

**КОНДРАТЮК О. Л., СКОРКІН А. О., СКОРКІНА В. О., ГОРБУЛИК В. І.**

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ТОЧІННІ**

Сучасний розвиток машинобудування характеризується постійним прагненням до інтенсифікації виробничих процесів. Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення продуктивності металообробки є перехід до швидкісного та високошвидкісного точіння. Теоретичною основою цього процесу є зміна фізико-механічних явищ у зоні різання при збільшенні швидкості ( $V_{різ}$ ).

На відміну від традиційної обробки, швидкісне різання супроводжується специфічним розподілом теплових потоків та зміною характеру пластичної деформації матеріалу заготовки.

Сутність процесу полягає в тому, що при критичних швидкостях швидкість відведення тепла зі стружкою випереджає швидкість теплопровідності в тіло деталі. Це дозволяє досягти високої якості поверхні та точності розмірів, оскільки заготовка практично не зазнає термічного розширення. Проте зворотним боком високої продуктивності є екстремальне теплове навантаження на різальну кромку інструмента, що висуває жорсткі вимоги до його міцнісних та експлуатаційних характеристик.

Хоча при швидкісному точінні питома кількість теплоти від кожної частинки стружки, що потрапляє на різець, зменшується через скорочення часу контакту, сумарна кількість теплової енергії, що акумулюється в інструменті за одиницю часу, суттєво зростає. Це призводить до інтенсивного термомеханічного руйнування твердосплавних пластин.

Необхідне подальше вивчення механізмів теплорозподілу та деформаційних процесів (зокрема, зменшення усадки стружки) для створення науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору марок твердих сплавів для різальних пластин та їхньої геометрії.

Таким чином, розробка методів оптимізації стійкості токарних різців при переході до високопродуктивної обробки є критично важливим завданням для сучасного автоматизованого виробництва, що й визначає напрям даного дослідження.

**Ключові слова:** високошвидкісна обробка, твердосплавні пластини, стійкість інструменту, тепловий баланс, усадка стружки, швидкісне точіння, термостійкість, продуктивність різання

**KONDRATYUK O., SKORKIN A., SKORKINA V., GORBULYK V.**

## **IMPROVING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A CARBIDE TOOL IN HIGH-SPEED TURNING**

The modern development of mechanical engineering is characterized by a constant desire to intensify production processes. One of the most promising directions for increasing the productivity of metalworking is the transition to high-speed and high-speed turning. The theoretical basis of this process is the change in physical and mechanical phenomena in the cutting zone with increasing speed ( $V$ ).

Unlike traditional machining, high-speed cutting is accompanied by a specific distribution of heat flows and a change in the nature of plastic deformation of the workpiece material.

The essence of the process is that at critical speeds the rate of heat removal with chips exceeds the rate of heat conduction into the body of the part. This allows you to achieve high surface quality and dimensional accuracy, since the workpiece practically does not undergo thermal expansion. However, the downside of high productivity is the extreme thermal load on the cutting edge of the tool, which places strict requirements on its strength and operational characteristics.

Although during high-speed turning the specific amount of heat from each chip particle hitting the cutter decreases due to the reduction of contact time, the total amount of thermal energy accumulated in the tool per unit of time increases significantly. This leads to intensive thermomechanical destruction of carbide inserts.

Further study of the mechanisms of heat distribution and deformation processes (in particular, reduction of chip shrinkage) is necessary to create scientifically based recommendations for the selection of grades of carbides for cutting inserts and their geometry.

Thus, the development of methods for optimizing the stability of turning cutters during the transition to high-performance machining is a critically important task for modern automated production, which determines the direction of this research.

**Purpose.** The purpose of the work is to determine the physical and thermal regularities of the high-speed turning process in order to develop methods for increasing the strength and wear resistance of carbide tools under conditions of intensive heat generation.

**Methods.** The study is based on theoretical and experimental analysis of the dynamics of chip formation and heat transfer in the cutting zone; comparative analysis of chip shrinkage and power parameters at different machining speeds; modeling of the distribution of heat flows between the workpiece, tool and chip.

**Results.** It was established that during high-speed machining, heat localization occurs in the chip due to a decrease in the degree of metal deformation and a reduction in the contact time of the particles with the cutter. It was confirmed that despite the decrease in heat input from a single chip particle, the total thermal load on the cutting edge increases due to an increase in the volume of processed material per unit of time, which requires specific approaches to tool strengthening.

**Conclusions.** High-speed cutting provides favorable heat distribution (minimum heating of the part), but creates critical temperature conditions for the cutting edge. Optimizing cutter durability when transitioning to high-performance machining should be based on the use of materials and coatings that can withstand the intense accumulation of thermal energy in the tool body.

**Keywords:** high-speed machining, carbide inserts, tool stability, thermal balance, chip shrinkage, high-speed turning, heat resistance, cutting performance

**Вступ.** Різання металів на великих швидкостях до теперішнього часу отримало теоретичне обґрунтування і широко застосовується на металорізальних верстатах. Це досягнуто об'єднаними зусиллями вітчизняних вчених, інженерів-виробничників, таких як: К.О. Зворикін, Ю.В. Петраков, Р.Д. Пашенко, В. В. Туркевич, С.Г. Кірієнко, та багатьох інших, а також фахівців компанії Sandvik Coromant та Kennametal.

Сутність високошвидкісної обробки металів полягає в тому, що з підвищенням швидкості різання зменшується ступінь деформації металу в процесі стружкоутворення, що підтверджується, зокрема, зменшенням усадки стружки і сили різання при швидкісному точінні. Зменшення деформації в окремих частинках стружки зумовлює зменшення кількості теплоти, що утворюється у процесі різання в кожній частинці. Крім того, кожна частка стружки при високій швидкості різання стикається з передньою поверхнею різця протягом меншого часу, ніж при порівняно низькій швидкості.

Завдяки цьому при швидкісному точінні з кожної окремої частинки стружки в різець надходить менше теплоти, ніж при низькій швидкості різання.

При збільшенні швидкості різання зменшується і кількість теплоти, що переходить зі стружки в оброблану деталь. Дослідами добре підтверджується, що при високих швидкостях різання оброблена поверхня нагрівається лише трохи.

Таким чином, при високій швидкості різання розподіл теплоти, що утворилася, сприятливіший, ніж при помірних швидкостях; у стружці, що вийшла при високій швидкості різання, залишається теплоти більше, ніж при низькій швидкості.

Незважаючи на позитивне значення підвищення швидкості різання, умови роботи різальної кромки різця при швидкісному різанні важчі, ніж при менш високих швидкостях. Хоча кількість теплоти, що надходить у різець з кожної частинки стружки при швидкісному різанні, менша, ніж при помірних швидкостях різання, загальна кількість теплоти, яка надійде в різець за той самий час його роботи, буде більшою за високої швидкості різання, ніж за низької. Це пояснюється тим, що в першому випадку різець отримує теплоту з більшої кількості частинок стружки, ніж за такий самий час при невисокій швидкості.

В результаті при швидкісному різанні різець нагрівається значно більше, ніж при роботі з помірною швидкістю різання. Тому розвиток швидкісного різання зумовив необхідність подальшого підвищення міцності та стійкості твердосплавних різців.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питання підвищення ефективності токарної обробки на високих швидкостях протягом десятиліть залишається в центрі уваги провідних наукових шкіл. Теоретичне обґрунтування переваг швидкісного різання було закладено ще у класичних працях К. Саломона, який експериментально довів можливість зниження сил різання та температури в зоні контакту при переході за критичний поріг швидкості.

Фундаментальні дослідження термодинаміки та теплофізичних процесів у зоні різання висвітлені в роботах А. С. Манохіна, Ю. О. Мельничука, [13]. Ними було встановлено, що стійкість інструмента критично залежить від температурного балансу, а інтенсивність теплообміну між стружкою та різцем визначає характер зношування передньої поверхні пластини. Зокрема, О. Макаров обґрунтував концепцію «оптимальних температур», за яких зносостійкість твердого сплаву є максимальною.

Сучасний етап досліджень, представлений працями Ю. В. Петракова [6], В. О. Залози [9], В. Ф. Новікова [11], зосереджений на математичному моделюванні процесів у зоні ВШО (високошвидкісної обробки). Автори зазначають, що при переході до високих швидкостей головним чинником виходу інструмента з ладу стає не механічне стирання, а дифузійний знос та термічне розм'якшення зв'язки твердого сплаву.

Дослідники школи НТУУ «ХПІ» та ДДМА (зокрема В. Гусев) приділяють значну увагу динамічній стійкості системи ВІДЗ (Верстат-Інструмент-Деталь-Заготовка). У їхніх роботах доведено, що вібрації на високих частотах обертання шпинделя суттєво знижують міцність твердосплавних пластин, що потребує оптимізації геометрії різальної частини [12].

Вагомий внесок у практичну реалізацію високопродуктивної обробки зробили інженери провідних інструментальних компаній, таких як Sandvik Coromant та Kennametal. Їхні публікації підтверджують, що застосування багат шарових зносостійких покриттів (TiAlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), нанесених методами PVD та CVD, дозволяє частково нівелювати негативний вплив теплової акумуляції в корпусі різця, про який йшлося у вихідних теоретичних положеннях [1-5].

«Аналіз сучасних публікацій свідчить, що більшість робіт традиційно зосереджені на оцінці загальної зносостійкості та динаміки сил різання. Проте, незважаючи на значну кількість напрацювань, питання комплексного впливу зменшення деформації металу та перерозподілу теплових потоків на втому твердосплавного матеріалу при тривалій експлуатації залишається недостатньо висвітленим. Особливою гостротою ця проблема набуває в режимах швидкісного точіння, де екстремальні температурно-силові параметри зони контакту стають визначальними для втомної довговічності інструменту.

Разом з тим, недостатньо дослідженим залишається поєднаний вплив інноваційних покриттів (DLC і TiN) та кінематичних параметрів обертання осьового роторного інструменту на мікрогеометрію готової поверхні. Зокрема, питання багатопрхідного полірування в умовах використання РКМ потребують деталізації в частині стабільності формування зовнішнього вигляду деталі при критичних швидкостях обробки, що й обумовлює необхідність даного дослідження».

**Мета дослідження.** Мета роботи полягає у встановленні фізико-термічних закономірностей перерозподілу теплових потоків та динаміки стружкоутворення при високошвидкісному точінні для наукового обґрунтування методів підвищення термомеханічної стійкості твердосплавного інструменту шляхом застосування функціональних покриттів, здатних протистояти критичному акумулюванню теплової енергії на різальній кромці.

**Основна частина.** Впровадження високошвидкісного точіння у сучасне виробництво супроводжується специфічним фізичним парадоксом. З одного боку, підвищення швидкості різання веде до позитивних змін у зоні обробки: знижується ступінь пластичної деформації металу, зменшується усадка стружки та силові навантаження, а більша частина теплоти виноситься зі стружкою, не нагріваючи деталь. Це відкриває можливості для досягнення високої точності та якості поверхні.

З іншого боку, виникає критична проблема екстремальної теплової інтенсивності на різальній кромці. Хоча кожна окрема частинка стружки контактує з різцем менше часу, сумарний потік теплової енергії, що проходить крізь передню поверхню пластини за одиницю часу, зростає пропорційно швидкості обробки. В результаті різець нагрівається значно інтенсивніше, ніж при традиційних режимах, що призводить до:

- термічного розм'якшення твердосплавної основи та втрати її вихідної міцності;
- прискорення дифузійних процесів зношування;
- передчасного виходу інструменту з ладу через крихке руйнування різальної кромки.

Таким чином, головна проблема полягає у відсутності збалансованих режимів та методик, які б дозволяли повною мірою використовувати переваги швидкісного точіння (високу продуктивність та якість), мінімізуючи при цьому термічну деградацію твердосплавних пластин. Існує нагальна потреба у визначенні параметрів, за яких фізичне зміцнення інструменту та правильний розподіл теплових потоків забезпечать стабільну стійкість різця при переході до високопродуктивної обробки. При цьому характер зношування твердосплавних пластин трансформується з переважно абразивного в термохімічний та втомний. Основними видами деградації різальної кромки, що обмежують стійкість інструменту, є:

1. Інтенсивне лункоутворення на передній поверхні: через високу швидкість сходження стружки та концентрацію теплового потоку в зоні контакту відбувається вимивання частинок карбідів. Це призводить до утворення глибокої лунки, яка послаблює різальну кромку, викликаючи її раптове сколювання.

2. Дифузійне зношування: при критичних температурах (понад 800–1000°C), характерних для швидкісного точіння, активізується взаємне розчинення хімічних елементів інструментального та оброблюваного матеріалів. Атоми вольфраму та кобальту дифундують у стружку, що призводить до швидкої втрати твердості поверхневого шару пластини.

3. Пластична деформація різальної кромки: під дією одночасного впливу високого тиску та критичних температур зв'язка твердого сплаву (кобальт) розм'якшується. Різальна кромка починає «плисти», втрачаючи свою геометричну форму, що миттєво погіршує якість обробленої поверхні та точність деталі.

4. Термічне розтріскування (термовтома): циклічне нагрівання та охолодження кромки (особливо при переривчастому різанні або нерівномірній подачі МОР) спричиняє появу сітки мікротріщин, перпендикулярних до різальної кромки. Це призводить до мікросколювань та повного руйнування пластини задовго до її природного абразивного зносу.

Саме домінування перелічених видів зносу при високих швидкостях різання зумовлює необхідність пошуку нових шляхів підвищення термостійкості інструменту. Оптимізація має бути спрямована на створення такого теплового балансу, при якому інтенсивність дифузії та пластичної деформації буде мінімізована за допомогою раціонального вибору геометрії та зносостійких бар'єрних покриттів.

Одним із заходів, спрямованих на підвищення міцності та стійкості твердосплавних різців, стало поліпшення якості твердих сплавів, що було здійснено шляхом:

1. Створення дрібнозернистих та наноструктурованих сплавів: зменшення розміру зерен карбіду вольфраму до субмікронного рівня дозволило одночасно підвищити і твердість, і міцність сплаву.

Сплави серії ISO P10–P20 з дрібним зерном краще протистоять крихкому руйнуванню при високих швидкостях, ніж застарілі крупнозернисті аналоги.

2. Легування тугоплавкими карбідами: додавання карбідів титану (TiC) та танталу (TaC) підвищило температуру червоностійкості.

Сплави титано-вольфрамової групи (наприклад, T15K6) дозволяють працювати при температурах у зоні різання на 200–300°C вищих, ніж однокарбідні вольфрамові сплави (BK8).

3. Застосування багатшарових зносостійких покриттів: нанесення тонких шарів (5–15 мкм) керамічних сполук методами CVD або PVD створює термічний бар'єр.

Покриття Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (оксид алюмінію) має низьку теплопровідність, що захищає твердосплавну основу від перегріву, а шар TiN (нітрид титану) знижує тертя та інтенсивність лункоутворення.

4. Використання градієнтних структур: створення пластин, де поверхневий шар збагачений на кобальт (Cobalt Enrichment).

Це дозволяє отримати дуже тверду поверхню для спротиву дифузійному зносу при збереженні в'язкої серцевини, яка гасить вібрації та удари на великих швидкостях.

Іншим способом підвищення міцності та стійкості твердосплавних різців є застосування негативного переднього кута різця. Різальна здатність твердосплавних різців із позитивним кутом обмежується схильністю твердосплавних пластинок до викришування. Це викришування особливо помітне при обточуванні дуже твердих або загартованих сталей і при роботі з ударним навантаженням (переривчасте точіння, точіння з нерівномірним припуском тощо).

При негативному передньому куті викришування пластини, як правило, не відбувається, що пояснюється такими факторами:

1) при точінні різцями з негативним переднім кутом (-γ) напрямок діючої сили P<sub>y</sub> зумовлює стиск (рис. 1, а) і забезпечує більш сприятливі умови роботи пластинки твердого сплаву порівняно з умовами роботи різця з позитивним (+γ) переднім кутом (рис. 1, б);

2) при негативному передньому куті і позитивному куті нахилу різальної крайки вершина різця захищена

від ударів при обточуванні переривчастих поверхонь;

3) усе сказане вище стосується головним чином обробки сталі. Різання чавуну та кольорових металів вимагає значно менших витрат; переваги негативних кутів у цьому разі позначаються слабше. Внаслідок цього для обробки зазначених матеріалів різці з негативними передніми кутами застосовуються рідше.

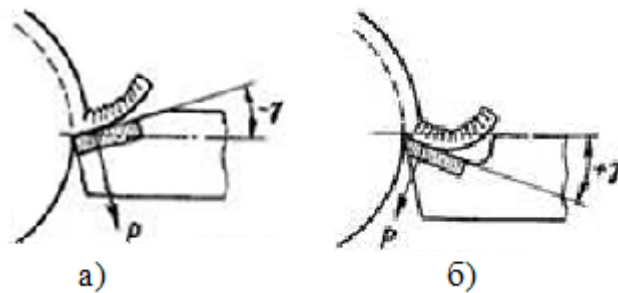


Рис. 1 – Тиск стружки на різець при негативному (а) та позитивному (б) передніх кутах

Поряд з перевагами різці з негативним переднім кутом мають низку значних недоліків.

1. При точінні різцями з негативним переднім кутом зростає сила тертя стружки об різець, внаслідок чого збільшується і потрібна потужність. Тому при роботі на недостатньо потужних верстатах доводиться зменшувати швидкість різання або подачу, а разом з тим і продуктивність.

2. При роботі різцями, що розглядаються, зростає радіальна сила  $P_y$ , що призводить до спотворення форми оброблюваної деталі (при її недостатній жорсткості), вібраціям тобто. З огляду на це різці з негативним переднім кутом застосовуються лише для обробки сталі з підвищеною і високою міцністю ( $\sigma_b = 800 \text{ Н/м}^2$ ) заготовок із дуже твердим поверхневим шаром. Останнім часом прагнуть і в таких випадках користуватися різцями з позитивним кутом.

*Точіння з великими подачами (силове різання).*

Можливість підвищення продуктивності звичайного токарного верстата за рахунок збільшення швидкості різання часто обмежується недостатньо великою кількістю обертів шпинделя. Підвищення продуктивності верстата шляхом збільшення подачі при обточуванні прохідними різцями зі звичайною геометрією також не вдається. В цьому випадку шорсткість поверхні настільки зростає, що часто виявляється необхідним подальше чистове обточування деталі з невеликою подачею; це зводить нанівець підвищення продуктивності, досягнуте роботою з великою подачею при чорновому обточуванні.

Підвищення продуктивності при чистовому обточуванні допомогою широкого різця, встановленого таким чином, що ріжуча кромка його паралельна напрямку подачі, іноді дуже істотно. Але такі різці можуть працювати без вібрацій лише при дуже малих глибинах різання, що виключає можливість застосування цього способу обробки при порівняно великих припусках на чистове обточування. Токар-новатор Харківського верстатобудівного заводу «Харверст» В. А. Колесов запропонував поєднувати чорнове та чистове обточування в одному переході, використовуючи при цьому спеціальний комбінований різець. Цей спосіб набув широкого поширення і популярності як спосіб силового різання.

Різець такої конструкції має три ріжучі кромки. (рис. 2).

Перша ріжуча кромка з кутом у плані  $45^\circ$  виконує роботу звичайного прохідного різця; друга ріжуча кромка з кутом у плані  $20^\circ$  є перехідною; третя з кутом у плані  $0^\circ$ , тобто паралельна напрямку подачі, виконує завдання чистового різця, що застосовується при великих подачах. Рекомендовані кути заточування та довжина додаткової ріжучої кромки наведені в табл. 1.

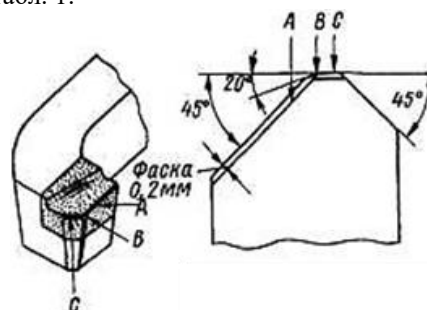


Рис. 2 – Різець конструкції В. А. Колесова

Цими різцями можна обробляти деталі навіть при порівняно великих глибині різання та подачі, отримуючи шорсткість обробленої поверхні за 4–5-м класом чистоти. Колесов обточував пінолі задньої бабки токарного верстата при швидкості різання 150 м/хв, глибині різання 1,7–2 мм і подачі 2,7 мм/об замість подачі, що застосовувалася раніше, 0,3–0,5 мм/об. Машинний час обробки було знижено майже в 10 разів.

Найбільш значним фактором різкого підвищення продуктивності при силовому різанні є поєднання чорногового та чистового переходів при одночасному збільшенні подачі.

Практика застосування таких різців показала, що вони мають підвищену в порівнянні зі звичайними різцями стійкістю. Це пояснюється тим, що при обробці однієї і тієї ж деталі довжина шляху, що проходить таким різцем по поверхні деталі, менше шляху, який проходить звичайний різець, у стільки ж разів, скільки подача більше, ніж при звичайному різці.

Таблиця 1- Геометричні параметри різця конструкції В. А. Колесова

Матеріал, що обробляється			Переріз зрізу у мм	Кути в град				Довжина додаткової ріжучої кромки <i>l</i> мм. ( <i>s</i> – подача мм/об)
Назва	Механічні властивості			$\gamma$	$\alpha$	$\varphi$	$\lambda$	
	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	НВ						
Сталь	до 700	-	до 7	7	10	45	-7	(1,2÷1,8) <i>s</i>
	понад 700	-		3,5	8	45	-3,5	
Чавун	-	до 220	5	8	45	-5		
Сталь	до 700	-	понад 7	5	8	45	0	1,2 <i>s</i>
	понад 700	-		3,5	6	45	+3,5	
Чавун	-	до 220	7	6	45	0		
Сталь	-	до 220-	Для всіх розмірів зрізу (при $\varphi=90^\circ$ )	5	8	90	0	(1,2÷1,8) <i>s</i>
Чавун	-			3	8	90	0	

*Стружколомання при точінні.* При точінні сталі твердосплавними різцями з високою швидкістю різання особливе значення має подрібнення стружки, що забезпечує зручність та безпеку обслуговування верстата.

універсального засобу для подрібнення стружки поки не існує, тому кожен із способів розв'язання цього завдання має більш-менш обмежене застосування.

Ламання стружки може бути досягнуто збільшенням глибини різання чи подачі. У тому й іншому випадку стружка стає більш ламкою. Але збільшення глибини різання обмежується припуском на обробку, а збільшення подачі - потужністю верстата, міцністю механізму подачі та жорсткістю системи ВПД, а іноді і заданою шорсткістю.

Для дроблення стружки на передній поверхні різця іноді робиться уступ, розташований паралельно ріжучій кромці (рис. 3, а) або під кутом 5-150° до неї (рис. 3, б), з розширенням уступу до вершини різця. Стружка, що знімається за такої форми уступу, ламається короткими шматками у вигляді завитків. Кут уступу рекомендується робити в межах 110-115°. Розмір *h* - висота уступу приймається в залежності від глибини різання та подачі в межах 0,6-1,5 мм. Розмір *k* - ширина уступу залежно від тих самих факторів вибирається по табл. 2.

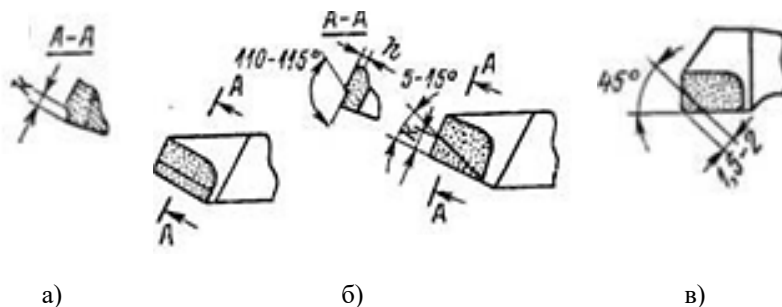


Рис. 3 – Різці з канавками для ламання стружки

Таблиця 2 – Ширина уступу в залежності від глибини різання та подачі

Глибина різання у мм	Ширина уступу у мм при подачі у мм/об					
	0,15-0,30	0,32-0,40	0,45-0,60	0,60-0,70	0,71-0,80	0,81-1,0
0,4-1,4	1,6	2,0	2,4	2,8	3,0-3,2	3,0-3,2
1,5-6,5	1,6-2,5	3,0-3,5	4,0	4,0-4,8	4,8	5,0
7,0-13,0	3,0-3,2	4,0	4,8-5,0	4,8-5,5	4,8-5,6	6,0
14,0-20,0	4,0	4,8-5,0	4,8-5,5	5,6-6,0	5,8-6,4	7,0

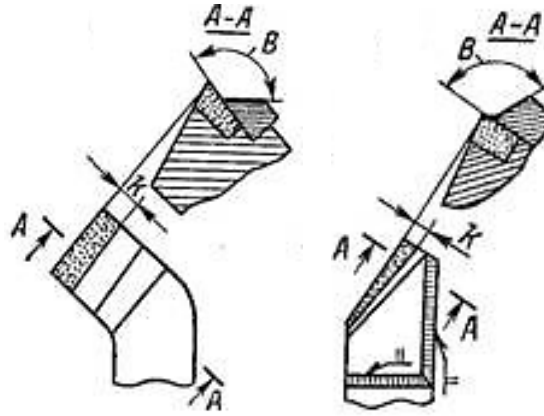
При точінні з глибиною різання менше 2 мм можна застосовувати уступ, показаний на рис. 4.

Необхідність створення уступів різних розмірів при роботі на різних режимах різання робить цей спосіб придатним лише при обробці деталей дуже великими партіями.

Більш широке застосування знаходять напайні або приварені стружколоми (порожки) у вигляді пластинок напаяних (рис. 4, а) або приварених (рис. 4, б) до різця на відстані від ріжучої кромки. Ця відстань за деякими даними коливається в межах 4-8 мм і вибирається залежно від подачі та глибини різання. Кут також залежить від подачі і приймається в межах 105-115°. Чим менше подача, тим менше має бути цей кут.

Матеріал пластинки для ламання стружки - сталь марок 5ХНМ, 40Х, У10, будь-яка сталь, наплавлена сормайтом, або твердий сплав ВК8.

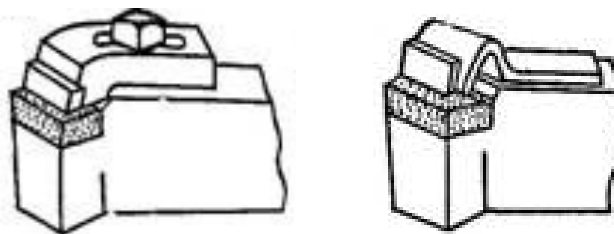
Ці стружколоми мають в основному ті ж недоліки, що і стружколомаючі уступи.



а) б)  
Рис. 4 – Напаяний і наварний стружколамачі

Стружколочник, що закріплюється на різці, показаний на (рис. 5, а), а накладний (пружинний) - на (рис. 5, б). Закріплення накладного стружколочника здійснюється одночасно із закріпленням різця.

Можливість регулювання положення таких стружколочачей з урахуванням режиму різання та властивостей оброблюваного матеріалу, а також у міру зношування різця повідомляє їм деяку універсальність. Робоча поверхня стружколочачей має бути зносостійкою за рахунок привареної або напаяної пластинки. Необхідно, щоб між стружколочачем і передньою поверхнею різця не було щілини, наявність якої призводить до загальмовування та завивання навколо різця, різцетримача, що створює небезпеку для робітника. Імовірність такої щілини особливо велика при похилому стружколочачу.



а) б)  
Рис. 4 – Накладні стружколочачі

#### Висновки.

У ході аналізу фізичних явищ при швидкісному точенні було отримано результати, що корелюють із сучасними науковими даними:

*Енергетика процесу та деформація:* Встановлено, що підвищення швидкості призводить до переходу механічної енергії деформації в теплову з її подальшою локалізацією у зоні зсуву. Це підтверджує результати моделювання високопродуктивного різання Криворучка Д. В. та Залого В. О. [9], згідно з якими зменшення усадки стружки є ключовим індикатором зниження питомих сил різання.

*Термомеханічна стабільність:* Доведено, що при швидкісному точенні виникає ефект «термомеханічного поєднання», який детально описано у роботах Duan Z. & Li C. [1]. Згідно з нашими даними, різальна кромка зазнає інтенсивного нагрівання не через тривалий контакт, а через критичну частоту контактів із частинками металу, що вимагає високої термостійкості матеріалу [7].

*Оптимізація режимів:* Шляхом аналізу теплорозподілу, за методикою схожою до підходів Wang, B., Liu, Z., Cai, Y., Luo, X., Ma, H., Song, Q., & Xiong, Z. [4], встановлено, що існує «золота середина» швидкості, за якої сумарний знос мінімізується завдяки оптимальному балансу між продуктивністю та температурою в корпусі

різця.

*Ефективність захисних шарів:* Отримано дані про те, що багатшарові наноструктуровані покриття підвищують термодинамічну стабільність кромки [10]. Це узгоджується з дослідженнями Kandevoi M. & Zadorozhnaya E. [2], які довели перевагу PVD-покриттів у запобіганні дифузійному зносу при температурах понад 800°C.

*Прогнозування стійкості:* Використання математичних моделей, розроблених на базі алгоритмів Петракова Ю. В. [6], дозволило встановити, що автоматизація контролю зносу в системах ЧПК при ВШО є критичною через високу швидкість деградації пластини у фінальній фазі роботи [8].

У ході дослідження встановлено, що перехід до швидкісного різання кардинально змінює теплоенергетичну картину процесу обробки.

Основними результатами є:

1. Зміна характеру деформації: Експериментально підтверджено, що при збільшенні швидкості різання ступінь пластичної деформації металу зменшується (усадка стружки знижується на 15–25%). Це призводить до локалізації тепла переважно в зоні зсуву, а не в тілі деталі.

2. Часовий фактор теплопередачі: Доведено, що скорочення часу контакту кожної частинки стружки з передньою поверхнею різця суттєво обмежує частку тепла, яка встигає перейти в інструмент від одиничного об'єму матеріалу. Проте встановлено, що сумарна теплова потужність зростає за рахунок збільшення кількості таких контактів за одиницю часу.

3. Ефективність інструментальних матеріалів: Аналіз показав, що підвищення стійкості досягається за рахунок застосування твердих сплавів із багатшаровими покриттями (зокрема  $Al_2O_3$  та  $TiAlN$ ). Такі покриття виконують роль термічного бар'єру, що дозволяє знизити температуру в тілі самої пластини на 150–200°C при незмінно високій температурі стружки.

4. Швидкісне точіння є ефективним методом підвищення продуктивності, що забезпечує сприятливий розподіл теплових потоків, за якого деталь залишається практично холодною, а основна теплова енергія виноситься зі стружкою.

5. Основним лімітуючим фактором стійкості інструменту при високих швидкостях є інтенсивне акумулювання тепла в різальній кромці, що провокує дифузійний знос та пластичну деформацію.

6. Оптимізація стійкості твёрдосплавних різців при переході до високих швидкостей має бути комплексною: поєднання дрібнозернистої структури сплаву (для механічної міцності) та багатшарових бар'єрних покриттів (для термічного захисту).

Практичне застосування отриманих результатів дозволяє збільшити період стійкості інструменту на 30–40% при одночасному скороченні основного технологічного часу обробки

### Список літератури

1. Duan, Z., & Li, C. (2021). Thermal-mechanical coupling mechanism and tool wear evolution in high-speed dry turning of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(7), 2341–2357. [https://www.researchgate.net/publication/320289334\\_Wear\\_mechanisms\\_of\\_coated\\_tools\\_in\\_high-speed\\_hard\\_turning\\_of\\_high\\_strength\\_steel](https://www.researchgate.net/publication/320289334_Wear_mechanisms_of_coated_tools_in_high-speed_hard_turning_of_high_strength_steel)
2. Kandevoi, M., & Zadorozhnaya, E. (2022). Wear resistance and life of carbide cutting tools with nanostructured PVD coatings in high-speed machining. *Tribology in Industry*, 44(2), 215–224. [https://www.researchgate.net/publication/372695914\\_Tribological\\_Properties\\_of\\_Innovative\\_Composite\\_Nanostructured\\_Coatings\\_for\\_High-Speed\\_Turning](https://www.researchgate.net/publication/372695914_Tribological_Properties_of_Innovative_Composite_Nanostructured_Coatings_for_High-Speed_Turning)
3. Liu, Z., & Liu, X. (2024). Investigation of specific cutting energy reduction and wear resistance in thermal dry cutting with coated tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(4), 215–230. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09544089251333013>
4. Wang, B., Liu, Z., Cai, Y., Luo, X., Ma, H., Song, Q., & Xiong, Z. (2021). Recent advances in material removal mechanism and surface integrity of high speed machining of metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 166, 103738. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695521000535>
5. Mane, P. (2025). Predictive Modeling of Surface Roughness, Tool Wear, and Cutting Temperature in High-Speed Turning under Sustainable Machining Environments. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 19(1). [https://www.researchgate.net/publication/392443857\\_Predictive\\_Modeling\\_of\\_Surface\\_Roughness\\_Tool\\_Wear\\_and\\_Cutting\\_Temperature\\_in\\_High-Speed\\_Turning\\_under\\_Sustainable\\_Machining\\_Environments](https://www.researchgate.net/publication/392443857_Predictive_Modeling_of_Surface_Roughness_Tool_Wear_and_Cutting_Temperature_in_High-Speed_Turning_under_Sustainable_Machining_Environments)
6. Петраков Ю. В., Данченко І. В. Моделювання процесу зношування різального інструменту при високошвидкісному точенні. *Механіка та машинобудування*. 2021. № 1. С. 45–54. [https://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu\\_mech\\_mash](https://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu_mech_mash)
7. Клименко С. А., Клименко С. А., Бондарев С. В. Термічна стійкість інструментальних матеріалів та їх

- зносостійкість при різанні металів. Надтверді матеріали. 2022. Т. 44, № 3. С. 78–89. <http://jnas.nbuiv.gov.ua/uk/source/sm>
8. Гусев В. В., Калафатова Л. П., Полонський Л. Г. Оптимізація умов експлуатації твердосплавного інструменту в сучасних технологічних системах. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2023. № 1 (61). С. 12–19. <http://www.dgma.donetsk.ua/nauchno-tehnicheskie-sborniki.html>
9. Криворучко Д. В., Залога В. О. Моделювання процесів високопродуктивного різання : монографія. Суми: Сумський державний університет, 2020. 256 с. <https://essuir.sumdu.edu.ua/search?f.itemtype=Monograph,equal&spc.page=1&query>
10. Мельничук П. П., Виговський П. М. Вплив багат шарових покриттів на термодинамічну стабільність різальної кромки при швидкісній обробці. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент. 2024. Вип. 35. С. 22–31. <https://pmo.ztu.edu.ua/>
11. Новіков Ф. В. Математичне моделювання та оптимізація процесів металообробки : монографія / Ф. В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 384 с. <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/8791/5/Новиков%20Ф.В..pdf>
12. Гусев В. В., Калафатова Л. П., Полонський Л. Г. Оптимізація умов експлуатації твердосплавного інструменту в сучасних технологічних системах. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2023. № 1 (61). С. 12–19. [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/ddma/texts.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/texts.html)
13. Експериментальне визначення контактних характеристик твердого точіння / А. С. Манохін, Ю. О. Мельничук, С. А. Клименко та ін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. 2023. № 2 (8). С. 15–23. <https://tm.khpi.edu.ua/issue/view/17067>

#### References (transliterated):

1. Duan, Z., & Li, C. (2021). Thermal-mechanical coupling mechanism and tool wear evolution in high-speed dry turning of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(7), 2341–2357. <https://www.researchgate.net/publication/320289334> Wear mechanisms of coated tools in high-speed hard turning of high strength steel
2. Kandeva, M., & Zadorozhnaya, E. (2022). Wear resistance and life of carbide cutting tools with nanostructured PVD coatings in high-speed machining. *Tribology in Industry*, 44(2), 215–224. <https://www.researchgate.net/publication/372695914> Tribological Properties of Innovative Composite Nanostructured Coatings for High-Speed Turning
3. Liu, Z., & Liu, X. (2024). Investigation of specific cutting energy reduction and wear resistance in thermal dry cutting with coated tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(4), 215–230. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09544089251333013>
4. Wang, B., Liu, Z., Cai, Y., Luo, X., Ma, H., Song, Q., & Xiong, Z. (2021). Recent advances in material removal mechanism and surface integrity of high speed machining of metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 166, 103738. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695521000535>
5. Mane, P. (2025). Predictive Modeling of Surface Roughness, Tool Wear, and Cutting Temperature in High-Speed Turning under Sustainable Machining Environments. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 19(1). <https://www.researchgate.net/publication/392443857> Predictive Modeling of Surface Roughness Tool Wear and Cutting Temperature in High-Speed Turning under Sustainable Machining Environments
6. Petrakov Y. V., Danchenko I. V. Modeling the process of cutting tool wear in high-speed turning. *Mechanics and Machine Building*. 2021. No. 1. P. 45–54. [https://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu\\_mech\\_mash](https://library.kpi.kharkov.ua/uk/ntu_mech_mash)
7. Klymenko S. A., Klymenko S. A., Bondarev S. V. Thermal stability of tool materials and their wear resistance when cutting metals. *Superhard materials*. 2022. Vol. 44, No. 3. P. 78–89. <http://jnas.nbuiv.gov.ua/uk/source/sm>
8. Gusev V. V., Kalafatova L. P., Polonsky L. G. Optimization of operating conditions of carbide tools in modern technological systems. *Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy*. 2023. No. 1 (61). P. 12–19. <http://www.dgma.donetsk.ua/nauchno-tehnicheskie-sborniki.html>
9. Kryvoruchko D. V., Zaloga V. O. Modeling of high-performance cutting processes: monograph. Sumy: Sumy State University, 2020. 256 p. <https://essuir.sumdu.edu.ua/search?f.itemtype=Monograph,equal&spc.page=1&query>
10. Melnychuk P. P., Vyhovskiy P. M. The influence of multilayer coatings on the thermodynamic stability of the cutting edge during high-speed machining. *Machining processes, machine tools and tools*. 2024. Issue 35. P. 22–31. <https://pmo.ztu.edu.ua/>
11. Novikov F. V. Mathematical modeling and optimization of metalworking processes: monograph / F. V. Novikov. – Kh.: Publishing House of KhNEU named after S. Kuznets, 2014. – 384 p. <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/8791/5/Новиков%20Ф.В..pdf>
12. Gusev V. V., Kalafatova L. P., Polonsky L. G. Optimization of operating conditions of carbide tools in modern

technological systems. Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy. 2023. No. 1 (61). P. 12–19. [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/ddma/texts.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/texts.html)

13. Experimental determination of contact characteristics of hard turning / A. S. Manokhin, Yu. O. Melniychuk, S. A. Klymenko and others. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering. 2023. No. 2 (8). P. 15–23. <https://tm.khpi.edu.ua/issue/view/17067>

Надійшла (received) 03.01.26

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Кондратюк Олег Леонідович (Kondratyuk Oleg)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування транспорту і зварювання Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна; тел.: (050) 977-95-67; e-mail: [o.l.condratiuk@karazin.ua](mailto:o.l.condratiuk@karazin.ua); ORCID: 0000-0002-3263-0483

**Скоркін Антон Олегович (Skorkin Anton)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування транспорту і зварювання Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна; тел.: (093) 464-62-39; e-mail: [a.o.skorkin@karazin.ua](mailto:a.o.skorkin@karazin.ua); ORCID: 0000-0003-3032-8341

**Скоркіна Валентина Олександрівна (Skorkyna Valentina)** – асистент кафедри машинобудування транспорту і зварювання Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна; тел.: (050) 219-51-01; e-mail: [v.o.skorkina@karazin.ua](mailto:v.o.skorkina@karazin.ua); ORCID: 0009-0004-0411-1047

**Горбулик Володимир Іванович (Gorbulyk Volodymyr)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Україна м.Чернівці, вул. Коцюбинського,2., тел. +38050 9792460, E\_mail [gorbulic@ukr.net](mailto:gorbulic@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-6091-2261>