

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.9.025

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук, **Е.Б. КОЗЛОВА**,
Э.В. КОНДРАТЮК, канд. техн. наук, Запорож'є, Україна

О ВЛИЯНИИ PVD ПОКРЫТИЙ НА УСЛОВИЯ РЕЗАНИЯ, ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА

У статті описаний взаємозв'язок контактних характеристик і параметрів стружкообразовання при різанні. Показаний вплив PVD покриття на основні характеристики процесу різання, знос і стійкість інструменту при обробці конструкційних железоуглеродистых, нержавіючих сталей, жароміцного сплаву на нікелевій основі.

В статье описана взаимосвязь контактных характеристик и параметров стружкообразования при резании. Показано влияние PVD покрытия на основные характеристики процесса резания, износ и стойкость инструмента при обработке конструкционных железоуглеродистых, нержавеющей сталей, жаропрочного сплава на никелевой основе.

The article describes the relationship of the contact characteristics and parameters of chip formation during cutting. Shows the effect of PVD coatings on the basic characteristics of cutting process, wear and tool life when machining iron, stainless steels, heat-resistant alloy based on Nickel.

Нанесение тонких вакуумно-плазменных покрытий (пленок), толщиной не более 5 мкм, на поверхности режущего инструмента позволяет во многих случаях повысить стойкость инструмента, либо увеличить режимы резания. Это приводит к повышению экономической эффективности механической обработки. Однако для определения областей и условий эффективного применения инструмента с покрытиями необходимо знать особенности процесса резания и роль покрытия в формировании этих условий.

1. ВЗАИМОСВЯЗЬ КОНТАКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ

Одним из основных достижений в изучении механики процесса резания является установление и экспериментальное подтверждение того факта, что при резании металлов, в связи с наличием свободной поверхности (наружная сторона стружки) происходит приспособляемость основного очага деформации (зоны стружкообразования) к условиям взаимодействия прирезцовой стороны стружки с передней поверхностью инструмента в контактной зоне (рис. 1). Считается, что свойства материала инструмента влияют на процесс стружкообразования значительно меньше, чем свойства обрабатываемого материала. Однако заметное влияние на параметры стружкообразования оказывают *теплопроводность инструментального материала и его контактная активность*. Теплопроводность действует преимущественно через среднюю температуру контакта, а контактная активность между материалом инструмента и обрабатываемым материалом через коэффициент трения [1]. **Основное влияние на коэффициент трения оказывает адгезионная активность между инструментальным и обрабатываемым материалами, под которой понимают способность инструментального материала к схватыванию или химическому соединению с материалом стружки во время ее движения по передней поверхности.**

Прочно соединенные с поверхностью инструмента, тонкие пленочные покрытия, могут иметь различный химический состав и способны существенно влиять на адгезионную активность между инструментом и стружкой и таким образом, оказывать влияние на изменение, как условий стружкообразования, так и условий изнашивания инструмента.

На рис. 1 приведена упрощенная схема стружкообразования (с одной плоскостью сдвига) на основании которой проведен анализ влияния покрытия на основные контактные характеристики процесса резания. К основным контактным характеристикам относят *среднюю температуру контакта* – $\bar{\Theta} \text{ } ^\circ\text{C}$, *длину контакта стружки с передней поверхностью* –

C , удельную силу трения по передней поверхности – q_f и среднее контактное давление – q_n .

В качестве главного из параметров процесса стружкообразования принимают усадку стружки, определяемую коэффициентом ее утолщения

$$K_a = \frac{a_{cmp}}{a} \quad (1)$$

где a – толщина среза, a_{cmp} – толщина стружки.

Если экспериментально измерить значение сил P_1 и P_2 , длину контакта – C и усадку стружки K_a , то из рис. 1 можно рассчитать:

– среднее контактное давление на передней поверхности:

$$q_n = \frac{P_1 \cos \gamma - P_2 \sin \gamma}{b_{cmp} C} \quad (2)$$

– средний коэффициент трения на передней поверхности:

$$\mu = \frac{P_1 \operatorname{tg} \gamma + P_2}{P_1 - P_2 \operatorname{tg} \gamma} \quad (3)$$

– удельную силу трения на передней поверхности:

$$q_f = q_n \cdot \mu \quad (4)$$

где P_1 – вертикальная составляющая силы резания, Н, P_2 – горизонтальная составляющая силы резания, Н, γ – передний угол инструмента, град, C – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента, мм, b_{cmp} – ширина стружки, мм.

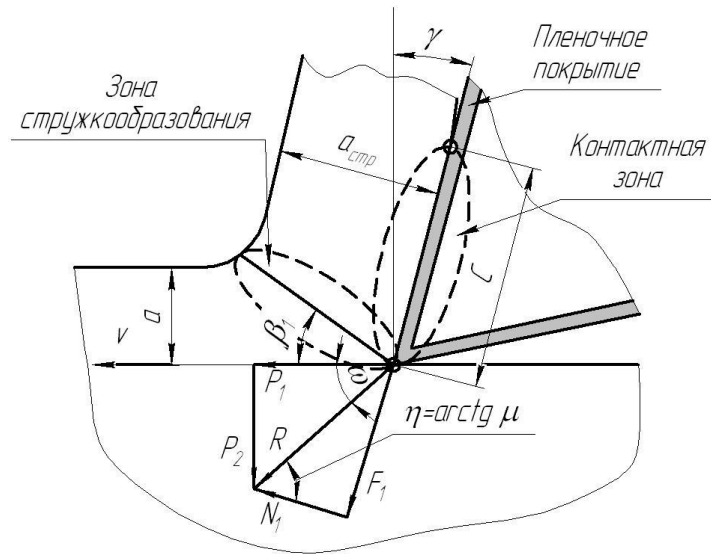


Рисунок 1 – Упрощенная схема стружкообразования
(в главной секущей плоскости – P_1):

P_1, P_2 – вертикальная и горизонтальная составляющие силы резания на передней поверхности, Н; N_1, F_1 – нормальная и сила трения на передней поверхности, Н; R – сила стружкообразования, Н;
 C – длина контакта стружки с передней поверхностью, мм;
 β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига, град; ω – угол действия, град;
 η – угол трения, град; μ – средний коэффициент трения; a – толщина среза, мм;
 $a_{стр}$ – толщина стружки, мм; v – скорость резания, м/с

Установлена простая связь [1] между процессами, происходящими в зоне стружкообразования и на контактной поверхности в виде зависимости (5).

$$\frac{C}{a} = K_a^l \quad (5)$$

где C – длина контакта на передней поверхности; a – толщина среза;
 K_a – коэффициент утолщения стружки; l – показатель степени.

Наличие этой связи позволяет экспериментально доказать, что адгезионная активность между материалом тонкого пленочного покрытия и обрабатываемым материалом может оказывать существенное влияние на формирование важнейших параметров процесса резания и определять работоспособность инструмента.

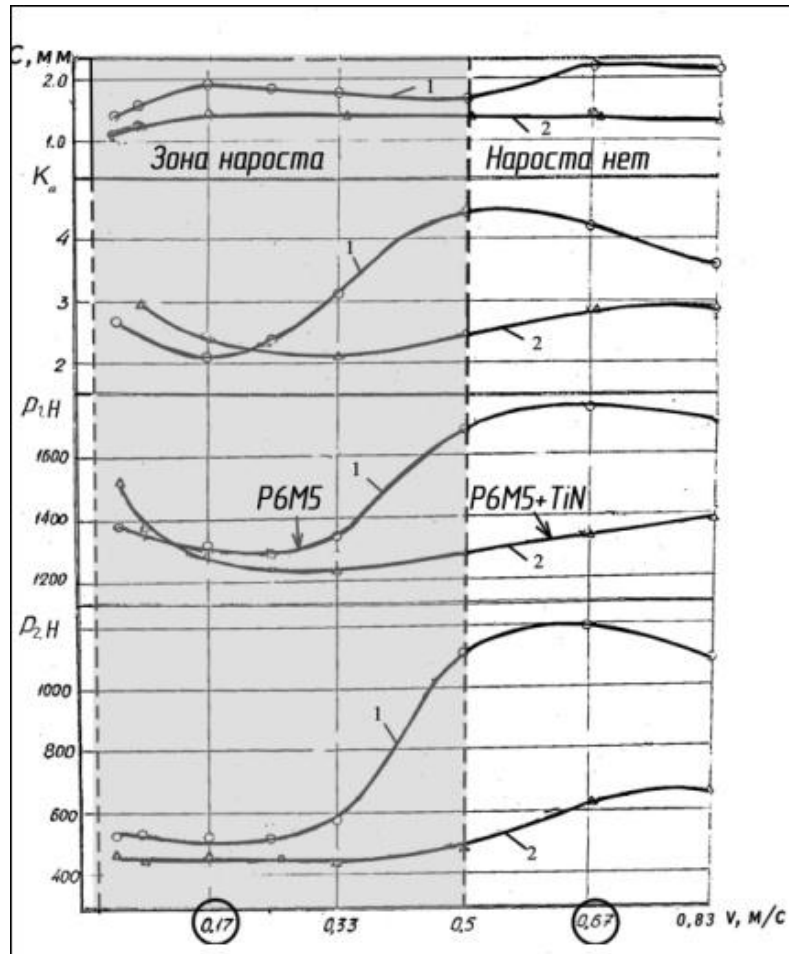
2. ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты измерения длины контакта стружки с передней поверхностью – C , усадки стружки – K_a , вертикальной – P_1 и горизонтальной – P_2 составляющих силы резания, при точении стали 45 режущими пластинами из быстрорежущей стали P6M5 без покрытия и с покрытием TiN (P6M5+TiN) в широком скоростном диапазоне $v=0,017...0,83$ м/с. Покрытие TiN имеет золотой цвет, высокую микротвердость, износостойкость и прочность сцепления с подложкой и в течение многих лет является базовым вакуумно-плазменным пленочным покрытием для режущего инструмента. Для инструмента без покрытия получены классические «типичные» кривые [2], на которых при скоростях ниже $v=0,5$ м/с наблюдается резкое снижение усадки стружки K_a и составляющих сил резания P_1 и P_2 . Это снижение связано с формированием нароста, который увеличивая фактический передний угол γ_f уменьшает объемы пластических деформаций при стружкообразовании. При увеличении скорости выше зоны вырождения нароста $v>0,5$ м/с снова наблюдается постепенное снижение K_a , P_1 , P_2 .

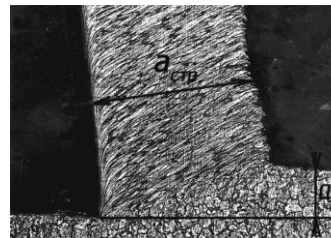
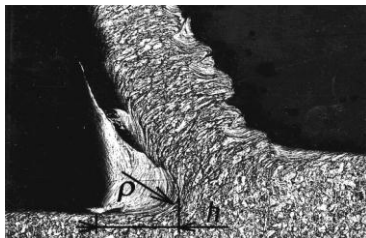
При резании инструментом с покрытием величины K_a , P_1 , P_2 и C значительно меньше, чем у инструмента без покрытия.

Совместное рассмотрение графиков и фото подтверждает, что при изменении скорости резания процессы стружкообразования протекают по разному. В зоне низких скоростей происходит наростообразование, а с увеличением скорости выше $v=0,5$ м/с нарост вырождается. Покрытие оказывает существенное влияние на форму и размеры нароста, приводит к уменьшению высоты нароста – h и радиуса его вершины – ρ , повышает его устойчивость от разрушения по сравнению с наростом на инструменте без покрытия. При скоростях резания инструментом с покрытиями выше зоны наростообразования $v=0,67$ м/с, толщина стружки – $a_{стр}$ значительно меньше, чем без покрытия, а отношение $K_a = \frac{a_{стр}}{a}$ и определяет усадку стружки.

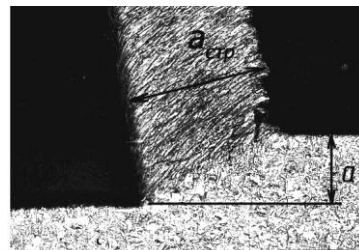
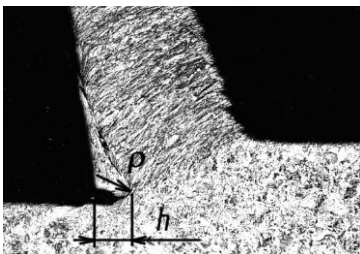
Принципиальная схема влияния покрытия на контактные условия и стружкообразование при точении Сталь 45 приведена на рис. 3 для скоростей выше зоны наростообразования.



1. Инструмент P6M5



2. Инструмент P6M5+TiN



$v=0,17 \text{ м/с}$

$v=0,67 \text{ м/с}$

x63

Рисунок 2 – Влияние покрытия TiN на характер «типичных» кривых и условия стружкообразования: 1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN.

Свободное ортогональное точение Стали 45. Режимы обработки: толщина среза $a=0,3 \text{ мм}$, ширина среза $b=1,5 \text{ мм}$, $\gamma=10^\circ$, $\alpha=8^\circ$

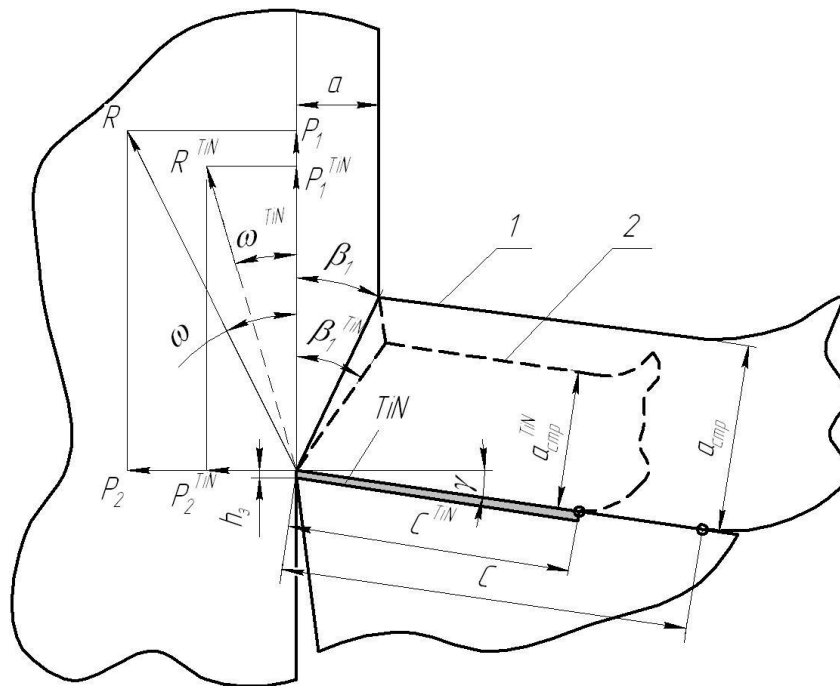


Рисунок 3 – Схема стружкообразования при точении Стали 45:

1 – Инструмент без покрытия – P6M5;

2 – Инструмент с покрытием – P6M5+TiN; R – сила стружкообразования, Н;
 ω – угол действия, град; β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига, град

Можно видеть, что на инструменте с покрытием уменьшается сила стружкообразования R и уменьшается угол действия этой силы – ω . Однако, при этом, увеличивается угол наклона условной плоскости сдвига – β_1 , который определяет величину площади сдвига, уменьшая ее размеры, снижая усадку стружки – K_a .

Приведенная схема показывает, что процесс резания инструментом с износостойким покрытием TiN протекает энергетически более выгодно, чем без покрытия т.е. с меньшей затратой работы на пластическое деформирование срезаемого слоя в стружку. Следствием этого является меньшее количество тепла, выделяемого при работе инструментом с покрытием. На рис. 4 показано распределение контактной температуры на передней поверхности при точении Стали 45 инструментом с покрытием и без, а также максимальные Θ_{max} и средние $\bar{\Theta}$ температуры контакта, рассчитанные по методике А.Н. Резникова [3].

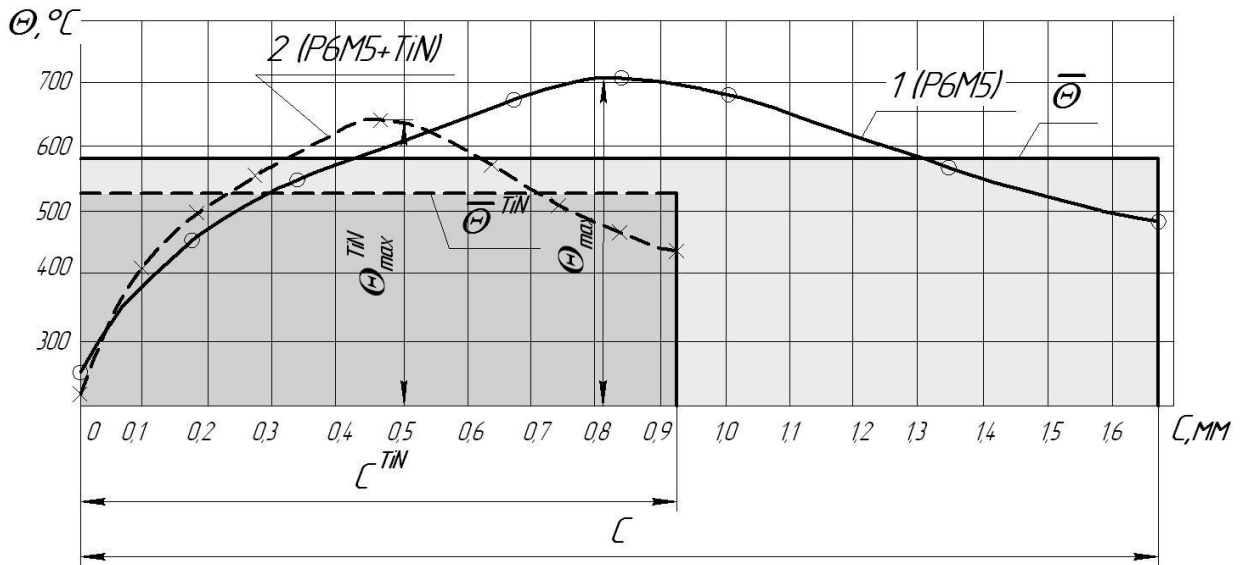


Рисунок 4 – Распределение контактных температур $\Theta = f(C)$ на передней поверхности инструмента при точении Стали 45:
1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN

Θ_{\max}^{TiN} , Θ_{\max} , $\overline{\Theta}^{TiN}$, $\overline{\Theta}$ – максимальные и средние контактные температуры на передней плоскости инструмента с покрытием и без покрытия (Условия эксперимента: $v=1$ м/с, $a=0,27$ мм, $b=1,4$ мм, без СОЖ)

Результаты расчетов показывают, что средние $\overline{\Theta}$ и максимальные контактные температуры Θ_{\max} на инструменте с покрытиями на 50 - 60°C ниже, чем без покрытия. Однако, если распределения контактных температур расположить в одном масштабе длины контакта, то видно, что на инструменте с покрытием на участке приближающемся к режущей кромке температуры на 50° C выше. Эти результаты показывают, что несмотря на то, что общее количество тепла, выделяемое при резании инструментом с покрытием становится меньше, снижая среднюю и максимальную контактные температуры, но из-за существенного сокращения длины контакта C , зона инструмента примыкающая к режущей кромке нагревается сильнее, поэтому теплостойкость инструментального материала на которую наносится покрытие должна быть высокой. На рис. 5 показаны распределения нормальных контактных напряжений σ рассчитанных по методике Н.Н. Зорева [4].

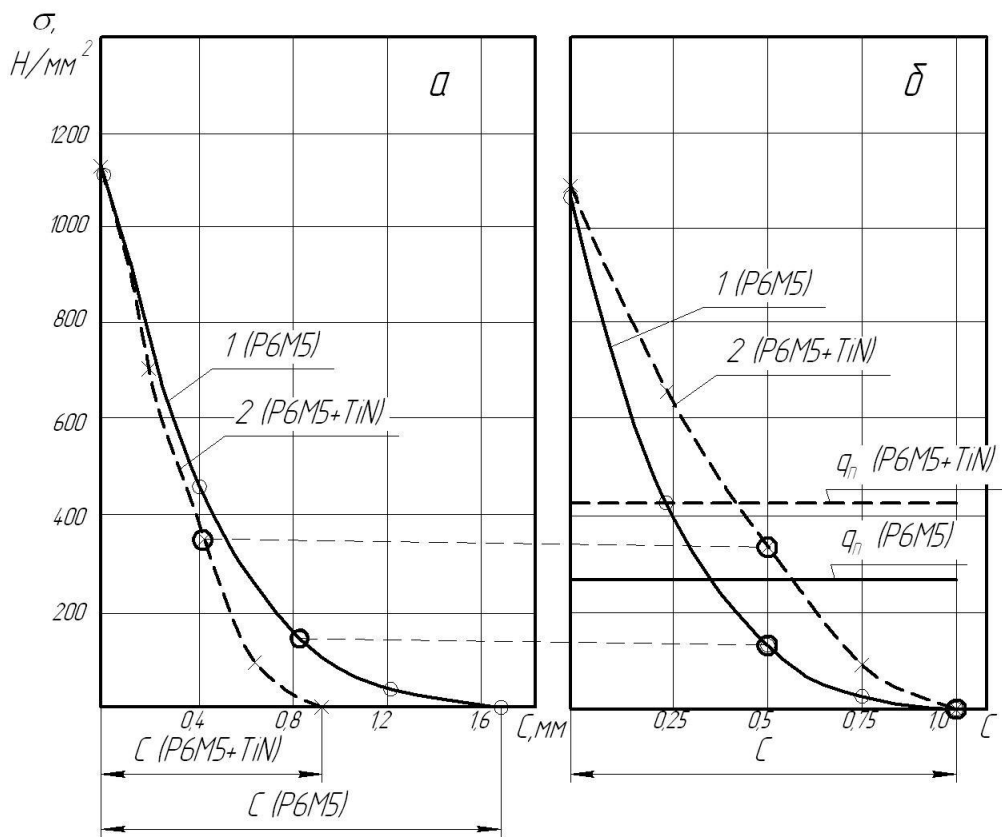


Рисунок 5 – Распределение нормальных напряжений σ на передней поверхности инструмента при точении Стали 45:
1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN

q_n – среднее контактное давление;

а – в реальном масштабе длины контакта стружки с передней поверхностью;
б – длина контакта – C для инструмента с покрытием и без покрытия принята за единицу $C=1$

(Условия резания показаны на рис. 4)

При расчете нормальных напряжений σ учитывают измеренные значения сил P_1 и P_2 и длину контакта C . Распределение напряжений в реальном масштабе длины контакта стружки C для инструмента с покрытием и без показано на рис. 5а, по которому видно, что силы резания на инструменте с покрытием меньше. Однако, если рассмотреть распределение нормальных напряжений на контактных площадках разных инструментов, длину которых принять за единицу $C=1$, то можно видеть, что нормальные напряжения σ на равных долях участков контакта у инструментов с покрытиями выше. Естественно выше и среднее

контактное давление – q_n . Этот важный результат, *более высокого среднего контактного давления на инструменте с покрытиями*, позволяет объяснить особенности возникновения заторможенного слоя в лунке износа инструмента с покрытиями (рассмотренного в п. 3), приводящего к повышению его стойкости. Таким образом, **несмотря на снижение сил P_1 и P_2 при резании инструментом с покрытиями, среднее контактное давление стружки на переднюю поверхность – q_n выше из-за более интенсивного сокращения длины контакта – C .**

Удельная сила трения по передней поверхности q_f является малоизменяемой величиной для каждого обрабатываемого материала и в основном определяется сопротивлением этого материала сдвигу.

Поэтому, средний коэффициент трения – $\mu = \frac{q_f}{q_n}$ зависит от уровня

среднего контактного давления q_n которое может изменяться в широких пределах при изменении условий контактирования.

На рис. 6 приведены расчетные значения среднего коэффициента трения стружки μ на передней поверхности. Видно, что у инструмента с покрытием значение $\mu=0,65$ ниже, чем у инструмента без покрытия $\mu=0,88$, но это снижение связано с повышением контактного давления q_n .

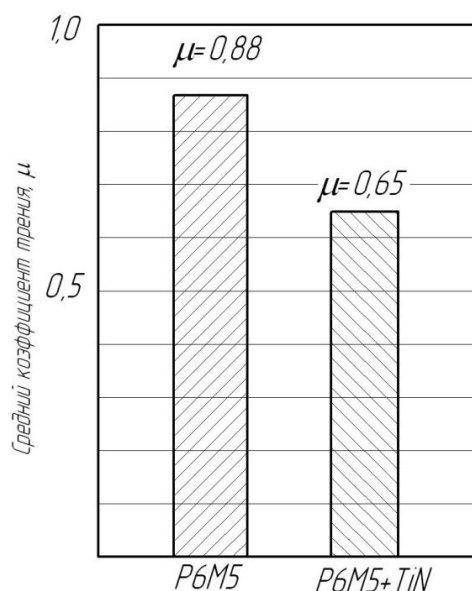


Рисунок 6 – Средний коэффициент трения на передней поверхности – μ при точении Стали 45 (условия резания на рис. 4)

Сокращение длины контакта – C и уменьшение толщины стружки – $a_{стр}$ формирует стружку с меньшим диаметром завивания (рис. 7). Таким образом, показано, что тонкие (≤ 5 мкм) пленочные покрытия нанесенные на поверхность режущего инструмента способны существенно изменять условия контактирования со стружкой и влиять на ее образование. Причиной этому является **изменение условий трения**.



Рисунок 7 – Вид стружки при точении Стали 45:
а – P6M5, б – P6M5+TiN

Для подтверждения этого важного вывода приведены результаты еще одного эксперимента [5], в котором на инструмент после нанесения покрытия TiN (не вынимая его из вакуумной камеры) сверху был нанесен дополнительный тонкий адгезионно активный слой (АСС) материала близкого по химическому составу с обрабатываемым материалом – Сталью 45.

Таким образом, на поверхности инструмента было сформировано двухслойное покрытие (TiN+АСС). На рис. 8 представлены резцы с покрытиями которые имеют различную адгезионную активность к обрабатываемому материалу.



Рисунок 8 – Резцы с покрытиями:
а – P6M5+TiN (низкая адгезионная активность);
б – P6M5+TiN+АСС (высокая адгезионная активность)

Результаты исследований (рис. 9) показывают, что адгезионная активность поверхностного слоя инструмента, который контактирует со стружкой, существенно влияет на условия резания. Тонкий адгезионно-активный к обрабатываемому материалу поверхностный слой покрытия в зоне скоростей выше наростообразования увеличивает длину контакта – C , усадку стружки – K_a и составляющие силы резания P_1 и P_2 .

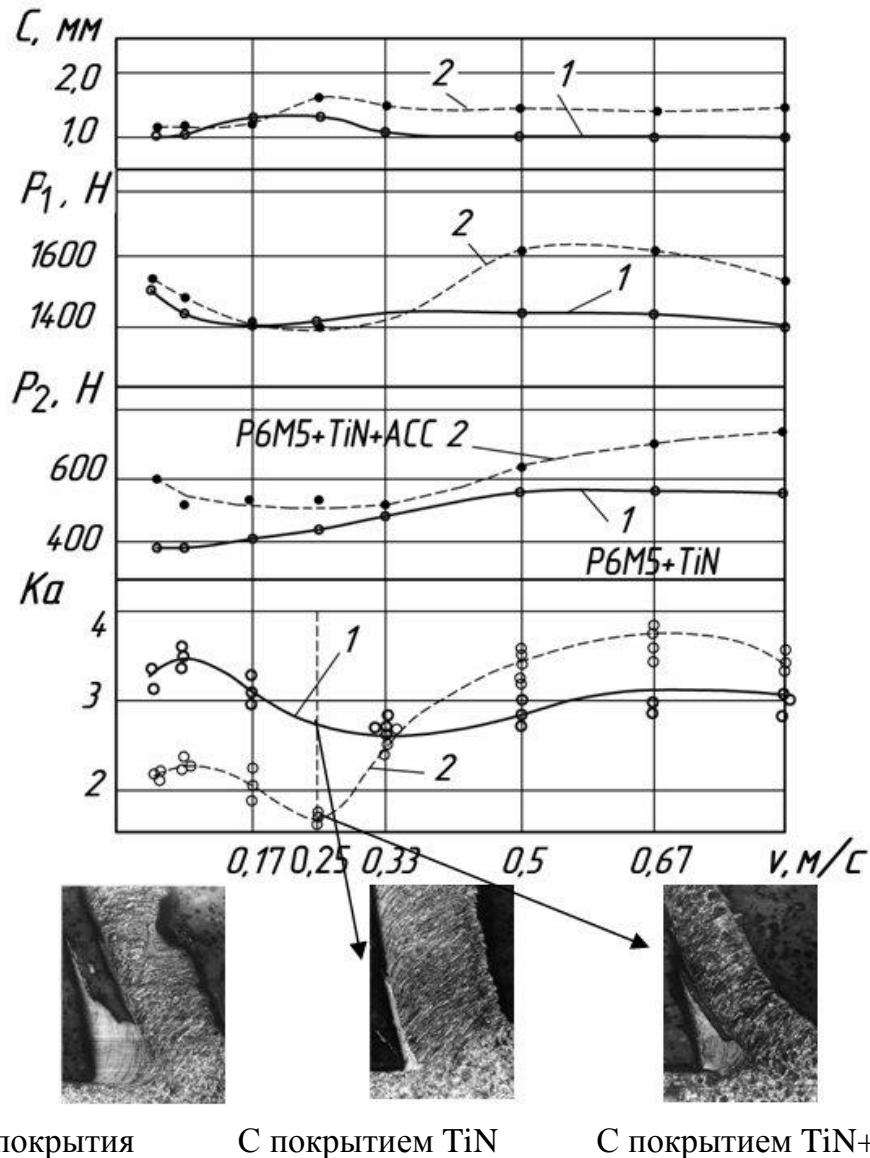


Рисунок 9 – Влияние адгезионно активного слоя (ACC) покрытия на характер «типичных» кривых и наростообразование:
 1 – P6M5+TiN, 2 – P6M5+TiN+ACC

Условия эксперимента: свободное ортогональное точение Стали 45,
 $a=0,3$ мм, $b=1,5$ мм, $\gamma=10^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $v=0,017...0,83$ м/с

Корни стружек, полученные на скорости $v=0,25$ м/с, при которой наблюдается максимальная высота нароста на инструменте без покрытия, на инструменте с покрытием TiN показывает резкое снижение высоты нароста, а при нанесении на покрытие TiN дополнительного АСС высота нароста снова существенно увеличивается.

Итак, приведенные результаты исследований показывают, что **тонкие поверхностные контактные слои инструмента способны изменять условия трения и существенным образом влиять на условия стружкообразования.**

Однако условия трения на передней поверхности инструмента зависят от величины нормального напряжения – σ со стороны стружки, которое постепенно снижается при удалении от вершины. Обычно между стружкой и передней поверхностью инструмента на различных участках имеют место два вида трения, различные по своей природе (рис. 10, а).

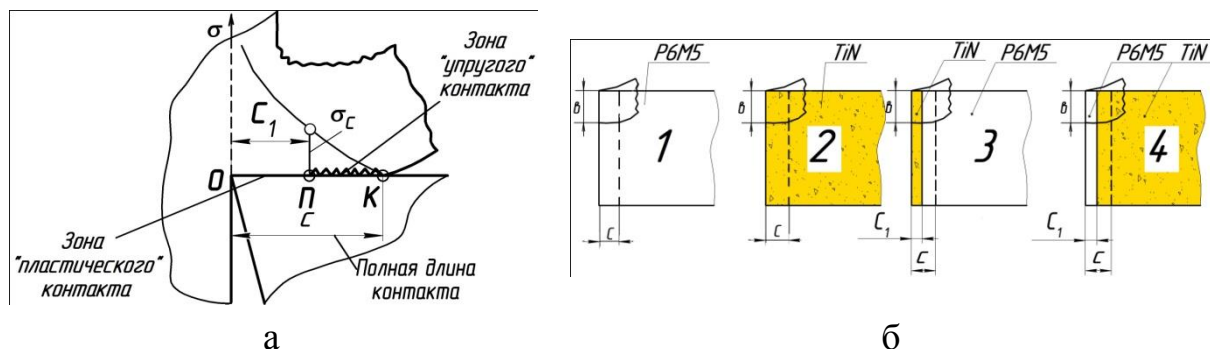


Рисунок 10 – Условия контактирования стружки с передней поверхностью инструмента:

- а – двухзонная модель трения, σ_c – граничное нормальное напряжение;
 б – варианты передней поверхности с зонами различной адгезионной активности

В первой зоне – оп, прилегающей к режущей кромке инструмента, нормальное напряжение σ столь значительное, что наблюдается сплошной контакт между материалом стружки и передней поверхностью, а движение материала стружки проходит за счет внутренних сдвигов в заторможенном слое стружки. Эта часть контакта – C_1 называется зоной «пластического

контакта». Протяженность участка пластического контакта C_1 для Стали 45 составляет 0,4–0,5 от общей длины контакта – C .

Во второй зоне – пк, удаленной от режущей кромки, где нормальное напряжение σ значительно меньше, перемещение стружки сопровождается исключительно внешним скольжением. Разделение контактных процессов в двухзонной модели связано с понятием **граничного нормального напряжения** σ_c , где на участке сплошного «пластического» контакта напряжение выше, а на участке точечного «упругого» контакта – ниже σ_c . Выше показано, что адгезионная активность контактной поверхности инструмента может быть характеристикой изменяющей процесс стружкообразования. Однако важно понимать какая зона «пластического» или «упругого» контакта играет определяющую роль в формировании условий стружкообразования. На рис. 11 приведены «типичные» кривые значений C , K_a , P_1 и P_2 , для инструментов с различными зонами адгезионной активности, показанные на рис. 10, б. Рассматривали 4 варианта: 1 – контактная (передняя) поверхность без покрытия, 2 – контактная поверхность полностью имеет покрытие TiN, 3 – на пластическом участке – C_1 нанесено покрытие – TiN, 4 – на пластическом участке – C_1 отсутствует покрытие – TiN.

Тонкие полоски у режущей кромки в вариантах 3 и 4 позволяют создать различные условия молекулярного схватывания на «пластическом» и «упругом» участках контакта передней поверхности со стружкой. Рассмотрение «типичных» кривых показывает, что кривые влияния основных контактных характеристик и усадки стружки от скорости резания расположились парами, причем наблюдается строгая закономерность состава пары. Пару образуют инструменты с одинаковыми условиями трения на втором – «упругом» участке контакта. Первая пара: варианты 1 и 3 и вторая пара: варианты 2 и 4. У первой пары в зоне «упругого» контакта нет покрытия, а у второй пары имеется. Таким образом, можно утверждать, что **влияние адгезионной активности контактной поверхности инструмента проявляется на «упругом» участке контакта, что и приводит к изменению условий резания.**

В рассмотренном выше случае, *при обработке Стали 45* величина «упругого» участка составляет приметно 0,5–0,6 от общей длины

контакта – C . Однако, это соотношение зависит от вида обрабатываемого материала, причем, чем труднее обрабатывается материал, тем участок «упругого» контакта становится меньше и составляет 0,2–0,1 от общей длины контакта – C или вообще, стружка контактирует с резцом в условиях полного пластического контакта [6].

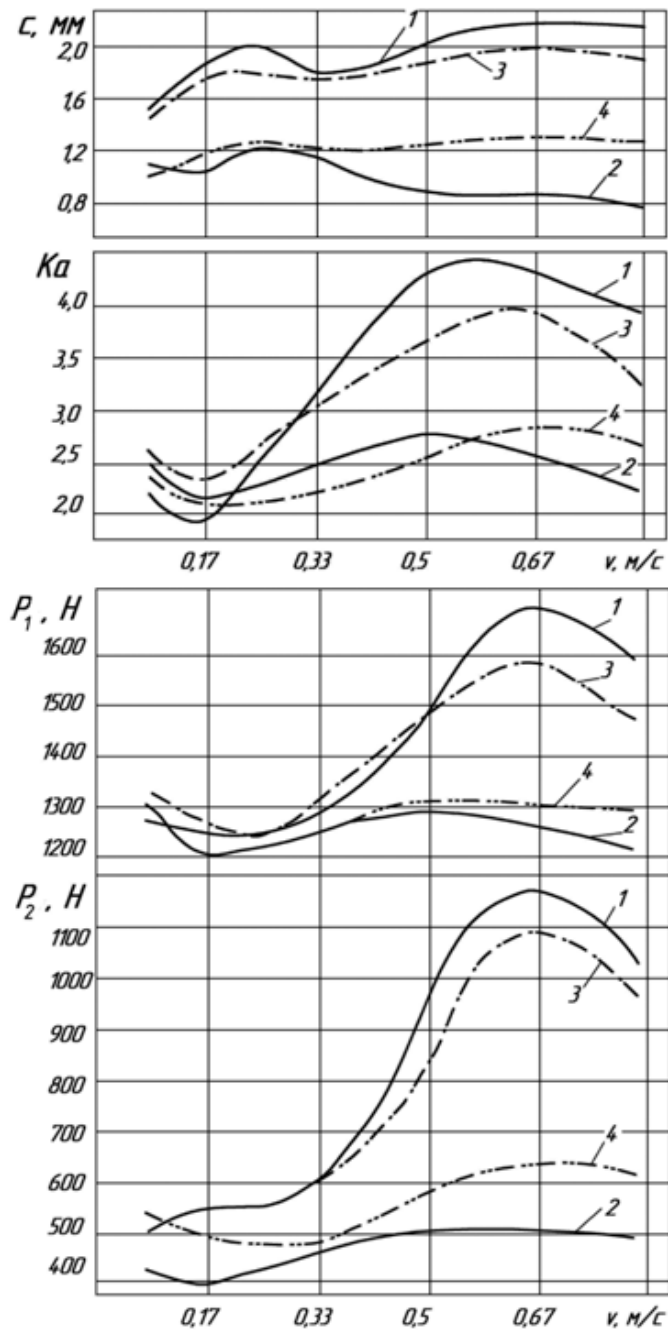


Рисунок 11 – Типичные кривые для инструментов с различными зонами адгезионной активности

Таким образом, если при резании труднообрабатываемых материалов зона «упругого» контакта становится намного меньше зоны «пластического» контакта, то и влияние покрытия на изменение условий трения и стружкообразования должно быть менее значительным или вообще не существенным. В таблице 1 приведены коэффициенты относительной адгезионной активности $K_{адз}$ покрытия из нитрида титана TiN к различным обрабатываемым материалам в сравнении с эталоном из быстрорежущей стали Р6М5. Способ определения $K_{адз}$ подробно описан в работе [7]. Из таблицы видно, что каждый обрабатываемый материал, отличающийся химическим составом друг от друга, имеет различную относительную адгезию к покрытию из нитрида титана. Минимальную относительную адгезию $K_{адз}=0,20$ имеет хромоникелевая сталь на основе железа 12Х18Н10Т, у Стали 45 $K_{адз}=0,33$, у жаропрочного сплава на никелевой основе ХН77ТЮР $K_{адз}=0,82$.

Таблица 1 – Коэффициенты относительной адгезионной активности $K_{адз}$ покрытий из TiN к различным обрабатываемым материалам

Контактная поверхность инструмента	Обрабатываемый материал							
	Сталь45		12Х18Н10Т		ХН77ТЮР		BT1-00	
	$\Delta F/S$	$K_{адз}$	$\Delta F/S$	$K_{адз}$	$\Delta F/S$	$K_{адз}$	$\Delta F/S$	$K_{адз}$
Р6М5 (эталон)	0,140	1,0	0,35	1,0	0,349	1,0	0,485	1,0
TiN	0,046	0,33	0,07	0,20	0,288	0,82	0,603	1,24

где $\Delta F/S$ – удельная сила трения.

Титановый сплав BT1-00 имеет $K_{адз}=1,24$, т.е. схватывается с покрытием TiN активнее, чем с быстрорежущей сталью Р6М5. В табл. 2 приведены значения длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента и усадки стружки для рассмотренных выше обрабатываемых материалов при точении их резцами из быстрорежущей стали Р6М5 с покрытием TiN и без покрытия на различных скоростях резания.

Результаты измерений показывают, что несмотря на различие в активности адгезионного схватывания разных обрабатываемых материалов с покрытием TiN существенный эффект в изменении длины контакта и усадки стружки наблюдается только при точении Стали 45. Из этого

Таблица 2 Влияние покрытия на длину контакта и усадку стружки при точении различных обрабатываемых материалов

Сталь 45					12X18H10T				
Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки К _а		Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки К _а	
	P6M5	P6M5+TiN	P6M5	P6M5+TiN		P6M5	P6M5+TiN	P6M5	P6M5+TiN
0,5	1,7	1,30	4,4	2,5	0,166	0,48	0,46	2,42	2,78
0,67	2,2	1,35	4,3	2,9	0,33	0,47	0,43	3,46	3,58
0,83	2,1	1,30	3,6	2,8	0,5	0,46	0,46	2,75	2,90
					0,67	0,49	0,43	2,55	2,53
					0,83	0,42	0,41	2,21	2,16
XH77TЮР					BT1-00				
Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки К _а		Скорость резания, м/с	Длина контакта С, мм		Усадка стружки К _а	
	P6M5	P6M5+TiN	P6M5	P6M5+TiN		P6M5	P6M5+TiN	P6M5	P6M5+TiN
0,018	0,52	0,51	3,06	3,09	0,018	0,15	0,15	1,19	1,22
0,05	0,56	0,54	3,15	3,08	0,083	0,15	0,15	1,11	1,12
0,083	0,56	0,56	2,62	2,61	0,166	0,16	0,16	1,13	1,09
0,166	0,58	0,56	2,79	2,77					

можно сделать важный вывод, что нанесение тонких покрытий на инструмент при резании труднообрабатываемых материалов не оказывает влияния на контактные условия и стружкообразование и поэтому не может быть эффективным приемом повышения их работоспособности. Однако, для большого количества конструкционных и легированных обрабатываемых материалов на основе железа, чугунов и ряда цветных сплавов нанесение тонких покрытий на режущий инструмент является очень эффективным приемом для повышения качества обработки и стойкости инструментов. Объем обрабатываемых материалов, при резании которых наблюдается значительное увеличение работоспособности инструмента с покрытием, составляет 80% от всего объема обрабатываемых материалов,

а для 20% труднообрабатываемых материалов нанесение покрытий на режущий инструмент малоэффективно.

3. ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ

На формирование места расположения и вида очага износа инструмента влияют: свойства обрабатываемого материала, режимы резания (скорость и толщина среза), геометрия инструмента, условия обработки (непрерывное или прерывистое резание, с постоянным или переменным сечением среза), а также адгезионная активность контактной поверхности инструмента к обрабатываемому материалу. Тонкие вакуумно-плазменные покрытия способны существенным образом изменять адгезионную активность контакта, влиять на размеры и место расположения очага износа и изменять условия изнашивания инструмента.

На рис. 12 показан характер износа инструмента из быстрорежущей стали в зависимости от вида обрабатываемого материала при интенсивных режимах обработки.

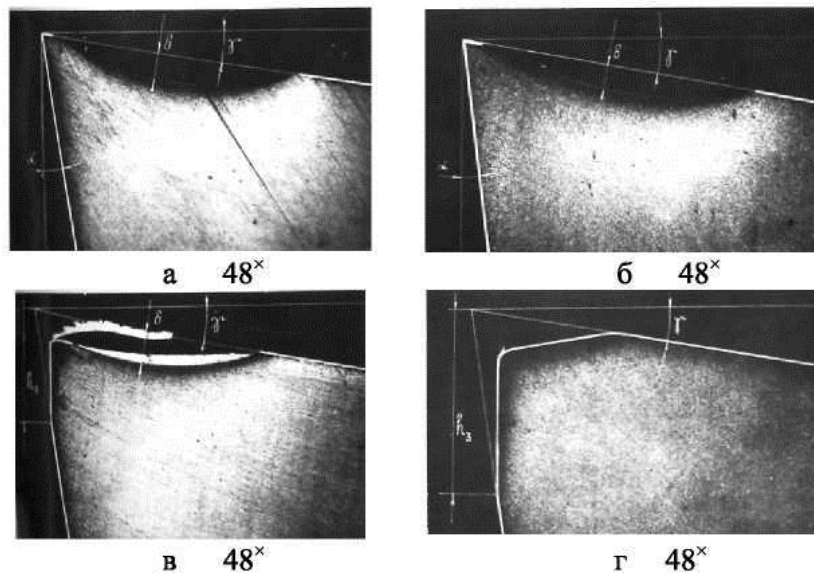


Рисунок 12 – Характер износа инструментов из быстрорежущей стали в зависимости от типа обрабатываемого материала:

- а – точение стали 45 $v=1,17$ м/с, $s=0,26$ мм/об; $T=1$ мин;
- б – точение стали ШХ15 $v=0,75$ м/с, $s=0,26$ мм/об; $T=1$ мин;
- в – точение стали 12Х18Н10Т $v=0,58$ м/с, $s=0,26$ мм/об; $T=1$ мин;
- г – точение сплава ЭИ 437Б $v=0,15$ м/с, $s=0,26$ мм/об; $T=1$ мин

При точении конструкционных железо–углеродистых сталей (Сталь 45 и ШХ15) износ формируется в виде лунки на передней поверхности, при обработке аустенитной нержавеющей стали (12Х18Н10Т) в виде лунки и площадки износа по задней поверхности, а при обработке жаропрочного сплава на никелевой основе ЭИ 437Б(ХН77ТЮР) в виде площадок износа на передней и задней поверхностях с опусканием вершины инструмента.

В табл. 2 показано, что покрытие оказывает влияние на изменение контактных условий и стружкообразование только при обработке железо–углеродистых материалов, поэтому исследование условий формирования очага износа и механизмов изнашивания именно этих материалов имеет важное практическое значение.

Измерение места расположения и размеров очага износа на передней поверхности резцовой пластины производили при быстром выводе ее из зоны точения Стали 45 на специальном устройстве, по схеме приведенной на рис. 13.

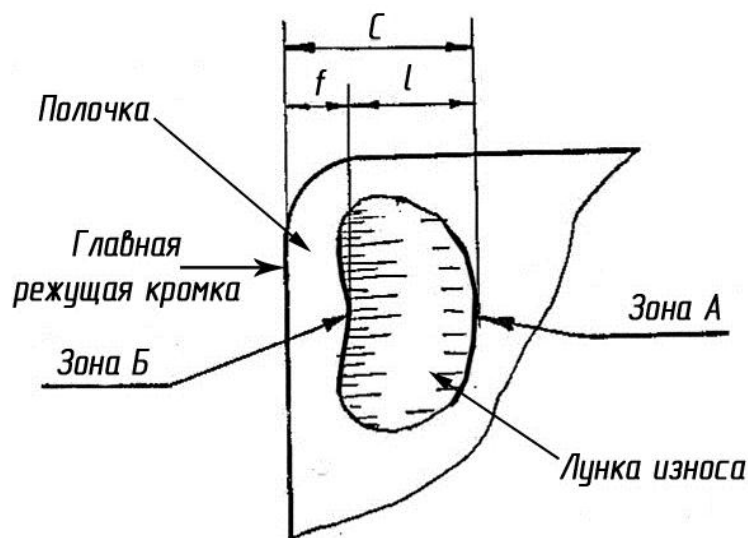


Рисунок 13 – Схема измерения места расположения и размеров очага износа на передней поверхности инструмента при точении Стали 45:

C – длина контакта, мм,
 l – ширина лунки износа, мм, f – ширина полочки, мм

Измеряли длину контакта – C , ширину лунки износа – l и ширину полочки – f . При рассмотрении лунки износа различают зону А – как место отрыва стружки от передней поверхности на выходе ее из лунки износа и зону Б – как место перехода полочки к началу лунки износа.

Формирование и изменение размеров очага износа необходимо рассматривать за определенный период времени т.к. контактные характеристики и условия стружкообразования измеренные в первые минуты резания острозаточенным инструментом (в период, когда лунка еще не сформирована) существенно отличаются от этих характеристик, когда инструмент приработан и находится в состоянии рабочего изнашивания. На рис. 14 показано изменение параметров лунки и усадки стружки при точении Стали 45 до полного теплового затупления резца.

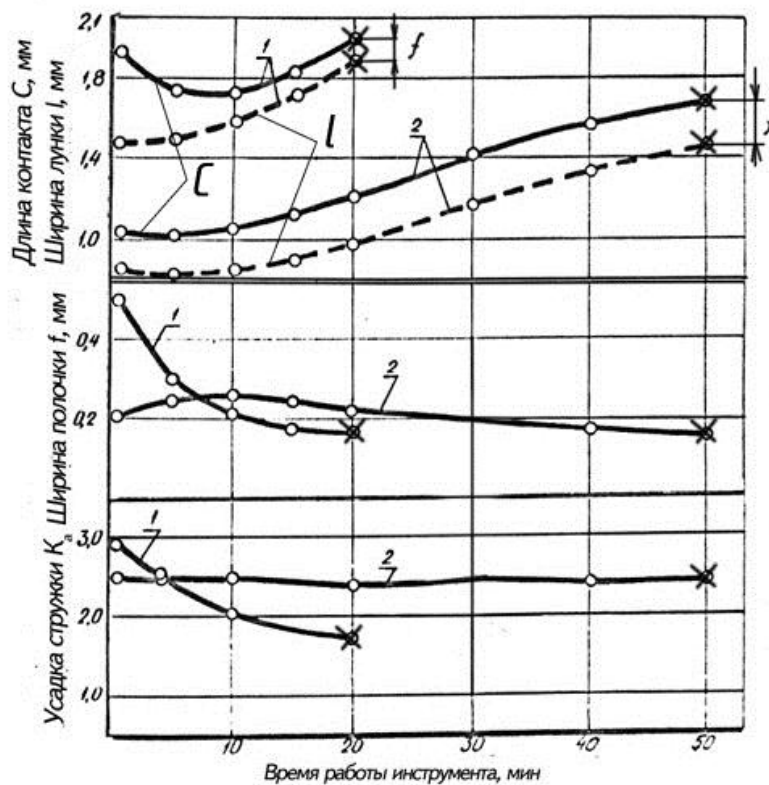


Рисунок 14 – Изменение параметров лунки и усадки стружки по времени при точении Стали 45:
 1 – P6M5, 2 – P6M5+TiN
 $v = 0,73$ м/с; $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,4$ мм; без СОЖ;
 х – время полного затупления резца
 (период стойкости – T , мин)

Видно, что длина контакта – C и ширина лунки – l у инструмента с покрытием остается меньше на протяжении всего периода стойкости – T . Значения ширины полочки – f и усадки стружки – K_a в первый момент времени больше у инструмента без покрытия, однако, с увеличением времени работы снижаются и после 5 мин, становятся меньше, чем у инструмента с покрытием. Усадка стружки и ширина полочки – f у инструмента с покрытием сохраняется без изменений длительное время.

В данных условиях точения период стойкости инструмента с покрытиями в 2,5 раза выше, чем без покрытия.

Для выяснения механизма повышения стойкости инструмента с покрытиями необходимо знать в какой зоне А или Б, на выходе или входе стружки в лунку износа реализуются износостойкие свойства покрытия. На рис. 15 приведены результаты исследования роста ширины лунки износа и период стойкости для 4-х вариантов передней поверхности инструмента. 1 вариант – передняя поверхность без покрытия, 2 – у режущей кромки на месте полочки нанесена полоска шириной 0,5 мм покрытия TiN, 3 – на месте полочки отсутствует покрытие, а на всей передней поверхности покрытие имеется, 4 – вся передняя поверхность имеет покрытие.

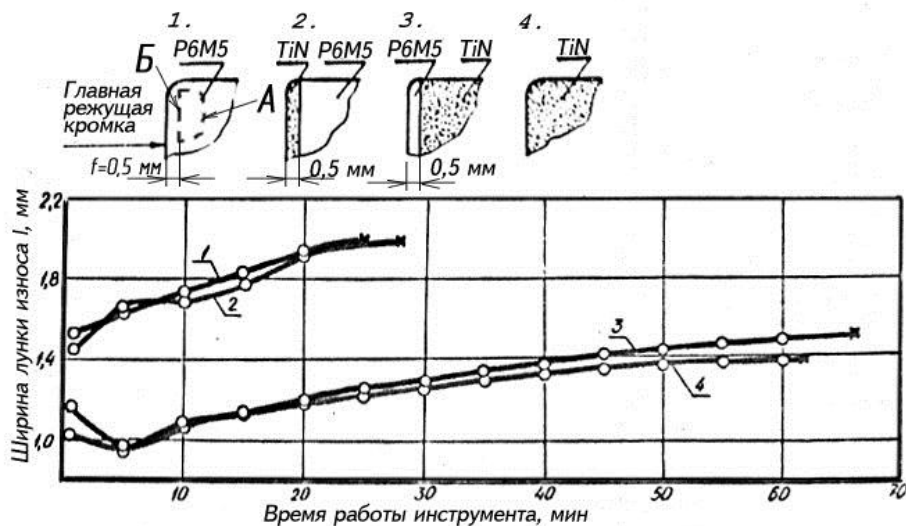


Рисунок 15 – Исследование влияния места нанесения износостойкого покрытия TiN на формирование размеров лунки износа и стойкость резцов при точении Сталь 45:
 $v = 0,67$ м/с, $s = 0,43$ мм/об, $t = 1,5$ мм, без СОЖ.
 x – время полного затупления инструмента

Приведенные графики однозначно показывают, что роль покрытия реализуется в зоне А, в которой стружка выходит из лунки износа. Кривые расположены парами с одинаковыми контактными условиями в зоне А. Для данных режимов резания покрытие в зоне А в 1,5 раза уменьшает ширину лунки износа и увеличивает стойкость инструмента более 2-х раз. Однако, остается неясным как покрытие толщиной всего ~5 мкм может сдерживать износ инструмента на который с высоким давлением воздействует сходящая стружка. Рассмотрение лунки износа при быстром выводе резца из зоны резания показало, что условия контактирования сходящей стружки с лункой износа принципиально отличаются. В лунке износа у инструмента с покрытием на участке примыкающему к зоне А выхода стружки, образуется устойчивый объем заторможенного обрабатываемого материала, по которому стружка и скользит при выходе из лунки. Это явление наблюдается при обработке разных железоуглеродистых материалов (Стали 45, 30ХГСА, ШХ15СГ) в том числе и при точении с СОЖ (рис. 16–19).

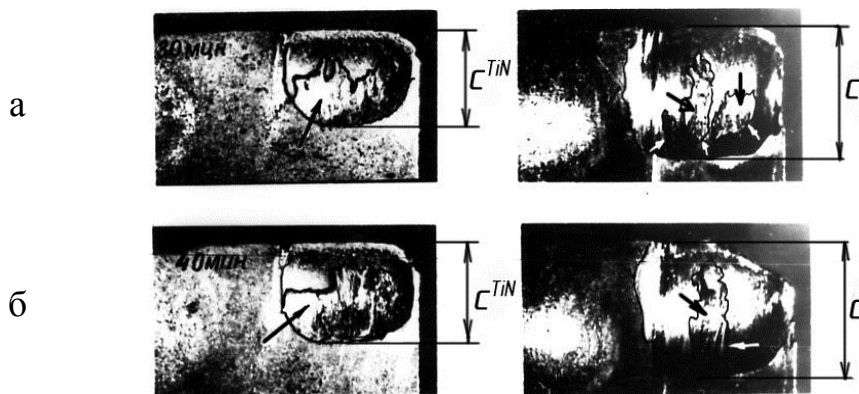


Рисунок 16 – Передняя поверхность инструмента при точении **Стали 45**:
а – 30 мин работы, б – 40 мин работы, $v = 0,73$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,5$ мм

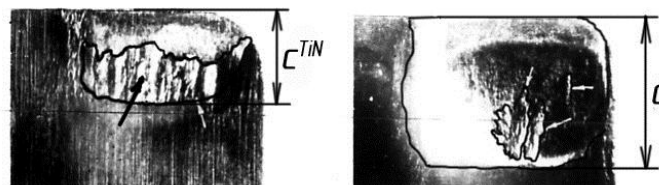


Рисунок 17 – Передняя поверхность инструмента при точении стали **30ХГСА**:
 $v = 0,47$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,5$ мм, $\tau = 30$ мин

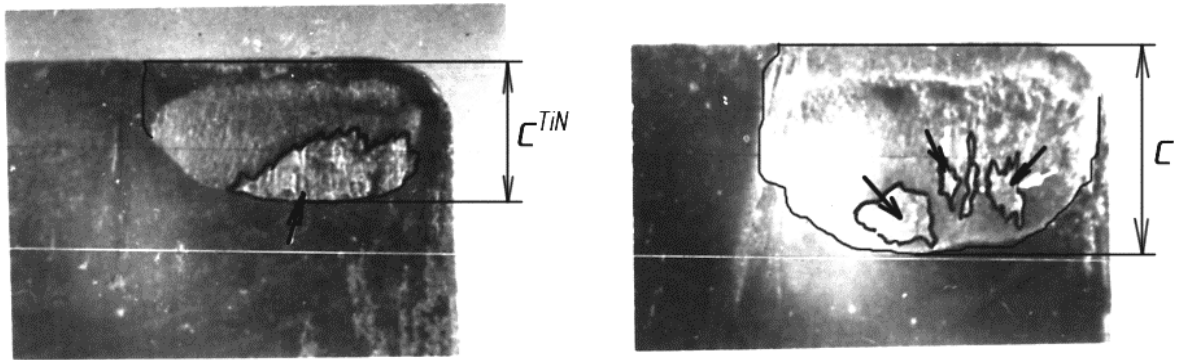


Рисунок 18 – Передняя поверхность инструмента при точении стали ШХ15СГ:
 $v = 0,5$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,5$ мм, $\tau = 10$ мин

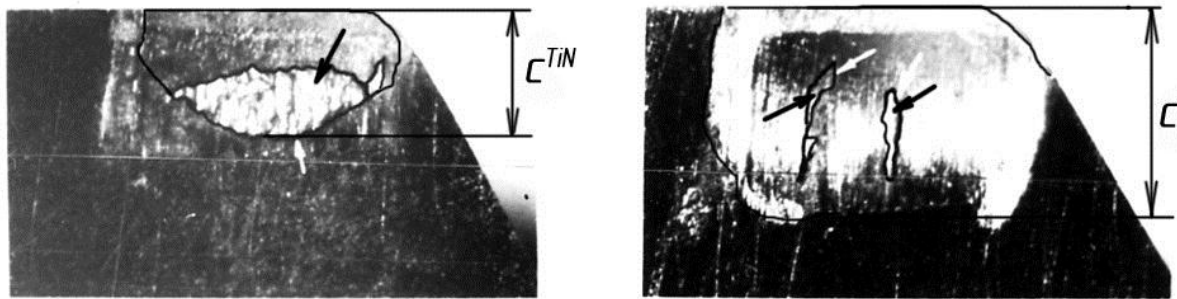


Рисунок 19 – Передняя поверхность инструмента при точении Стали 45 с применением СОЖ:
 $v = 0,83$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,5$ мм, $\tau = 5$ мин

В лунке износа у инструмента без покрытия, наблюдается только островки налипков, меняющие свое расположение по всей площади. Различие в условиях контактирования стружки с поверхностью лунки в первую очередь обусловлено уровнем контактного давления определяемого размерами ширины лунки – l . У инструментов с покрытием уровень среднего контактного давления q_n всегда выше из-за меньшей в 1,5 раза длины контакта – C .

Таким образом, заторможенный слой обрабатываемого материала, возникающий в лунке износа у инструмента с покрытием, предохраняет заднюю сторону лунки от контакта со сходящей стружкой и тем самым препятствует ее расширению и изнашиванию.

На рис. 20 приведена принципиальная схема износа инструмента с покрытием при точении железоуглеродистых материалов, на основании которой можно описать механизм повышения стойкости инструмента с покрытием следующим образом:

1. При первом контакте стружки ($\tau \leq 0,5$ мин) с передней поверхностью, у инструмента с покрытием, за счет снижения адгезионного схватывания, уменьшается длина контакта – C , увеличивается угол условной плоскости сдвига β_1 и в связи с этим снижается усадка стружки и сила стружкообразования R . Однако, средние контактные давления – q_n увеличиваются, т.к. сокращение площади контакта за счет уменьшения длины контакта происходит в большей степени, чем снижение составляющих силы резания P_1 и P_2 .

2. Через 0,5-2 мин. работы инструмента происходит прорыв (разрушение) покрытия в месте, начала формирования лунки и стружка начинает контактировать с материалом инструмента. Однако, условия контактного трения в лунке в этом случае отличаются от условий контактирования стружки с инструментом без покрытия более высокими значениями средних контактных давлений q_n .

3. При повышении среднего контактного давления наблюдается полное заторможение контактного слоя стружки, а граница, определяющая ее движение, поднимается выше гребешков микронеровностей инструментального материала, т.е. реализуется пластический сдвиг в материале стружки.

4. Образовавшийся заторможенный слой у инструмента с покрытием плотно прилегает к задней стороне лунки. В этом случае обеспечивается внутреннее трение в материале сходящей стружки.

У инструмента без покрытия задняя стенка лунки свободная от заторможенного слоя, хотя на дне лунки возникают островковые налипы, которые меняют свою конфигурацию, и место расположения во времени, подтверждая их неустойчивость.

Таким образом, устойчивый заторможенный слой обрабатываемого материала, сформировавшийся у инструмента с покрытием, предохраняет заднюю стенку лунки от контакта со

сходящей стружкой и отодвигает источники тепловыделения от ее поверхности.

5. Покрытие проявляет свои износостойкие свойства в зоне отрыва стружки от передней поверхности на выходе из лунки (Зона А), сдерживает рост ее ширины. Это позволяет длительное время сохранять высокое нормальное давление стружки и обеспечить устойчивость заторможенных слоев на задней стороне лунки.

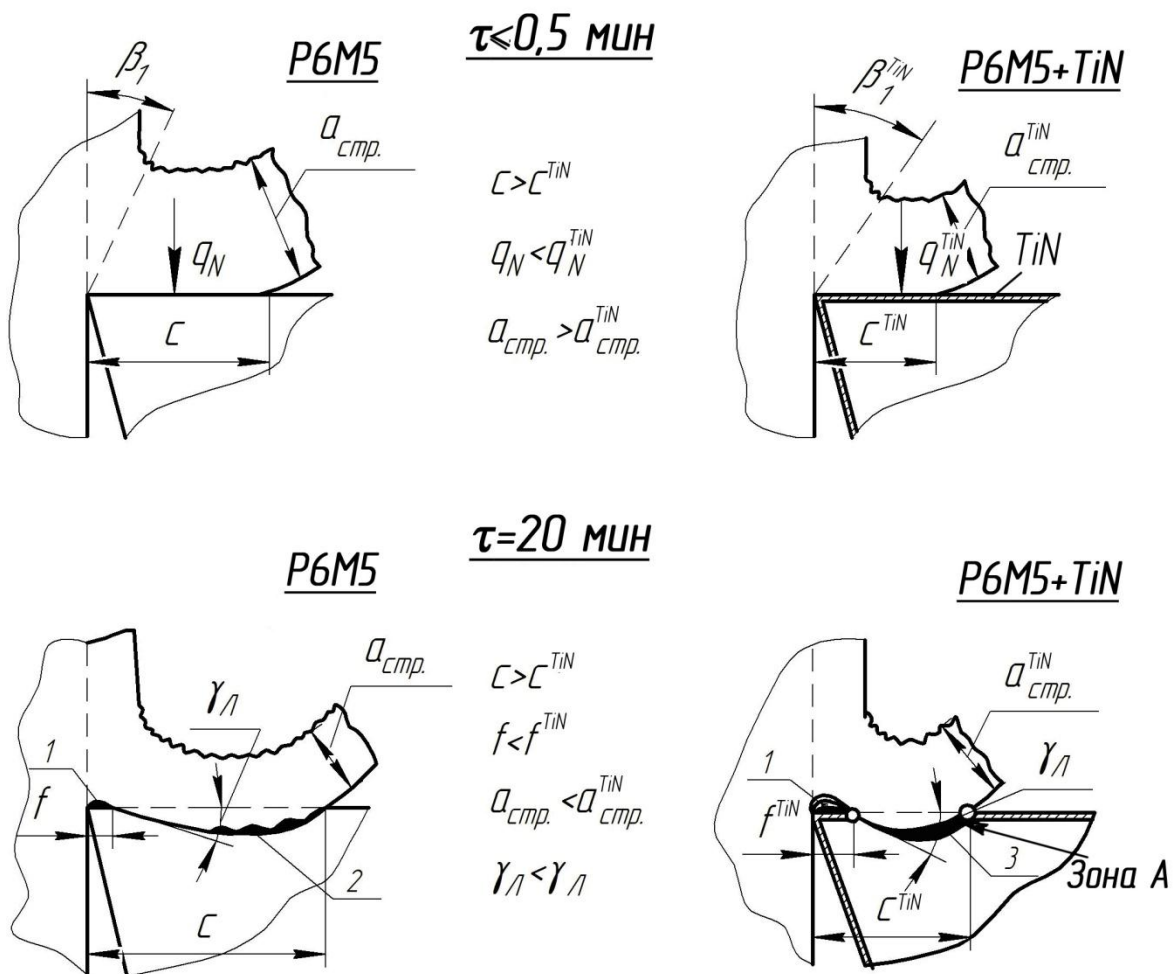


Рисунок 20 – Принципиальная схема изнашивания инструмента с покрытием при точении железоуглеродистых материалов:

- 1 – Застойная зона у режущей кромки;
- 2 – Неустойчивые налипсы в лунке износа;
- 3 – Заторможенный слой обрабатываемого материала

6. Возможность более длительное время сохранять меньшие размеры лунки, позволяет обеспечивать такие условия обтекания стружкой вершины режущего клина, которые способствуют формированию наиболее рациональной формы застойной зоны на полочке у режущей кромки, предохраняющей от износа заднюю поверхность (рис. 21).

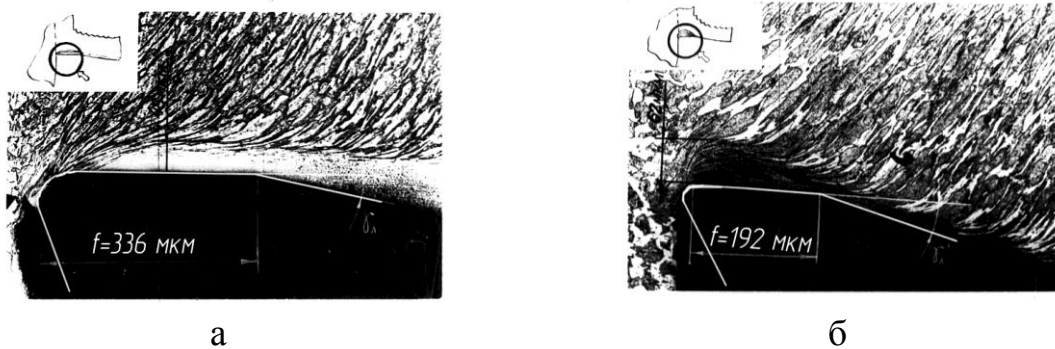


Рисунок 21 – Условия кинематического заторможения (форма застойной зоны) обрабатываемого материала на полочке у вершины резца при точении Стали 45:
 а – Р6М5, б – Р6М5+TiN
 $v = 0,67$ м/с, $s = 0,43$ мм/об; $t = 1,4$ мм; $\tau = 5$ мин, без СОЖ

7. Увеличение размеров лунки в сторону выхода стружки изменяет условия обтекания вершины режущего клина стружкой и ведет к уменьшению зоны застоя на полочке и износу полочки, что способствует повышению износа задней поверхности и выходу инструмента из строя.

К сожалению выше описанный механизм повышения стойкости инструментов с покрытиями не реализуется при резании труднообрабатываемых материалов, особенно инструментом из быстрорежущей стали. Покрытие разрушается в первый момент контакта со стружкой, не оказывая заметного влияния на повышение износостойкости. Разрушение покрытия связано со значительным до 4-х раз выше по сравнению с железоуглеродистыми материалами, контактными нагрузками и характерной для этих материалов неустойчивостью пластического течения в зонах контактного трения (рис. 22).



x2000

Рисунок 22 – Вид контактного взаимодействия стружки и передней поверхности инструмента при точении сплава ЭИ787:

$$v = 0,033 \text{ м/с}; s = 0,3 \text{ мм/об}; t = 1,5 \text{ мм}$$

Инструментальный материал – Р12МФ5–МП

Износ на передней поверхности происходит без образования лунки и полочки у режущей кромки и устойчивых заторможенных зон, установленных для железистых материалов.

При точении титановых, а также жаропрочных сплавов ЭИ787 и ЭИ437 (ХН77ТЮР) в широком диапазоне изменения режимов и условий резания инструментом из быстрорежущей стали с различными покрытиями, существенного эффекта не установлено.

Список использованных источников: 1. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / Полетика М.Ф. – М.: Машиностроение. – 1969. – 148 с. 2. Еремин А.И. Физическая сущность явлений при резании сталей / Еремин А.И. – М.: Свердловск. – Машгиз, 1951. – 226 с. 3. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / Резников А.Н. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 4. Зорев Н.Н. О взаимосвязи процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента : Вестник машиностроения, 1963, – №12. – С.42-50. 5. Внуков Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследований условий их трения с обрабатываемыми материалами и реализации новых технологических возможностей : дисс. доктора техн. наук / Внуков Юрий Николаевич. – М., 1992. – 371 с. 6. Sata T., Mizuno M. Frictions process on cutting tools and cutting mechanism //Journal scient Research Inst.– June.– Vol. 49.–1955. 7. Нанесение износостойких покрытий на режущий инструмент / Под ред. Внукова Ю.Н. – К.: Техника, 1992. –143 с.

Bibliography (transliterated): 1. Poletika M.F. Kontaktnye nagruzki na rezhushhih poverhnostjakh instrumenta / Poletika M.F. – M.: Mashinostroenie. – 1969. – 148 p. 2. Eremin A.I. Fizicheskaja sushhnost' javlenij pri rezanii stalej / Eremin A.I. – M.: Sverdlovsk. – Mashgiz, 1951. – 226 p. 3. Reznikov A.N. Teplofizika processov mehanicheskoy obrabotki materialov / Reznikov A.N. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 279 p. 4. Zorev H.H. O vzaimozavisimosti processov v zone struzhkoobrazovanija i v zone kontakta prednej poverhnosti instrumenta : Vestnik mashinostroenija, 1963, – №12. – P.42-50. 5. Vnukov Ju.N. Povyshenie iznosostojkosti bystrozrezhushhih instrumentov na osnove issledovanij uslovij ih trenija s obrabatyvaemymi materialami i realizacii novyh tehnologicheskikh vozmozhnostej : diss. doktora tehn. nauk / Vnukov Jurij Nikolaevich. – M., 1992. – 371 p. 6. Sata T., Mizuno M. Frictions process on cutting tools and cutting mechanism //Journal scient Research Inst.– June.–Vol. 49.–1955. 7. Nanesenie iznosostojkikh pokrytij na rezhushhij instrument / Pod red. Vnukova Ju.N.–K.: Tehnika, 1992. –143 p.