

УДК 621.914

Г.М. Виговський, к.т.н., проф.

О.А. Громовий, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНІЙ ОБРОБЦІ

На основі теоретичного розгляду високошвидкісної обробки поверхонь деталей торцевим фрезеруванням визначені напрямлення підвищення продуктивності і якості обробки.

Актуальність проблеми. Перспективним шляхом розвитку сучасних технологічних процесів є застосування високошвидкісної обробки при обробці плоских поверхонь.

Серед деталей, які підлягають обробці різанням, значна частина їх має плоскі поверхні з високими вимогами до точності та шорсткості і підвищення продуктивності їх обробки є актуальною задачею для машинобудівної галузі. Одним із найбільш продуктивних методів обробки, що можуть бути застосовані при високошвидкісній обробці (ВШО) плоских поверхонь, є використання торцевих фрез, оснащених надтвердими матеріалами (НТМ). Разом з тим, значною мірою якість та продуктивність обробки плоских поверхонь залежить від характеристик процесів стружкоутворення, що вимагає глибокого вивчення їх особливостей.

Мета роботи. Полягає в розгляді існуючих досліджень процесу стружкоутворення при високошвидкісній обробці металів і сплавів та основних проблем, які необхідно вирішити для його широкого застосування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота пов'язана з виконанням НДР Житомирського державного технологічного університету "Удосконалення процесів обробки плоских поверхонь деталей торцевим фрезеруванням" РК № 01060013148 та "Прогресивні інструменти та технологічні процеси для виготовлення деталей верстатів" РК № 01060013149.

Основна частина. З ціллю вивчення механізму стружкоутворення при ВШО вивчалось формоутворення стружки у визначеному діапазоні швидкостей різання різноманітних оброблюваних матеріалів [1].

Експерименти показали [1], що залежно від матеріалу заготовки та його властивостей в режимі ВШО утворюється зливна стрічкова стружка (рис. 1) або сегментна стружка (в умовах локалізованого зсуву), яка складається з окремих сегментів, розділених тонкими напруженими граничними областями місцевого зсуву (рис. 2).

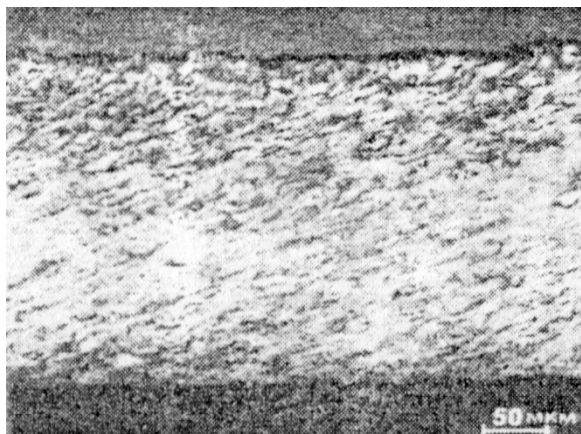


Рис. 1. Мікрофотографія зливної стружки, отриманої при обробці сталі марки 20 (швидкість різання 371,7 м/с) [1]

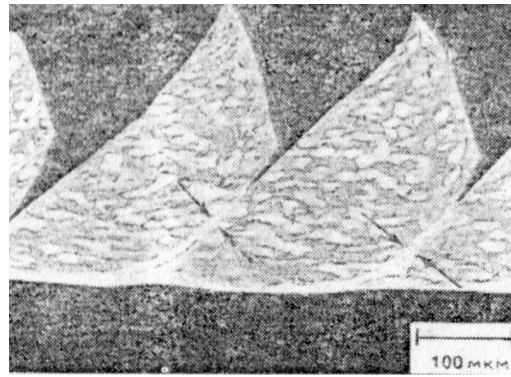


Рис. 2. Мікрофотографія сегментної стружки, отриманої в режимі локалізованого зсуву при обробці титану марки ВТ6 (швидкість різання 0,8 м/с) [1]

Як правило, зливна стружка утворюється тим інтенсивніше, чим вище значення добутку теплофізичних характеристик оброблюваного матеріалу $k\rho c$, де (k – коефіцієнт теплопровідності, ρ – густина, c – питома теплоємність). Її утворенню сприяє наявність об'ємноцентрованої та гранецентрованої кристалічної структури та низької твердості. Всі ці показники мають алюмінієві сплави та м'які низьковуглецеві сталі.

Локалізація зсуву інтенсифікується при низьких значеннях добутку теплофізичних характеристик матеріалу $k\rho c$, гексагональній щільноупакованій структурі мартенситу та високої твердості. Ці ознаки властиві титановим сплавам, спеціальним сплавам на нікелевій основі і загартованим легированим сталям. У деяких матеріалах (таких, наприклад, як леговані сталі та спеціальні сплави на нікелевій основі) перехід від зливної стружки до стружки локалізованого зсуву спостерігається при більш високих швидкостях різання (рис. 3).

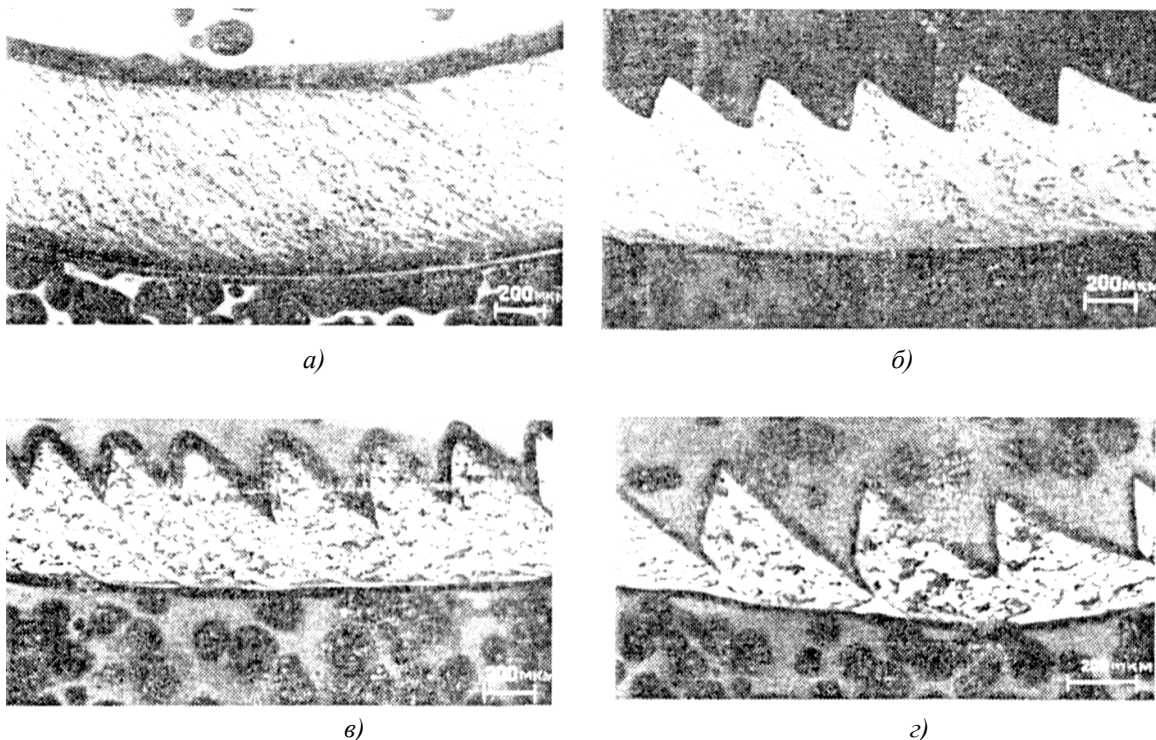


Рис. 3. Характер формоутворення стружки залежно від швидкості різання при обробці сталі марки 40XH2MA (HB 325): а – зливна стружка при швидкості різання 0,67 м/с; б – перехід від зливної стружки до стружки локалізованого зсуву при швидкості різання 2,08 м/с; в – стружка чистого локалізованого зсуву при швидкості різання 4,16 м/с; з – стружка локалізованого зсуву з практично розділеними сегментами при швидкості різання 43,33 м/с [1]

Точний діапазон швидкості переходу залежить від матеріалу заготовки (його металофізичних властивостей) та умов різання (подачі). Наприклад, при обробці сталі марки 40ХН2МА (НВ 200) такий перехід має місце при швидкості різання $\approx 4,3$ м/с та подачі 0,46 мм/об. При подальшому збільшенні швидкості різання протяжність контактів між сегментами зменшується, що призводить до відділення сегментів за межами визначеної швидкості. Оскільки при обробці титанових сплавів сегментна стружка утворюється на всіх швидкостях різання, титан можна вважати ідеальною моделлю для вивчення ВШО аналогічних матеріалів, так як відповідні експерименти можуть виконуватися на понижених та більш зручних швидкостях різання. За допомогою експериментів [1], проведених при обробці титанового сплаву марки зі швидкостями різання від 0,00007 до 30 м/с, вдалося пояснити деякі особливості механізму стружкоутворення.

На рис. 4 схематично зображено процес утворення стружки при локалізованому зсуві. Даний процес, який характеризується нестійким режимом різання, обумовлений термомеханічною нестабільністю матеріалу заготовки при механічній обробці, включає в себе дві стадії. Перша стадія характеризується пластичною нестабільністю і локалізацією деформації у вузькій смугі головної зони, яка знаходиться перед інструментом під кутом $\sim 45^\circ$ до напрямку різання. Друга стадія супроводжується висадкою нахиленого клину матеріалу заготовки інструментом, що надвисає, та утворенням сегментів стружки з досить малою деформацією.

При висадці сегмента у головній зоні перед інструментом відбувається інтенсивний зсув у площині, яка розташована під кутом $\sim 45^\circ$ до напрямку різання. Це відбувається між останнім сегментом, який зформувався і наступним «народженим» (в зонах 2, 3 і 4 на рис. 4). Смуга найбільшої концентрації зсувів співпадає із зоною висадки.

Таким чином, при ВШО алюмінієвих сплавів та м'яких низьковуглецевих сталей утворюється зливна стружка. У легованих сталях і спеціальних сплавах на нікелевій основі перехід від зливної стружки до стружки локалізованого зсуву спостерігається при більш високих швидкостях різання.

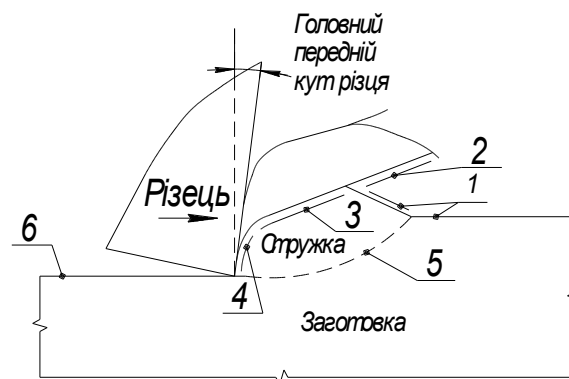


Рис. 4. Схема процесу формоутворення стружки локалізованого зсуву, який реалізується при ВШО деяких матеріалів: 1 – недеформовані поверхні; 2 – частина поверхні катастрофічного зсуву, яка відділяється від наступного сегмента в результаті інтенсивного зсуву; 3 – смуга інтенсивного зсуву, яка обумовлена катастрофічним зсувом на стадії висадки формуючого сегмента; 4 – поверхня інтенсивного зсуву при контакті сегмента з інструментом і наступним ковзанням по передній поверхні інструмента;

5 – інтенсивна місцева деформація в зоні первісного зсуву; 6 – оброблена поверхня [1]

При різанні з надвисокими швидкостями зливна стружка переходить в елементну, а у випадку обробки загартованих сталей – в порошкоподібну [2]. Така зміна виду стружки підтверджує теоретичне положення про збільшення крихкості матеріалу. Стружкоутворення протікає в адіабатичних умовах і на нього впливає не тільки температурно-швидкісний фактор, як при звичайному різанні, але й часовий. Він визначає час дії температури, швидкість нагріву, температурний градієнт та інші показники, які характеризують фізичні особливості надшвидкісного різання. Коефіцієнт укорочення стружки для широкого кола оброблюваних матеріалів значно менший, ніж при звичайному різанні. В ряді випадків він може бути менше одиниці при одночасному зменшенні ширини стружки (рис. 5). Кут зсуву більше звичайного, досягає 60° . Такий характер стружкоутворення зумовлено особливостями умов тертя на передній поверхні, динамічними фізико-механічними властивостями оброблюваного металу та протікання мікродеформацій.

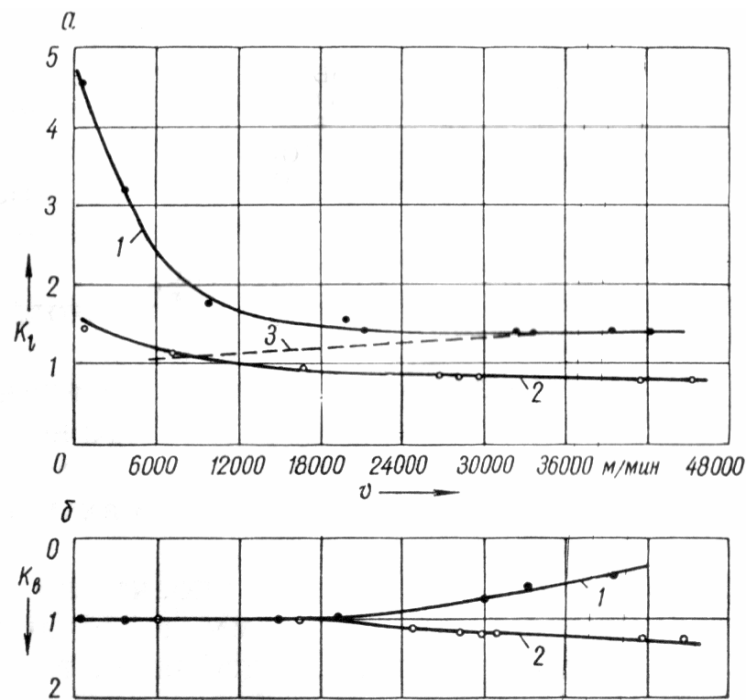


Рис. 5. Залежність коефіцієнтів укорочення K_v (а) та розширення K_b (б) стружки від швидкості різання: 1 – алюміній, $\gamma = -15^\circ$; 2 – алюміній, $\gamma = 45^\circ$; 3 – сталь 50, $\gamma = 0^\circ$ [2]

У праці [3] розглянуто існуючі представлення про механізм стружкоутворення при ВШО. За основу прийнята фізична модель запропонована Р.Командурі (рис. 6).

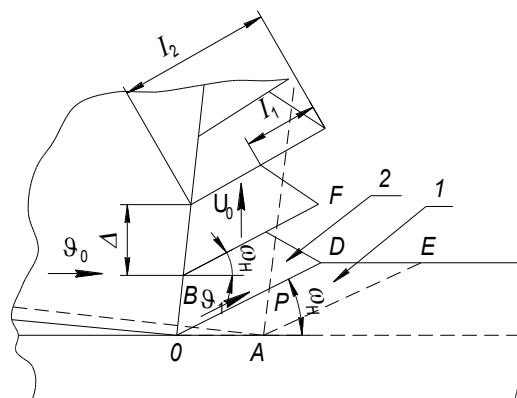


Рис. 6. Механізм стружкоутворення [3]

При формуванні елемента 2 відбувається деформація трикутника OAP. Деформація матеріалу деталі здійснюється поверхнею OB різця. Одночасно з цим відбувається переміщення елемента 2 відносно елемента 1. Напрямок ковзання визначається напрямком OD. В кінці висадки елемента 2 починається висадка елемента 1 вздовж поверхні AE. Процес повторюється з періодом, що визначається швидкістю ковзання стружки вздовж передньої поверхні різця і товщиною елементів. В результаті двостадійності процесу деформації з'являється циклічна складова сили різання. Якщо умови різання не призводить до переваги процесів розміцнення, то утворюється зливна стружка.

Для визначення впливу переходу від зливної до стружки локалізованого зсуву на знос були проведені експерименти [3] при обробці сплавів ХН60ВТ, ВТ5 і на сталях Ст45, Ст60Г і загартованої сталі ХВГ. В якості різального інструмента використовували п'яти- і чотирихгранні пластинки із Т15К6, Т5К10, ВК8, К10 і Р25. Глибина різання складала 0,5 і 1 мм. Типова крива зносу h_s , як функції швидкості різання для ХН60ВТ показана на рис. 7.

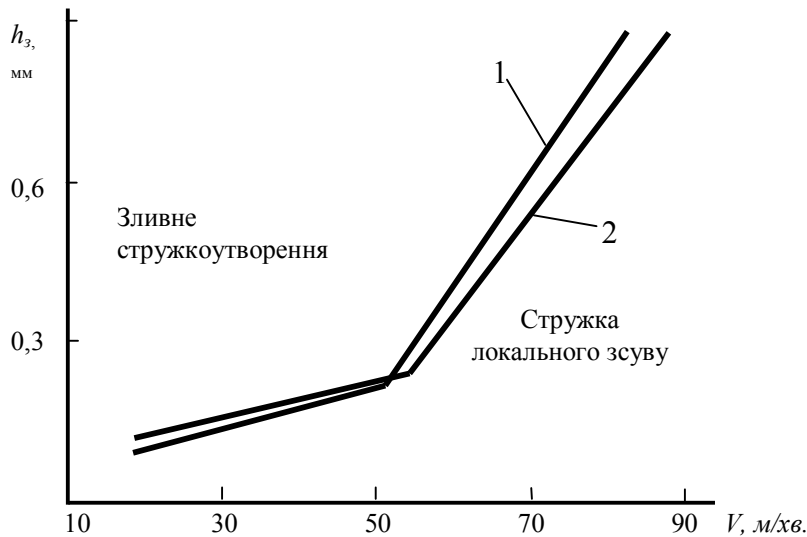


Рис. 7. Характер зношування від швидкості різання:
1) $S = 0,35$ мм/об., 2) $S = 0,20$ мм/об. [3]

Аналогічний характер мали криві зносу і при обробці інших матеріалів (виключення складав сплав ВТ5). При обробці сплаву ВТ5 перегин на кривій зносу не спостерігався та інтенсивність зносу лінійно зростала зі збільшенням швидкості різання. Для всіх останніх випадків точка перегину відповідала швидкості переходу від зливної стружки до стружки локалізованого зсуву.

Для визначення впливу зміни характеру стружкоутворення на шорсткість поверхні проводилася обробка при швидкостях менших і більших, ніж швидкість при якій спостерігається зміна характеру стружкоутворення при різноманітних умовах різання і матеріалах. Кількісний і якісний вплив переходу від зливної до стружки локального зсуву на параметр шорсткості H_a , H_z і форму гребінців при точінні не спостерігався. Але при швидкостях різання вище критичних, виявлені окремі налипання металу на обробленій поверхні, які викликані процесом наростоутворення.

Дослідження [4] виконані при неперервному точінні сталі 40Х ($220 \div 240$ НВ) і нікелевого сплаву ХН77ТЮР на верстаті мод. 16К20 з використанням різальних пластин форми SNGN 120408 із оксидно-карбідної ВОК 71 і нітридно-карбідної РКС 22 кераміки (твердий сплав ВК6 використовували для порівняння) на режимах різання: $v = 50 \div 1000$ м/хв., $S = 0,075 \div 0,7$ мм/об., $t = 1 \div 2$ мм. Різальні пластини в державці мали наступну геометрію: $\gamma = -7^\circ$, $\alpha = 7^\circ$, $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ($\varphi = 40^\circ$ і $\varphi_1 = 5^\circ$ при теплових дослідженнях).

Характер процесів деформації в зоні стружкоутворення вивчали на шліфах стружки і поверхневого шару оброблених деталей. В результаті досліджень встановлено суттєвий вплив швидкості різання на контактні процеси і характер затуплення керамічних різальних інструментів. Прикладом зміни характеру стружкоутворення від швидкості v різання є форма стружки, яка утворюється при точінні сплаву ХН77ТЮР з $v = 50 \div 250$ м/хв. ($S = 0,15$ мм/об., $t = 1$ мм). При обробці сплаву ХН77ТЮР з $v = 50$ м/хв. (рис. 2.9, а) утворюється зливна стружка з радіусом закручування 50...100 мм в площині, нормальній до передньої поверхні інструмента. При $v = 100$ м/хв. утворюється стружка у вигляді плоскої гвинтової спіралі, яка складається з кільцеподібних сегментів діаметром не більше 20 мм, на яких чітко продивляється зовнішній пилоподібний рельєф і окремі розриви сильно деформованого металу. Зміна форми і напрямку закручування стружки можна пояснити першоступеневим впливом швидкості різання на характер деформації оброблюваного матеріалу на радіусній ділянці між головною і допоміжною різальними кромками.

При точінні з $v = 150$ м/хв. стружка має вигляд плоских сегментів довжиною 2...8 мм, які зберігають кільцеподібну форму, з чітко вираженими пилоподібними виступами на зовнішній поверхні і більшим числом розривів сильно деформованого металу. З підвищенням швидкості різання до $v = 250$ м/хв. стружка складається з окремих елементів і подальше збільшення швидкості різання до 350 м/хв. не змінює її форму при деякій тенденції до зменшення розмірів елементів, що дозволяє

стверджувати про завершення при $v = 250$ м/хв. перебудови деформаційних процесів в зоні стружкоутворення. Аналіз геометричних параметрів елементів стружки показав, що розширення стружки незначне і складає від 5 до 10 %. Зі збільшенням товщини шару. Що зрізається формування елементної стружки відбувається при меншій швидкості різання.

Детальне вивчення причин і умов перебудови деформаційних процесів в зоні різання представляє практичний інтерес, так як при цьому змінюється характер та інтенсивність зношення різального інструмента, а також стан обробленого поверхневого шару. Такі дослідження виконували при точінні сталі 40X ($S = 0,3$ мм/об.), вплив швидкості різання на характер стружкоутворення вивчали на шліфах стружки в поперечному перерізі та шліфах поверхневого шару оброблених деталей. Помітна трансформація текстури стружки починається при $v = 350 \div 450$ м/хв. залежно від теплофізичних властивостей інструментального матеріалу. Це виражається в зменшенні ширини L_o зони основних і висоти h_d зони додаткових деформацій і глибини h_{dc} деформованого шару деталі з одночасним зниженням ступеня спотворювання структури оброблюваного матеріалу за об'ємом стружки.

Для різальних інструментів (PI) з ВОК 71 з низьким коефіцієнтом теплопровідності межа початку трансформації зафіксована при менших значеннях v , а для РКС 22 ця межа зміщується в сторону більших швидкостей. При $v = 350 \div 450$ м/хв. починається локалізація зсуву в зоні основних пластичних деформацій, а на шліфах добре продиляються елементи стружки, міцно зв'язані один з одним. З підвищенням швидкості різання зростає пилоподібний рельєф на зовнішній поверхні стружки, який свідчить про підвищення ступеню локалізації зони основних пластичних деформацій. Подальше підвищення швидкості різання до 750 м/хв. призводить до формування добре вираженої елементної стружки, в якій основний об'єм елемента стружки практично не деформований і його мікроструктура не відрізняється від вихідного матеріалу. Сусідні елементи стружки зв'язані між собою досить тонкою та сильно деформованою смугою зсуву шириною 10...18 мкм, в якій реалізуються фізичні процеси, що відрізняються від явищ в зоні основних пластичних деформацій [5]. Встановлено, що значення мікротвердості оброблюваного матеріалу всередині елемента стружки ідентичні і в 1,5 ÷ 2 рази нижчі мікротвердості матеріалу в смузі зсуву.

Ступінь зносу PI практично не впливає на розміри зони основних пластичних деформацій і ширину смуги зсуву, але дещо збільшує висоту зони додаткових пластичних деформацій та значно впливає на глибину деформованого шару деталі. Наприклад, при різанні ВОК 71 з фаскою зносу задньої поверхні $h_3 = 0,4$ мм ($v = 750$ м/хв., $S = 0,3$ мм/об.) глибина деформованого шару деталі збільшується в 2 рази та досягає значень $h_{dc} = 0,008...0,01$ мм.

В умовах високошвидкісного різання теплота в зонах основних та додаткових пластичних деформацій виділяється швидше, ніж відводиться з цих зон за рахунок теплопровідності матеріалу, що призводить до зародження смуги адіабатичного зсуву і концентрації теплоти в її внутрішньому об'ємі. Подальші деформації відбуваються тільки в смузі адіабатичного зсуву через термічне розміцнення матеріалу до тих пір, доки не почнеться руйнування матеріалу в смузі зсуву зі швидкістю деформації до 10^6 с⁻¹. Смуга зсуву розповсюджується від вершини PI до зовнішньої поверхні заготовки практично через весь недеформований матеріал. Це призводить до миттєвого зміщення сформованого елемента стружки в напрямку від передньої поверхні інструмента та виникнення високочастотних ударних навантажень на контактні площадки PI. При цьому рівень динамічних навантажень на інструмент визначається швидкістю різання, подачею та теплофізичними властивостями оброблюваного та інструментального матеріалів. На основі аналізу деформаційної структури поперечного перерізу стружки встановлено, що зі збільшенням швидкості різання ширина адіабатичної смуги зсуву зменшується і при $v = 1000$ м/хв. порушується зв'язок між сусідніми елементами стружки по смузі зсуву.

Вплив швидкості v різання на довжини повного C і пластичного C_1 контактів стружки з передньою поверхнею інструментів з різноманітних матеріалів досліджували при точінні сталі 40X (рис. 8). Встановлено, що зі збільшенням v від 150 до 750 м/хв. довжини C і C_1 контактів зменшуються у керамічних інструментів в середньому на 10 %. Максимальні довжини C і C_1 контактів по всьому діапазоні швидкостей різання мають пластини ВК6, найменші – пластини ВОК 71 і середні значення – пластини РКС 22. Виявлена залежність знаходиться в добрій кореляції з коефіцієнтом теплопровідності інструментального матеріалу. Необхідно відмітити, що на ділянці пластичного C_1 контакту по всьому діапазону швидкостей різання відсутні сліди зовнішнього тертя зі стружкою. Однак саме на цій ділянці зафіксоване першопочаткове руйнування і зони повзучості керамічних інструментальних матеріалів.

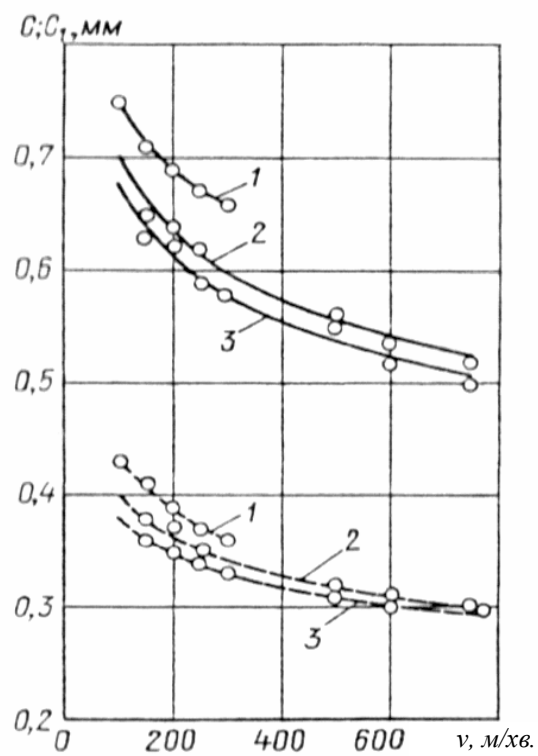


Рис. 8. Вплив швидкості v різання на довжини повного C (суцільні лінії) і пластичного C_1 (штрихові лінії) контактів стружки з передньою поверхнею інструмента при точінні сталі 40X ($S = 0,3$ мм/об., $t = 1$ мм) інструментами з ВК6 (1), РКС 22 (2) і ВОК 71 (3) [5]

Як встановлено [6], основним фактором, який впливає на мікроструктуру при швидкісному фрезеруванні дисковими фрезами, є швидкість різання.

На рис. 9 представлено мікрознімок стружки, отриманої при фрезеруванні сталі 30ХГСА з $\sigma_b = 70 \text{ кг/мм}^2$ дисковою фрезою, яка оснащена твердим сплавом Т15К6. На знімку різко позначені напрями зсувів металу. На прирізцевій стороні стружки зерна витягнуті вздовж напрямку руху і утворюють прирізцевий шар, що відрізняється від структури стружки. Товщина цього шару, ступінь деформації зерен і кут нахилу їх до напрямку руху змінюється залежно від швидкості різання.

Мікроструктура матеріалу, що оброблюється, в нормалізованому стані представляє собою пластинчастий перліт з сіткою фериту.

Утворення тонкого прирізцевого шару пов'язано із взаємодією поверхонь контакту опорної сторони стружки з передньою поверхнею інструмента, що і є результатом дії сили тертя.



Рис. 9. Мікроструктура стружки при фрезеруванні пазів
($v = 307 \text{ м/хв.}$, $s_z = 0,08 \text{ мм/зуб}$, $t = 8 \text{ мм}$)[6]

За даними дослідів А.І. Ісаєва встановлено, що деформуючий метал, приведений в стан пластичності, вдавлюється на поверхні контакту в мікровпадини на передній поверхні інструмента, дякуючи такому зачепленню поверхневий шар зони деформації загальмовується.

На передній поверхні інструмента в місці контакту з деформуючим металом виникають два види тертя.

В зоні деформуючого металу, який розташований ближче до різальної кромки інструмента, внаслідок наявності загальмованого прирізцевого шару виникає процес внутрішнього тертя. Сам прирізцевий шар переміщується з малою швидкістю під дією сил внутрішнього тертя основних частинок деформуючого металу, що розташований над прирізцевим шаром.

На межі прирізцевого шару відбувається зовнішнє тертя між опорною поверхнею стружки та передньою поверхнею інструмента. Фізичну сутність цього явища пояснено: "В початковий момент контакту металу, що деформується, з поверхнею передньої грані має місце механічне зачеплення поверхонь контакту внаслідок наявності мікронерівностей на поверхні передньої грані та виникнення сили тертя спокою. По мірі подальшого розвитку процесу деформації деформуючий метал переходить в пластичний стан і починає текти відносно загальмованих шарів на поверхні контакту".

Відомо, що в результаті пластичного деформування металу виникає температура в зоні деформації, величина якої змінюється залежно від зміни режимів різання. Дослідниками встановлено, що ця температура впливає на коефіцієнт зовнішнього тертя, тому можна вважати, що розміри прирізцевого граничного шару зони деформації відповідно до цього будуть змінюватись.

Граничний шар металу, який прилягає до прирізцевої сторони стружки, сильно деформований і проявляється дуже слабо. По мірі збільшення швидкості різання товщина граничного шару зі сторони передньої поверхні інструмента зменшується, відповідно збільшується температура і зменшується сила тертя між стружкою, що зрізається і передньою поверхнею інструмента.

Наближені виміри товщини прирізцевого шару показують, що:

а) збільшення швидкості різання в два рази в порівнянні з початковою швидкістю ($v = 166$ м/хв.) товщина шару зменшується в 4 рази;

б) при відносно малій швидкості різання ($v = 166$ м/хв.) при наявності негативного переднього кута $\gamma = -10^\circ$ виникають більші деформації шару металу, що зрізується.

З аналізу структури стружок встановлюємо, що кут зсуву зерен зі збільшенням швидкості різання збільшується і процес стружкоутворення покращується, так як зменшується об'єм і ступінь деформації металу, який перетворюється в стружку.

Утворення прошарку фериту в стружках вказує на те, що пластична деформація в основному відбувається по найбільш м'яким пластичним зернам, тобто по фериту.

На рис. 10 представлено структуру стружки, яка отримана при швидкості різання $v = 307$ м/хв. та глибині різання $t = 8$ мм (оброблювана сталь 30ХГСА з $\sigma_b = 70 \div 80$ кг/мм²).

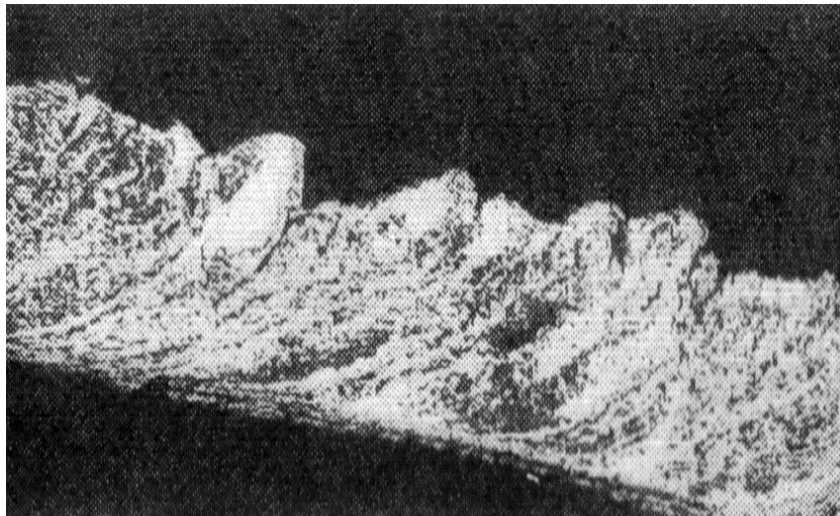


Рис. 10. Мікроструктура стружки при фрезеруванні зі швидкістю $v = 307$ м/хв., $s_z = 0,04$ мм і $t = 8$ мм [6]

В даному випадку подача на зуб фрези була мінімальною і складала $s_z = 0,04$ мм. Структура цієї стружки різко відрізняється від структур, отриманих при тих самих умовах різання, але з більшими подачами (рис. 11).

За всією товщиною стружки її структура однакова, з сильно подрібненими зернами фериту і перліту, з більшими викривленнями кристалічної ґратки. Ступінь деформації зерен дуже велика і, судячи по структурі, дорівнює ступеню деформації прирізцевого шару. Підтвердженням цього є також відносно висока температура стружки (650°) при мінімальній подачі.

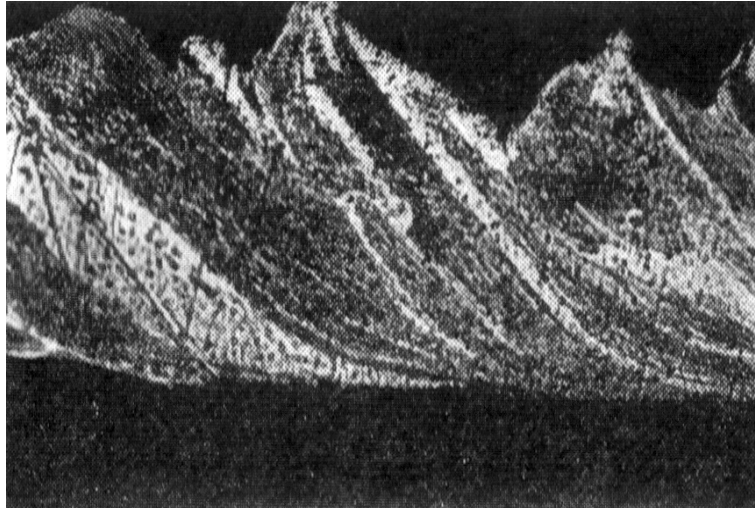


Рис. 11. Мікроструктура стружки при фрезеруванні паза зі швидкістю $v = 307 \text{ м/хв.}$, $s_z = 0,23 \text{ мм}$, $t = 8 \text{ мм}$ [6]

Зі збільшенням подачі структура стружки різко змінюється: ясно видно зерна фериту, які мали розтягнуту форму, і при подачі $s_z = 0,23 \text{ мм}$ відсутній прирізцевий граничний шар. Деформації металу, що зрізується, дещо зменшилися.

На основі проведених досліджень за мікроструктурою стружок при швидкісному фрезеруванні дисковими фрезами можна сказати, що зі збільшенням швидкості різання зменшується пластична деформація металу і відповідно повинні зменшуватися й сили різання.

За зовнішнім виглядом стружка при фрезеруванні пазів має форму коми, щільно скрученої в спіраль. Опорна або підрізцева сторона стружки має достатньо гладку блискучу поверхню.

Швидкість різання впливає на форму стружки. Значно впливають на форму стружки геометричні параметри різальної частини інструмента, зокрема, кут нахилу різальної кромки.

Впливає на форму стружки величина подачі на зуб при фрезеруванні дисковими фрезами. Зі збільшенням подачі на зуб ($s_z = 0,3 \text{ мм}$) кривизна стружки у виходу фрези з металу зменшується, тоді як при малих подачах ($s_z = 0,08 \text{ мм}$) форма стружки характеризується меншою кривизною у виходу фрези в метал і більшою у виходу.

Питання про форму стружки при швидкісному фрезеруванні має актуальне значення для практичних цілей. За формою стружки визначається об'єм стружкової канавки і, відповідно, число зубців фрези, а число зубців, в свою чергу, визначає продуктивність при фрезеруванні. За формою стружки можна судити про правильність геометричної форми різальної частини інструмента.

Деякі явища в процесі стружкоутворення, які виникають в умовах високошвидкісного різання, призводять до підвищення інтенсивності зносу інструмента [7]. Насамперед йде мова про підвищення контактної температури, яка стимулює посилення фізико-хімічних процесів. У свою чергу, зростання контактної температури пов'язано з підвищенням швидкості відносного переміщення стружки й інструмента, скороченням поверхні їхнього контакту, високою швидкістю деформації.

Широкі можливості високошвидкісного шліфування підтверджуються рядом прикладів збільшення швидкості знімання металу в п'ять-десять разів при зберіганні необхідних параметрів точності і якості обробки. Такі результати пояснюються збільшенням в одиницю часу кількості абразивних зерен, що беруть участь в роботі шліфування, а також більш сприятливими умовами процесу утворення стружки.

Збільшення швидкості різання може істотно вплинути на процес шліфування, тому що, з одного боку, інтенсифікується процес зняття стружок, а з іншого, – можливі зміни умов роботи кожної різальної кромки, викликані збільшенням швидкості ковзання і деформування металу та зменшенням тривалості контакту різальної кромки з оброблюваною поверхнею.

Робота кожного абразивного зерна (різальної кромки), що бере участь в процесі шліфування, витрачається на пружно-пластичне деформування і диспергування металу, на тертя між зерном та металом і на подолання сил інерції при утворенні стружки. Відповідно до сучасних уявлень механізм утворення стружки при шліфуванні принципово не відрізняється від стружкоутворення при різанні лезовим інструментом, але має свої особливості, зумовлені великими швидкостями деформування,

негативними передніми кутами різальних кромок, малими товщинами зрізів та малою тривалістю контакту вершини різальної кромки з оброблюваною поверхнею.

Швидкість різання, як відомо, найбільше впливає на процес різання. Без перебільшення можна сказати, що вона визначає сам процес різання.

Досить наглядне представлення про вплив швидкості різання на процес стружкоутворення дає розгляд мікрошліфів коренів стружок, отриманих при різноманітних швидкостях різання при умові, якщо процес різання припиняється практично миттєво [8].

Дослідження впливу швидкості різання на процес стружкоутворення проводилися при вільному різанні відпаленої сталі 45. Зразки застосовувалися у вигляді кілець. Поперечна подача $s = 0,33$ мм/об. Ширина точіння дорівнювала 3–4 мм. При швидкостях різання до $v = 70$ м/хв. застосовувався швидкорізальний різець марки Р9. При більш високих швидкостях різання досліди проводилися вже твердосплавним різцем Т15К6. Різці застосовувалися з наступною геометрією: $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$. При проведенні основної частини дослідів по впливу швидкості різання на процес стружкоутворення застосовувались наступні швидкості різання: 3,6, 9,3, 17,5, 29, 45,3, 70, 114, 182 і 300 м/хв., тобто швидкості різання змінювалися в 85 раз.

Швидкості різання більш високі, ніж $v = 300$ м/хв., не застосовували, так як всі особливості процесу швидкісного різання, з точки зору зовнішнього вигляду процесу стружкоутворення, цілком чітко виявляються при швидкостях різання до 300 м/хв.

Всі досліди, як правило, повторювалися по декілька разів. Звичайно більшою і менш помітною різницею в процесі стружкоутворення при одній і тій самій швидкості різання, за винятком розмірів наростів, не спостерігалось. Всі досліди проводилися при точінні на повітрі без застосування охолодження.

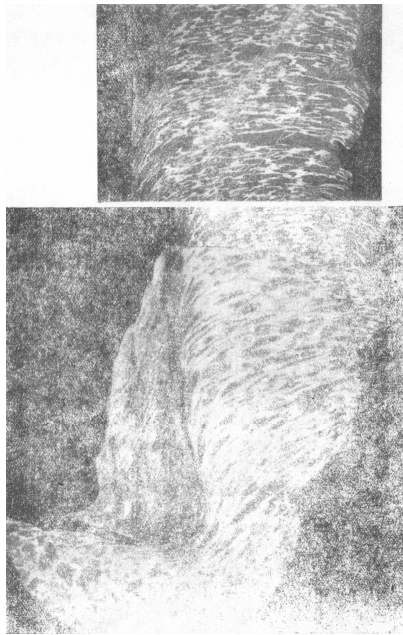
За мікрошліфом корня стружки при швидкості різання $v = 3,6$ м/хв. вже відбувається утворення наросту довільних розмірів. Збільшенню розмірів наросту сприяв також і відпуск сталі 45, у результаті якого в'язкість сталі збільшилася. При різанні сталі 45, що має більш високу твердість в зоні швидкостей різання 3–4 м/хв., звичайно нарост не спостерігався.

На рис. 12 наведено мікрошліф корня стружки при швидкості різання $v = 9,3$ м/хв.. На цьому мікрошліфі ще більш помітно, що нарост складається з окремих прошарків. При цьому тут спостерігається і процес його часткового руйнування. Так, на стружці видно невеликі за розмірами частинки наросту на ділянці, де проходить утворення обробленої поверхні. При подальшому збільшенні різання спостерігається поступове зменшення наросту. При швидкості різання $v = 45,3$ м/хв. наросту на передній грані різця у вигляді клиноутворюючого підвищення металу, який має порівняно більші розміри, не спостерігається. На підрізцевій стороні стружки чітко видно порівняно більшої товщини текстурований шар стружки. Товщини текстурованого шару стружки збільшуються в напрямку від вершини різця. Добре видно рівномірну пластичну деформацію по всьому перерізу корня стружки.

При швидкості різання $v = 70$ м/хв. товщина текстурованого шару стружки різко зменшується. При цьому спостерігається надто різке коливання самої товщини текстурного шару. На багатьох ділянках по довжині стружки видно, що товщина текстурного шару незначна.

Подібний стан прирізцевого шару стружки показує, що сила тертя, яка обумовлює утворення текстурного шару на передній грані, значно змінюється, тобто відбувається коливання цієї сили, що проявляється у вигляді різкої зміни товщини текстурного шару стружки.

Колівання сили тертя обумовлюється зміною стану граничного шару.



*Рис. 12. Мікрошліф кореня стружки ($\times 100$).
Сталь 45; $V = 9,3$ м/хв.; $S = 0,33$ мм/об.; різець P9.
Вільне різання [8]*

При швидкостях різання $v = 182$ м/хв. видно, що товщина шару текстури металу на прирізцевій поверхні стружки значно зменшена в порівнянні з товщиною цього шару при менших швидкостях різання. Це показує, що збільшення швидкості різання до 182 м/хв. супроводжується подальшим зменшенням сили тертя на передній грані різця. При швидкості різання $v = 300$ м/хв. чітко спостерігається локалізація пластичної деформації.

При проведенні дослідів по визначенню впливу швидкості на характер процесу різання виходили з припущення про те, що настільки різка зміна характеру процесу стружкоутворення, яка спостерігалася в зонах середніх і високих швидкостей різання та обумовлена змінами металу в зонах передруйнування та руйнування повинно в тій чи іншій мірі виявлятися за допомогою дослідження структури металу в зоні зсуву стружки під електронним мікроскопом.

Суттєва зміна в характері пластичних деформацій в зоні лінії зсуву стружки спостерігається при швидкості різання $v = 182$ м/хв. Тут спостерігаються ділянки з великою кількістю різноманітних мікротріщин. Розміри цих мікротріщин у більшості випадків рівні 1000-3000 Å. Утворення такого роду тріщин в умовах швидкісного різання свідчить про збільшення крихкості шару, що зрізується, у зоні утворення стружки.

Процес збільшення крихкості металу в зонах передруйнування і руйнування та появу в результаті значної кількості мікротріщин є характерним для швидкісного різання пластичних матеріалів. До числа основних факторів, що обумовлюють суттєве полегшення процесу різання в умовах швидкісного різання, відноситься збільшення крихкості металу в зоні стружкоутворення.

Збільшення крихкості шару, що зрізується, металу в зоні стружкоутворення досягається доведенням температури шару, що зрізується, в зонах передруйнування та руйнування до значень, що обумовлюють мінімальний об'єм пластичних деформацій при руйнуванні. Величина цієї температури залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Для багатьох марок сталей ця температура близька до кімнатної. Однак обробка різанням при кімнатній температурі, навіть при інтенсивному охолодженні за допомогою CO_2 , можлива через високе значення теплового ефекту в зоні стружкоутворення лише при невисоких швидкостях різання.

Для надзвичайно великої кількості марок сталей значне зниження об'єму пластичних деформацій досягається при доведенні температури шару, що зрізується, в зоні стружкоутворення до температур синьоломкості. Різання при цій температурі в результаті збільшення крихкості шару, що зрізується, є однією з фізичних передумов механізму раціонального використання твердосплавних інструментів.

Ефективним засобом, що обумовлює збільшення крихкості шару, що зрізується, в зоні невеликих швидкостей різання, є введення в зону стружкоутворення відповідного зовнішнього середовища, кінетичні частинки яких, проникаючи в зони передруйнування та руйнування шляхом впровадження в кристалічну ґратку металу, викликають збільшення крихкості шару, що зрізується.

Зменшення об'єму пластичних деформацій шару, що зрізується, досягається також в результаті застосування високих швидкостей різання. При цьому відбувається значна локалізація пластичних деформацій, в результаті якої пластична деформація зосереджується в порівняно невеликих ділянках деформуємого об'єму. Локалізація пластичної деформації обумовлює доведення шару, що зрізується, до граничного стану при меншій затраті енергії, що витрачається на процес різання. Таким чином, полегшення процесу різання досягається збільшенням крихкості шару, що зрізується, в зоні стружкоутворення. Збільшення крихкості шару, що зрізується, та взагалі зменшення об'єму пластичних деформацій при доведенні шару, що зрізується, до граничного стану досягається:

1) шляхом локалізації пластичних деформацій в результаті застосування високих швидкостей різання;

2) підвищенням температури за рахунок теплового ефекту деформації в зонах передруйнування та руйнування до значень, при яких руйнування суттєво полегшується в результаті збільшення крихкості шару, що зрізується, в зоні стружкоутворення;

3) при невисоких швидкостях різання збільшення крихкості шару, що зрізується, досягається за рахунок введення в зону різання зовнішнього середовища, кінетичні частинки якого, впроваджуючись в процесі деформації в кристалічну ґратку металу, викликають значне пониження пластичності. До такого роду зовнішнього середовища відносяться в першу чергу водень та кисень.

Зона передруйнування в багато чому визначає сам процес руйнування, тобто процес утворення стружки. Однак вплив зони передруйнування на процес різання, а також і сам механізм утворення та розвитку зони передруйнування обумовлюються багатьма факторами, серед яких на першому місці стоїть швидкість різання. Так, при дуже низьких швидкостях різання зона передруйнування досягає великих розмірів. В результаті пружної і пластичної деформації в цій зоні відбувається утворення та розвиток ультрамікроскопічних і мікроскопічних тріщин. Зовнішнє середовище при цьому активно впливає на розвиток цих тріщин. Це в свою чергу, поряд з пластичною деформацією викликає передруйнування металу в зоні передруйнування. В результаті граничний стан шару, що зрізується, досягається при суттєво меншому об'ємі пластичних деформацій та різання при цьому здійснюється вже значно збільшеною крихкістю металу. Температурний фактор при низьких швидкостях різання не суттєво впливає через низькі значення температур.

В зоні високих швидкостей різання найбільше впливає на процес стружкоутворення температура, величина якої досягає великих значень. При цьому величина зони передруйнування хоча і зменшується в розмірах, однак пружні і пластичні деформації, що протікають в цій зоні, і величина теплового ефекту, обумовлена цими деформаціями, а також величина теплового ефекту в самій зоні руйнування впливає шляхом збільшення крихкості шару, що зрізується, на процес різання. Суттєвий вплив має при цьому і спостерігається в цих умовах локалізація пластичних деформацій шару, що зрізується, значно зменшуючи загальний об'єм пластичних деформацій в зоні стружкоутворення.

В результаті корінної зміни стану граничного шару в зоні контакту інструмента з оброблюваним металом та різким зменшенням явищ молекулярного схоплювання, що обумовлені зміною стану граничного шару і зменшенням об'єму пластичних деформацій, під впливом збільшення крихкості шару, що зрізується, в зоні контакту інструмента з оброблюваним металом різко змінюється характер сил тертя та величини зносу.

Аналіз існуючих досліджень [9] дозволяє прийти до висновку, що в процесі різання приходиться мати справу в основному з двома видами стружок – елементними і неперервними. Однак більш близьке вивчення показує, що між цими двома видами стружок має місце скоріше кількісна відмінність, ніж якісна. В обох випадках при обробці пластичних матеріалів основним фактором, що визначає структуру стружки, є пластичний стиск, який призводить до ковзання і зсувних процесів.

Послідовність утворення елементної стружки представлена на рис. 13. Для спрощення на рисунку взятий випадок, коли $\gamma = 0^\circ$.

В положенні *a*) різець дотикається виробу та впливає на нього деякою силою P , яка викликає пружно напружений стан, що розповсюджується на ділянці l_0 . Дослідження на поляризаційній установці показали, що величина l_0 залежить від товщини зрізу a та переднього кута різця γ . При зміні переднього кута в межах $20 \dots (-15^\circ)$ відношення $\frac{l_0}{a}$ змінюється в межах $5 \dots 15$. На рис. 13, а нанесені ізохромати – лінії однакових дотичних напруг, що визначають область розповсюдження деформацій попереду різця і під ним.

В положенні *б*) різець здійснив пластичний стиск частини захопленого матеріалу, причому контакт виробу з різцем збільшився, внаслідок чого сила, що діє на виріб, також збільшується, що призводить до подальшого пластичного стиску. В деякому положенні, що визначається величиною l (рис. 13, в) матеріал, що заключений в елементі, отримує таке зміцнення, що подальший його стиск стає неможливим, відбувається

зсув по деякій поверхні, яку в першому наближенні можна прийняти за площину, нахилену до напрямку руху різця під кутом β_1 (кут зсуву).

До цього моменту зусилля для пластичного стиску повинне мати величину, що визначається на основі закону політропи стиску наступним виразом:

$$P_{деф} = \sigma_o b a \left(\frac{l_o}{l} \right)^m,$$

де σ_o – умовна границя текучості при стиску; b – ширина зрізу (при вільному різанні); m – показник політропи стиску, який може бути прийнятий рівним 1,25.

Замінюючи величину $\frac{l_o}{l}$ коефіцієнтом поздовжньої усадки k_l , отримаємо:

$$P_{деф} = \sigma_o b a k_l^m.$$

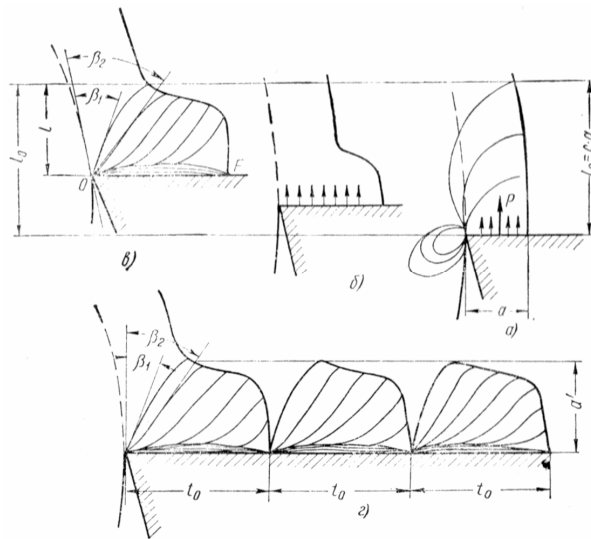


Рис. 13. Послідовність утворення елементної стружки

Із розглянутої рівноваги сил за рис. 14 слідує, що сила $P_{деф}$ в момент зсуву долає опір T , що визначається формулою:

$$T = \frac{P_{деф}}{\cos \beta_1} [1 - (\sin \beta_1 + \mu_1 \cdot \cos \beta_1) \cdot (\sin \beta_1 + \mu_2 \cdot \cos \beta_1)],$$

де μ_1 і μ_2 – коефіцієнти зовнішнього та внутрішнього тертя.

Ця сила викликає середні дотичні напруження в площині зсуву

$$\tau_{cp} = \frac{T \cdot \cos \beta_1}{b a'} = \frac{T \cdot \cos \beta_1}{b a k_l}$$

або $\tau_{cp} = \sigma_o k_l^{m-1} [1 - (\sin \beta_1 + \mu_1 \cdot \cos \beta_1) \cdot (\sin \beta_1 + \mu_2 \cdot \cos \beta_1)]$.

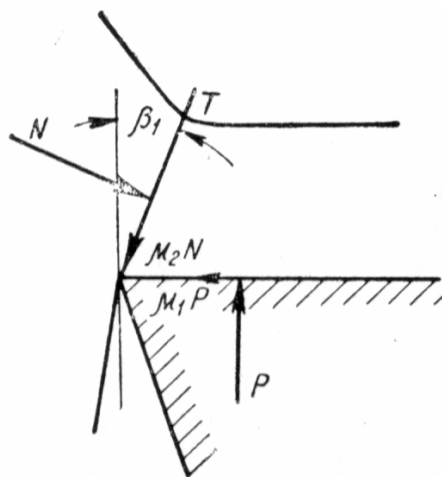


Рис. 14. Схема сил в зоні стружкоутворення

Утворення елемента стружки супроводжується появою всередині його текстури, що орієнтована в основному під деяким кутом β_2 до напрямку вектора швидкості різання (рис. 15), так званий “структурний кут”, $\eta = \beta_2 - \beta_1$ звичайно коливається в межах 10–25°.

Однак структурні лінії всередині елемента стружки не зберігають постійного напрямку, що пов’язано з гальмуючою дією сил тертя, діючих між стружкою і передньою поверхнею різця. В результаті структурні лінії по мірі наближення до цієї поверхні загинаються і прагнуть прийняти напрямок, паралельний її елементам. У самої передньої поверхні знаходиться найбільш деформований шар, всередині якого немає або слабо представлена орієнтація структури. Цей шар знаходиться в загальмованому стані, що визначається, очевидно, тим, що початок йому дає вдавлювання деякого шару метала стружки в мікронерівності передньої поверхні різця. За наявними даними ступінь деформації стружки в загальмованій зоні приблизно в 10 раз більший середньої деформації стружки, і температура в цьому шарі значно вища, ніж в поверхневих шарах стружки.

Таким чином, в кожному елементі стружка складається з трьох шарів:

- 1) шару з лініями текстури під кутом β_2 ;
- 2) шару з завихреною текстурою, лінії якої прагнуть до паралельності з елементами передньої поверхні різця;
- 3) шару зі слабо орієнтованою структурою – граничний, загальмований шар.

Матеріал стружки, розташований в двох останніх шарах, дає початок наросту, який представляє собою відшарований матеріал стружки найбільш щільний та твердий. Наріст може існувати лише до визначеної температури. При досягненні високих температур ($\theta > 600^\circ$) наріст на різці більше не утворюється, так як шари стружки, що дають йому початок, пом’якшуються, стають досить пластичними, набувають деяку рухливість. Замість наросту з’являється так званий текучий шар. Текучий шар докладно вивчено Т.Н. Лоладзе і для різноманітних умов знайдена його товщина c_x і довжина, рахуючи від вершини різця. Зі збільшенням швидкості, а також зі зменшенням переднього кута c_x і l_x зменшуються. Зі збільшенням товщини зрізу c_x і l_x збільшуються.

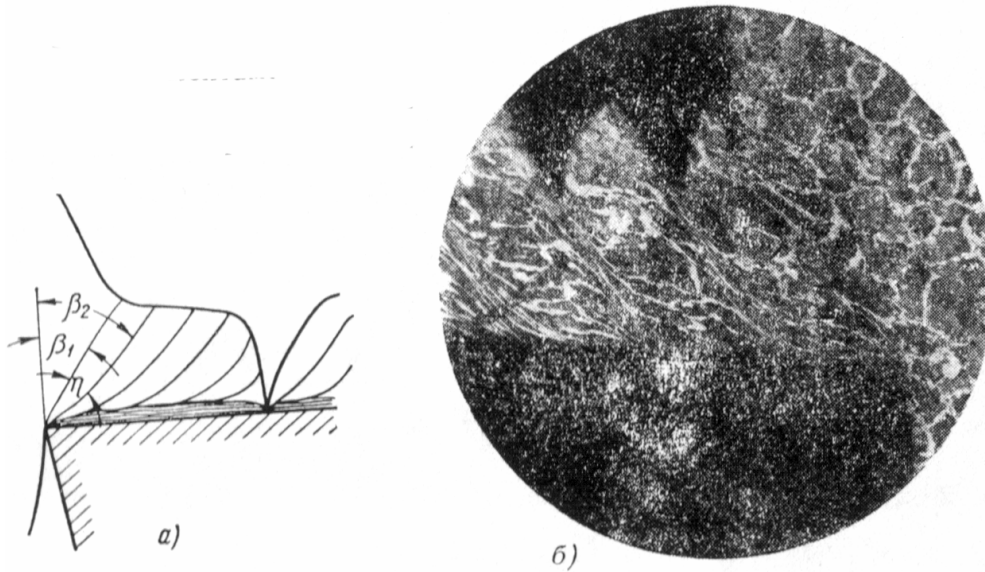


Рис. 15. Елементна стружка: а – структурна схема; б – структура стружки. $\times 53$

Відношення $\frac{c_{x\text{cp}}}{l_x}$ залишається приблизно постійним для різноманітних умов і складає

$$\frac{c_{x\text{cp}}}{l_x} = 0,18 \div 0,2.$$

Величина $c_{x\text{cp}}$ змінюється в межах 0,04–0,18 мм, причому для швидкісного різання $c_{x\text{cp}} = 0,04 \div 0,1$ мм.

Величина l_x коливається в межах 0,2–1,0 мм.

Швидкість руху в текучому шарі по напрямку, зворотному руху основного потоку стружки, складає

$$v_{\text{тек}} = \left(\frac{1}{20} - \frac{1}{30} \right) v_{\text{стр}}.$$

Таким чином, має місце ковзання стружки по відношенню до текучого застійного шару, завдяки чому зовнішнє тертя стружки по передній поверхні різця замінюється повністю або частково внутрішнім тертям стружки по застійному шару, що запобігає зносу передньої поверхні різця.

В теперішній час складається визначена думка на користь того, що текучий шар розташовується не тільки на передній поверхні різця, але також обтікає його вершину і на деякій ділянці розташовується між задньою поверхнею різця і поверхнею виробу (поверхня різання). Ця частина текучого шару створює на задній поверхні інструмента умови, аналогічні передній поверхні, так як тертя поверхні виробу по інструменту замінюється повністю або частково внутрішнім тертям структурно незмінних шарів виробу по застійному шарі.

Основним ефектом швидкісного різання є виникнення при визначених температурних умовах текучого шару, що знаходиться в достатньо пластичному стані, можливо навіть наближеному до стану плавлення. Наявність такого шару призводить до зменшення тертя на передній та задній поверхнях інструмента, а як наслідок, до зменшення зносу та покращення якості обробленої поверхні.

Неперервні стружки відрізняються від елементних відсутністю різко виражених елементів. Мікрошліф такої стружки дає картину якби однорідного тіла, однак, з ясно вираженими трьома зонами. На рис. 16, а дано мікрошліф кореня стружки, отриманий при обробці бурта на сталі марки 45. Режим різання: $b = 4$ мм; $s = 0,27$ мм/об.; $v = 80$ м/хв. – вільне різання. На шліфі чітко видно різницю в структурі вихідного матеріалу (феритна сітка + перліт) і стружки; $\beta_1 = 18^\circ$; $\beta_2 = 34^\circ$. Товщина текучого шару складає $\sim 0,03$ мм, довжина $\sim 0,8$ мм.

На рис. 16, б дано мікрошліф неперервної стружки, отриманої при наступних умовах: сталь марки 45, $H_B = 180$, вільне різання; $b = 4$ мм; $s = 0,25$ мм/об.; $v = 150$ м/хв.; $\gamma = 0^\circ$. В стружці видно текстуру, якій відповідає кут $\beta_2 = 40^\circ$ і лінії зсувів окремих елементів з кутом $\beta_1 = 28^\circ$.

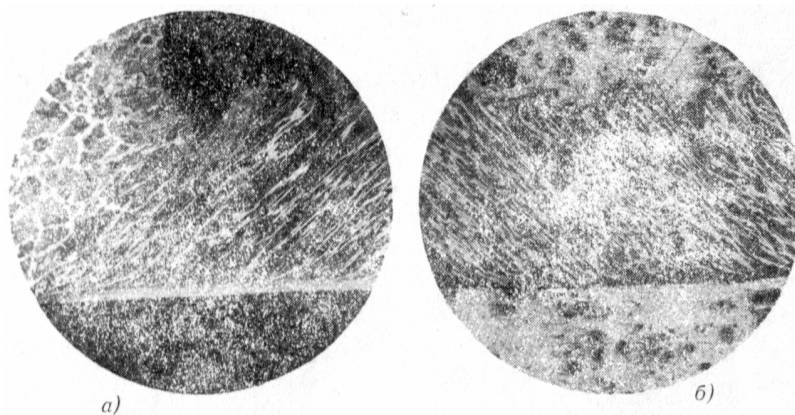


Рис. 16. Структура неперервної стружки ($\times 53$)

Ідентичність елементних і неперервних стружок в структурному відношенні та наявності у тих і інших двох кутів β_1 і β_2 та трьох зон у відношенні характеру текстури заставляють думати, що характер утворення тих та інших стружок однаковий. До такого висновку призводять і думки єдності процесу різання, а також і те, що в ряді випадків одна і та ж стружка включає в себе обидва види: з одної сторони, вона є елементною, з іншої, – неперервною. Такі стружки, наприклад, мають місце при зворотніх перерізах зрізу ($t < s$) при роботі трьохкромочними різцями.

Елементні та неперервні стружки мають місце як при швидкісному, так і нешвидкісному різанні. Їх виникнення і перехід одного виду в інший залежать від багатьох факторів, в тому числі від швидкості різання, товщини зрізу, переднього кута і форми передньої поверхні інструмента, від роду оброблюваного матеріалу, наявності або відсутності вібрацій та ін. Тому неправильним є думка про те, що швидкісному різанню відповідають тільки неперервні стружки.

Більшість авторів виказують свої думки тільки по структурі зливних стружок, вважаючи, що основою їх утворення є переважно простий зсув. Напрямок пластичного зсуву визначається кутом β_1 , а напрямком текстури – деформацією зерен внаслідок відносного зсуву, який перетворює їх з кулеподібних в еліпсоїдні, а в плоскому перерізі – з кругів в еліпси.

М.І. Клушин, спираючись на математичне дослідження процесу пластичного деформування, стверджує, що структурні лінії всередині елементної стружки відповідають напрямкам ліній ковзання, за якими матеріал тече на стадії стиску і яким відповідають максимальні дотичні напруги. Однак, коли матеріал в зоні пластичної деформації отримує велике зміцнення (наклеп), і запас пластичності матеріалу буде вичерпано, наступить відділення елемента по деякій лінії, яка є вже лінією розриву. Вона є огинаючою лінією ковзання, що з'явилася на стадії стиску.

В застосуванні до неперервних (зливних) стружок М.І. Клушин також приходиться до висновку, що в елементах цієї стружки відбувається не тільки зміщення по напрямку, що визначається кутом β_1 , але і додаткові зсуви по різноманітним напрямкам, що обумовлені стиском елемента, який продовжується весь час, на протязі якого він знаходиться в контакті з передньою поверхнею інструмента.

Таким чином, в принципі М.І. Клушин стоїть на точці зору наявності ковзань внаслідок пластичного стиску не тільки в елементній стружці, але й в неперервній. Однак для практичних цілей він вважає можливим аналіз деформованого стану при утворенні зливних стружок проводити на базі простого зсуву.

Вважаємо процес утворення елементних і зливних стружок в якісному відношенні однаковим, що базується на ковзаннях, пов'язаних з течією металу під впливом стиску за межами пружних деформацій. За сучасними поглядами закономірний характер цих ковзань пов'язано між сусідніми атомними ланцюгами. Сама відстань між лініями ковзання ставиться у зв'язок з довжиною хвилі вказаних коливань і швидкістю їх розповсюдження.

Висновки:

1. При високошвидкісній обробці алюмінієвих сплавів та м'яких низько-вуглецевих сталей утворюється зливна стружка.
2. У легованих сталях і спеціальних сплавів на нікелевій основі перехід від зливної стружки до стружки локалізованого зсуву спостерігається при більш високих швидкостях різання.
3. При різанні з надвисокими швидкостями зливна стружка переходить в елементну, а у випадку обробки загартованих сталей – в порошокподібну. Така зміна виду стружки підтверджує теоретичне положення про збільшення крихкості матеріалу при високошвидкісній обробці.

4. Утворення стружки при високошвидкісній обробці протікає в адіабатичних умовах і на нього впливає не тільки температурно-швидкісний фактор, але й часовий. Він визначає час дії температури, швидкість нагріву, температурний градієнт та інші показники, які характеризують фізичні особливості надшвидкісного різання.

5. При високошвидкісній обробці для ряду матеріалів існує граничне значення швидкості різання при якій завершується перебудова деформаційних процесів в зоні стружкоутворення, що в подальшому не змінює форму зрізуваної стружки.

6. Кут зсуву зерен зі зростанням швидкості різання збільшується і процес стружкоутворення покращується, так як зменшується об'єм і ступінь деформації металу, який перетворюється в стружку, а утворення прошарку фериту в стружках вказує на те, що пластична деформація в основному відбувається по найбільш м'яким пластичним зернам, тобто по фериту.

7. В зоні високих швидкостей різання найбільше впливає на процес стружкоутворення температура, величина якої досягає великих значень. При цьому величина зони передруйнування хоч і зменшується в розмірах, однак пружні і пластичні деформації, що протікають в цій зоні, і величина теплового ефекту, обумовлена цими деформаціями, а також величина теплового ефекту в самій зоні руйнування найбільше впливає шляхом збільшення крихкості шару, що зрізується, на процес різання. Спостерігається в цих умовах локалізація пластичних деформацій шару, що зрізується, що значно зменшує загальний об'єм пластичних деформацій в зоні стружкоутворення.

8. Основним ефектом швидкісного різання є виникнення при визначених температурних умовах текучого шару, що знаходиться в достатньо пластичному стані, можливо навіть наближеному до стану плавлення. Наявність такого шару призводить до зменшення тертя на передній та задній поверхнях інструмента, а як наслідок, до зменшення зносу та покращення якості обробленої поверхні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Погонин А.А., Москвитин А.А.* Механизм стружкообразования при высокоскоростной обработке (ВСО) металлов и сплавов // Известия вузов / Машиностроение. – 2003. – № 3. – С. 24–28.
2. *Яцерицын П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э.* Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов. – Минск: Высш. школа, 1990. – 512 с.
3. *Петров П.П.* Повышение эффективности высокоскоростного резания пластических металлов: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.03.01 / СПГТУ. – С.-Пб., 1992. – 17 с.
4. *Кузин В.В.* Исследования процесса высокоскоростного резания керамическими инструментами // Вестник машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 47–51.
5. *Клушин М.И.* О физических основах сверхскоростного резания металлов // Тр. Горьковского политехнического ин-та. – Горький: ГПИ. – Т. XVI. – Вып. 4. – С. 15–22.
6. *Подъемицков Е.К.* Скоростное фрезерование пазов дисковыми фрезами. – М.: Оборонгиз, 1955. – 144 с.
7. Підручник для студентів вищих навчальних закладів / А.І. Грабченко, М.В. Верезуб, Ю.М. Внуков, П.П. Мельничук, Г.М. Виговський / За редакцією А.І. Грабченка. – Житомир: ЖДТУ, 2003. – 451 с.
8. *Яковлев Г.М.* Новые исследования физических основ скоростного резания металлов. – Минск, 1957.
9. *Резников Н.И.* Скоростное резание металлов с большими подачами. – М.: Машгиз, 1957.

ВИГОВСЬКИЙ Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, проректор з організаційно-навчальної роботи Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обробка металів різанням;
- проектування різальних інструментів.

ГРОМОВИЙ Олексій Андрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем, заступник декана факультету інженерної механіки Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обробка металів різанням;
- моделювання технологічних процесів.

Подано 02.10.2009