания может служить кинетическая сила трения $F_к$ и ее амплитуда $A_к$.

Схема установки для определения величин $F_к$ и $A_к$ представлена на рис. 4.



а) б)

Рис. 4. Схема установки для определения фрикционных характеристик инструментального материала с покрытиями (а) и график изменения кинетической силы трения от времени (б)

Образец инструментального материала с покрытием или без покрытия 2 протягивается между двумя образцами обрабатываемого материала 1, которые нагружены нормальной силой $P_{ст}$ (рис. 4, а). С помощью регистрирующей аппаратуры фиксируется изменение кинетической силы трения $F_к$ и ее амплитуды $A_к$ (рис. 4, б). При относительном перемещении образцов на поверхности образца инструментального материала фиксируются следы трения – мостики схватывания (рис. 4, б).

Влияние покрытия на фрикционные характеристики композиции «П – ИО) представлено на рис. 5. Анализ представленных графиков позволяет отметить следующее. Нанесение износостойких покрытий позволяет снизить значения кинетической силы трения $F_к$ и амплитуды $A_к$, при этом, уменьшение данных параметров не зависит от инструментального материала, а определяется составом и свойствами износостойкого покрытия и свойствами обрабатываемого материала. Наибольшее снижение фрикционных характеристик имеет место при трении по конструкционным материалам и существенно меньше при трении по труднообрабатываемым материалам. Покрытие одного и того же состава, полученное различными методами, одинаково влияет на величину кинетической силы трения и ее амплитуду.

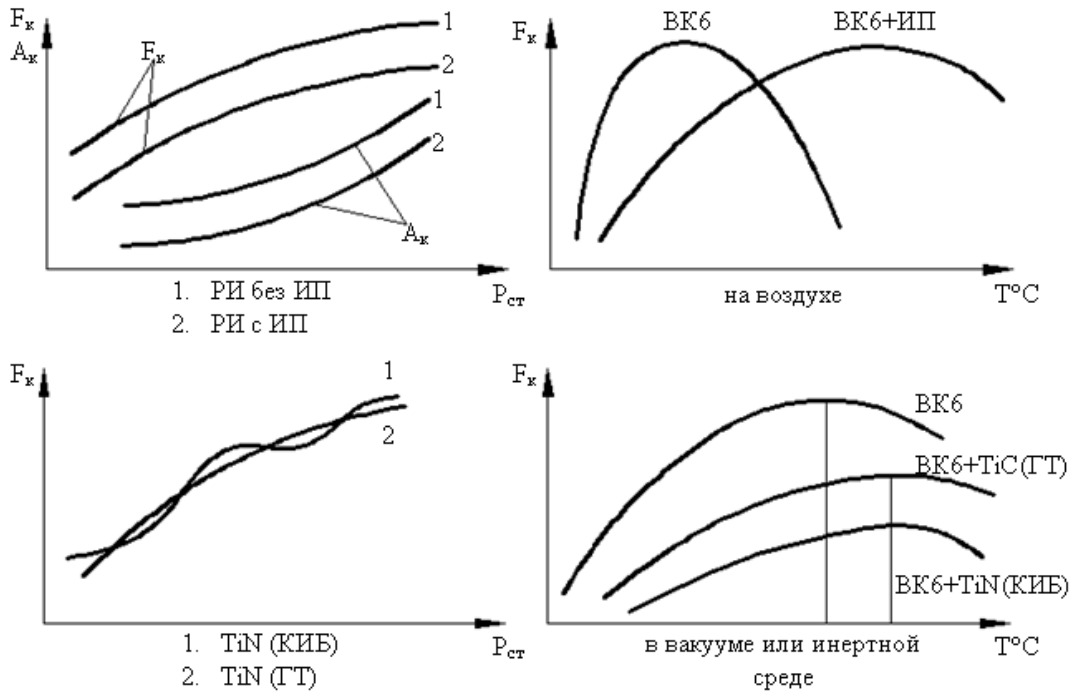


Рис. 5. Изменение фрикционных характеристик от температуры (T^oC) и статической нагрузки ($P_{ст}$)

Изменение состава многоэлементных покрытий, полученных методом КИБ, позволяет направленно влиять на фрикционные характеристики инструментального материала путем изменения его состава (рис. 6).

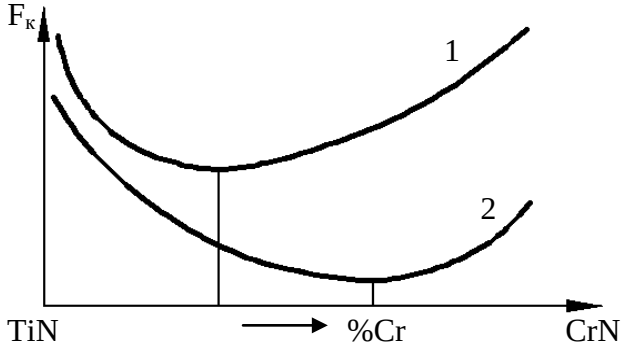


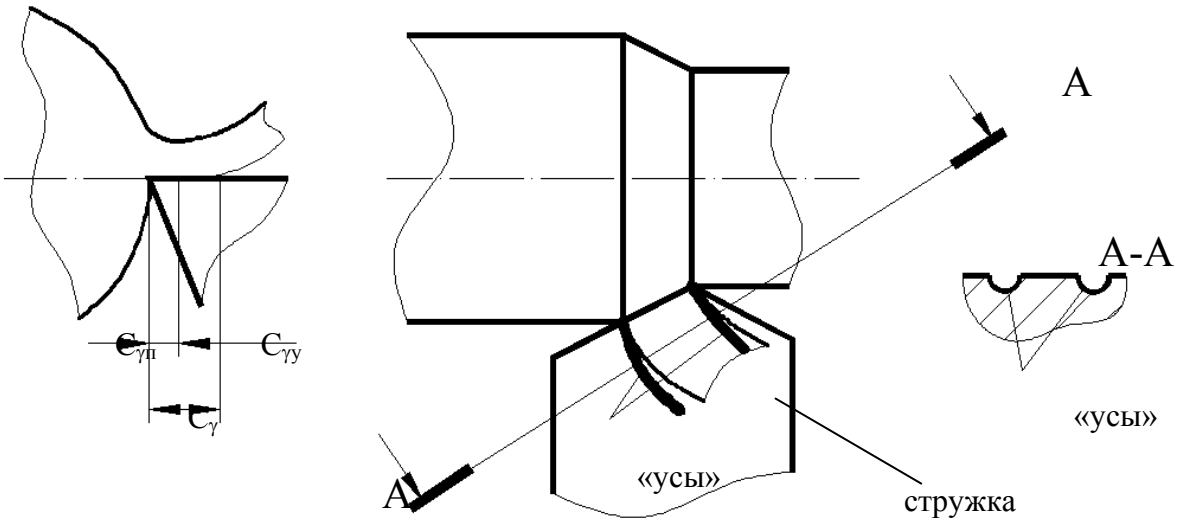
Рис. 6. Влияние состава покрытия TiCrN на кинетическую силу трения: 1,2 – соответственно обрабатываемые материалы № 1 и № 2

Увеличение кинетической силы трения с ростом статической силы $P_{ст}$ объясняется увеличением фактической площади контакта в паре трения, при возрастании температуры – ростом количества активных центров схватывания и площади фактического контакта из-за увеличения пластичности материала и снижения сопротивляемости его пластическому деформированию. Кроме того, с увеличением температуры инициируются процессы разрушения поверхностных пленок, что способствует образованию химически чистых (ювенильных) поверхностей. При дальнейшем росте температуры про-

исходит разупрочнение мостиков схватывания и сильное окисление трущихся поверхностей, что, вместе взятое, приводит к уменьшению силы трения.

Окисляемость инструментальных материалов с покрытиями

В процессе обработки резанием контактные площадки режущего инструмента подвергаются воздействию активных реагентов из окружающей среды, что приводит к его износу. Особенно эти процессы усиливаются для операций прерывистого резания, резания с образованием дискретных типов стружек и с применением СОЖ. Даже при резании с образованием сливной стружки, наблюдаются так называемые «краевые эффекты» - образование «усов» (рис. 7, б). Из-за дискретности контакта краев стружки с передней поверхностью в эту зону попадает кислород, что приводит к окислению, а в дальнейшем к разрушению контактного слоя режущего инструмента. Кроме того имеется достаточно высокая вероятность проникновения кислорода в зону упругого контакта на передней поверхности инструмента (рис. 7, а - $C_{\gamma п}$ – участок пластического контакта; $C_{\gamma у}$ –участок упругого контакта). Поэтому сопротивляемость инструментального материала высокотемпературному окислению является важной характеристикой, существенно влияющей на работоспособность режущего инструмента.



а) б)

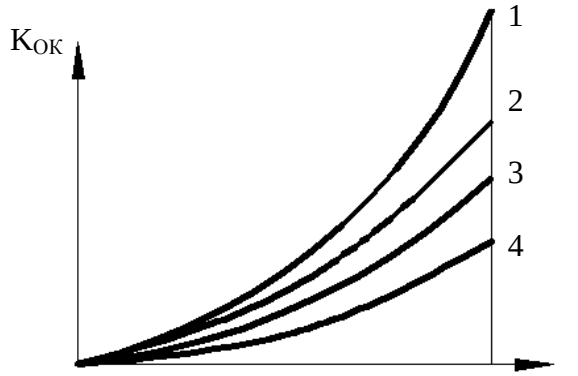
Рис. 7. Участки пластического и упругого (а) и образование «усов» на передней поверхности (б) инструмента

Склонность инструментального материала с покрытием к окислению оценивают по коэффициенту окисляемости:

$$k_{ок} = \frac{m_1 - m_0}{f_0}$$

где f_0 - площадь окисления пластины инструментального материала, m_1,m_0- масса пластины после и до нагрева.

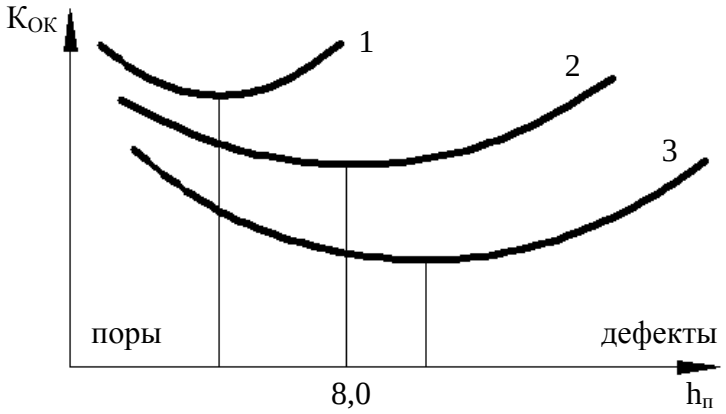
Износостойкие покрытия, применяемые для упрочнения режущего инструмента, обладают значительной термодинамической устойчивостью и



1- ВК6; 2 - ВК6+TiN(КИБ);
3 - ВК6+TiC(ГТ);
4 - ВК6+TiCrN (КИБ)

Рис. 8. Влияние покрытий на коэффициент окисляемости твердых сплавов

лучшей сопротивляемостью высокотемпературным окислению и коррозии по сравнению с инструментальной основой (рис. 8).



1 - ВК6+TiN(КИБ); 2 - ВК6+TiC(ДТ);
3 - ВК6+TiCrN (КИБ)

Рис. 9. Влияние толщины покрытия на коэффициент окисляемости твердых сплавов с покрытием

Большую сопротивляемость окислению имеют одноэлементные покрытия ХОП по сравнению с одноэлементными покрытиями, нанесенных методом КИБ. Нанесение многоэлементных покрытий методом КИБ ведет к увеличению сопротивляемости твердых сплавов к окислению по сравнению

с одноэлементными. Также большую сопротивляемость к окислению имеют покрытия многослойного типа.

Окисляемость износостойких покрытий существенно зависит от его толщины. Для каждого состава покрытия имеются оптимальная толщина, при которой склонность к окислению минимальна (рис. 9).

С уменьшением толщины покрытия доступ кислорода через него к поверхности твердого сплава возрастает (через поры, кратеры, межзеренные границы и т. д.) и окисляемость повышается. Большая окисляемость твердого сплава при больших толщинах покрытий связано с повышением дефектности его строения, что оказывает влияние на окисляемость инструментального материала. **(См. пример из учебного пособия табл. 3.1 стр. 73).**

Горячая твердость

«Горячая твердость» является важной характеристикой инструментального материала, т. к. определяет сопротивляемость контактных площадок режущего инструмента микроползучести при высокой температуре. Нанесение покрытий приводит к увеличению горячей твердости композиции «П – ИО).

С ростом температуры микротвердость твердого сплава с покрытием заметно снижается (рис. 10), однако остается выше микротвердости твердого сплава без покрытия. Меньшее снижение микротвердости с ростом температуры обеспечивают многоэлементные и многослойные покрытия по сравнению с одноэлементными. В то же время для инструментального материала с покрытием интенсивность снижения «горячей твердости» больше, чем без покрытия. (**См. примеры из учебного пособия рис. 3.7, 3.8 и табл. 3.2 стр. 75,76**).

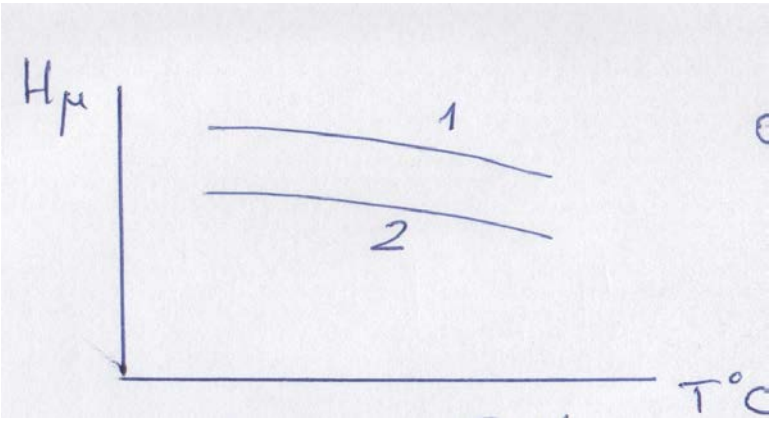


Рис. 10. Влияние покрытия на горячую твердость твердого сплава: 1, 2 – соответственно с покрытием и без покрытия

Механические свойства износостойких покрытий

Основное влияние на свойства покрытий оказывают их состав и конструкция, а также технология нанесения. Рассмотрим влияние указанных факторов на остаточные напряжения ($\sigma_{ост}$) и механические свойства (прочность адгезии, которая характеризуется коэффициентом отслоения K_o, уменьшение которого свидетельствует о повышении прочности адгезии покрытия с инструментальной основой, микротвердость H^0_μ, модуль Юнга E,

трещиностойкость, характеризующая коэффициентом интенсивности напряжений K_{1C} или вязкостью разрушения $K_{ICП}$ и циклической трещиностойкостью $t_ц$) ионно-плазменных покрытий, получаемых методом КИБ.

Коэффициент отслоения Ко можно определить методом вдавливания индентора на твердомере ТК-2М (рис. 11) и рассчитать по формуле:

$$K_0 = \frac{S_0}{S_л},$$

где S_O- площадь отслоения покрытия вокруг лунки от индентора; $S_Л$- площадь лунки.

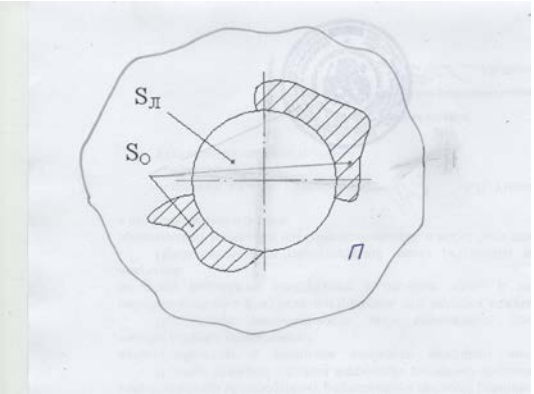


Рис. 11. Схема к определению коэффициента отслоения

Остальные механические свойства определяются по известным методикам.

Микротвердость покрытий зависит как от его состава, так и технологии нанесения. Введение в состав покрытия TiN дополнительного легирующего элемента повышает его микротвердость (рис. 12). Введение второго легирующего элемента в состав покрытия TiN приводит к дальнейшему росту микротвердости. **(См. рис. и табл. 3.4 из учебного пособия стр. 83).**

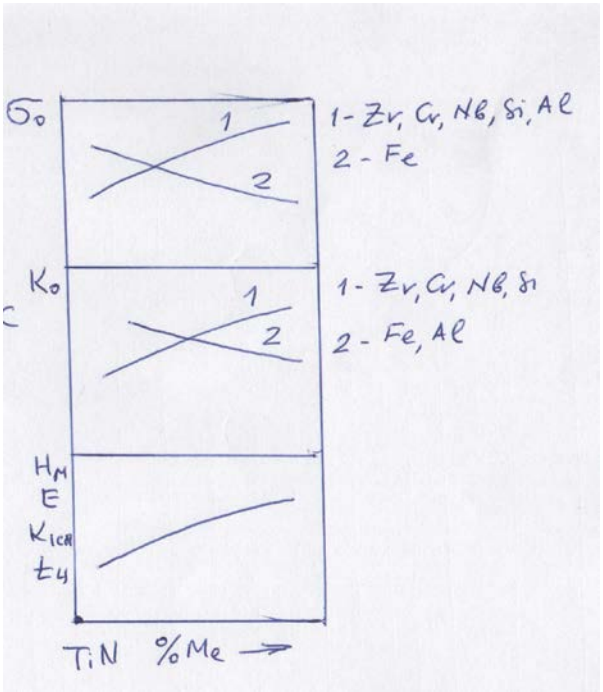


Рис. 12. Влияние содержания второго элемента на остаточные напряжения и механические свойства двухэлементных покрытий

Изменение технологических условий, например, нанесение покрытий из раздельных и составных катодов, также отражается на величине микротвердости. Так микротвердость покрытий TiZrN, полученных из раздельных катодов, выше аналогичного параметра для покрытий, полученных с использованием составных катодов. (**См. табл. 3.5 из учебного пособия стр. 83**). Наблюдаемое влияние технологических условий на свойства покрытий объясняется различными механизмами упрочнения, действующими при нанесении покрытий с использовани-

ем раздельных и составных катодов. Более высокая микротвердость покрытий, полученных из раздельных катодов, объясняется действием двух механизмов упрочнения материала покрытия – твердорастворным за счет легирования основного материала покрытия и упрочнением микроструктурными барьерами за счет образующейся мультислойной структуры, образующейся в результате вращения РИ в камере установки. (**См. пример из учебного пособия рис. 3.15 и 3.16 стр. 84 и 85**).

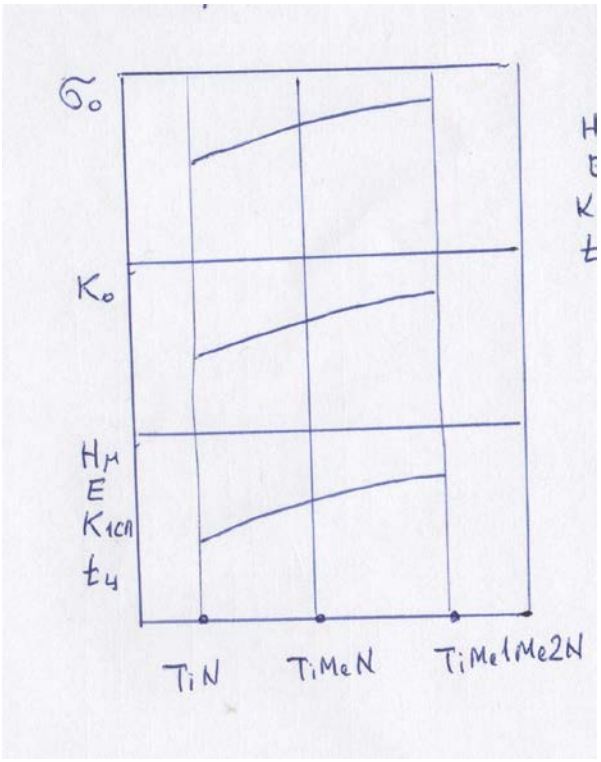


Рис. 13. Изменение остаточных сжимающих напряжений и механических свойств при переходе от одноэлементных к двух- и трехэлементным покрытиям

Прочность адгезии покрытия с инструментальной основой также зависит как от состава покрытия, так и технологии его нанесения. Введение в состав покрытия TiN дополнительного легирующего элемента приводит к изменению прочности адгезии (рис. 12). В зависимости от легирующего элемента она может, как возрастать, так и уменьшаться. Как видно из рис. 12 и **табл. 3.4 из учебного пособия стр.83**, введение в состав покрытия TiN Zr, Cr, Nb и Si прочность адгезии снижается, а Fe и Al – повышается. Снижение прочности адгезии при переходе от одно- к двухэлементным покрытиям, полученным с использованием составных катодов, связано с более высокой микротвердостью двухэлементных покрытий. Прочность адгезии трехэлементных покрытий меньше по сравнению с двухэлементными, за исключением покрытий, имеющих в качестве второго легирующего элемента алюминий или железо (**см. табл. 3.4 из учебного пособия стр. 83**).

Покрытия, полученные с использованием раздельных катодов, имеют большую прочность адгезии, по сравнению с покрытиями, полученными из составных катодов (**табл. 3.5 из учебного пособия стр. 83**), что объясняется их мультислоистостью. При переходе от одно- к двух- и трехэлементным покрытиям возрастают сжимающие остаточные напряжения и увеличиваются модуль Юнга E, вязкость разрушения $K_{ICП}$ и циклическая трещиностойкость $t_ц$ покрытий (рис. 13 и **табл. 3.4 из учебного пособия стр. 83**). Многослойные покрытия по сравнению с однослойными покрытиями имеют более высокие механические свойства (**см. табл. 3.6 из учебного пособия стр. 86**).

ВЛИЯНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА КОНТАКТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Направленное изменение свойств износостойких покрытий путем варьирования их составом, структурой и строением позволяет существенно изменить контактные характеристики процесса резания. При этом появляется возможность управления важнейшими выходными параметрами процесса резания: производительностью, стойкостью, надежностью, качеством и точностью обработанных деталей.

Стружкообразование и наростообразование при резании инструментом с покрытием

Нанесение покрытий на рабочие поверхности режущего инструмента оказывает существенное влияние на процесс резания и приводит к трансформации зон стружкообразования. Как видно из рис. 14, для режущего инструмента с покрытием уменьшаются размеры зоны основных пластических деформаций *OLM* и зоны дополнительных деформаций *OF*.
При нанесении покрытия линии *OL* и *OM*, характеризующие начало и конец зоны пластического деформирования, смещаются по часовой стрелке в сторону передней поверхности инструмента (положения *OL'*, *OM'*), причем более значительно смещается линия *OL*. Подобная трансформация зон основных и дополнительных пластических деформаций наблюдается при увеличении переднего угла и росте скорости резания.

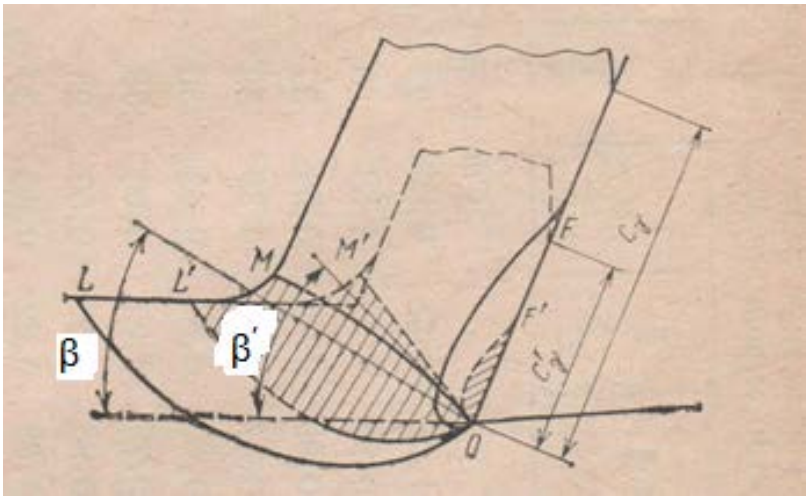


Рис. 14. Обобщенные представления о трансформации зон стружкообразования при резании инструментом с покрытием:
OLM, *OF*, C_γ, β и *OL'M'*, *OF'*, C_γ', β' – зоны основных и дополнительных деформаций, длина контакта стружки по передней поверхности, угол сдвига соответственно при резании инструментом без покрытия и с покрытием

Влияние покрытий на трансформацию зон *OLM* и *OF* проявляется вследствие уменьшения трения при перемещении контактирующих поверхностей обрабатываемого материала относительно поверхности покрытия, а также из-за снижения напряжений сдвига, которое происходит благодаря снижению интенсивности тепловыделений и перераспределения тепловых потоков. В результате снижения трения уменьшается полная длина контакта стружки с передней поверхностью $C\gamma$ и увеличивается угол сдвига β.

При определенных условиях на передней поверхности режущего инструмента образуется нарост: частицы металла привариваются к передней поверхности, наслаиваются друг на друга, образуя относительно неподвижное клинообразное тело.

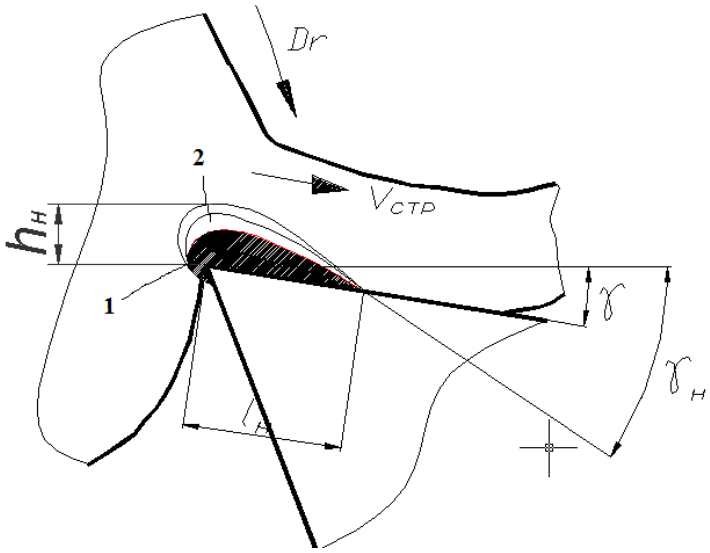


Рис. 15. Схема строения нароста

Нарост имеет следующие зоны (рис. 15):

1 – полностью неподвижная зона; 2 – зона, в которой скорость частиц металла изменяется от 0 до скорости стружки.

Нарост характеризуется следующими параметрами: $h_н$ – высота нароста; $l_н$ – длина подошвы нароста; $\gamma_н$ ($\gamma_ф$) – угол нароста (фактический передний угол).

Положительные свойства нароста: твердость нароста в 2-2.5 раза выше твердости основного материала, следовательно, нарост упрочняет режущий клин и осуществляет резание; нарост увеличивает передний угол инструмента ($\gamma_ф$) и, тем самым, облегчает процесс резания; располагаясь на передней поверхности и нависая над задней, нарост защищает их от износа.

Отрицательные свойства нароста: т.к. нарост периодически образуется и разрушается (часть нароста уносится сходящей стружкой, а другая попадает на уже обработанную поверхность) ухудшается шероховатость обработанной поверхности, уменьшается точность обработки и возникает вероятность возникновения вибраций.

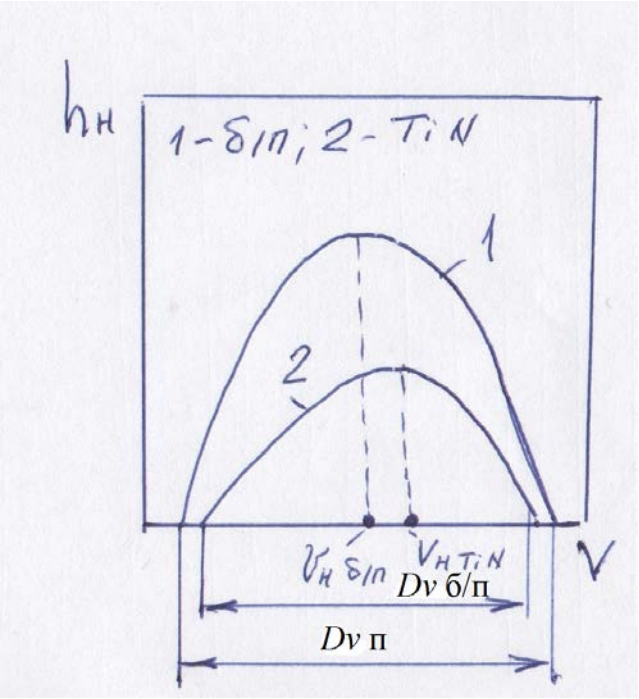


Рис. 16. Влияние покрытий на высоту нароста

Нанесение покрытий существенно влияет на процесс наростообразования. Одноэлементные покрытия (TiN, CrN, MoN) заметно уменьшают параметры нароста (высоту $h_н$ и длину $l_н$), снижают диапазон скоростей (Dv) устойчивого наростообразования (рис. 16 и **рис. 4.6 из учебного пособия**). Скорость резания $v_н$, при которой формируется нарост максимальной высоты $h_{н\ max}$, смещается для инструмента с покрытием на 20 … 50% в область более высоких значений.

Контактные характеристики процесса резания

Нанесение одноэлементных покрытий TiN (рис. 17 и **табл. 4.1 из учебного пособия стр. 92**) снижает длину контакта C_γ стружки с передней поверхностью, нормальные силы N_γ и силы трения $F\gamma$ на передней поверхности, угол действия ω и увеличивает угол сдвига β. Соответственно снижаются

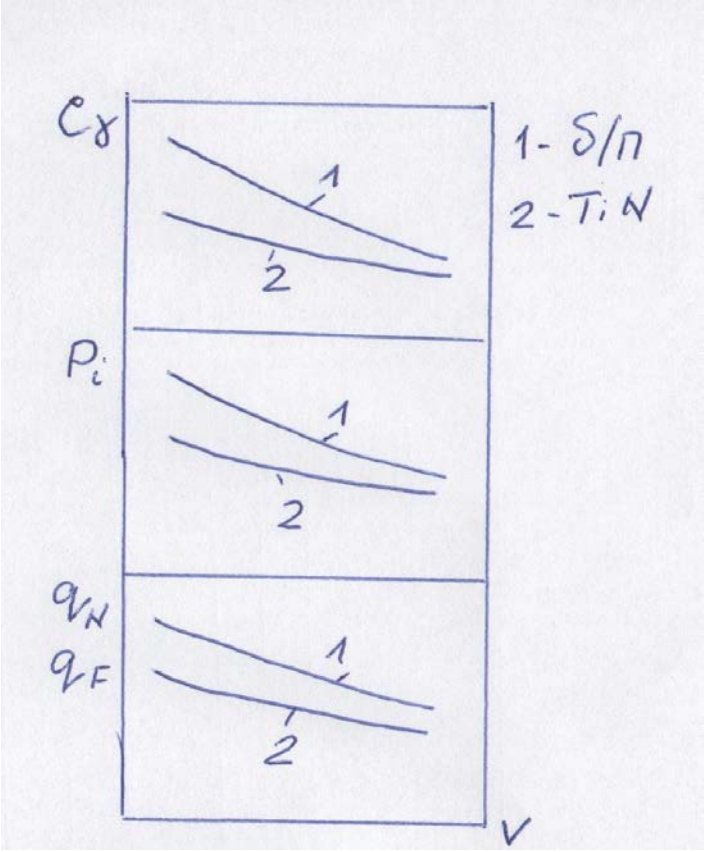


Рис. 17. Влияние покрытий на длину контакта (C_γ), силы резания (Pi) и средние контактные нагрузки (q_N и q_F)

коэффициенты трения на передней μ_γ и задней μ_α поверхностях инструмента. Следствием этого является уменьшение коэффициента укорочения стружки K_L (рис. 18), составляющих сил резания P_z, P_y, P_x, что свидетельствует о снижении степени пластической деформации материала в зоне стружкообразования. Уменьшение длины контакта стружки с передней поверхности и составляющих силы резания сказывается на средних контактных нормаль-

ных q_N и касательных q_F нагрузках и контактных нормальных σ_N и касательных τ_F напряжениях.

Нанесение покрытий TiN ведет к снижению контактных нагрузок и напряжений. В то же время при работе режущего инструмента в условиях резания, когда снижение длины контакта стружки с передней поверхностью происходит в большей степени, чем снижение силы резания, контактные нормальные нагрузки q_N и напряжения σ_N для инструмента с покрытием могут быть выше, чем для инструмента без покрытия.

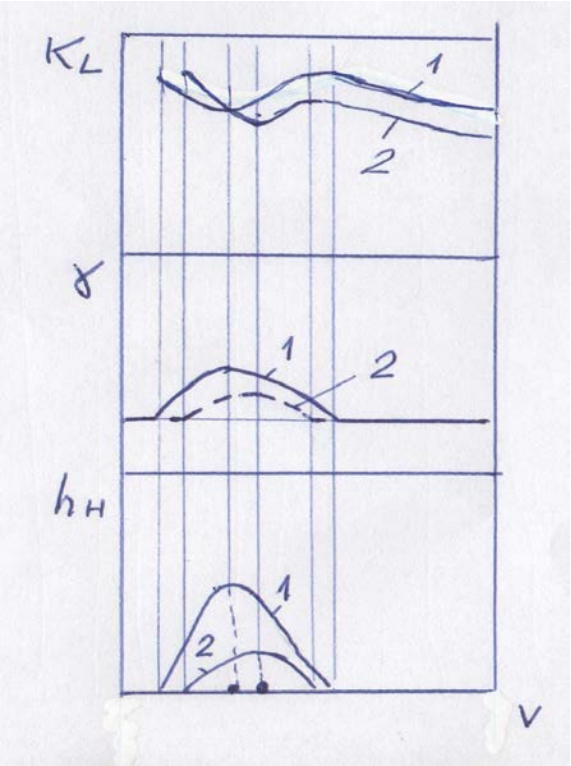


Рис. 18. Влияние покрытия на коэффициент укорочения стружки

Это означает, что такой инструмент имеет повышенную склонность к упругим прогибам, потере формоустойчивости режущего клина и снижению запаса пластической прочности. Данный факт следует учитывать при разработке новых составов покрытий и проектировании режущих инструментов с такими покрытиями, так как чем больше покрытие снижает характеристики контактных процессов, а также энергозатраты на трение, тем выше вероятность упруго-пластических прогибов и снижения пластической прочности режущей части инструмента.

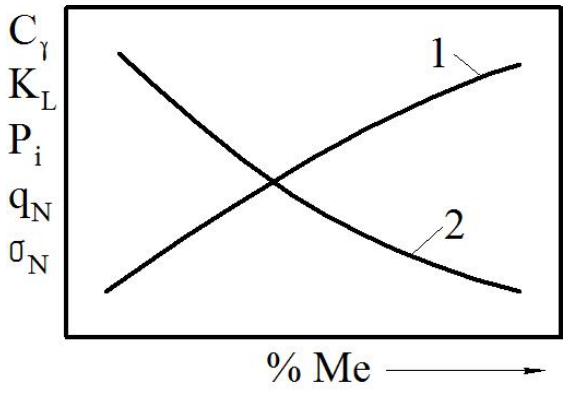


Рис. 19. Влияние содержания дополнительного элемента Me в покрытии на контактные характеристики процесса резания:
$1 – C_\gamma, K_L, P_i$; $2 – q_N, q_F$

Изменение состава покрытий оказывает существенное влияние на контактные характеристики процесса резания. Повышение в покрытии содержания дополнительного элемента приводит к повышению длины контакта C_γ

стружки с передней поверхностью, коэффициента укорочения стружки K_L, составляющих сил резания и снижению средних удельных нормальных и касательных нагрузок на передней поверхности (рис. 19).

Переход от одноэлементных покрытий к многоэлементным характеризуется повышением сил трения на передней поверхности режущего инструмента, что подтверждается увеличением длины контакта стружки с передней поверхностью и коэффициента трения на передней поверхности (рис. 20). Соответственно увеличивается пластическая деформация обрабатываемого материала в зоне стружкообразования, о чем свидетельствует рост коэффициента укорочения стружки и составляющих сил резания.

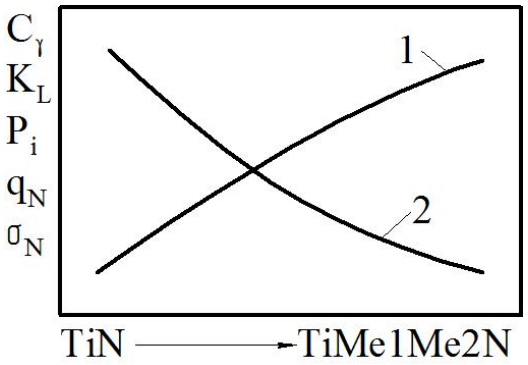


Рис. 20. Изменение контактных характеристик процесса резания (1- C_γ, K_L, Pi; 2-q_N, q_F) при переходе от одноэлементных к многоэлементным покрытиям

Увеличение длины контакта стружки с передней поверхностью, характерное для инструмента с двух- и трехэлементными покрытиями, способствует снижению средних удельных нормальных нагрузок и контактных нормальных напряжений на передней поверхности (рис. 22) по сравнению с одноэлементными покрытиями. При этом удельные нагрузки на задней поверхности практически не изменяются и остаются на уровне, имеющем место для инструмента с одноэлементным покрытием. Аналогичное влияние покрытий на контактные характеристики процесса резания проявляется и в условиях прерывистого резания **(см. учебное пособие табл. 4.4 и 4.5 стр. 98-99).**

Тепловое состояние режущего инструмента с покрытием

Как и при непрерывной, так и при прерывистой обработке основной причиной изменения теплового состояния инструмента является изменение контактных характеристик процесса резания при нанесении покрытия.

При токарной обработке нанесение одноэлементных покрытий нитрида титана приводит к уменьшению общего количества теплоты Q, образующейся в процессе резания, теплоты трения по передней $Q_{тп}$ и задней $Q_з$ поверхности и теплоты деформации $Q_д$ (рис. 21). При этом разница в общем количестве теплоты для инструмента с покрытием и без покрытия с увеличением

скорости резания возрастает. Уменьшение длины контакта C_γ и составляющих сил резания P_z, P_y и P_x при нанесении одноэлементных покрытий приводит к снижению интенсивности тепловых источников деформации $q_д$ и трения $q_{тп}$ на передней поверхности режущего инструмента.

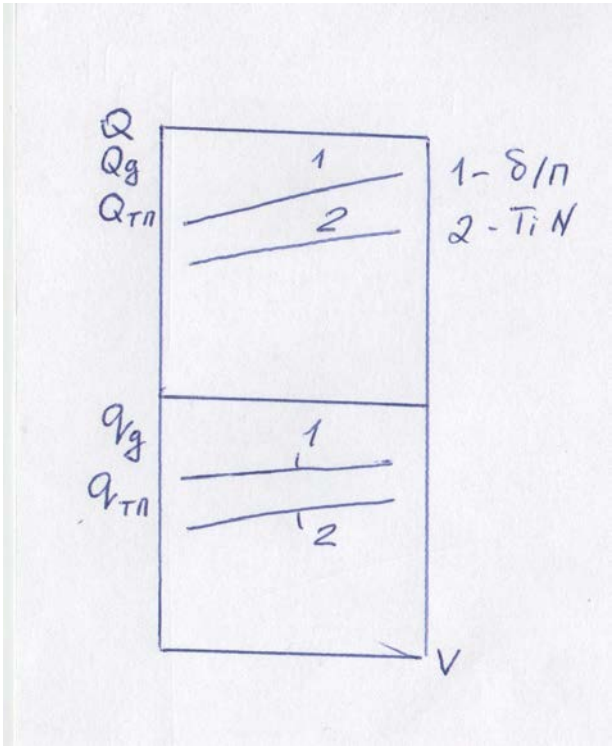


Рис. 21. Влияние покрытия на показатели теплового состояния режущего инструмента

В результате снижения интенсивностей $q_д$ и $q_{тп}$ уменьшается интенсивность теплового потока $q_п$ в режущий клин инструмента со стороны передней поверхности. Снижение мощности теплового потока Q_n и интенсивности $q_п$ через переднюю поверхность снижает температуру на передней поверхности Тк и в режущем клине (рис. 23). При этом максимальная температура на передней поверхности и изотермы температуры в режущем клине смещаются в сторону главной режущей кромки и задней поверхности (рис. 23).

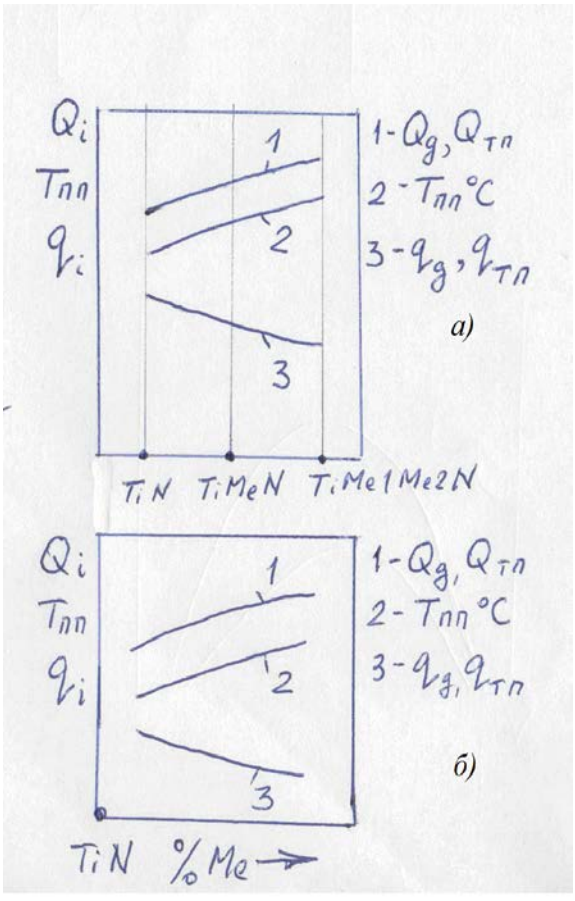


Рис. 22. Изменение показателей теплового состояния инструмента при переходе от одноэлементных покрытий к двух- и трехэлементным покрытиям (а) и при повышении содержания легирующего элемента (б) в составе покрытия

При переходе от одноэлементных покрытий к многоэлементным покрытиям увеличиваются силы резания, что вызывает рост источников теплоты деформации и трения по передней поверхности, а также контактной температуры на передней поверхности режущего инструмента (рис. 22, а). В то же время, увеличение длины контакта стружки снижает интенсивность тепловых источников (рис. 22, а). При этом, максимальн-

ная температура на передней поверхности и изотермы температуры в режущем клине смещаются в сторону от главной режущей кромки и задней поверхности (рис. 23). Кроме того, изотермы в режущем клине инструмента с многоэлементным покрытием сдвигается вглубь инструментальной основы (рис. 23, **рис. 4.14 стр.110 из учебного пособия**). Сказанное выше говорит о более благоприятном тепловом состоянии режущего инструмента с многоэлементными покрытиями.

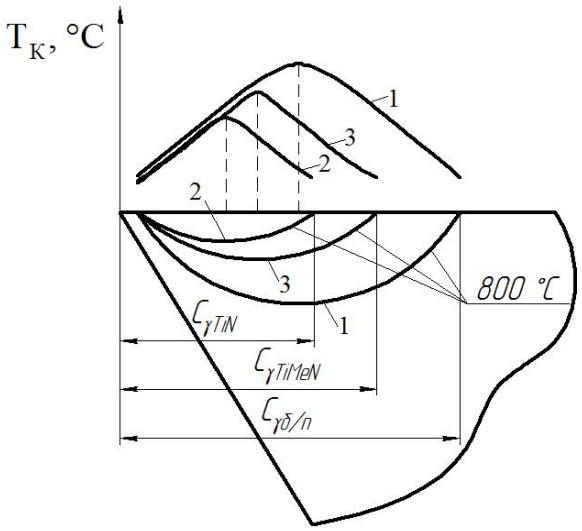


Рис. 23. Влияние покрытий на контактную температуру на передней поверхности и изотермы температурного поля в режущем клине инструмента: 1 – без покрытия, 2 – с покрытием TiN; 3 – с покрытием TiMeN

Повышение содержания легирующего элемента в покрытии ведет к росту сил резания, что вызывает рост источников теплоты деформации и трения по передней поверхности, а также контактной температуры на передней поверхности режущего инструмента. В то же время, увеличение длины контакта стружки снижает интенсивность тепловых источников (рис. 22, б).

Нанесение покрытия приводит к перераспределению количества теплоты, образующегося в зоне резания, между инструментом, стружкой и заготовкой (рис. 24 и **табл. 4.8 из учебного пособия стр. 111**). Уменьшение коэффициента укорочения стружки K_L, которое имеет место при нанесении покрытия, ведет к повышению скорости перемещения стружки по передней поверхности инструмента. В тоже время, снижение полной длины контакта стружки с передней поверхностью C_γ уменьшает площадь теплового источника от трения на передней поверхности. Оба этих фактора приводят к тому, что количество теплоты, уходящее со стружкой, увеличивается, а количество теплоты, поступающей в инструмент и заготовку, снижается.

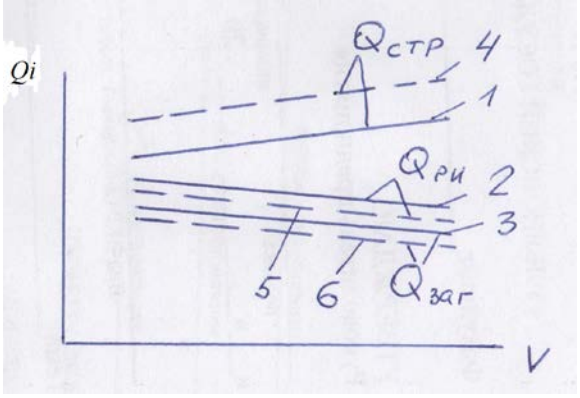


Рис. 24. Влияние покрытий на тепловой баланс при резании: 1,2,3 – без покрытия; 4,5,6 – с покрытием

Аналогичное влияние ИП оказывают на тепловое состояние РИ при прерывистом резании (**см. учебное пособие рис. 4.15 и 4.16, табл. 4.11 - 4.13, стр. 114-118).**

Напряженное состояние режущего инструмента с покрытием

Напряженное состояние режущего инструмента характеризуется контактными нормальными σ_N и касательными τ_F напряжениями, эквивалентными напряжениями, действующими на передней поверхности, напряжениями, действующими в режущем клине, и в покрытии в процессе резания.

Нанесение одноэлементных покрытий (например, TiN) ведет к снижению нормальных контактных напряжений на передней поверхности режущего инструмента. Увеличение длины контакта при нанесении многоэлементных покрытий по сравнению с одноэлементными покрытиями приводит к дальнейшему снижению нормальных контактных напряжений. При этом контактные касательные напряжения изменяются незначительно (рис. 25).

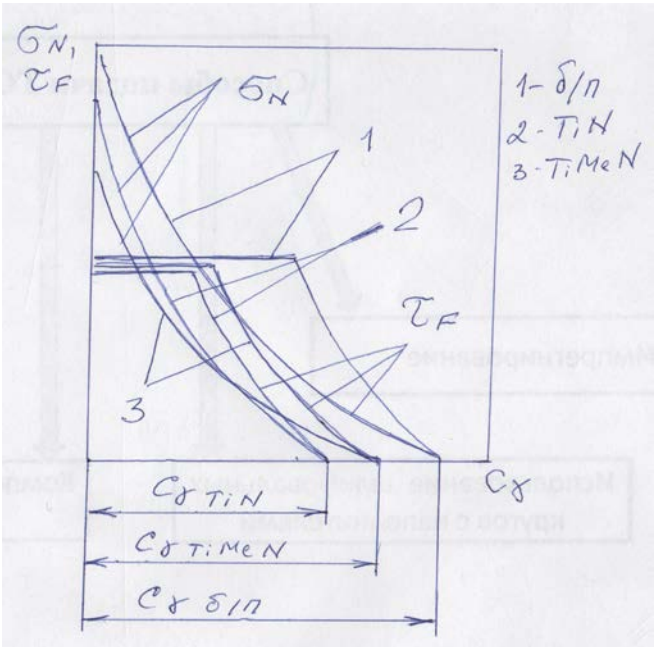


Рис. 25. Влияние покрытий на контактные нормальные (σ_N) и касательные (τ_F) напряжения на передней поверхности инструмента

Нанесение покрытий, как было сказано выше, уменьшает температуру и силы резания, что является причиной снижения эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$, действующих на передней поверхности инструмента, по сравнению с инструментом без покрытия. При этом, распределение эквивалентных напряжений на передней поверхности инструмента при токарной обработке носит немонотонный характер (рис. 26). Максимальные

напряжения возникают у вершины режущего клина инструмента и на участке контакта по передней поверхности, равном $(0,4 – 0,5)C_\gamma$. Повышение длины контакта Cγ при нанесении многоэлементных покрытий по сравнению с одноэлементными уменьшает контактные напряжения на передней поверхности, в результате чего эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}$ снижаются (рис. 26). Таким образом, при переходе от одноэлементных покрытий к многоэлементным эквивалентные напряжения снижаются (рис. 27).

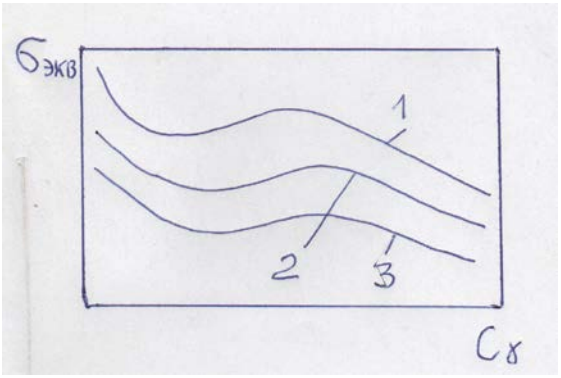


Рис. 26. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ на передней поверхности: 1 – без покрытия; 2 – TiN; 3 – TiZrN

Нанесение одноэлементных покрытий снижает напряжения, действующие в режущем клине, а уменьшение длины контакта C_γ вызывает смещение изобар данных напряжений в сторону задней поверхности. Повышение длины контакта стружки с передней поверхностью при нанесении многоэлементных покрытий приводит к смещению изобар напряжений, по сравнению с одноэлементными покрытиями, от режущей кромки и задней поверхности (**рис. 4.17 из учебного пособия стр. 119**).

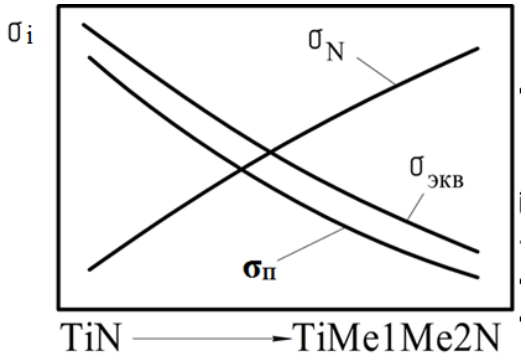


Рис. 27. Влияние состава покрытий на эквивалентные ($\sigma_{экв}$), нормальные (σ_N) и напряжения ползучести ($\sigma_П$) в покрытиях в процессе резания

При этом снижается и величина напряжений в режущем клине инструмента с данными покрытиями. Таким образом, применение многоэлементных покрытий в большей степени способствует снижению контактных напряжений, действующих на передней поверхности и в режущем клине инструмента. При этом изобары напряжений смещаются в сторону от режущей кромки инструмента в направлении схода стружки, что улучшает напряженное состояние режущего клина инструмента.

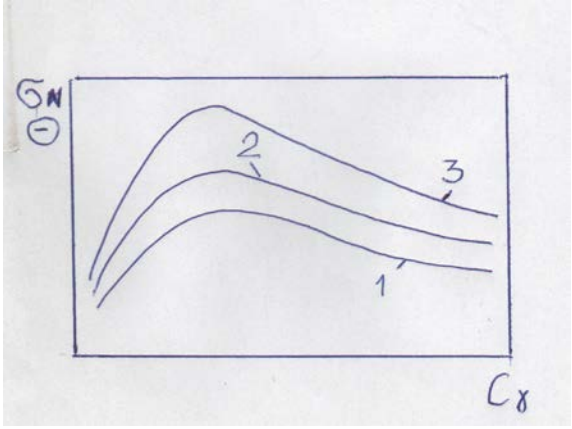


Рис. 28. Распределение нормальных напряжений (σ_N) в материале покрытия в процессе резания: 1 – TiN; 2 – TiZrN; 3 – TiZrCrN

В процессе резания в покрытии возникают нормальные напряжения сжатия (σ_N) (рис. 28). Формирование в покрытиях в процессе резания высоких сжимающих напряжений сдерживает и тормозит процессы образования и развития в них трещин и увеличивает время работы инструмента до разрушения покрытия. Напряжения, действующие в покрытии в процессе резания, зависят от состава покрытия, материала инструментальной основы. Наименьшая величина напряжений σ_N характерна для одноэлементных покрытий. Переход от одноэлементных нитридных покрытий к многоэлементным характеризуется повышением напряжений σ_N (рис. 27), что благоприятно сказывается на напряженном состоянии покрытий. Более высокий уровень нормальных сжимающих напряжений в многоэлементных покрытиях связан с их высокими механическими свойствами и высоким уровнем остаточных сжимающих напряжений. В процессе резания в покрытиях действуют растягивающие напряжения, связанные с ползучестью режущего клина инструмента ($\sigma_П$). Уровень данных напряжений меньше в многоэлементных покрытиях по сравнению с одноэлементными. По мере работы режущего инструмента происходит трансформация сжимающих суммарных напряжений в растягивающие напряжения (рис. 29). Данный процесс в многоэлементных покрытиях происходит за больший период работы режущего инструмента по сравнению с одноэлементными покрытиями.

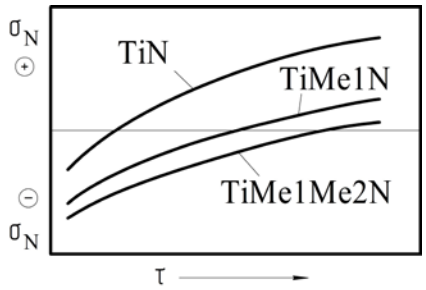


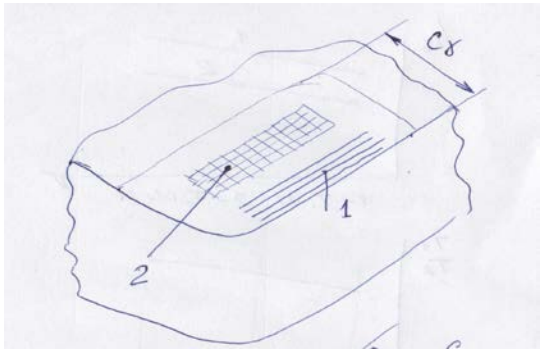
Рис. 29. Изменение нормальных напряжений σ_N от времени работы инструмента

При прерывистом резании наблюдается аналогичная картина влияния покрытий на напряженное состояние режущего инструмента (см. учебное пособие рис. 4.23-4.25, стр. 125-128)

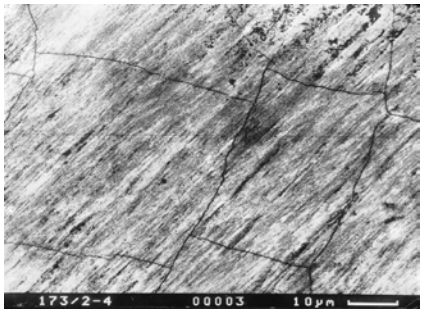
РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

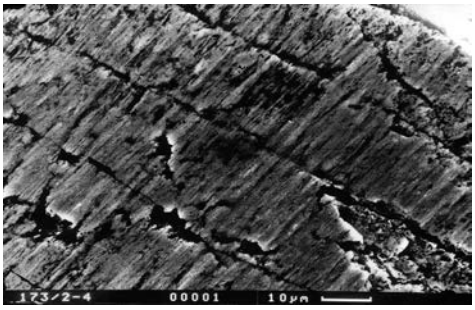
Характер разрушения износостойкого покрытия в процессе резания

При непрерывном продольном точении разрушение покрытия происходит в результате образования трещин на передней поверхности (рис. 29, а), причиной образования которых являются эквивалентные напряжения.



а)





б) в)

Рис. 29. Схема образования трещин (а) и вид контактных площадок на передней поверхности инструмента (б, в) с покрытием при токарной обработке:
1, в – трещины на участке пластического контакта,
2, б – трещины на участке упругого контакта

Действие эквивалентных напряжений на участке упругого контакта наряду с процессами схватывания приводит к усталостным процессам в материале покрытия, в результате которых образуется сетка трещин (рис. 29,б), а высокий их уровень на участке пластического контакта вызывает упругопластические деформации режущего клина, приводящие к возникновению на данном участке поперечных трещин (рис. 29, в).

Рост количества поперечных трещин вдоль режущей кромки и мелких трещин на участке упругого контакта приводит сначала к скалыванию покрытия по краям трещин, а затем к ослаблению отдельных объемов покрытия и удалению их сходящей стружкой с обнажением инструментальной основы. В дальнейшем образуется лунка износа по передней поверхности.

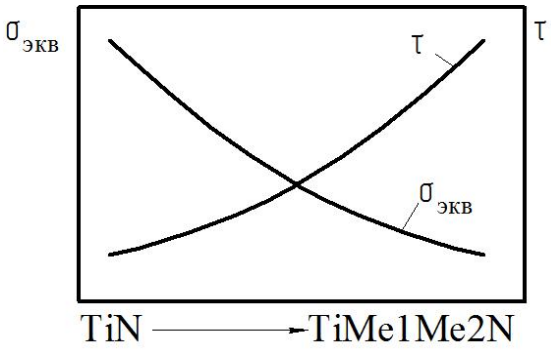


Рис. 30. Влияние состава покрытий на время образования трещин (τ) и эквивалентные напряжения ($\sigma_{экв}$)

Разрушение покрытий различного состава имеет одинаковый характер, а динамика процесса трещинообразования зависит от состава покрытия и режима резания.

Нанесение многоэлементных покрытий увеличивает время (τ) работы инструмента до образования трещин как на участке упругого, так и пластического контактов (рис. 30). Для режущего инструмента с многоэлементными покрытиями за одно и то же время обработки характерна меньшая интенсивность трещинообразования на контактных площадках работы инструмента по сравнению с одноэлементными покрытиями. Причиной этого, как было сказано ранее, являются более высокие нормальные сжимающие напряжения σ_N, которые формируются в них в процессе резания (рис. 28) и более эффективно сдерживают процессы образования и развития трещин.

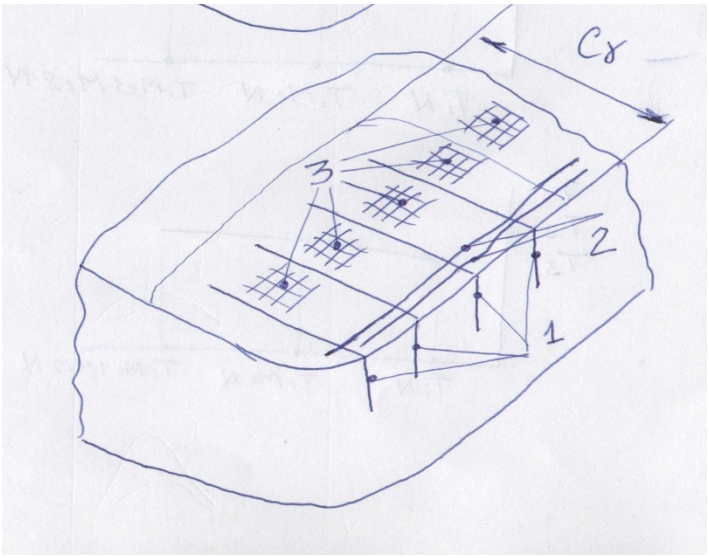


Рис. 31. Схема образования трещин на передней поверхности инструмента при торцовом фрезеровании

При прерывистом резании, например, при торцовом фрезеровании, образование трещин в покрытии происходит в результате переменных тепловых и силовых нагрузок, возникающих при чередовании рабочего и холостого ходов режущего инструмента. Циклическое изменение данных напряжений за время рабочего и холостого ходов вызывает усталостные явления, способствующие возникновению трещин. Кроме того, росту трещин способствуют растягивающие напряжения в режущем клине инструмента, возникающие во время его холостого хода. Чем больше амплитуда колебаний тепловых и силовых нагрузок за время рабочего цикла инструмента, тем выше величина напряжений, действующих на передней поверхности и в режущем клине инструмента и вызывающих образование трещин в покрытии.

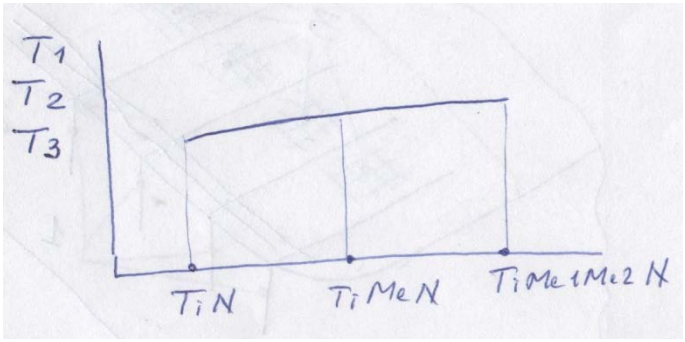


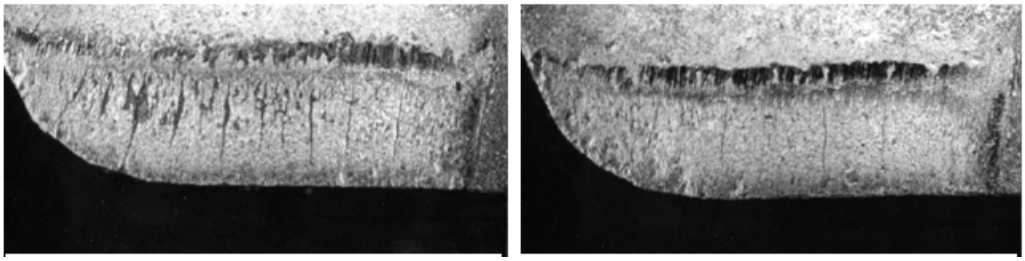
Рис. 32. Влияние покрытий на время до образования продольных трещин (T_1), сетки трещин (T_2) и разрушения покрытия (T_3) на передней поверхности при торцовом фрезеровании

Для режущего инструмента с покрытиями процесс разрушения покрытий начинается с образования продольных трещин в материале инструментальной основы (рис. 31, трещины 1) на середине контакта по передней поверхности, которые со временем выходят на режущую кромку и заднюю поверхность. Дальнейшее увеличение времени работы инструмента ведет к об-

разованию продольных трещин в покрытии, а затем поперечных трещин и возникает сетка трещин (рис. 31, трещины 3).

Образование сетки трещин ослабляет отдельные объемы покрытия и способствует удалению их сходящей стружкой. Одновременно с образованием поперечных трещин в материале покрытия на передней поверхности инструмента возникают поперечные трещины в инструментальной основе, расположенные вдоль режущей кромки, которые далее сливаются в единую трещину вдоль всей режущей кромки (рис. 31, трещины 2).

Более высокие механические свойства многоэлементных покрытий и уровень сжимающих нормальных напряжений, действующих в них в процессе резания во время рабочего хода инструмента, увеличивают время работы РИ до образования продольных трещин в инструментальной основе (время



а) б)

Рис. 33. Вид контактных площадок на передней поверхности инструмента с покрытиями TiN (а) и TiCN-TiN (б) при торцовом фрезеровании заготовок из стали 5ХНМ

T_1), сетки трещин в покрытии (время T_2) и до разрушения покрытия (время T_3) (рис. 32) **(см. примеры из учебного пособия рис. 5.7 – 5.9 стр.136-138).**

Многослойные покрытия по сравнению с однослойными в большей степени сдерживают процессы трещинообразования и снижают интенсивность этих процессов в инструментальной основе (рис. 33 и **рис. 5.10 и 5.11 стр. 138 и 139 из учебного покрытия).**

Особенности изнашивания режущего инструмента с износостойким покрытием

Покрытия заметно изменяют характер изнашивания контактных площадок.

Для инструмента из быстрорежущей стали нанесение покрытий сдерживает развитие лунки износа на передней поверхности, меняя характер ее развития.

Разрушение покрытия на передней поверхности при работе быстрорежущим инструментом происходит уже на стадии приработочного и установившегося изнашивания инструмента. Разрушаясь на контактной площадке на передней поверхности, покрытие сохраняется на полочке *C* вдоль контактной площадки между режущей кромкой и краем лунки, что объясняется защитным действием нароста. Наличие нароста на передней поверхности способствует сохранению покрытия и на локальных участках задней поверх-

ности. Остатки покрытия сдерживают развитие очагов износа на контактных площадках инструмента. Для инструмента без покрытия характерно интенсивное развитие лунки не только в направлении схода стружки (от режущей кромки), но и в противоположном направлении (к кромке), что при выходе лунки к режущей кромке (при уменьшении размера C, рис. 34) приводит к катастрофическому разрушению инструмента. Для инструмента с покрытием развитие лунки резко замедляется, особенно в направлении к режущей кромке. Замедляется рост лунки износа в глубину (уменьшается глубина лунки $h_л$) и особенно в ширину (уменьшается ширина лунки $B_л$), снижается интенсивность изнашивания по задней поверхности (фаска износа по главной задней $h_з$ и вспомогательной задней $h_{з.в.}$ поверхностям (рис. 34).

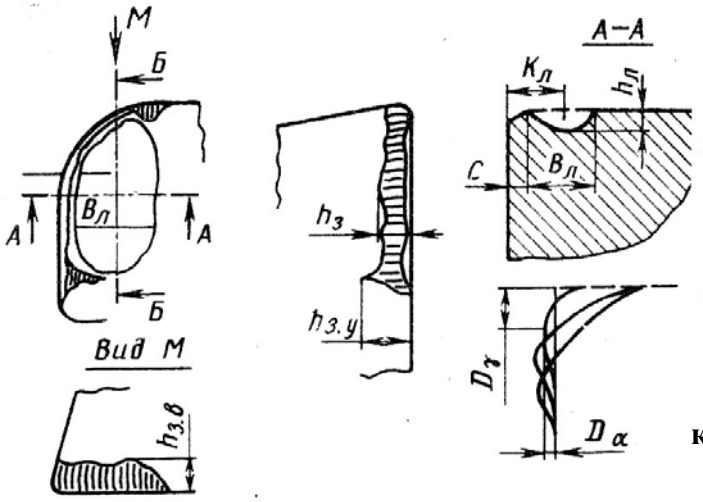
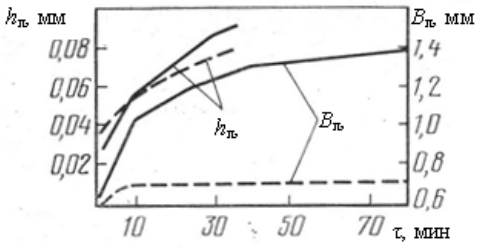


Рис. 34. Схема изнашивания контактных площадок режущего инструмента

Быстрорежущего инструмента с покрытием сопровождается увеличением переднего угла. Это происходит вследствие более интенсивного роста лунки в ширину для инструмента без покрытия (рис. 35).



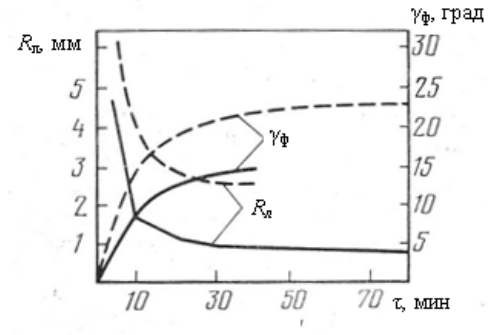


Рис. 35. Изменение параметров лунки износа на передней поверхности инструмента во времени: сплошная линия – для инструмента без покрытия; штриховая – с покрытием

Увеличение переднего угла для быстрорежущего инструмента с покрытием снижает энергозатраты на пластическое деформирование срезаемого слоя и является одной из причин роста работоспособности инструмента с покрытием.

Разрушение покрытия при работе быстрорежущим инструментом инициируется адгезионными процессами в условиях наростообразования, в которых работает данный инструмент. В этих условиях резко усиливается роль усталостных процессов, связанных с воздействием на покрытие знакопеременных нагрузок. В условиях активного наростообразования покрытие разрушается более

интенсивно, при этом нивелируется различие в эффективности инструмента с различными по составу покрытиями.

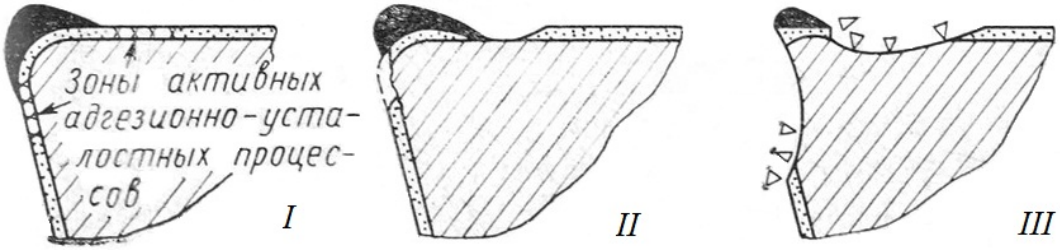


Рис. 36. Обобщенная схема развития очагов изнашивания быстрорежущего инструмент с покрытием

Динамика развития очагов износа быстрорежущего инструмента с покрытиями включает следующие стадии (рис. 36).

Стадия 1 соответствует периоду приработки инструмента. Покрытие, полностью сохранившее свою сплошность на передней и задней поверхностях инструмента, эффективно снижает мощность теплового источника. На второй стадии в результате адгезионно-усталостных процессов, особенно в условиях неустойчивого наростообразования, начинается разрушение покрытия на контактных площадках инструмента по усталостному механизму с развитием сетки хрупких трещин. Частично разрушенное покрытие продолжает сдерживать развитие очагов износа на контактных площадках вследствие большой сопротивляемости абразивному истиранию. Одновременно, за счет благоприятного изменения параметров лунки износа и роста фактического переднего угла для инструментов с покрытиями, мощность деформационного источника теплоты ниже, чем у инструмента без покрытия.

На третьей стадии покрытие сохраняется на полочке, по мере роста очагов износа все больше нивелируется разница между инструментом с покрытием и без покрытия и наступает катастрофический износ.

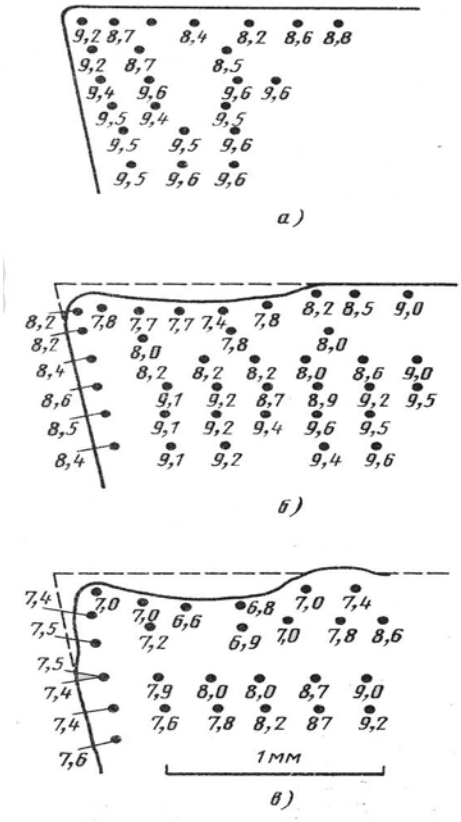


Рис. 37. Распределение микротвердости в режущем клине быстрорежущего инструмента без покрытия при точении стали 45:
V=55 м/мин; S=0,3 мм/об; t = 2 мм;
а, б, в – время работы инструмента соответственно 30 с, 5 мин, 18 мин

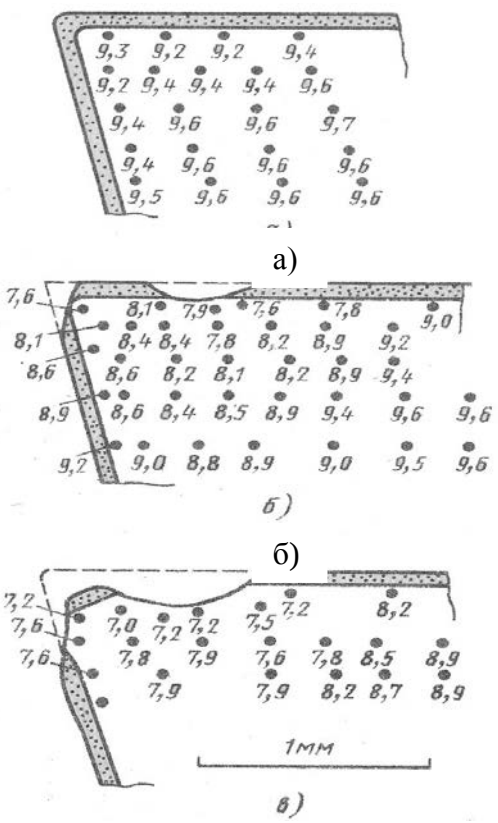


Рис. 38. Распределение микротвердости в режущем клине быстрорежущего инструмента с покрытием TiN при точении стали 45:
V=55 м/мин; S=0,3 мм/об; t = 2 мм;
а, б, в – время работы инструмента соответственно 30 с, 8 мин, 55 мин

Нанесение покрытий достаточно эффективно предохраняет основу быстрорежущего инструмента от разупрочнения, что обусловлено снижением термомеханической нагрузки на режущий клин (рис. 37 и 38). На стадии приработки для инструмента без покрытия уже наблюдается снижение микротвердости локальных объемов быстрорежущей стали непосредственно у контактных площадок передней и задней поверхностей, а для инструмента с покрытием TiN снижение микротвердости практически отсутствует. На стадии установившегося изнашивания микротвердость режущей части инструмента с покрытием и без покрытия различаются уже несколько меньше, хотя уровень разупрочнения для инструмента с покрытием заметно ниже. На стадии катастрофического изнашивания микротвердость режущей части инструмента с покрытием практически та же самая, что инструмента без покрытия, хотя полное разупрочнение пластины с покрытием было достигнуто за гораздо большее время. На стадии катастрофического износа для инструментов как с покрытием, так и без покрытия имеет место значительное изменение формы режущей части.

Для инструмента из твердого сплава нанесение покрытий на твердосплавный инструмент изменяет характер износа контактных площадок инструмента, устраняя процесс лункообразования на передней поверхности,

имеющее место для инструмента без покрытий при обработке заготовок из конструкционных сталей на режимах резания, соответствующих получистовой и чистовой обработке. Для режущего инструмента с покрытиями наблюдается изменение формы режущего клина в виде выпучивания по передней поверхности и пластического оттеснения задней поверхности (рис. 39 и **рис. 5.17 стр. 145 из учебного пособия).** Происходящее при этом опускание вершины режущего клина инструмента зависит не только от материала инструментальной основы, но и от свойств материала износостойкого покрытия, которые определяются в свою очередь его составом (**см. учебное пособие рис. 5.18 стр.146**).

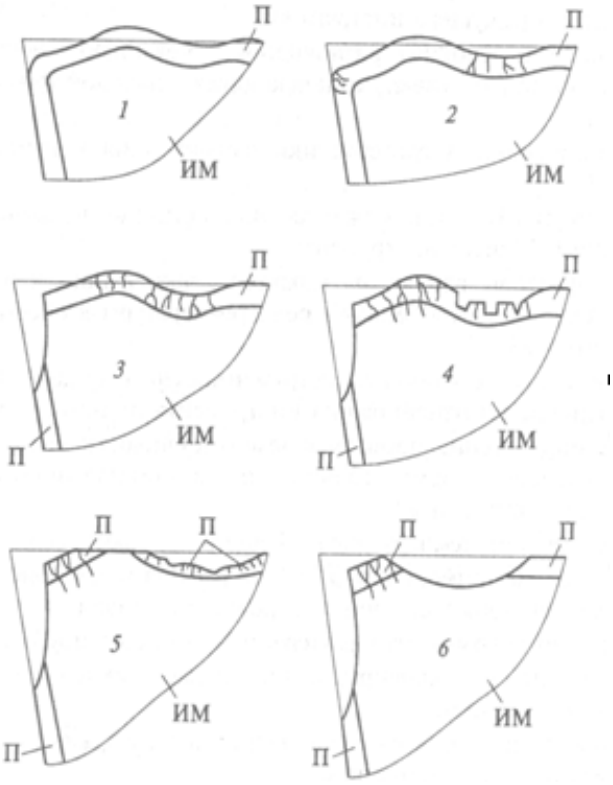


Рис. 39. Обобщенная физическая модель изнашивания и деформации твердосплавного инструмента с покрытием: П – покрытие; ИМ – инструментальный материал

При обработке заготовок **из чугуна** характер износа твердосплавных пластин с покрытиями существенно изменяется по сравнению с обработкой заготовок из конструкционной стали. Абразивное воздействие материала заготовки резко интенсифицирует процессы трещинообразования и разрушения покрытий.

При обработке заготовок **из труднообрабатываемых материалов** разрушение покрытия происходит уже на стадии приработочного изнашивания режущего инструмента. Однако и после разрушения покрытия контактные поверхности долго сопротивляются изнашиванию благодаря сохранению его на участке, примыкающем к режущей кромке, и в виде отдельных «островков» на участке скольжения стружки по передней поверхности.

Процесс изнашивания контактных площадок твердосплавного инструмента с покрытиями при токарной обработке (непрерывное резание) проходит следующие стадии (рис. 39 и **рис. 5.19 стр. 147 учебного пособия**): 1 – пластическая деформация режущего клина инструмента, вызванная действием эквивалентных напряжений на передней поверхности инструмента; 2 – зарождение и развитие трещин на контакте по задней поверхности и участке упругого контакта на передней поверхности;

3 – разрушение покрытия на контакте по задней поверхности, дальнейшее развитие трещин на участке упругого контакта и образование трещин на участке пластического контакта в результате деформации режущей части инструмента; 4 – развитие очага износа по задней поверхности, локальные разрушения покрытия на участке упругого контакта, дальнейшее развитие трещин на участке пластического контакта с прорастанием их в основу твердого сплава; 5 – дальнейшее разрушение покрытия на участке упругого контакта, локальные вырывы макрообъемов покрытия и разрушение покрытия на участке пластического контакта; 6 – образование лунки износа, интенсивное развитие очагов износа на контактных поверхностях, ведущее к катастрофическому износу инструмента.

Прерывистое резание характеризуется значительной спецификой с точки зрения циклического характера формирования застойных зон, значительных колебаний температур во время рабочего и холостого циклов, специфических условий контакта задней поверхности инструмента и обрабатываемого материала. В этих условиях инструмент с покрытием работает в наименее благоприятных условиях из-за повышенной хрупкости износостойких покрытий. Эффективность покрытий однослойного типа при прерывистом резании значительно снижается, причем катастрофическое изнашивание инструмента наступает при меньших критических значениях износа. Особенности изнашивания инструмента с покрытием, установленные для непрерывного резания, в целом относятся и к прерывистому резанию. Покрытие, обладающее более высокими термодинамической устойчивостью, прочностью внутренних химических связей и пассивностью по отношению к обрабатываемому материалу, является диффузионным барьером между инструментальным и обрабатываемым материалом **(см. рис. 5.22 стр. 151 учебного пособия).**

Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями

Работоспособность быстрорежущего инструмента с покрытиями

Нанесение однослойных одноэлементных покрытий увеличивает период стойкости быстрорежущего инструмента при обработке заготовок из конструкционных сталей в 2 – 5 раз по сравнению с инструментом без покрытия (рис.40).

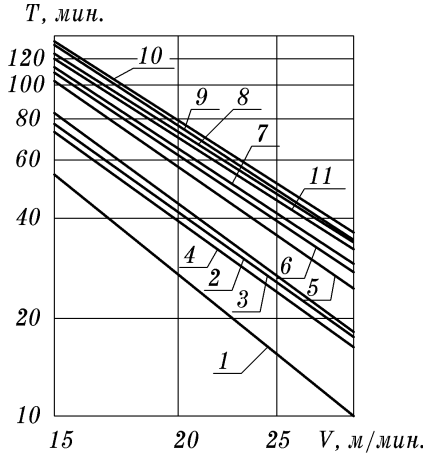


Рис. 40. Влияние скорости резания *V* на период стойкости *T* режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5К5 с покрытиями при обработке заготовок из стали 12Х18Н10Т:
1 – TiN; *2* – (Ti,Si)N; *3* – (Ti,Zr)N; *4* – (Ti,Al)N; *5* – (Ti,Si,Cr)N; *6* – (Ti,Si,Zr)N; *7* – (Ti,Si,Al)N; *8* – (Ti,Zr,Si)N; *9* – (Ti,Zr,Al)N; *10* – (Ti,Al,Si)N; *11* – (Ti,Al,Zr)N; S=0,3мм/об, t=0,75мм

Эффективность покрытий заметно возрастает по мере увеличения скорости резания и уменьшения подачи. Это характерно для продольного точения, сверления и симметричного торцового фрезерования **(см. рис. 5.23, 5.24 стр. 153 учебного пособия).**

При обработке заготовок из чугуна характер износа быстрорежущего РИ существенно изменяется по сравнению с обработкой заготовок из конструкционной стали. Абразивное воздействие материала заготовки резко интенсифицирует процессы трещинообразования и разрушения покрытий. Более высокие механические свойства многоэлементных покрытий на основе нитридов способствуют сдерживанию процессов разрушения покрытий и развития очагов износа по сравнению с одноэлементными покрытиями.

При обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов разрушение покрытия происходит на стадии приработочного изнашивания режущего инструмента. Однако и после разрушения покрытия контактные поверхности долго сопротивляются изнашиванию благодаря сохранению его на участке, примыкающем к режущей кромке, и в виде отдельных «островков» на участке скольжения стружки по передней поверхности.

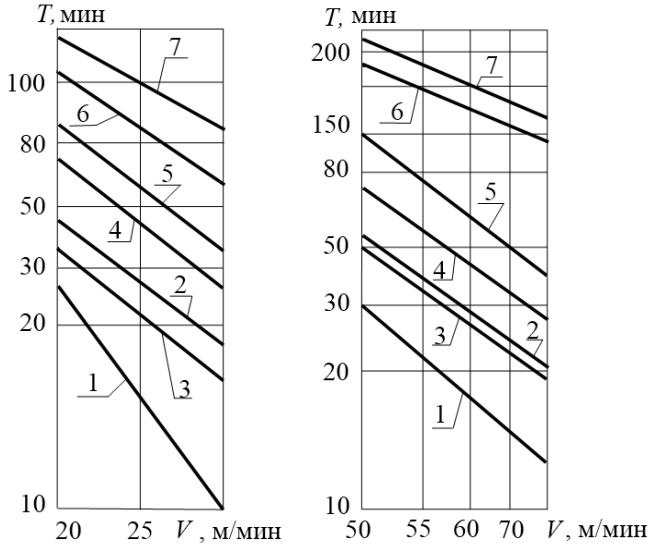
Эффективность одноэлементных покрытий заметно снижается при резании на скоростях активного наростообразования, что связано с неустойчивостью данного процесса, появлением низкочастотных вибраций, цикличностью нагружения контактных площадок инструмента и высокой интенсивностью разрушения покрытий вследствие зарождения и развития трещин усталости.

Для повышения работоспособности инструмента из быстрорежущей стали с покрытием в условиях наростообразования необходимо использовать многоэлементные и многослойные покрытия, способные значительно лучше, чем однослойные покрытия, сопротивляться разрушению в условиях усталостных процессов. Кроме того, следует создавать такие условия обработки, при которых стабилизируется или исключается наростообразование.

Применение многоэлементных нитридных покрытий увеличивают период стойкости пластин Р6М5 по сравнению с покрытием из нитрида титана в 1,25 – 5,5 раза в зависимости от состава, марки обрабатываемого материала и режима резания (**см. рис. 5.26 стр. 154 учебного пособия).**

Эффективность быстрорежущего инструмента с покрытиями может быть повышена путем воздействия на контактные площадки дополнительной поверхностной упрочняющей обработки. Например, в качестве дополнительной упрочняющей обработки можно использовать импульсное лазерное излучение. При этом возможны два варианта такой обработки контактных площадок инструмента – до и после нанесения покрытий. В первом случае применение импульсной лазерной обработки способствует повышению сопротивляемости режущего клина упругопластическим деформациям за счет образования в поверхностном слое основы зоны закалки повышенной твердости. Во втором – дополнительно повышается микротвердость покрытия и прочность сцепления его с инструментальной основой. Применение импуль-

сной лазерной обработки повышает период стойкости быстрорежущего инструмента в 1,5 – 3,2 раза в зависимости от свойств обрабатываемого материала, состава покрытия и режима обработки (рис. 41) **(см. рис. 5.27 стр. 156 учебного пособия).**



а) **б)**

Рис.41. Влияние скорости резания *V* на период стойкости *T* пластин Р6М5 с покрытием при точении заготовок из стали 30ХГСА (*а*) и 12Х18Н10Г (*б*):
1 – TiN; 2 – TiZrN; 3 – TiFeN-TiN; 4 – (Ti-Fe)-TiFeN-TiN; 5 – (Ti-Zi-Fe)-TiZrFeN-TiZrN; 6 – (Ti-Fe)-TiFeN-TiN + ЛО, 7 – (Ti-Zi-Fe)-TiZrFeN-TiZrN + ЛО;
а-*S* = 0,3 мм/об, *t* = 0,75 мм; б – *S* = 0,3 мм, *t* = 0,5 мм

Эффективность быстрорежущего инструмента, особенно в условиях неустойчивого наростообразования, можно повысить за счет повышения прочности его сцепления с инструментальной основой путем нанесения между ними переходных адгезионных слоев. Например, при обработке заготовок из сталей 30ХГСА и 12Х18Н10Т **(см. рис. 5.28 стр. 157 учебного пособия)** нанесение многослойных покрытий с переходными адгезионными слоями повышает период стойкости инструмента в 1,4 – 4,2 раза по сравнению с покрытием TiN в зависимости от режима резания и конструкции многослойного покрытия (рис. 41). Более высокая работоспособность режущего инструмента с многослойными покрытиями, имеющими переходные адгезионные слои, по сравнению с инструментом с однослойным покрытием, объясняется снижением остаточных напряжений в покрытии и повышением прочности адгезии с инструментальной основой. Кроме того, снижению интенсивности износа инструмента также способствуют более высокая микротвердость переходных слоев на основе сложных нитридов и наличие в покрытии дополнительных границ, повышающих его трещиностойкость.

Работоспособность твердосплавного инструмента с покрытиями

При обработке заготовок из конструкционных сталей применение покрытий на основе нитридов существенно повышает эффективность твердосплавного инструмента. Нанесение двухэлементных нитридных покрытий по сравнению с одноэлементными покрытиями повышает период стойкости твердосплавного инструмента в 1,8 – 3,5 раза в зависимости от условий резания и состава покрытия. Еще более высокую эффективность имеют трехэлементные покрытия **(см. рис. 5.29, 5.30 стр. 158 и 159 учебного пособия).**

Более высокая эффективность многоэлементных покрытий по сравнению с одноэлементными объясняется их более высокими механическими свойствами и влиянием на контактные процессы, тепловое и напряженное состояние режущего клина инструмента. Механические свойства многоэлементных покрытий способствуют формированию в них в процессе резания высоких сжимающих нормальных напряжений, сдерживающих процессы образования и развития в них трещин. С другой стороны, нанесение многоэлементных покрытий, по сравнению с одноэлементными, обеспечивает более благоприятные условия протекания контактных процессов на передней поверхности, создает более благоприятное тепловое и напряженное состояние режущего клина инструмента. Это проявляется в снижении средних нормальных нагрузок и нормальных напряжений, смещении максимальной температуры на передней поверхности и изотерм температуры в режущем клине в сторону от задней поверхности режущего инструмента и вглубь инструментальной основы.

На рис. 42 качестве примера показано влияние состава покрытий на период стойкости твердосплавного инструмента при токарной обработке заготовок из конструкционных сталей.

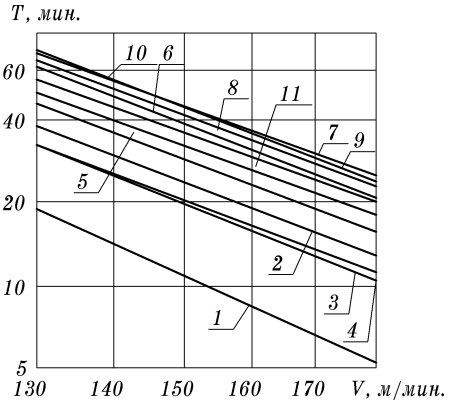


Рис. 42. Влияние скорости резания *V* на период стойкости *T* режущего инструмента из твердого сплава МК8 с трехэлементными покрытиями при обработке заготовок из стали 12Х18Н10Т:
1 – TiN; *2* – (Ti,Si)N; *3* – (Ti,Zr)N; *4* – (Ti,Al)N;
5 – (Ti,Si,Cr)N; *6* – (Ti,Si,Zr)N;
7 – (Ti,Si,Al)N; *8* – (Ti,Zr,Si)N; *9* – (Ti,Zr,Al)N;
10 – (Ti,Al,Si)N; *11* – (Ti,Al,Zr)N;
S=0,3мм/об, t=0,5мм

Эффективность твердосплавного инструмента с однослойными покрытиями, по аналогии с быстрорежущим инструментом, можно повысить путем дополнительной упрочняющей обработки контактных площадок инструмента и применением многослойных покрытий. Увеличение микротвердости покрытия и повышение прочности его сцепления с инструментальной основой после импульсной лазерной обработки, способствует повышению периода стойкости твердосплавного инструмента в 1,5 – 3,2 раза (рис. 43) **(см. рис. 5.31 стр. 160 учебного пособия).**

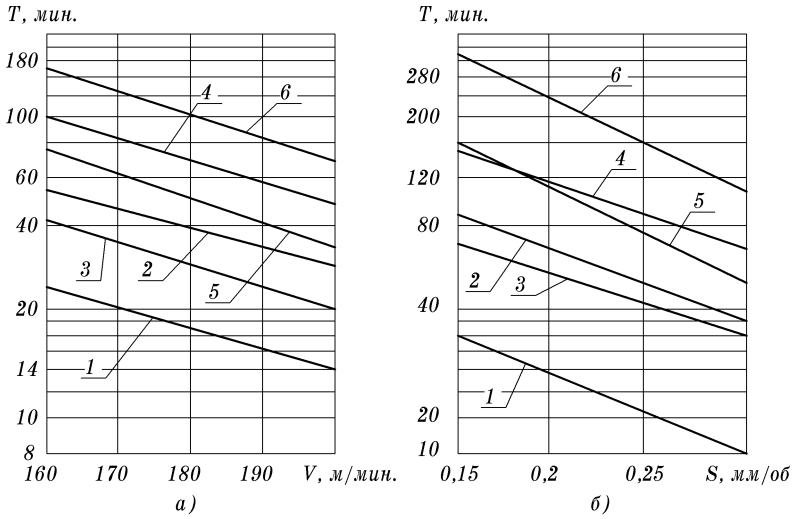


Рис. 43. Влияние скорости резания*V* (*а*) и подачи *S* (*б*) на период стойкости инструмента из твердого сплава МК8 при точении заготовок из стали 30ХГСА:

а – S = 0,3 мм/об, t = 0,5 мм; *б* – V =180 м/мин, t = 0,5 мм; *1* – TiN, *2* – TiN+ЛО, *3* – (Ti,Zr)N, *4* – (Ti,Zr)N+ЛО, *5* – (Ti,Zr)CN, *6* – (Ti,Zr)CN+ЛО

Применение многослойных покрытий расширяет области эффективного использования твердосплавного инструмента с покрытиями. Изменяя конструкцию многослойного покрытия (толщину отдельных слоев и толщиной покрытия в целом), можно управлять параметрами структуры и механическими свойствами и тем самым влиять на режущую способность инструмента.

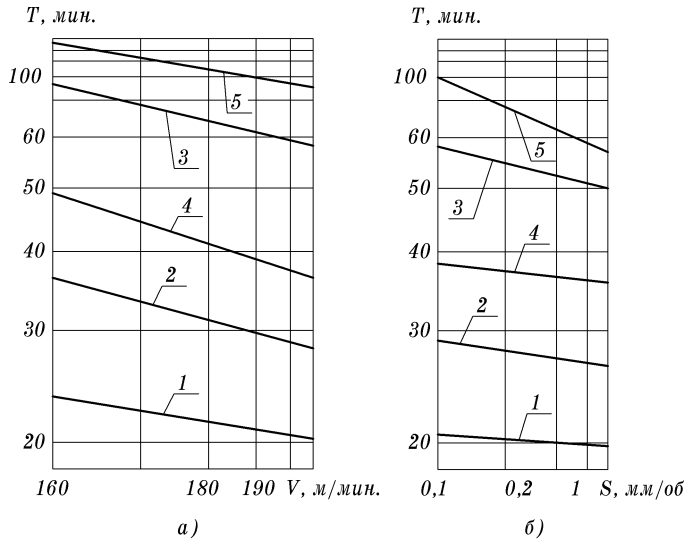


Рис. 44. Влияние скорости резания *V* (*а*) и подачи *S* (*б*) на период стойкости инструмента *T* с различными покрытиями при обработке стали 5ХНМ:

1 – TiN; *2* – TiN-TiCN; *3* – TiN-(Ti,Zr)N; *4* – TiN-(Ti,Al)N; *5* – TiN-TiCN-(Ti,Zr)N

Применение многослойных покрытий повышает период стойкости твердосплавного инструмента по сравнению с однослойными покрытиями при токарной обработке заготовок из конструкционных сталей в 1,5 – 4,0 раза (рис. 44), а при торцовом фрезеровании в 1,4 – 4,5 раза в зависимости от конструкции покрытия и свойств обрабатываемого материала **(см. рис. 5.32, 5.33 стр. 161 учебного пособия).**

Работоспособность инструмента с покрытиями при резании труднообрабатываемых материалов

Наиболее широко применяются жаропрочные коррозионностойкие сплавы на основе железа, никеля, кобальта и титана. Рассмотрим основные особенности резания данных материалов.

1 – Низкая теплопроводность труднообрабатываемых материалов в сочетании с высокой прочностью приводят при резании к росту мощности основных источников теплоты и увеличению интенсивности теплового потока в сторону инструмента, что увеличивает вероятность потери формоустойчивости режущей части инструмента и ее последующего пластического разрушения.

2 – Высокая химическая активность особенно при температурах, возникающих при резании, приводит к активизации физико-химических процессов на контактных площадках инструмента (граничная адгезия, твердофазные и жидкофазные диффузионные реакции между инструментальным и обрабатываемым материалами) и является главной причиной интенсификации таких видов изнашивания режущего инструмента, как адгезионно-усталостный и диффузионный.

3 – Склонность труднообрабатываемых материалов к механическому упрочнению в процессе пластического деформирования при резании приводит к росту интенсивности абразивного изнашивания.

Исходя из отмеченных свойств трукднообрабатываемых материалов основными причинами отказов инструмента при их обработке являются потеря формоустойчивости режущей части инструмента (пластическое разрушение) и физико-химические виды изнашивания его контактных площадок и, в частности, адгезионно-усталостное изнашивание.

Указанные причины интенсивных отказов режущего инструмента при резании труднообрабатываемых материалов наиболее неблагоприятны для хрупкого покрытия, поэтому оно интенсивно разрушается уже в первые секунды работы инструмента, и использование инструмента с покрытием для резания труднообрабатываемых материалов весьма ограничено. Подтверждением сказанного является то, что большинство известных западных фирм («Видиа Крупп», «Хертель» (ФРГ), «Планзее» (Австрия), «Сандвик Коромант» (Швеция) и др.) практически не производят инструмент с покрытием для резания труднобрабатываемых материалов.

Анализ причин разрушения покрытий при резании труднообрабатываемых материалов показывает, что наибольшую эффективность могут обеспечить многоэлементные и многослойные покрытия, как наиболее отвечающие идее композиционного инструментального материала. Однако эффективность режущих инструментов с такими покрытиями при обработке труднообрабатываемых материалов ниже, чем при обработке конструкционных сталей, что, как было сказано выше, связано с особенностями процесса резания таких материалов.

Работоспособность инструмента из экономичных инструментальных материалов с покрытием

Экономичные инструментальные материалы основной группы (БВТС, керамика) обладают повышенными твердостью и износостойкостью, но одновременно имеют склонность к хрупким сколам, что связано с их относительно невысокими твердостью и ударной вязкостью. Поэтому при нанесении покрытий на режущий инструмент из данных инструментальных материалов необходимо использовать ионно-плазменную технологию КИБ, которая позволяет формировать покрытие без выраженной переходной зоны в условиях активного воздействия бомбардирующих высокоэнергетичных ионов на дефекты поверхности рабочих поверхностей инструмента, что не снижает прочности композиции «покрытие-инструментальный материал» по сравнению с прочностью исходного инструментального материала.

Имеющиеся в технической литературе данные свидетельствуют о заметно меньшей эффективности покрытий на инструментах из БВТС по сравнению с эффективностью покрытий на стандартных твердых сплавах, коэффициент поышения периода стойкости в данном случае не превышает 2 – 2,5 **(см. рис. 5.40 стр. 168 учебного пособия).**

Минералокерамика является типичным хрупким материалом, разрушение которого происходит без видимого пластического деформирования, поэтому керамические инструменты чрезвычайно чувствительны к поверхностным дефектам, возникающим при их изготовлении и заточке. Кроме того, основной особенностью контактных процессов при резании керамическим инструментом является высокий уровень нормальных напряжений и концентрация тепловых напряжений у вершины режущего клина. В этой связи керамический инструмент обладает повышенной склонностью к хрупкому разрушению. При применении покрытий КИБ для РИ из минералокерамики следует учитывать специфическую роль покрытия и технологию его формирования: состав покрытия в зависимости от условий обработки должен обеспечивать снижение нормальных контактных напряжений по передней поверхности инструмента; уровень термомеханического воздействия на приповерхностные слои керамического материала в процессе осаждения покрытия должен соответствовать уровню, при котором формируются остаточные напряжения сжатия, способствующие «залечиванию» поверхностных микротрещин и снижающие уровень напряженности у их «устья»; формируемая между керамическим материалом и покрытием в процессе его осаждения переходная зона не должна приводить к разупрочнению матрицы.