

Внуков Ю. М., Залого В. О.

ЗНОШУВАННЯ І СТІЙКІСТЬ РІЗАЛЬНИХ ЛЕЗОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Навчальний посібник

Друге видання, стереотипне





Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Внуков Ю. М., Залога В. О.

ЗНОШУВАННЯ І СТІЙКІСТЬ РІЗАЛЬНИХ ЛЕЗОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Навчальний посібник

Друге видання, стереотипне

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

Суми
Сумський державний університет
2024

УДК 621.9.029 (075.8)

В 60

Рецензенти:

А. І. Грабченко – доктор технічних наук, професор Харківського національного університету «ХПІ»;

Н. С. Равська – доктор технічних наук, професор Київського національного університету «КПІ»;

В. М. Тонконогий – доктор технічних наук, професор Одеського національного політехнічного університету

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник
для студентів вищих навчальних закладів
(лист № 1/11- 11368 від 14.12.2010 р.)*

Внуков Ю. М.

В 60 Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навчальний посібник / Ю. М. Внуков, В. О. Залого. – 2-ге вид., стер. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 273 с.

ISBN 978-966-657-148-2

У навчальному посібнику наведена інформація про контактні процеси на робочих поверхнях лез інструментів, умови руйнування, механізми, види та критерії зношування різальних лезових інструментів; розглянуті особливості зношування різних різальних лезових інструментів – різців, осьових (свердел, зенкерів, розгорток), фрез, різенарізних, протяжок; залежність «v-T»; вплив умов різання на величини параметрів зношування, стійкість інструменту, допустиму швидкість різання; наведені рекомендації щодо вибору шляхів усунення причин передчасного зношування інструментів; вибору періоду стійкості залежно від виду інструменту та інша довідкова інформація; питання для самоперевірки (у кожному розділі) і типові тести для самоперевірки та модульного контролю знань.

Навчальний посібник може бути використаний під час вивчення теми «Зношування і стійкість різальних інструментів» із курсу «Теорія різання» студентами всіх спеціальностей, які навчаються за напрямками «Машинобудування» та «Інженерна механіка», і може бути корисний студентам машинобудівних спеціальностей старших курсів під час курсового та дипломного проектування, а також магістрам та аспірантам під час виконання магістерських та кандидатських робіт. Методичною і довідковою інформацією, наведеною в навчальному виданні, можуть користуватися й інженерно-технічні працівники в процесі вирішення конкретних виробничих завдань.

УДК 621.9.029 (075.8)

ISBN 978-966-657-148-2

© Сумський державний університет, 2024

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	5
1 РУЙНУВАННЯ ТА ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ІНСТРУМЕНТУ	6
1.1 Працездатність інструменту.....	6
1.2 Міцність різальної частини інструменту	9
1.2.1 Крихке руйнування леза	9
1.2.2 Пластичне руйнування леза.....	27
1.2.3 Оцінювання міцності інструментального матеріалу.....	32
1.3 Зношування різальної частини інструменту	34
1.3.1 Контактні процеси на робочих поверхнях леза інструменту. 34	
1.3.1.1 Адгезійні процеси під час різання.....	41
1.3.1.2 Дифузійні процеси під час різання.....	49
1.3.1.3 Поняття про середній коефіцієнт тертя.....	63
1.3.1.4 Адгезійні процеси під час різання та їхній вплив на середній коефіцієнт тертя.....	68
1.3.1.5 Вплив на середній коефіцієнт тертя мастильно-охолодного середовища.....	72
1.3.1.6 Наростоутворення під час різання і його вплив на контактні процеси на лезі інструменту.....	75
1.3.2 Вплив зносостійких покриттів на контактні процеси на робочих поверхнях леза інструменту	80
1.3.3 Види і криві зношування різальної частини інструменту.....	87
1.3.4 Механізми зношування інструменту	94
1.3.4.1 Механічне зношування	95
1.3.4.2 Адгезійно-втомне (адгезійне) зношування.....	97
1.3.4.3 Абразивне зношування	99
1.3.4.4 Термоутомне (термічне) зношування.....	102
1.3.4.5 Окисне (хімічне) зношування.....	103
1.3.4.6 Дифузійне зношування.....	104
1.3.4.7 Евтектичне зношування.....	110
1.3.4.8 Інтегральне (сумарне) зношування інструменту.....	112
1.3.5 Критерії зношування різальних інструментів.....	115
1.3.5.1 Критерій блискучої смужки.....	118
1.3.5.2 Силовий критерій (критерій Шлізенгера).....	118
1.3.5.3 Критерій рівного зношування.....	120
1.3.5.4 Критерій оптимального зношування.....	121

1.3.5.5 Критерій технологічного зношування.....	125
1.3.6 Максимально допустиме зношування інструментів.....	127
1.4 Особливості зношування інструментів із покриттями.....	134
1.5 Аналіз шляхів усунення причин передчасного зношування інструментів.....	139
1.6 Поняття про надійність різальних інструментів	140
Контрольні запитання.....	147
2 РУЙНУВАННЯ ТА ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ІНСТРУМЕНТУ.....	150
2.1 Залежність «V-T». Поняття про показник відносної стійкості інструменту.....	150
2.2 Зв'язок між стійкістю інструменту і швидкістю різання.....	154
2.2.1 Визначення оптимальної швидкості різання.....	156
2.2.2 Визначення періоду стійкості найбільшої продуктивності.....	164
2.2.3 Визначення періоду стійкості найменшої собівартості оброблення.....	168
2.2.4 Визначення найвигідніших періодів стійкості інструментів...	171
2.3 Вплив умов різання на стійкість інструменту й допустиму швидкість різання.....	176
2.3.1 Вплив подачі та глибини різання на допустиму швидкість різання.....	179
2.3.2 Вплив умов оброблення на допустиму швидкість різання.....	181
2.3.2.1 Вплив оброблюваного матеріалу.....	181
2.3.2.2 Вплив матеріалу різальної частини інструменту.....	183
2.3.2.3 Вплив геометричних елементів лека.....	185
2.2.2.4 Вплив форми передньої поверхні лека.....	191
2.3.2.5 Вплив мастильно-охолодних технологічних середовищ...	192
2.3.2.6 Вплив переривчастості процесу різання.....	192
2.3.2.7 Вплив допустимої величини зношування інструменту δ_3 ..	193
2.4 Діагностика стану різального лека інструменту.....	194
2.5 Формули для визначення допустимої швидкості різання за різних методів оброблення.....	199
2.6 Уніфікована формула швидкості різання.....	203
2.7 Ефективність застосування зносостійких покриттів.....	204
Контрольні запитання.....	215
ТИПОВІ ТЕСТИ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ТА МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ.....	218
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	271

ВСТУП

Більшість деталей машин із різних матеріалів одержує остаточну форму і розміри в результаті механічного оброблення. Важлива роль у цьому належить обробленню матеріалів різанням, особливо у випадках, коли потрібно одержати деталі з високою точністю і малою шорсткістю оброблених поверхонь. Процес різання здійснюється за допомогою різального інструменту – лезового (різальний інструмент із заданою кількістю лез установленої форми, наприклад, різець, фреза, свердло та ін.) або абразивного (різальний інструмент, призначений для абразивного оброблення, наприклад, шліфувальний круг, хонінгувальний брусок та ін.), який є невід’ємною частиною механічної системи «верстат – інструмент – пристрій – деталь». Як складова частина системи різальний інструмент (за незмінних останніх складових) вирішально діє на її ефективність, яка значною мірою залежить від його надійності. Під надійністю різального інструменту розуміють властивість збереження ним до заданого часу встановлених значень усіх параметрів, що характеризують його працездатний стан, вимог та характеристик оброблення, виконуваного цим інструментом, за встановленого порядку технічного обслуговування, відновлення, ремонту, зберігання та транспортування (ДСТУ 2233 – 93). Водночас стан інструменту в процесі оброблення постійно змінюється, оскільки робочі поверхні його лез (лезо – клиноподібний елемент різального інструменту, призначений для проникнення в матеріал заготовки та відділення шару матеріалу у вигляді стружки) перебувають у контакті з переміщуваними стосовно них стружкою та поверхнями на оброблюваній деталі (різання та оброблюваною) в умовах як внутрішнього, так і зовнішнього тертя ковзання, високих температур (до температур плавлення оброблюваного матеріалу) та тисків (до 2 000 ат), що супроводжується їх руйнуванням та зношуванням. Тому для того щоб оброблення різанням було продуктивним, економічним та забезпечувало високу якість виготовлених деталей, необхідно знати не лише основні закономірності процесу різання, а й тісно пов’язані з ними процеси руйнування та зношування різальної частини інструменту.

1 РУЙНУВАННЯ ТА ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ІНСТРУМЕНТУ

1.1 Працездатність інструменту

Працездатний стан різального інструменту (леза) («**працездатність**») характеризується таким його станом, за якого він здатний виконувати оброблення різанням за встановлених у нормативно-технічній документації (НТД) умовах із зазначеними вимогами. Водночас *стан різального інструменту* характеризують сукупністю значень його параметрів (наприклад, значеннями заднього й переднього кутів, величиною зношування по задній або передній поверхнях лека та ін.) у цей момент.

Примітка. Під *зношуванням* розуміють величину, що характеризує зміну форми й розмірів різальної частини інструменту (леза) внаслідок зношування під час різання

До *умов оброблення* відносять, наприклад, *оброблюваний матеріал, технологічне устаткування, режим різання, порядок технічного обслуговування, відновлення й ремонту та ін.* До *вимог оброблення* відносять, наприклад, *допуски розмірів, форми взаємного розміщення оброблених поверхонь, параметри шорсткості, продуктивність оброблення різанням, питомі зведені витрати на оброблення тощо.*

У процесі різання інструмент втрачає свою працездатність у результаті руйнування або зношування лека.

На рисунку 1.1 наведена схема сучасних уявлень про вплив різних умов на вихід інструменту з ладу.

Непрацездатним станом різального інструменту («**непрацездатність**»), що характеризується його «*відмовою*» (див. підрозд. 1.3.5), може бути відхилення від установлених значень хоча б одного з параметрів різального інструменту, вимог або характеристик оброблення, виконуваного цим інструментом. До *характеристик оброблення* відносять: *силу різання,*

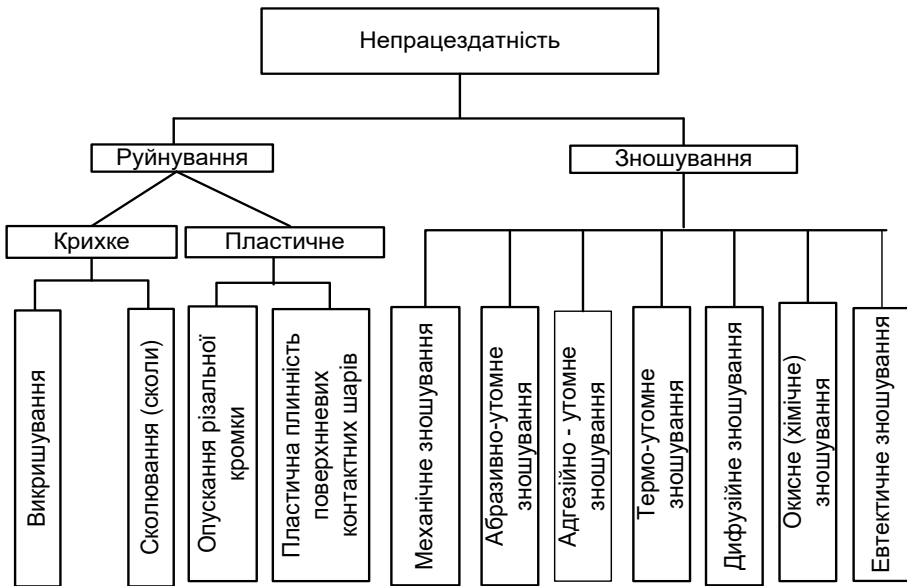


Рисунок 1.1 – Схема сучасних уявлень про причини втрати працездатності різальних інструментів

температуру різання, рівень вібрацій, шорсткість обробленої поверхні, точність розміру і форми тощо.

Обсяг роботи різального інструменту до затуплення («напрацювання різального інструменту», «напрацювання між відмовами різального інструменту», «напрацювання до відмови різального інструменту (леза)») може бути виражений інтервалом часу, масою чи об'ємом знятого матеріалу, довжиною шляху різання, площею обробленої поверхні чи числом оброблених заготовок. Залежно від величин, що виражають напрацювання різального інструменту, розрізняють такі напрацювання: *тимчасове, масове, об'ємне, шляхове, поверхневе та штучне.*

Тимчасове напрацювання між відмовами різального інструменту може виражатися часом різання, машинним часом, тривалістю циклу роботи автоматичного обладнання (автома-

тичної лінії) тощо. Частковим випадком тимчасового напрацювання до відмови або між відмовами, коли напрацювання виражене часом різання, є **період стійкості T** – час різання новим або відновленим різальним інструментом (лезом) від початку різання до його відмови.

Примітка. Під *часом різання* розуміють інтервал часу, впродовж якого інструмент перебуває в безпосередньому контакті з оброблюваною поверхнею, що супроводжується зняттям стружки

Існує зв'язок між періодом стійкості й напрацюванням між відмовами. Наприклад, тимчасове напрацювання між відмовами, виражене основним (машинним) часом t_o , і період стійкості T зв'язані залежністю

$$t_o = T \frac{l_{p.x}}{l_p} = T \frac{t_{p.x}}{t_p},$$

де $l_{p.x}$ і $t_{p.x}$ – відповідно довжина та час робочого ходу інструменту; l_p і t_p – відповідно довжина та час різання (див. підрозд. 2.2.2).

Шляхове напрацювання між відмовами L , м, і період стійкості T , хв, зв'язані залежністю

$$L = T \cdot V,$$

де V – швидкість різання, м/хв.

Вивчення фізичних закономірностей зношування інструменту дозволяє призначати оптимальні умови експлуатації (роботи) інструменту, прогнозувати вихідні показники процесу оброблення загалом, а також сформулювати вимоги, що ставляться до інструментальних матеріалів, і визначити галузі їхнього ефективного застосування.

1.2 Міцність різальної частини інструменту

За недостатньої міцності леза інструменту його руйнування («*раптова відмова*») відбувається за допомогою крихкого сколювання і викришування або в результаті пластичної деформації й наступного зрізу. Руйнування інструменту є недопустимим видом відмови і свідчить зазвичай про неправильне призначення геометричних параметрів різальної частини (леза) інструменту, умов і режимів оброблення, вибору марки інструментального матеріалу, що може супроводжуватися або значним підвищенням сил різання, або формуванням у різальному клині напружень, більших, ніж ті, які можуть ним допускатися.

1.2.1 Крихке руйнування леза

Крихке руйнування леза є результатом поступового розвитку й нагромадження мікротріщин, які зі збільшенням зовнішнього навантаження зливаються в макротріщину. Процес зародження й розвитку тріщин відбувається в часі, тобто залежить від тривалості прикладення навантаження. Є два види крихкого руйнування леза: викришування різальних кромки і відколи (сколювання) різальної частини (леза) (рис. 1.2).

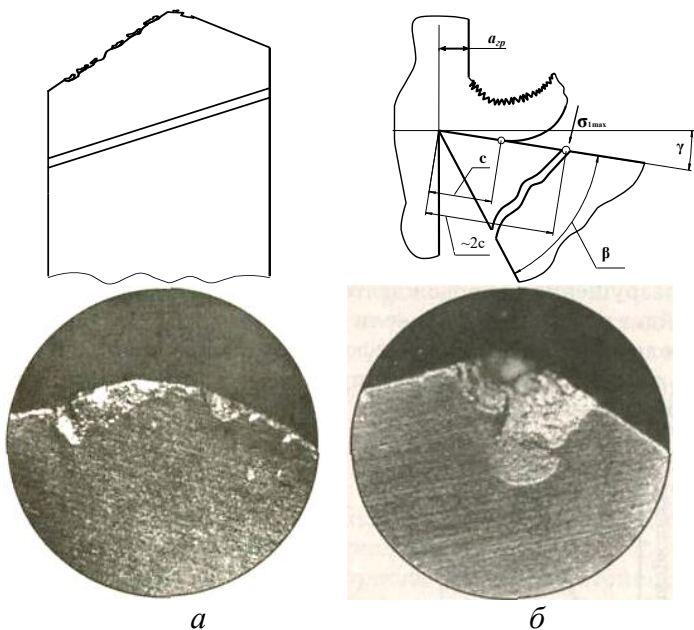


Рисунок 1.2 – Крихке руйнування леза:
а – викришування; *б* – сколювання

Викришування – це відділення відносно малих частинок (до 1 мм і трохи більше) різальної кромки (рис. 1.2 а), найчастіше пов’язане з недостатньою для прикладених навантажень площиною перерізу леза, яка визначається кутом загострення β ; з поверхневими дефектами і неоднорідністю структури інструментального матеріалу, залишковими напруженнями та ін. Викришування також може бути пов’язане зі зміною напруженого стану в перехідних процесах різання – на вході інструменту в контакт або його виході з контакту зі зрізуваним шаром. Частковим випадком викришування є «обсипальність» різальної кромки. Під обсипальністю різальної кромки розуміють часткове або суцільне руйнування її ділянок розмірами не більше ніж 0,3 мм.

Викришування відіграє незначну роль у зношуванні інструментів, виготовлених із легованих і швидкорізальних інструментальних сталей, і має велике значення в сумарному зношуванні твердосплавних інструментів.

Сколювання (відколи) – це відділення порівняно великих об’ємів інструментального матеріалу, які можуть навіть перевищувати об’єм леза в межах контакту передньої поверхні зі стружкою (рис. 1.2 б).

Сколювання залежить від видів оброблюваного та інструментального матеріалів, форми та геометрії різального леза, діючих на лезо питомих навантажень (тиску), тобто величини напружень, що формуються в різальному клині (лезі), які переважно визначаються кутом загострення β , переднім γ і заднім α кутами та головним кутом у плані φ , тому що саме ці кути визначають як розміри перерізу різального клина (β, γ, α), так і тиск стружки на передню поверхню (γ, φ). З режимів різання найбільший вплив на сколювання має товщина зрізу a і, значною меншою мірою, ширина зрізу b . Швидкість різання може впливати на цей вид крихкого руйнування зазвичай через зміну динамічного стану технологічної системи, наприклад, за виникнення вібрацій.

Установлено, що зі зменшенням кута загострення, наприклад, за збільшення заднього кута

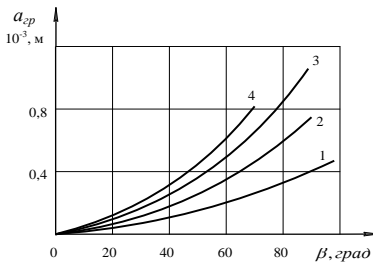


Рисунок 1.3 – Вплив кута загострення на граничну товщину зрізу під час оброблення різних оброблюваних матеріалів різними із ВК8 ($V = 0,026$ м/с):

1 – 110Г13Л; 2 – ХН60Т;
3 – 12Х18Н10Т; 4 – ШХ15

за збільшення заднього кута α зменшується (незалежно від властивостей оброблюваного матеріалу) *гранична (допустима) товщина зрізу a_{sp}* , за якої настає сколювання (рис. 1.3), що пояснюється зростанням напружень у різальному клині за рахунок зменшення площі його перерізу.

Зі збільшенням переднього кута γ за $\beta = \text{const}$ (за одночасного зменшення заднього кута α , наприклад, поворотом різального клина) величина граничної товщини зрізу збільшується. Це пояс-

нюється тим, що за незмінної міцності леза зі збільшенням переднього кута сили різання, а відповідно й напруження в різальному клині зменшуються. Збільшення головного кута в плані φ викликає зменшення граничних товщин зрізу, що пов'язане зі збільшенням тиску стружки на передню поверхню, а отже, й напружень у різальній частині.

Оскільки напруження, що виникають у різальному клині, залежать від опору оброблюваного матеріалу пластичної деформації під час різання, тобто рівня дотичних напружень по умовній площині зсуву τ_{ϕ} , то підвищення τ_{ϕ} викликає зниження $a_{зр}$.

Як характеристика опору крихкому руйнуванню інструментального матеріалу може бути межа його міцності за одноосьового розтягування σ_{ϵ} . За збільшення σ_{ϵ} граничні товщини зрізу зростають і, навпаки, зі зменшенням σ_{ϵ} вони зменшуються. Зменшення граничних товщин зрізу залежно від марки інструментального матеріалу має місце в такому порядку: швидкорізальна сталь, тверді сплави груп ВК і ТТК, далі група ТК і різальна кераміка.

Таким чином, основними факторами, що визначають сколювання, є: властивості оброблюваного й інструментального матеріалів, форма і геометрія різального клина, товщина зрізу.

Поняття граничної товщини зрізу уточнюються з урахуванням фактора часу, тому що процес розвитку тріщин у різальній частині інструменту залежить і від часу різання (руйнування від втоми).

Характер розподілу стискувальних і розтягувальних напружень у різальному лезі одержують поляризаційно-оптичним методом. У різальній частині можуть бути області як розтягувальних (+) і стискувальних (-) напружень (рис. 1.4 а, б), так і лише стискувальних напружень (рис. 1.4 в). Водночас зона

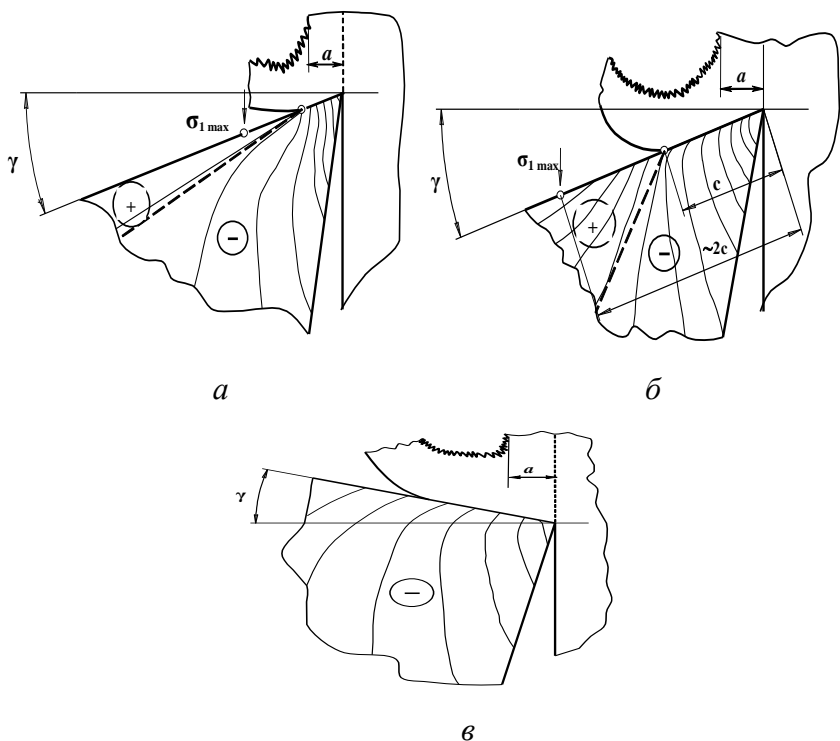


Рисунок 1.4 – Лінії ізохорм біля різальної кромки залежно від переднього кута γ і товщини зрізу a

розтягувальних напружень починається наприкінці контакту стружки з передньою поверхнею.

Значний вплив на характер напруженого стану роблять також і форма передньої поверхні, і значення переднього кута. Зі зменшенням переднього кута зона стискування збільшується, а зона розтягування звужується або зовсім зникає (рис. 1.4 в). Дослідження напруженого стану показало, що найбільш напружена ділянка в зоні розтягування («небезпечні точки», у яких найбільш імовірно почнеться раптове руйнування, – відкол) розташована на передній поверхні інструменту на відстані, що дорівнює $(2-2,5)c$, де c – довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструменту (рис. 1.4 б). Сколювання

різальної частини інструменту відбувається в той момент, коли розтягувальні напруження в небезпечній зоні досягають межі міцності інструментального матеріалу σ_{σ} . Утворюється мікротріщина, яка, розвиваючись, перетворюється на макротріщину, і в результаті відбувається відкол.

У випадку малих товщин зрізів переважають стискувальні напруження (рис. 1.4 а), а за більших товщин зрізів істотну роль відіграють також і розтягувальні напруження (рис. 1.4 б). Зі зменшенням товщини зрізу зона дії розтягувальних напружень зменшується, і після певної її величини в різальній частині діють лише стискувальні напруження. У цьому разі характеристикою крихкої міцності леза інструменту буде межа міцності на стиск σ_{σ} . Максимальні стискувальні напруження під час різання розвиваються на передній поверхні поблизу різальної кромки. Величина максимальних напружень $\sigma_{I_{max}}$, що діють на різальну кромку під час різання різних матеріалів, має такі значення: для свинцю – 28–30 МПа; міді – 600–700 МПа; заліза і сталей – 800–1 400 МПа; для жароміцних сплавів на нікелевій основі – 1 600–2 200 МПа і т. д. З огляду на те, що межі міцності на стиск твердих сплавів і швидкорізальної сталі перебувають у межах $\sigma_{\sigma} = 3\,500\text{--}4\,500$ МПа, ймовірно, що вони не повинні крихко руйнуватися під дією стискувальних напружень під час оброблення зазначених матеріалів. Інструменти з різальної кераміки та СТМ під час різання твердих матеріалів можуть зазнавати крихкого руйнування під дією стискувальних напружень, тому що для цих інструментальних матеріалів $\sigma_{\sigma} \leq 2\,000$ МПа.

Експериментально встановлена приблизно лінійна залежність між межею міцності на розтягування σ_{σ} інструментального матеріалу й граничною товщиною зрізу a_{zp} , за якої відбувається руйнування різальної частини інструменту. Якщо σ_{σ} для швидкорізальної сталі становить 1 800–2 000 МПа, для твердих сплавів – 500–800 МПа, для різальної кераміки – 150–200 МПа, для алмазу – 100–150 МПа, то за інших однакових умов величини

на a_{sp} для швидкорізального інструменту буде втричі більшою, ніж для твердих сплавів, у 8–10 разів більшою, ніж для різальної кераміки, і в 15–20 разів більшою, ніж для алмазу. Тому інструменти з алмазу і різальної кераміки застосовують лише для чистових операцій, коли товщини зрізів відносно малі й у різальній частині інструменту переважно діють напруження стиснення.

Характер навантаження леза – *безперервне* (наприклад, точіння) або *переривчасте* (наприклад, фрезерування) різання – також впливає на величину граничної товщини зрізу. За переривчастого різання гранична товщина зрізу в 1,5 раза менша, ніж за безперервного. Однією з основних причин передчасного

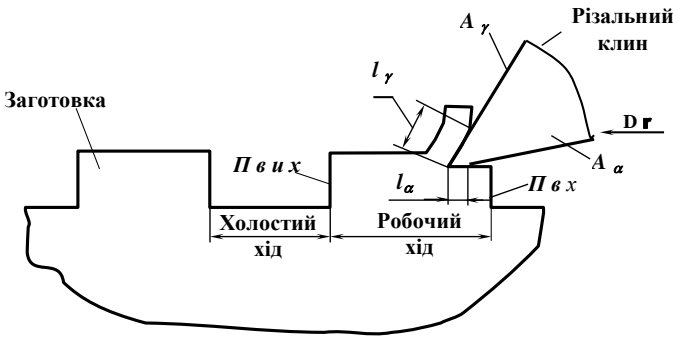


Рисунок 1.5 – Схема переривчастого різання

руйнування леза за переривчастого різання (рис. 1.5) є різка зміна навантаження (удар) на лезо інструменту як у момент входження леза (від 0 – за холостого ходу, до \max – за робочого), так і в момент його виходу із зони різання (від \max – за робочого ходу, до 0 – за холостого).

Характер навантаження леза інструменту за переривчастого (нерівномірного) різання, а отже, й умови періодично повторюваних навантажень і розгрузок його контактних поверхонь залежать не лише від режиму різання й числових значень геометричних параметрів леза, але значною мірою й від знаків кутів переднього γ і нахилу різальної кромки λ (рис. 1.6), що визнача-

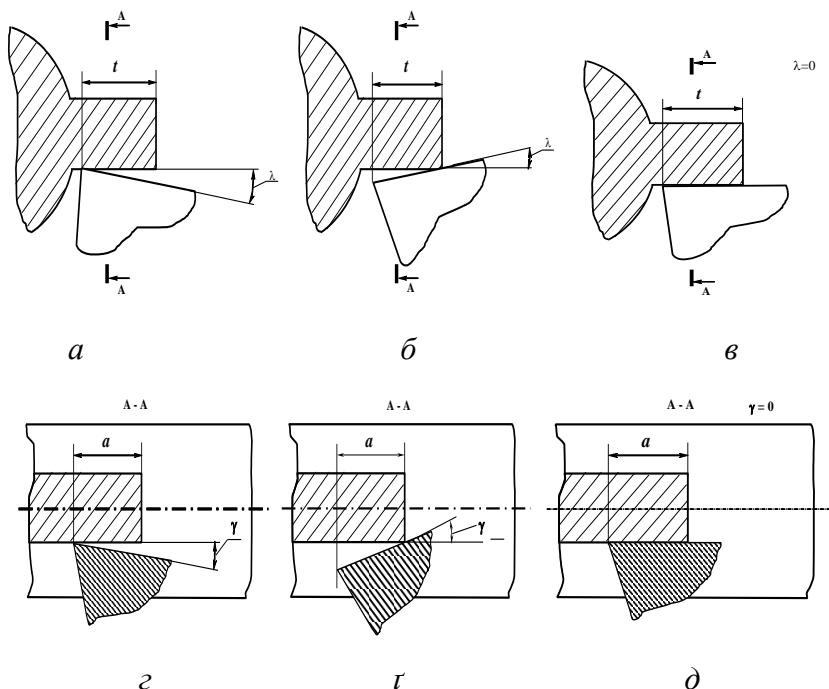


Рисунок 1.6 – Початок контакту леза інструменту зі зрізуваним шаром залежно від кутів нахилу різальної кромки λ (а, б, в) і переднього γ (г, т, д)

ють разом із формою і розміщенням поверхонь входу $\Pi_{вх}$ і виходу $\Pi_{вих}$ шлях різання за час робочого ходу.

Залежно від знаків цих кутів контакт леза зі зрізуваним шаром із тими самими параметрами (товщиною зрізу a і глибиною різання t) може починатися на вершині за $\lambda < 0$ (а), у будь-якій точці різальної кромки на деякій відстані від неї за $\lambda > 0$ і $\gamma > 0$ (б, г) або в будь-якій точці передньої поверхні за $\gamma < 0$ (т). Контакт може бути лінійним за $\lambda = 0$ і $\gamma \neq 0$ або за $\lambda \neq 0$ і $\gamma = 0$ (в, д) і поверхневим за $\lambda = 0$ і $\gamma = 0$.

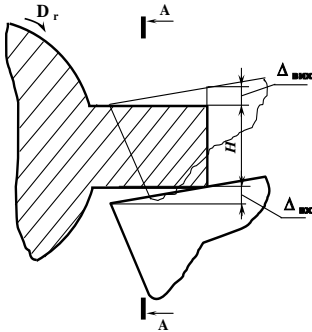


Рисунок 1.7 – До визначення шляху (часу) частини циклу «різання» (робочий хід) за $\gamma \neq 0$ і $\lambda \neq 0$

Шлях різання, а відповідно і час робочого ходу в головному русі різання D_r істотно залежать від значень λ і γ . Для визначення характеристик (шляхів і часу) періодів робочого ходу інструменту – врізання, основного різання та виходу – розглянемо поздовжнє точіння переривчастої поверхні з постійним діаметром із плоскими граничними поверхнями виступів $P_{вх}$ і $P_{вих}$ (див. рис. 1.5) лезом із прямолінійними різальними кромками й плоскою передньою поверхнею.

За $\lambda \neq 0$ ($\gamma \neq 0$) дійсний шлях різання h_d збільшується порівняно з номінальним H (основне різання) на величину врізання $\Delta_{вх}$ і виходу леза з контакту зі зрізуваним шаром $\Delta_{вих}$ (рис. 1.7):

$$h_d = H + \Delta_{вх} + \Delta_{вих}.$$

За $\lambda = 0$ і $\gamma = 0$ дійсний шлях різання $h_d = H$.

Тривалість контакту леза з виступом, а отже, і час прикладання навантаження визначаються як сумарний час різання за робочий хід, що містить у собі періоди: врізання, основного різання й виходу.

Період врізання (τ_{ep}) – відрізок часу від моменту торкання леза зі зрізуваним шаром (зрізом) до моменту, що відповідає кінцю зміни (збільшення) площі контакту.

Період основного різання ($\tau_{осн}$) – відрізок часу, що характеризується сталістю площі контакту.

Період виходу ($\tau_{вих}$) – відрізок часу від моменту початку зменшення площі контакту до моменту виходу леза з контакту зі зрізуваним шаром.

Сумарний час різання (τ_{Σ}) – загальний час контакту леза інструменту з виступом за робочий хід:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{ep} + \tau_{очн} + \tau_{вих} .$$

Для розуміння про види початку й кінця контактів леза інструменту зі зрізуваним шаром залежно від співвідношення між кутами γ і λ розглянемо дійсний переріз зрізу, що являє собою чотирикутник $ABCD$ (рис. 1.8). Точка A – вершина; точка B – точка перетину головної різальної кромки ($ГРК$) K і зовнішньої утворювальної (оброблюваної) поверхні P_f

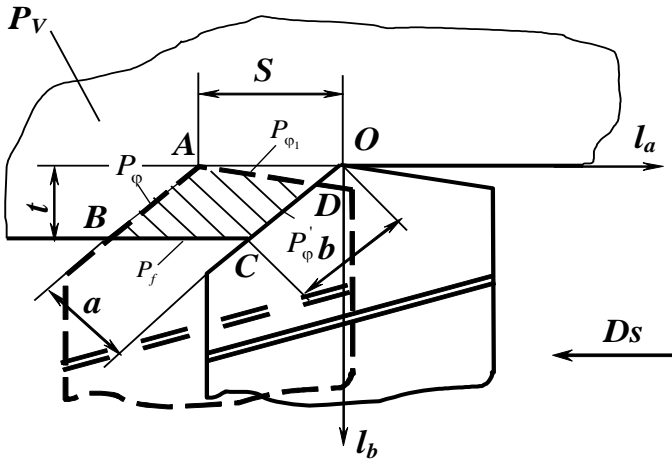


Рисунок 1.8 – Переріз зрізуваного шару

заготовки наприкінці циклу головного руху різання; точка C – точка перетину $ГРК$ і зовнішньої утворювальної поверхні заготовки на початку циклу головного руху різання; точка D – точка перетину допоміжної різальної кромки ($ВРК$) K' з поверхнею різання на початку циклу головного руху різання.

Бічні сторони цього чотирикутника є слідами граней чотиригранників зрізу (рис. 1.9). Очевидно, що їхній вигляд, положення і відповідно форма перерізу зрізу залежать:

P_φ – від кута φ і t ; P_{φ_1} – від кута φ_1 і S ; P'_φ – від кута φ і t ; P_f – від форми оброблюваної поверхні заготовки і S .

У розглянутому випадку зона контакту являє собою чотирикутник $AB'C'D'$, точки A', B', C', D' якого належать пе-

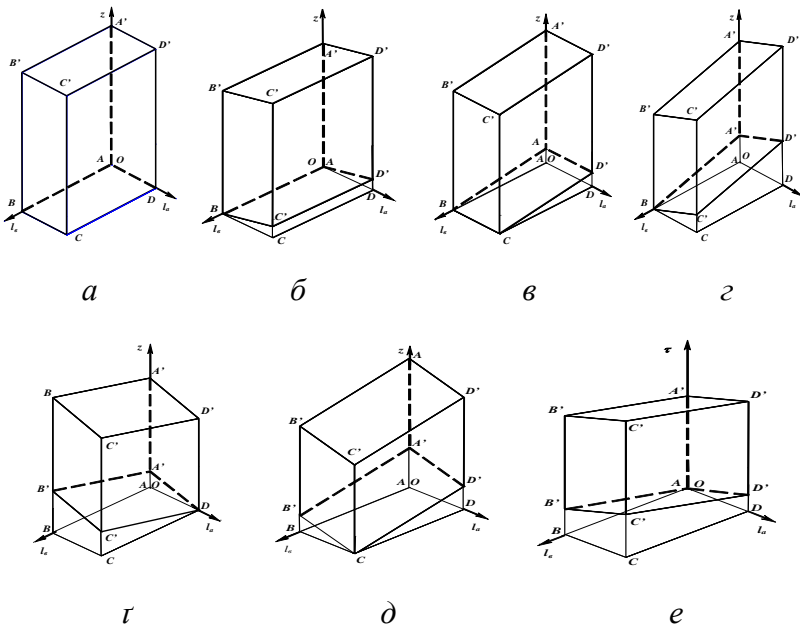


Рисунок 1.9 – Вид початку контакту леза інструменту зі зрізуванням шаром залежно від співвідношення між кутами γ і λ ($\varphi = 90^\circ$, $\varphi_1 = 0^\circ$): $a - \lambda = 0; \gamma = 0$; $b - \lambda = 0; \gamma > 0$; $c - \lambda > 0; \gamma = 0$; $d - \lambda > 0; \gamma > 0$; $e - \lambda < 0; \gamma < 0$; $e - \lambda < 0; \gamma > 0$

редній поверхні, а точки A, B, C, D є їхніми проєкціями на P_V (рис. 1.9), тобто переріз зрізу є проєкцією зони контакту на основну площину P_V .

Ударні навантаження за врізання інструменту в момент зустрічі точок передньої поверхні A_γ з поверхнею входу Π_{ax} (див. рис. 1.5) є однією з основних причин руйнування леза інструменту в умовах переривчастого або нерівномірного різання. Вигляд зони контакту в момент врізання (входу) значною мірою визначає рівень і характер діючих на лезо динамічних навантажень, а отже, й імовірність руйнування різального клина, наприклад, за точкового початку контакту різальної кромки зі зрізуваним шаром на вершині леза (т. А на рис. 1.9 е), і імовірність її руйнування значно вищі, ніж за розміщення точки контакту на деякій відстані від вершини (т. В на рис. 1.9 г).

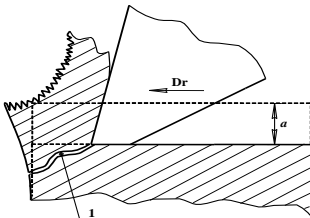


Рисунок 1.10 – Відрив зрізуваного шару в момент виходу леза із зони різання під час стругання

Зростання ймовірності раптового руйнування леза в момент його входу в зрізуваний шар залежно від виду контакту можна розмістити в такій послідовності: точковий (рис. 1.9 г, г, д, е), лінійний (рис. 1.9 б, в), плоский (рис. 1.9 а).

Однією з істотних причин раптового руйнування леза інструменту за переривчастого різання, крім ударних навантажень у момент врізання (входу), є ударні навантаження в момент виходу інструменту з контактної з ним ділянки зрізуваного шару.

У момент виходу інструменту з контакту зі зрізуваним шаром може виникати тріщина 1 (за оброблення крихких матеріалів) (рис. 1.10) або тонка перемичка (за оброблення пластичних матеріалів), яка в подальшому сформує «задирку», і ча-

стина зрізаного шару, що залишається перед лезом у певний час, миттєво відривається від оброблюваної заготовки.

У момент відриву цієї частини стружкоутворення, а отже, і дія (тиск) стружки на передню поверхню припиняються. Однак дія на лезо інструменту з боку задньої поверхні ще триває в результаті пружного відновлення елементів технологічної системи, зокрема і за рахунок пружного відновлення поверхонь на заготовці (рис. 1.11), тобто в цей момент різальна кромка піддається однічному консольному навантаженню з боку задньої поверхні і перестає перебувати в стані всебічного стиску. Це обумовлено тим, що на виході інструменту із зони різання система «верстат – інструмент – за-

готовка», «стиснута» зусиллями різання, відновлює свій початковий стан, тобто має місце пружного повернення заготовки (інструменту) як у напрямку, зворотному головному руху різання («розкручування» системи), так і пружного відновлення в радіальному напрямку, зокрема поверхонь на ній (різання й обробленої). У результаті відбувається зворотний удар у зонах, що прилягають до різальних кромки (головної й допоміжної), з боку задніх поверхонь, що призводить або до механічного руйнування леза, або до утворення мікро- і субмікротріщин, що сприяють інтенсивному його руйнуванню.

Зворотний удар є однією з основних причин раптової відмови інструменту, особливо за переривчастого (нерівномірного) оброблення деталей із важкооброблюваних матеріалів із малими модулями пружності, тобто здатних до пружно-пластичної післядії.

Розглянемо умови взаємодії леза із заготовкою в момент припинення їхнього контакту при «виході». У момент виходу

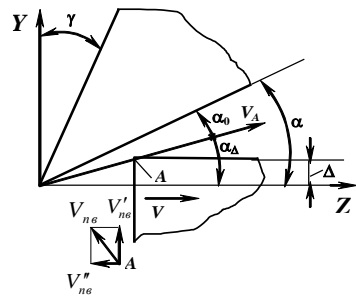


Рисунок 1.11 – Схема виходу леза із зони різання

точки A із зони різання (рис. 1.11) починається процес відновлення системи під дією пружних деформацій, що відповідають навантаженням за сталого різання й жорсткості елементів системи. Водночас рух точки A буде складним (у напрямку вектора V_{ne}) у результаті пружного відновлення системи уздовж осей Y і Z зі швидкостями відповідно V'_{ne} і V''_{ne} .

Під час повернення технологічної системи з пружно-пластичного стану у вихідне в напрямку осі Y різальна кромка, переміщуючись по траєкторії головного руху в напрямку осі Z , одночасно під дією пружних деформацій буде переміщатися на величину Δ і в напрямку вектора швидкості V'_{ne} , що буде супроводжуватися зменшенням заднього кута. Таким чином, траєкторія руху точки A на заготовці щодо леза в результатуючому русі зі швидкістю V_A визначить значення величини α_Δ , на яку зменшується задній кут α :

$$\alpha_\Delta = \text{arctg} \frac{V'_{ne}}{V}. \quad (1.1)$$

Отже, дійсний задній кут α_ϕ на виході різального клина із зони різання буде дорівнювати $\alpha_\phi = \alpha - \alpha_\Delta$ і залежить від співвідношення швидкостей різання й пружного відновлення технологічної системи в напрямку Y .

Залежно від схеми вантаження леза й умов переривчастого (нерівномірною) різання технологічна система з пружно-пластичного стану у вихідне положення може переходити або за експонентним законом (в умовах миттєвого припинення різання), або за затухальним коливальним законом (в умовах, коли має місце поступове зменшення діючих на лезо навантажень).

У першому випадку

$$y = \Delta e^{-\tau T}, \quad (1.2)$$

де y – поточне значення пружної деформації Δ у момент часу τ від початку виходу леза із зони різання; T – стала часу експо-

ненти, що характеризує крутість траєкторії точки A в русі пружного відновлення й залежна від жорсткості елементів системи і умов деформування. Вона чисельно дорівнює сталій демпфірування й коливається в межах 10^{-4} – 10^{-6} с.

Швидкість пружного відновлення в цьому випадку

$$V'_{не} = \frac{dy}{d\tau} = \frac{\Delta}{T} e^{-\tau/T}. \quad (1.3)$$

Максимальна швидкість пружного відновлення, за якої має місце найбільша втрата заднього кута, буде за $\tau = 0$, тобто в момент початку виходу різального клина із зони оброблення, й дорівнює

$$V'_{не \max} = \Delta/T. \quad (1.4)$$

Якщо пружна деформація Δ буде вимірятися в мм, а стала часу – в секундах, то для визначення швидкості в м/хв формула (1.4) набере вигляду

$$V'_{не} = 0,06\Delta/T. \quad (1.5)$$

З урахуванням цієї залежності з формули (1.1) одержимо α_{Δ} , град.:

$$\alpha_{\Delta} = \text{arctg} \frac{0,06\Delta}{TV}. \quad (1.6)$$

Якщо технологічна система з деформованого стану у вихідне положення повертається за затухальним коливальним законом, швидкість пружного відновлення можна характеризувати залежністю

$$V'_{не} = \frac{\Delta}{\tau_{не}} = \frac{\Delta}{T_C/4} = 4\Delta f_C \text{ мм/с} = 0,04\Delta f_C \text{ м/с}, \quad (1.7)$$

де $\tau_{не}$ – час пружного відновлення, с; T_C , f – відповідно період і частота власних коливань системи в радіальному напрямку.

З урахуванням (1.7) формула (1.1) набере вигляду

$$\alpha_{\Delta} = a \operatorname{rctg} \frac{0.04\Delta \cdot f_c}{V}, \text{ град.} \quad (1.8)$$

Із залежностей (1.6) і (1.8) бачимо, що втрата заднього кута значною мірою визначається величинами пружної деформації Δ на замикальній ланці технологічної системи, частотою власних коливань системи в радіальному напрямку f і швидкістю різання V .

За більших значень величини пружної деформації на замикальній ланці технологічної системи, малих швидкості різання і значеннях заднього кута α , обраних без урахування його зменшення на величину α_{Δ} , дійсний задній кут α_0 може стати таким, що дорівнює 0, і навіть мати від'ємне значення (за $\alpha < \alpha_{\Delta}$). У цьому випадку на виході різального клина із зони різання на задню поверхню леза будуть діяти навантаження, пропорційні пружній деформації й жорсткості системи, що призводить зазвичай до інтенсивного зношування інструменту по задній поверхні і навіть його руйнування, тобто за вибору заднього кута з умови $\alpha < \alpha_{\Delta}$ процес виходу леза з контакту з відповідною ділянкою поверхні на заготовці буде супроводжуватися ударними навантаженнями внаслідок пружного відновлення елементів системи в напрямку, зворотному головному руху різання, зі швидкістю V'' , що сприяє інтенсивному механічному руйнуванню різальної кромки. Руйнівальна дія ударних навантажень із боку задніх поверхонь леза значно підсилюється крутними коливаннями, що зазвичай супроводжують процес різання, особливо під час оброблення заготовок із важкооброблюваних матеріалів із переривчастими поверхнями або нерівномірним припуском. Саме цим багато в чому пояснюється більш низька стійкість інструментів за переривчастого різання порівняно з безперервним.

Таким чином, небезпечні точки (точки, у яких можуть виникати граничні розтягувальні напруження) у момент виходу лека з контакту зі зрізуваним шаром з'являються вже і на задній **поверхні** A_{α} (див. рис. 1.5). А оскільки ширина площадки контакту на задній поверхні l_{α} значно менша від довжини контакту лека зі стружкою на передній поверхні l_{γ} , то напруження миттєво зростають, і ймовірність крихкого руйнування значно збільшується. Саме тому під час фрезерування завжди (якщо, звичайно, дозволяє технічний стан верстата) рекомендують попутне різання (рис. 1.12, напрям $D_r - 2$), за якого товщина зрізу поступово змінюється від максимуму під час врізання зуба фрези до поступового зниження до 0 на виході зуба з контакту із заготовкою (рис. 1.13 б), на відміну від зустрічного фрезерування, коли товщина зрізу змінюється від 0 під час врізання до максимуму на виході зуба з контакту із заготовкою (рис. 1.13 а).

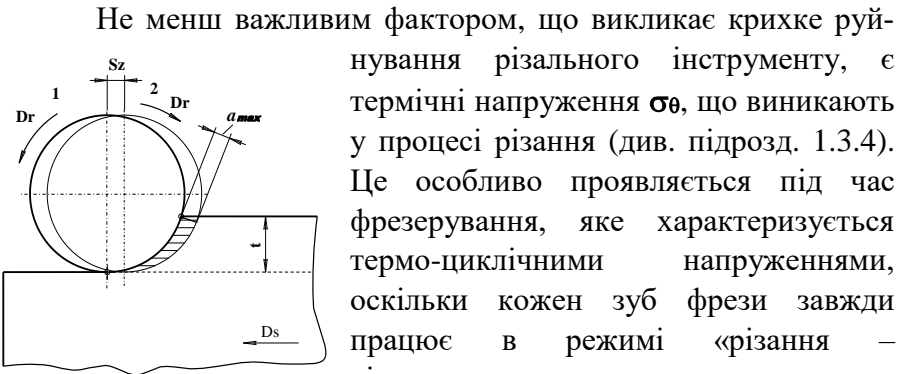
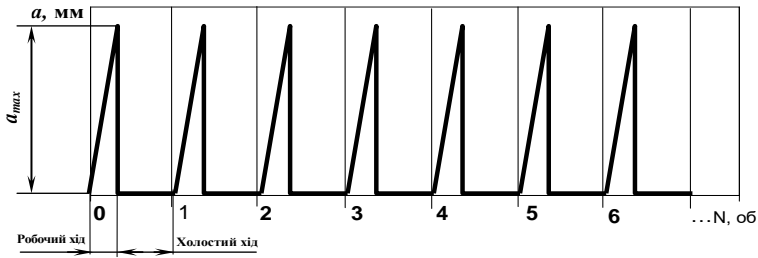


Рисунок 1.12 – Кінематична схема циліндричного фрезерування:

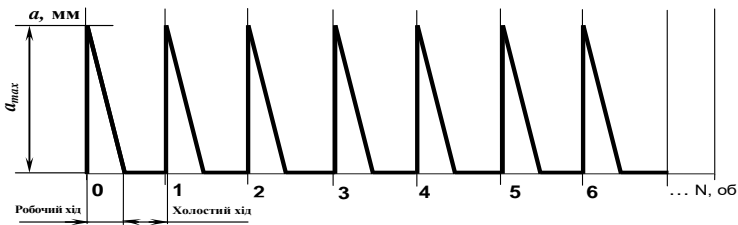
- 1 – зустрічне;
- 2 – попутне

відповідно теплового і напруженого стану різального інструменту.

Не менш важливим фактором, що викликає крихке руйнування різального інструменту, є термічні напруження σ_{θ} , що виникають у процесі різання (див. підрозд. 1.3.4). Це особливо проявляється під час фрезерування, яке характеризується термо-циклічними напруженнями, оскільки кожен зуб фрези завжди працює в режимі «різання – відпочинок», що супроводжується зазвичай різкою зміною температурного режиму (від максимальної температури за робочого ходу до мінімальної для прийнятих умов оброблення – за холостого ходу) і відповідно і напруженого стану різального інструменту.



a



б

Рисунок 1.13 – Зміна товщини зрізу за зустрічного (*a*) і попутного (*б*) фрезерування

У загальному випадку напруження, що виникають у різальній частині інструменту, визначаються як сума напружень, що виникають під дією сил різання й температурного поля, а також залишкових напружень, що виникають під час виготовлення інструменту, зокрема під час напаявання та заточування. Якщо сума цих напружень перевищить межу міцності на розтягування в небезпечних точках, то відбувається крихке руйнування леза.

Викришування великими частинами (відколи), що руйнують різальні леза інструментів у такому ступені, що подальша їхня робота без переточування неможлива або недоцільна, за розмірами і наслідками являє собою не явище зношування, а різновид поломки інструменту.

1.2.2 Пластичне руйнування леза

Існує область режимів різання, за яких інструмент не може зрізати стружку, тому що сам може піддаватися пластичній деформації й зрізу в результаті процесу пластичної плинності контактних шарів. Розвитку процесу пластичної плинності контактних шарів і деформації леза сприяють інтенсивний розігрів і розм'якшення інструментального матеріалу за режимів різання, що характеризуються високими силовими і тепловими навантаженнями, а також усебічне стискання різальної кромки, у результаті якого пластичність матеріалу інструменту в цій зоні істотно підвищується.

Пластична плинність поверхневих контактних шарів інструментального матеріалу і їхній подальший зріз переважно відбуваються уздовж задньої поверхні (рис. 1.14 а). У деяких випадках він може спостерігатися й уздовж передньої поверхні леза. За певних умов (за великих питомих навантажень інструменту) процес різання може супроводжуватися пластичним деформуванням (опусканням) леза (рис. 1.14 б).

Водночас за відносно високих швидкостей різання пластичне опускання різальної кромки може спостерігатися не лише в різців із швидкорізальних сталей (рис. 1.14 а), а також і в різців, оснащених твердим сплавом (рис. 1.14 б).

Формостійкість різального леза (його здатність не деформуватися за навантаження в процесі стружкоутворення, тобто зберігати геометрію) прийнято оцінювати відношенням твердості матеріалу інструменту до твердості стружки

оброблюваного матеріалу $\frac{HV_i}{HV_{стр}}$. Твердість стружки вище від

твердості оброблюваного матеріалу, що обумовлено деформаційними процесами й зміцненням матеріалу зрізаного шару в зоні стружкоутворення. Експериментально доведено, що

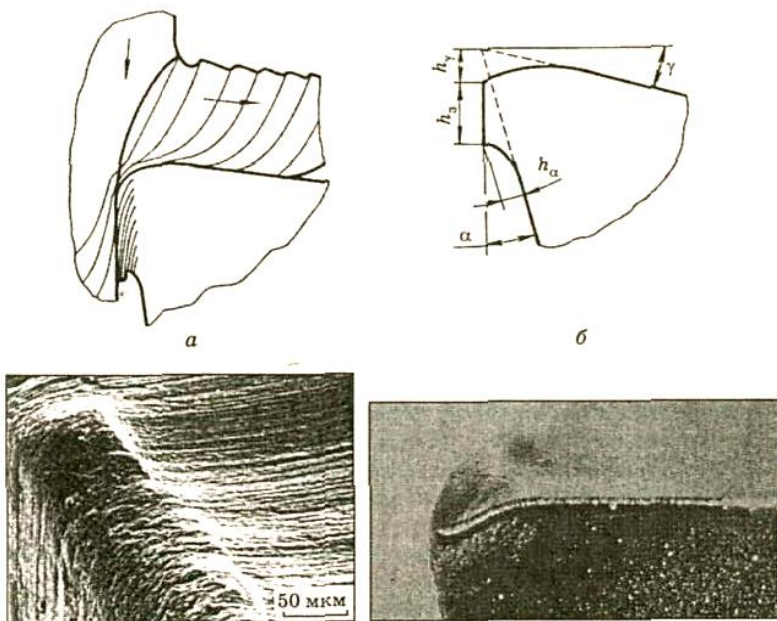


Рисунок 1.14 – Пластична плинність поверхневих контактних шарів на задній поверхні (а) та пластичне деформування (опускання) леза (б)

для запобігання деформації різальної кромки під час зрізання стружки повинне витримуватися співвідношення $\frac{HV_i}{HV_{стр}} \geq 1,4$.

За зміни умов різання (особливо швидкості різання) змінюються й температура різання (середня контактна температура на передній і задній поверхнях інструменту), а отже, і ступінь її впливу на твердість оброблюваного й інструментального матеріалів. Зі збільшенням температури різання твердість стружки практично не змінюється, тому що температура в зоні стружкоутворення піднімається незначно і становить лише 100–300 °С, що не може приводити до істотного зменшення твердості стружки. У той самий час у тонких контактних шарах інструментального матеріалу температура може збільшуватися до дуже високих значень і досягати температур плавлення оброб-

люваного матеріалу. Тому твердість інструментального матеріалу в тонких контактних шарах із підвищенням температури буде зменшуватися. У момент, коли співвідношення твердості матеріалів інструментального і стружки буде нижчою від критичного значення, почнеться інтенсивне пластичне деформування різальної кромки.

Таким чином, пластична міцність інструментального матеріалу залежить від його здатності зберігати твердість за високих температур, тобто від його теплостійкості.

Для оцінювання здатності інструментального матеріалу пручатися пластичному руйнуванню використовують коефіцієнт запасу пластичної міцності, що визначається з формули

$$n_T \approx \frac{HV_3}{6\sqrt{\tau_\phi^2 + \tau_k^2}} \approx \frac{HV_3}{\sqrt{HV_{стр}^2 + HV_k^2}}, \quad (1.9)$$

де HV_i – твердість інструментального матеріалу в контактних шарах за температури різання;

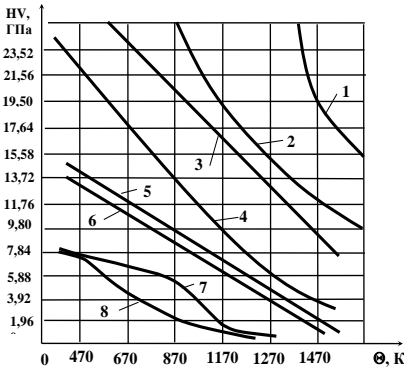
τ_ϕ – напруження зсуву в зоні стружкоутворення;

τ_k – напруження зсуву в контактних шарах оброблюваного матеріалу;

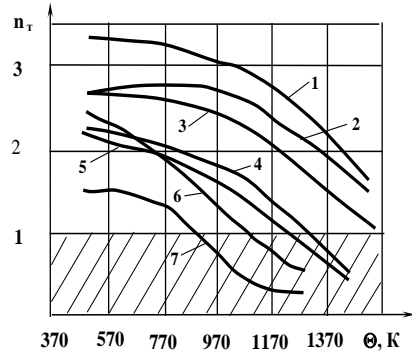
$HV_{стр}$ – твердість стружки;

HV_k – твердість пластично деформованих контактних шарів оброблюваного матеріалу вздовж задньої поверхні за температури, що розвивається біля різальної кромки.

З виразу (1.9) бачимо, що пластична міцність інструментального матеріалу визначається переважно температурними залежностями твердості інструментального та оброблюваного матеріалів у зоні їхнього контакту під час різання. На рисунку 1.15 а наведені температурні залежності твердості різних інструментальних матеріалів, з яких бачимо, що інструментальні матеріали за «гарячою» твердістю можна розмістити в



a



б

Рисунок 1.15 – Температурні залежності твердості (*a*) і коефіцієнта запасу пластичної міцності (*б*) різних інструментальних матеріалів (оброблюваний матеріал – сталь 40X):

a: 1 – алмаз; 2 – ельбор; 3 – карбід кремнію; 4 – електрокорунд;
5 – T15K6; 6 – BK8; 7 – P18; 8 – B12;

б: 1 – ЦМ332; 2 і 3 – маловольфрамові тверді сплави; 4 – BK8;
5 – T15K6; 6 – безвольфрамові тверді сплави; 7 – P18

такій послідовності: алмаз, кубічний нітрид бору (ельбор), карбід кремнію, електрокорунд (різальна кераміка), твердий сплав групи ТК, твердий сплав групи ВК, швидкорізальна сталь і вуглецева інструментальна сталь.

Розрахунок коефіцієнта запасу пластичної міцності за формулою (1.9) дозволяє визначити сфери раціонального використання інструментальних матеріалів за пластичною міцністю залежно від температур різання (рис. 1.15 б) і від швидкості різання під час оброблення різних матеріалів (рис. 1.16).

На цих рисунках в області, у якій коефіцієнт запасу пластичної міцності нижче за 1 (заштрихована зона) – різання неможливе через пластичну деформацію різальної частини інструменту.

Якщо різальна частина інструменту формостійка до температур плавлення оброблюваного матеріалу, то в цьому випадку швидкість різання не обмежується за критерієм пластичної міцності. Оброблення міді, латуні, алюмінію та бронзи твёрдосплавним і швидкорізальним інструментами може бути реалізована практично з будь-якою швидкістю різання. Висока «гаряча» твердість і відсутність хімічної спорідненості кубічного нітриду бору із залізвуглецевими сплавами дозволяє на порядок збільшувати швидкості різання порівняно з твердими сплавами. Таким чином, для кожної пари «інструментальний – оброблюваний» матеріали є гранична швидкість різання $V_{гр}$ (див. (1.10)), за якої розвиваються такі контактні температури, які приводять до пластичного деформування різального леза.

Розігрівання різальної частини інструменту за різних

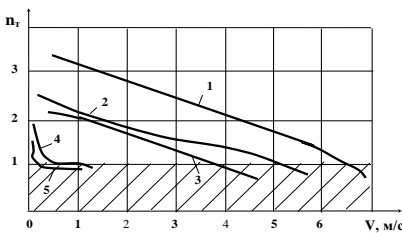


Рисунок 1.16 – Залежність коефіцієнта запасу пластичної міцності від швидкості різання під час оброблення різцем зі сплаву Т15К6 різних матеріалів:

- 1 – сталь 40; 2 – 12Х18Н9Т;
- 3 – ШХ15; 4 – ХН70ВМТЮ;
- 5 – ХН55ВМТКЮ

схем оброблення істотно відрізняється. Наприклад, для переривчастих процесів різання граничні за пластичною міцністю швидкості різання мають більш високі значення.

Під час оброблення сталей, жароміцних і титанових сплавів, інших важкооброблюваних матеріалів швидкість різання найчастіше обмежується межею пластичної міцності інструментальних матеріалів. Тому для підвищення продуктивності оброблення таких матеріалів необхідно підвищувати межу пластичної міцності ін-

струментального матеріалу, тобто вибирати матеріали для леза, які мають більші твердість під час нагрівання й температуропровідність.

1.2.3 Оцінювання міцності інструментального матеріалу

Крихке й пластичне руйнування інструменту обмежує застосування високих режимів різання (граничну товщину зрізу a_{gr} та граничну швидкість різання V_{gr} (див. (1.10)) і відповідно продуктивність оброблення.

Для заданих умов різання потрібно, щоб інструментальний матеріал мав певну межу міцності за розтягування σ_B для того, щоб уникнути крихкого руйнування інструменту поза контактною зоною, де діють максимальні розтягувальні напруження («небезпечні точки»). Поряд із цим інструментальний матеріал повинен мати певну межу міцності на стиснення σ_{-B} , щоб уникнути крихкого руйнування в зоні стиску в області різальної кромки, де діють максимальні стискувальні напруження. Абсолютна величина відповідної межі міцності переважно визначається опором оброблюваного матеріалу різанню, що характеризується, наприклад, під час розтягування величиною τ_{ϕ} , а також товщиною зрізу a . Чим більші τ_{ϕ} і a , тим вищою повинна бути міцність інструментального матеріалу на розтягання. Необхідна величина σ_B залежить не лише від властивостей оброблюваного матеріалу, а й від виду операції. Величина максимальних напружень у «небезпечних точках», у неконтактній зі стружкою зоні, залежить від характеру навантаження леза на вході й виході його з контакту. Наприклад, за зустрічного фрезерування (див. рис. 1.12) найбільші розтягувальні напруження розвиваються у фазі виходу леза інструменту з контакту (див. рис. 1.13 а). Тому для фрезерних операцій необхідно, щоб межа міцності на розтягання інструментального матеріалу була значно вищою, ніж для точіння.

Часті нагрівання й охолодження різальної частини інструменту за переривчастого різання викликають термічні удари

й виникнення термічних напружень, що призводять до появи тріщин і подальшого руйнування. Тому для запобігання появи термічних тріщин інструментальний матеріал повинен мати малу межу пружності й коефіцієнт лінійного розширення та більш високу температуропровідність. Іноді для зниження термічних напружень використовують додаткове підігрівання інструменту поза зоною різання.

Опір інструментального матеріалу пластичному руйнуванню визначається температурною залежністю його твердості, а також властивостями оброблюваного матеріалу τ_{ϕ} і τ_k та його температурою плавлення.

Комплексним критерієм міцності інструментального матеріалу під час різання заданих оброблюваних матеріалів може бути добуток

$$\Pi = a_{ep} \cdot V_{ep}, \quad (1.10)$$

де a_{ep} – гранична товщина зрізу, за якої відбувається крихке руйнування різальної частини інструменту (втрата крихкої міцності);

V_{ep} – гранична швидкість різання, за якої розвивається температура, що знижує твердість інструментального матеріалу до недопустимих для збереження форми значень (втрата пластичної міцності).

Добуток (1.10) є максимально допустимий міцністю інструменту об'єм зрізуваного за одиницю часу шару за ширини зрізу $b = 1$ мм. Значення Π характеризує потенційно можливу продуктивність оброблення заданого оброблюваного матеріалу заданим інструментальним матеріалом. Режими різання з меншими значеннями Π свідчать про неповне використання міцнісних властивостей (можливостей) даного інструментального матеріалу.

1.3 Зношування різальної частини інструменту

У процесі різання в результаті взаємодії оброблюваного матеріалу з інструментальними контактними площадками на передній і задній поверхнях інструменту зношуються.

На рисунку 1.17 показана площадка зношування на задній поверхні леза інструменту. Зношування контактних площадок інструменту відбувається безупинно, впродовж усього процесу різання, практично за всіх можливих умов різання. Тому поряд із достатньою міцністю різальна частина інструменту повинна мати високу зносостійкість – здатність запобігати стиравальній дії з боку стружки (передня поверхня) і поверхонь на оброблюваній деталі (задні поверхні).

1.3.1 Контактні процеси на робочих поверхнях леза інструменту

Відомо, що різання являє собою процес упровадження різального клину (леза) у заготовку з утворенням нової поверхні

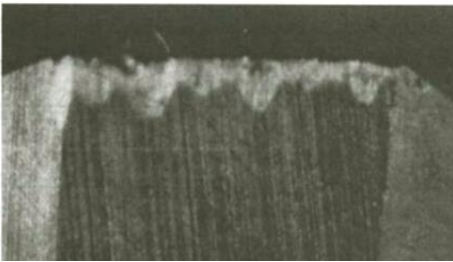


Рисунок 1.17 – Площадка зношування на задній поверхні

за рахунок відділення від заготовки зрізаного шару. У результаті такої взаємодії на контактних поверхнях виникають сили опору ковзанню, які прийнято характеризувати нормальними σ_N і дотичними q_F напруженнями (рис. 1.18, 1.19). Велика кількість виконаних

експериментальних робіт дозволяє скласти уявлення про процеси, що відбуваються на контактних поверхнях (передній та задній) леза інструменту.

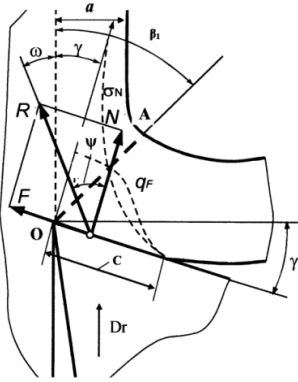


Рисунок 1.18 – Схема сил, що діють на передній поверхні інструменту

Нормальні напруження σ_N , обумовлені величиною дотичних напружень τ , що діють у зоні первинних деформацій (в умовній площині зсуву OA (рис. 1.18)):

$$\tau = \frac{P_\tau}{OA \cdot b},$$

де P_τ – сила зсуву в площині OA, Н; b – ширина зрізуваного шару, мм.

Процес утворення стружки почнеться в тому випадку, коли $\tau \geq \tau_s$, де τ_s – межа плинності оброблюваного

матеріалу на зсув.

Вважається встановленим, що нормальні контактні напруження σ_N (рис. 1.19 а, 1.20 а) мають найбільшу величину

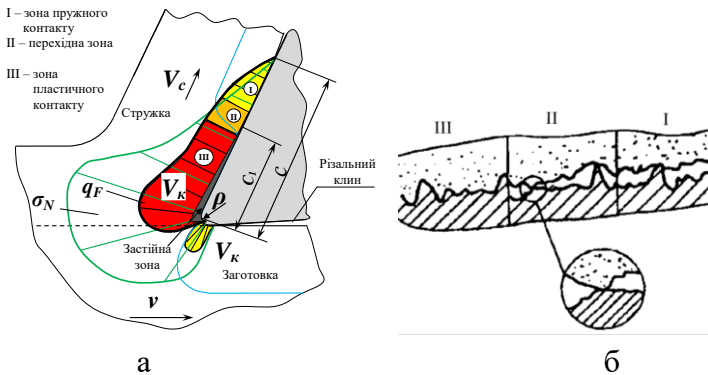


Рисунок 1.19 – Характерний розподіл контактних напружень σ_N , q_F і відносної швидкості ковзання V_k на контактних поверхнях леза (а) та зони контакту стружки з передньою поверхнею леза інструменту (б)

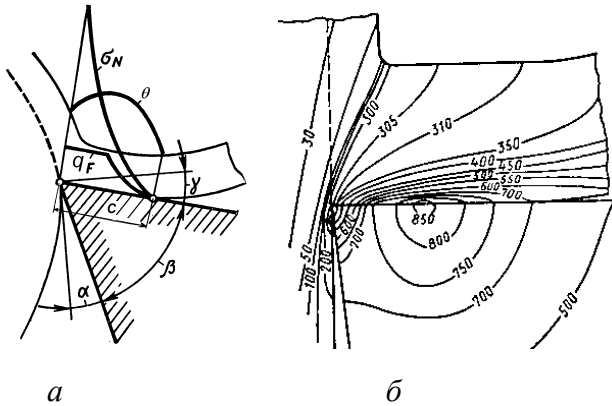


Рисунок 1.20 – Форма епюри дотичних контактних напружень (а) і розподіл температури в зоні контакту стружки з передньою поверхнею леза інструменту (б)

біля різальної кромки інструменту, монотонно спадаючи до нуля в міру віддалення від неї. В області різальної кромки вони можуть досягати в різних умовах $(2-3)\tau_s$, що свідчить про те, що стружка в області різальної кромки перебуває в стані загальної пластичної текучості.

Що стосується епюри дотичних контактних напружень на передній поверхні q_F , то їх на певній ділянці контакту стружки з нею прийнято вважати постійними (рис. 1.20 а) і такими, що дорівнюють межі міцності на зсув матеріалу стружки (приблизно $0,6\tau_s$). За подальшого віддалення від різальної кромки дотичні напруження зменшуються до нуля. У загальному випадку дотичні напруження на передній поверхні пропорційні нормальним в області найбільшого віддалення межу площадки контакту від різальної кромки, де нормальні напруження незначні. У той самий час дотичні напруження не залежать від нормальних напружень в області біля різальної кромки, де нормальні напруження досягають своєї максимальної величини.

На ділянці зовнішнього тертя (зони I та II (частково) на рис. 1.19) дотичні напруження безупинно зменшуються до нуля (рис. 1.20 а). Температура на поверхні інструменту в області його контакту зі стружкою й заготовкою також розподілена нерівномірно (рис. 1.20 а, б), маючи максимум поблизу середини цієї області, тобто $C_1 \approx 0,5C$ (рис. 1.19).

Примітка. Температура поверхневих шарів стружки та інструменту різна в одному й тому самому місці поверхні контакту, оскільки нагрівання зазнають увесь час одні й ті самі шари інструменту, а контактні поверхні стружки й заготовки безупинно оновлюються.

Тому якщо в практичних умовах максимальна температура на поверхні інструменту не повинна перевищувати температуру теплостійкості інструментального матеріалу, то максимальна температура в поверхневих шарах стружки може бути як меншою за неї, так і більшою та навіть досягати температури плавлення оброблюваного матеріалу

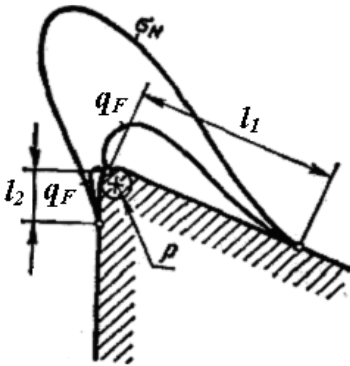


Рисунок 1.21 – Епюри контактних напружень на передній і задній поверхнях леза інструменту

На рисунку 1.21 наведені епюри контактних напружень: нормальних σ_N і дотичних q_F на передній і задній поверхнях леза інструменту з радіусом округлення ρ різального леза, одержані поляризаційно-оптичним методом. Епюра нормальних напружень безперервна для площадок контакту l_1 і l_2 передньої й задньої поверхонь, а епюри дотичних напружень на цих площадках індивідуальні.

Це дало підстави М. М. Зореву описати залежність нормальних σ_N напружень на передній поверхні степеневою функцією:

$$\sigma_N = \sigma_m \cdot \left(\frac{l_1 - x}{l_1} \right)^n, \text{ де } n = 2 \cdot \left\{ \frac{l_1}{a \cdot K_a [\mu + \operatorname{tg}(\psi - \gamma)]} - 1 \right\},$$

$$\sigma_m = q_N \cdot (n + 1),$$

де q_N – середнє контактне навантаження (тиск) на передній поверхні; x – відстань від різальної кромки до розглянутої точки ($0 \leq x \leq l_1$); a – товщина зрізу; K_a – коефіцієнт усадки стружки; γ – передній кут; ψ – кут дії (див. рис. 1.18).

Сучасні уявлення про розподіл напружень на контактних площадках робочих поверхонь леза інструменту наведені на рисунку 1.19 а. У загальному випадку область контакту стружки з передньою поверхнею леза інструменту на довжині площадки контакту 3 можна розділити на пружну (I), перехідну (II) і пластичну (III) зони (рис. 1.19). На ділянці пружного контакту I стружка контактує безпосередньо з передньою поверхнею. Тут здійснюється зовнішнє тертя ковзання, й опір руху стружки визначається силою тертя між тілами, що контактують. На ділянках пластичного контакту III й частково II (частково на ширині площадки контакту C_1) розміщений загальмований шар (застійна зона), у межах якого стружка рухається не по передній поверхні, а по загальмованому шару, опір руху стружки визначається опором зсуву в контактному шарі стружки. На цих ділянках зовнішнє тертя ковзання відсутнє і замінюється «внутрішнім» тертям між окремими шарами стружки. За такої схеми на площадці контакту, який має області пружного й пластичного контактів практично хімічно чистих (ювенільних) поверхонь, в умовах високих температур і тисків різко інтенсифікуються адгезійні (див. підрозд. 0) та дифузійні (див. підрозд. 1.3.1.2) процеси.

Величина площадки контакту C залежить від переднього кута γ , товщини зрізуваного шару a , ступеня деформації стружки, швидкості різання й інших факторів. Для її визначення вико-

ристовуються формули багатьох авторів, серед яких найбільше застосовують модифіковану формулу Н. Г. Абуладзе:

$$C = aK_a^{0.1} \left[K_a (1 - \operatorname{tg} \gamma) + 1/\cos \gamma \right],$$

з якої бачимо, що C зростає за збільшення коефіцієнта усадки стружки K_a , товщини зрізу a зменшується за збільшення пе-

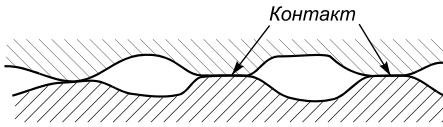


Рисунок 1.22 – Схема контактування двох поверхонь

реднього кута γ . Установлено, що за збільшення кута нахилу різальної кромки λ довжина контакту стружки з передньою поверхнею C також зменшується.

Процес тертя на робочих поверхнях інструменту має як подібні ознаки, так і відмінності із процесом, що виникає за ковзання будь-яких металевих поверхонь.

Щоб зрозуміти відмінності між цими процесами, розглянемо спочатку загальну механіку тертя-ковзання.

У загальному випадку тверді поверхні мають просторові дефекти, які перевищують за розмірами атомні відстані. Під час накладення однієї поверхні на іншу за рахунок того, що контактування відбувається по окремих виступних нерівностях (рис. 1.19 б, 1.22), дійсна площа контакту f_r звичайно становить незначну частку від ідеальної площі f . За збільшення навантаження на з'єднаних поверхнях площа контакту збільшується – спочатку за рахунок пружних деформацій, однак уже за подальшого відносно незначному зростання навантаження деформація нерівностей стає пластичною, і дійсна площа контакту збільшується прямо пропорційно прикладеному навантаженню незалежно від реальної або ідеальної площі поверхонь, що контактують. Таким чином,

$$f_r = \frac{N}{\sigma_T},$$

де N – нормальна сила на передній поверхні; σ_T – межа плинності.

Сила тертя в цьому випадку є силою, необхідною для розподілу або початку пластичного деформування вершин виступів, формуючи площадки фактичного контакту. Із зростанням сили, що діє по нормалі до поверхні, площа контакту на вершинах виступів збільшується пропорційно навантаженню. Тому сила тертя F на передній поверхні (див. рис. 1.18), яка необхідна для початку пластичного деформування виступів на площадках контакту, також зростає прямо пропорційно нормальній силі на передній поверхні N (силі нормального тиску). Їхнє відношення в умовах зовнішнього ковзання є величиною приблизно постійною, і її називають коефіцієнтом тертя ковзання, який розраховується за законом тертя Амонтона:

$$\mu = \frac{F}{N} .$$

Такі уявлення про ковзання, тертя та коефіцієнт тертя прийнятні для розв'язування багатьох практичних задач, у яких напруження на поверхнях малі порівняно з межею плинності матеріалів.

Водночас, коли нормальна сила зростає до величини, за якої фактична площа контакту становить більшу частину номінальної, фактична площа контакту більше не зростає пропорційно навантаженню, тобто в граничному випадку, коли дві поверхні контактують по всій площі, фактична площа контакту вже не залежить від нормальної сили. У цьому випадку сила тертя, що виникає за відносного переміщення поверхонь, дорівнює силі, необхідній для деформування менш жорсткого поверхневого шару по всій площі. Величина цієї сили майже не залежить від нормальної сили, але прямо пропорційна номінальній площі контакту – залежність, прямо протилежна залежності, яка обумовлена класичною теорією тертя. Відомо,

що така схема контакту твердих тіл, які рухаються відносно один одного в умовах, характерних для процесу різання (ювенільно чисті контактувальні поверхні, високі тиск і температура), характерна для переважної більшості видів механічного оброблення й обумовлена характером перебігу різних процесів (механічного руйнування, теплових, адгезійних, дифузійних та ін.), що супроводжують процес тертя леза інструменту зі стружкою і поверхнями на заготовці.

1.3.1.1 Адгезійні процеси під час різання

Як ми вже відзначали, навіть найгладкіші металеві поверхні в субмікроскопічному масштабі є шорсткуватими і під час зіткнення контактують своїми ділянками, що виступають. На цих ділянках локальні тиски стають достатніми для забезпечення пластичної деформації. Унаслідок цієї пластичної деформації оголюються нові поверхні, метали безпосередньо контактують хімічно чистими поверхнями й між ними встановлюються адгезійні зв'язки.

Примітка. Адгезія (від лат. adhaesio – прилипання) – це злипання (схоплювання, зварювання) контактних ділянок твердих тіл, що з'єднуються своїми поверхнями. Адгезія обумовлена міжмолекулярною й міжатомною взаємодією

Авторадіофотограми відносно нерухомих поверхонь під навантаженням, спрямованим нормально до площини поділу, показують, що в тому випадку, коли металеві поверхні притискаються одна до одної, за певних умов можуть утворюватися містки зв'язок (з'єднання) (рис. 1.23 а), які складаються з контактувальних матеріалів (нова формація).

Під час роз'єднання поверхонь ці містки зв'язок можуть руйнуватися або безпосередньо за новою формацією, або з відокремлюванням її з якоїсь із контактувальних поверхонь (рис. 1.23 б). Таким чином, руйнування містків адгезійних зв'язок може супроводжуватися перенесенням з однієї поверхні на іншу металевих часток, величини яких значно більші порівняно з розмірами атомів. Подібні експерименти свідчать про те, що в області контакту завжди утворюються адгезійні зв'язки, які розриваються під час розділення поверхонь. Для виникнення адгезії («містків» міцних металевих зв'язків) необхідно, по-перше, достатнє зближення поверхонь, щоб почали діяти атомні й молекулярні сили і, по-друге, щоб за допомогою пластичної деформації була вилучена поверхнева плівка, що

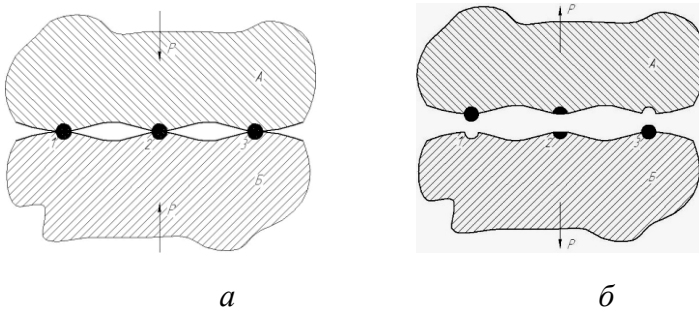


Рисунок 1.23 – Схема утворення та руйнування адгезійних містків зв'язок

складається з окислів і зміцненого (наклепаного) металу, і в результаті цього відбулося стикання чистих металів. Адгезія є результатом утворення інтерметалічних зв'язків між контактувальними тілами і залежить від їхньої здатності утворювати між собою хімічні сполуки й тверді розчини. Чим більше спорідненість (за хімічним складом) контактувальних матеріалів, тим (за інших однакових умов) імовірність адгезії вища.

Час, під час проходження якого частинки оброблюваного матеріалу перебувають у контакті з інструментом у зонах II

(частково) і III (рис. 1.19), за традиційних швидкостей різання становить не більше ніж 3–10 с, що значно менше від часу, необхідного для формування плівок окислів на заново утворених поверхнях стружки й заготовки (різання й обробленої). З іншого боку, механічна взаємодія стружки і, наприклад, поверхні різання, що рухаються щодо передньої та задньої поверхонь лека інструменту, відповідно призводить до руйнування значної частини крихких поверхневих плівок окислів на них.

За низьких температур дійсні адгезійні зв'язки на одиницю площі можуть бути значно меншими, ніж за підвищених температур. За зміни температури змінюється й дійсна межа міцності контактувальних матеріалів. Тому за достатньо високих температур уся площа контакту може бути охоплена адгезійними зв'язками, однак питома сила адгезії $F_n = F_a/S$ (де F_a – абсолютна сила відриву; S – площа поверхні відбитка) виявиться значно меншою, ніж за більш низької температури. Тому адгезійну взаємодію контактувальних тіл прийнято характеризувати коефіцієнтом інтенсивності адгезії K_{ad} , що являє собою питому силу адгезії F_n , віднесено до межі міцності σ_ϵ оброблюваного (випробовуваного) матеріалу:

$$K_{ad} = \frac{F_n}{\sigma_\epsilon}$$

На рисунку 1.24 наведені криві зміни коефіцієнта інтенсивності адгезії K_{ad} залежно від зміни температури, з яких випливає, що для всіх пар спостерігається однаковий характер зміни інтенсивності адгезії.

Зі збільшенням температури спостерігається зростання інтенсивності адгезії, і після температури фазових перетворень спостерігається спад кривих (винятками є пари з металокерамічними твердими сплавами). Фактично спад після досягнення $K_{ad} = 1$ не повинен спостерігатися в тому випадку, якщо немає дифузійної взаємодії контактувальних пар.

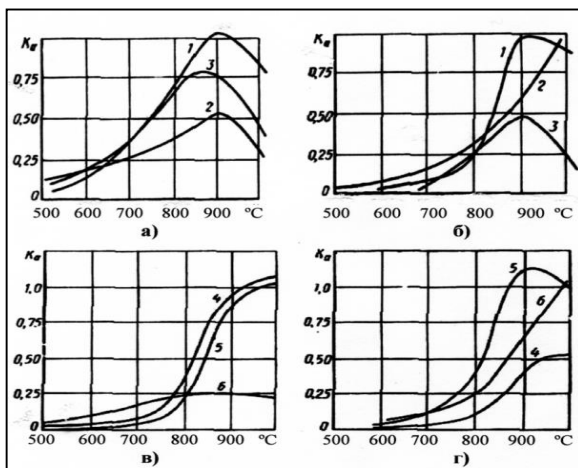


Рисунок 1.24 – Температурні залежності коефіцієнта адгезії корунду (крива 1), кубічного нітриду бору (крива 2) і алмазу (крива 3) до заліза Армко (а) і титану (б); твердих сплавів Т15К6 (в) та ВК8 (г) до сталі 12Х18Н10Т (крива 4), титану (крива 5) і заліза Армко (крива 6)

Однак за контакту алмазу й карбїду кремнію із залізом Армко (технічно чисте залізо) за температури вище за 900 °С відбуваються фазові перетворення й утворення на межі поділу шару зі зміненою структурою, межа міцності якого має більші значення. Тому значення K_{ad} необхідно визначати до температури фазових перетворень. Що ж стосується кубічного нітриду бору й корунду, то у зв'язку з відсутністю фазових перетворень спостерігається збереження значення $K_{ad} = 1$. Рівність одиниці цього відношення природно, тому що якщо за суцільного контакту вся номінальна площа охоплена адгезійними зв'язками, питома сила адгезії повинна дорівнювати межі міцності оброблюваного матеріалу за даної температури.

Необхідно зауважити, що достовірним на наведених сімействах кривих є те, що, починаючи з температури 500 °С, спостерігається тенденція до зростання K_{ad} до температури фазових перетворень $\alpha - \beta$ – титану. Проведені дослідження пока-

зали, що інтенсивність адгезійної взаємодії досліджених матеріалів зі збільшенням температури істотно змінюється. Ці дані також дають певне пояснення явищам адгезійного зношування різальних інструментів (див. підрозд. 1.3.4.2). Наприклад, мала інтенсивність адгезійних зв'язків у парі «залізо Армко – сплав Т15К6» порівняно з парою «залізо Армко – сплав ВК8» свідчить про те, що карбід титану в сплаві Т15К6 є інгібітором адгезійних зв'язків, і тому титано-вольфрамо-кобальтові сплави мають більшу різностійкість порівняно з вольфрамо-кобальтовими сплавами.

Примітка. Інгібітор (від лат. *inhibeo* – затримую) – речовина, що гальмує процес

Відразу можна відзначити, що сплави на основі титано-вольфрамових карбідів не повинні мати особливих переваг із погляду адгезійного зношування під час оброблення сплавів на основі титану.

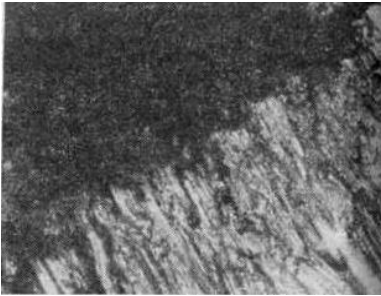


Рисунок 1.25 – Передня поверхня різця після короткочасного різання сталі 18X2H4BA (сталь 18X2H4BA – сталь 40 загартована; $v = 8,3$ мм/с; $a = 0,07$ мм; $b = 4$ мм; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 10^\circ$)

Значний вплив на процес схоплювання чинить застосування змащувальних рідин. У разі контакту твердих металів за наявності змащення перенесення металу зазвичай зменшується, але не завжди усувається повністю.

Під час різання в середовищах води, масел, чотирихлористого вуглецю, різних спиртів і т. д. залежно від властивостей інструментального й оброблюваного матеріалів адгезія може як зменшуватися, так і збільшуватися.

На рисунку 1.25 показана передня поверхня різця із загартованої сталі 40 після короткочасного різання сталі 18X2H4BA в середовищі повітря. Видно прилиплі в результаті адгезії до передньої поверхні частинки оброблюваної сталі.

На рисунку 1.26 наведені знімки кореня стружки під час різання в середовищі бензолу C_6H_6 (а) і в середовищі чотирихлористого вуглецю CCl_4 (б). На рисунку 1.26 а спостерігається інтенсивна пластична деформація контактних шарів: лінії тек-

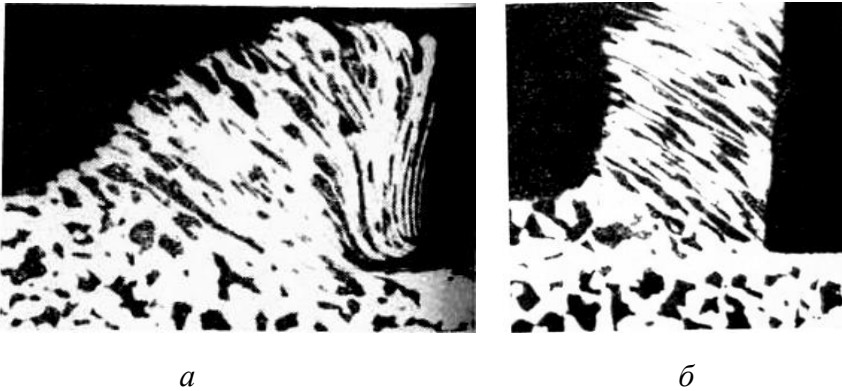


Рисунок 1.26 – Корінь стружки під час різання сталі 20X
у середовищах бензолу (а)
і CCl_4 (б) – (сталь 20X - P18; $v = 13,2$ м/хв; $a = 0,1$ мм; $b = 2$ мм;
 $\gamma = 10^\circ$)

стури контактних шарів стружки викривляються й стають практично паралельними передній поверхні. Під час різання в середовищі CCl_4 лінії текстури в контактних шарах стружки майже не викривляються, що свідчить, що різке зниження як адгезійних зв'язків, так і тертя (рис. 1.26 б).

Подібний вплив на процес адгезії й тертя виявляють і інші змащувальні рідини. Однак в області високих тисків побли-

зу різальної кромки на площі, трохи більшій від перетину зрізуваного шару, змащення не може повністю усунути адгезію.

Існують різні погляди на те, яким чином рідина проникає в зону контактувальних тіл. Найбільш достовірним можна вважати, що рідина проникає між контактними поверхнями внаслідок нещільного контакту завдяки наявності мікро- та субмікровиступів і пор. Для того щоб пересвідчитись у цьому, можна провести такий експеримент. Плексигласовий різець із полірованими поверхнями може різати олово, свинець та інші м'які матеріали. Наносячи краплю пофарбованої води або чотирихлористого вуглецю на поверхню різання (за малих швидкостей), можна помітити, як рідина, швидко всмоктуючись, проникає в контакт і змочує його поверхню. Цей дослід наочно показує, що виступи і дрібні пори на поверхні контакту цілком достатні для проникнення рідини. Чим менша в'язкість рідини, тим швидше вона проникає в контакт. Наприклад, чотирихлористий вуглець і вода швидше проникають у контакт, ніж мастило.

На рисунку 1.27 схематично наведені результати до-

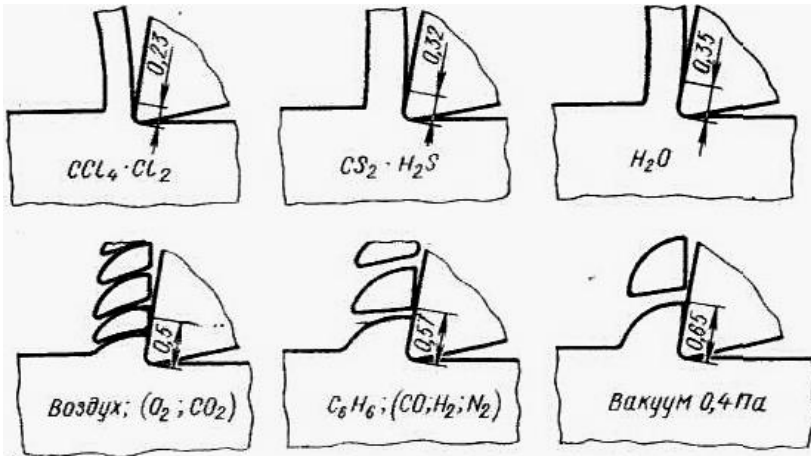


Рисунок 1.27 – Замальовки з мікроспліфів зони контакту під час різання в різних середовищах (сталь 20X - P18;

$$v = 0,2 \text{ мм/з}; a = 0,1 \text{ мм}; \gamma = 10^\circ)$$

слідження процесу різання сталі 20Х у різних рідинах і газоподібних середовищах, які показують, що однаковий і найбільш сильний ефект із зменшення довжини контакту, усадки і сил різання дає застосування чотирихлористого вуглецю й чистого хлору, що мають найбільшу хімічну активність. Однаковий ефект застосування рідини й газу свідчить про те, що основним є створення на контактних поверхнях захисної плівки тим або іншим реагентом унаслідок хімічної реакції.

Найбільш інтенсивна адгезія спостерігається під час різання у вакуумі. Усе це свідчить про те, що зменшення адгезії стружки з інструментом є результатом хімічної взаємодії середовища з ювенільною поверхнею металу. Продукти хімічної взаємодії у вигляді солей, окислів та ін., перебуваючи в процесі різання між оброблюваним металом й інструментом, зменшують адгезію.

Необхідно підкреслити, що не будь-яка рідина зменшує адгезію. Наприклад, бензол, проникаючи в контакт, інтенсифікує адгезію (див. рис. 1.26 а) під час різання сталі, тому що, будучи інертним стосовно сталі, він виключає проникнення хімічно активного кисню повітря в зону контакту і формування захисної окисної плівки.

Адсорбція інертних газів нехтовно мала, тому досліди в середовищі цих газів (гелію, аргону й ін.) рівноцінні дослідам у вакуумі. Ті гази, які інтенсивно реагують із оброблюваним матеріалом і різальним інструментом і утворюють захисні плівки з окислів або солей, знижують адгезію й поліпшують чистоту оброблення (сірководень, хлор, кисень і деякі інші).

Високі контактні тиски, що виникають під час різання, виключають гідродинамічний режим змащення за використання звичайних мастильних матеріалів. Змащення видавлюється, і на поверхнях контакту зберігається лише тонка плівка з декількох молекулярних шарів. Жирні кислоти, реагуючи з металевими поверхнями, утворюють захисну плівку милоподібних сполук, що мають більшу температуру плавлення, ніж жирні кислоти

(порядку 200 °С). Саме здатністю утворювати на контактних поверхнях тверді мастильні плівки й пояснюється перевага жирних кислот перед парафінами й спиртами. Для досягнення ефективного змащення за більш високої температури в змащувальну рідину вводяться добавки, що містять сірку, хлор або те й інше разом. Ці добавки, взаємодіючи з металевою поверхнею, утворюють сульфіди або хлориди, з яких і складаються плівки, що захищають нижчі шари металу від адгезії. Для залізних сплавів сульфіди зберігають свою ефективність до 800 °С, а хлориди – лише до 400 °С. Там, де температура тертя не дуже велика, краще проявляють себе хлоровані добавки.

Значний вплив на змащувальний ефект виявляє швидкість різання. Зі збільшенням швидкості різання адсорбовані на поверхні плівки після руйнування за відносного переміщення, наприклад, стружки і передньої поверхні, не встигають відновлюватися в контактній зоні, умови різання поступово наближаються до умов тертя у вакуумі або в середовищі інертних газів, і інтенсивність адгезії збільшується. Крім того, у точках контакту виникають температурні спалахи, середня температура в зоні тертя підвищується, контактні шари розм'якшуються, виступи і пори в контакті зменшуються або зовсім зникають і з появою суцільного контакту змащення й повітря не проникають у контакт. Тому з підвищенням швидкості різання ефективність змащення і взагалі вплив різних середовищ на адгезійні процеси, а відповідно і на тертя різко знижується.

1.3.1.2 Дифузійні процеси під час різання

Висока температура, інтенсивна адгезія, великі пластичні деформації й високі тиски в зоні контакту леза інструменту зі стружкою і поверхнями на заготовці за високих швидкостей різання повинні істотно сприяти взаємному дифузійному розчиненню компонентів інструментального й оброблюваного матеріалів, що за певного поєднання зазначених факторів може значною мірою впливати на зношування інструменту.

Примітка. Дифузія (від лат. diffusion – поширення, розтікання) – поширення речовини до якого-небудь середовища в напрямку зменшення його концентрації, обумовлене тепловим рухом іонів, атомів, молекул, а також більших частинок

Дифундувати можуть як розчинені в речовині сторонні частинки, так і частинки самої речовини (самодифузія). Якщо в системі підтримується нерівномірний розподіл температури або на систему діють зовнішні сили, наприклад, теплові, електричні, то відбуваються відповідно термодифузія, електродифузія і т. ін.

Дифузія в металах в умовах відносного спокою контактувальних елементів, тобто без їхнього відносного переміщення, вважається досить повільним процесом. Тому може сформуватися думка, що дифузійне взаємне розчинення оброблюваного й інструментального матеріалів навряд чи може бути істотним під час різання, яке характеризується короткочасністю одиничного контакту, і, наприклад, проявлятися в зношуванні інструменту. І дійсно, щоб одержати помітну дифузію атомів за взаємного контактування двох металів, які перебувають у відносному спокої навіть у зазначених умовах, але за кімнатної температури, необхідно кілька місяців. Якщо ж підігріти контактувальні метали до високої температури, то швидкість дифузії може збільшитися в кілька сотень, тисяч і навіть мільйонів разів, але й у цьому разі маса продифундованого металу мізерно мала порівняно з масою матеріалу, що видаляється за той самий час із поверхонь інструменту в результаті зношування. Це пояснюється тим, що основним законом дифузії є так званий параболічний закон збільшення дифузійного шару: початковий період дифузії за такої схеми контактування твердих тіл характеризується досить високою швидкістю розчинення, але з часом швидкість зменшується за законом параболи. Тобто коли контактувальні поверхні знаходяться у відносному спокої, самі продукти дифузійних процесів (сформований із них шар) стають перепорою для подальшого їх перебігу. Під час різання стружка зі зрізаним шаром і знову

утвореними поверхнями на оброблюваній деталі (обробленою і різання) безупинно з великою швидкістю переміщуються щодо поверхонь інструменту (передньої й задньої). Водночас у контакт входять усе нові й нові ювенільно (хімічно) чисті ділянки поверхні оброблюваного матеріалу з відносно хімічно чистими (очищеними від окисних плівок і вторинних структур) поверхнями леза інструменту, й тому швидкість взаємного розчинення матеріалів, що труться, постійно висока. Саме ця особливість процесу різання істотно збільшує швидкість взаємного розчинення одне в одному оброблюваного й інструментального матеріалів, тобто в умовах різання параболічний закон дифузійного розчинення на встигає проявлятися. У цьому разі можна провести аналогію між конвективним теплообміном і дифузійним розчиненням в умовах відносного швидкого переміщення контактувальних елементів, як це має місце в процесі різання матеріалів. Відомо, що швидкість теплопередачі за конвективного теплообміну більш високого порядку, ніж у разі теплопровідності.

Можна припустити, що через малий час контакту інструменту з оброблюваним матеріалом дифузійні шари в умовах різання повинні мати досить малу товщину й у прирізцевій поверхні стружки, і на знову утворених поверхнях заготовки (різання й обробленій), і на робочих поверхнях леза інструменту. Водночас доведено, що товщина дифузійних шарів на поверхні різання й у стружці залежно від елемента, що дифундує, в умовах інтенсивного дифузійного розчинення може обчислюватися десятками й сотнями атомних площин і більше.

На межі зіткнення реагуючих пар металів можливі два види дифузії: гетеродифузія й реактивна дифузія. У першому випадку утвориться твердий розчин із решіткою розчинника. Максимальна концентрація речовини, що дифундує в металі-розчиннику, не може перевищувати граничної концентрації, обумовленої діаграмою стану. У другому випадку може відбутися, незалежно від явища взаємної розчинності, хімічна реакція

з утворенням інтерметалічної сполуки безпосередньо на межі поділу реагуючих металів. Умова для утворення нових фаз за дифузії полягає в тому, що речовини, які беруть участь у цьому процесі, за своєю природою можуть утворити інтерметалічні сполуки. Останнє також визначається діаграмою стану металів, що дифундують.

Інтенсивність перенесення речовини під час гетеродифузії, що визначає насамперед інтенсивність зношування робочих поверхонь леза, визначається граничною розчинністю матеріалу різального інструменту в оброблюваному матеріалі, його концентрацією й швидкістю розчинення.

Під час реактивної дифузії інтенсивність розчинення визначається вмістом елементів інструментального матеріалу в утвореній інтерметалічній фазі й швидкістю хімічної реакції на межі поділу. Дифузія молекули хімічної сполуки в решітку металу неможлива. У метал дифундують атоми, що утворилися в результаті дисоціації цих сполук. Тому за дифузійного розчинення інструментального матеріалу в оброблюваному матеріалі необхідно розглядати дифузію елементів, які входять в інструментальний матеріал, – вуглецю, вольфраму, титану, кобальту та ін., – роздільно.

Водночас необхідно враховувати й той факт, що в багатоконтактних системах у процесі дифузії має місце взаємовплив окремих компонентів на їх розчинність і швидкість дифузії.

У загальному випадку кількість речовини компонента В, виражена в молях маси речовини, яка продифундувала в компонент А, виражається рівнянням

$$dM = -D \frac{dc}{dx} dS d\tau,$$

де D – коефіцієнт дифузії; $\frac{dc}{dx}$ – градієнт концентрації в якій-небудь точці; d – елементарна площа, через яку відбувається дифузія; $d\tau$ – час дифузії.

Цей вираз називають першим законом дифузії і він є рівнянням перенесення речовини. Воно прийнятне до дифузії в будь-якому середовищі – твердому, рідкому й газоподібному. Як бачимо з наведеного рівняння, коефіцієнт дифузії D дорівнює вираженій у молях кількості речовини, що дифундує за 1 с крізь площу 1 м^2 за градієнта концентрації, що дорівнює молю на 1 м, і має розмірність $\text{м}^2/\text{с}$.

Здебільшого для практичних розрахунків закон дифузії виражається таким рівнянням:

$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{dc}{dx} \right),$$

де $\frac{dc}{dx}$ – швидкість зміни концентрації в часі.

Це рівняння називають *другим законом дифузії*.

Якщо перше рівняння визначає швидкість проникнення речовини через одиницю поверхні деякого середовища при стаціонарному стані потоку, тобто коли концентрація в будь-якій узятій точці із часом не змінюється і швидкість проникнення виражається через градієнт концентрації та коефіцієнт дифузії, то друге рівняння визначає накопичення речовини в певній точці середовища як функцію часу, тобто це рівняння належить до нестационарного стану потоку.

З першого рівняння можна знайти швидкість дифузії (швидкість розчинення):

$$q = \frac{dM}{d\tau} = -D \frac{dc}{dx},$$

яка істотно залежить від часу перебігу процесу.

На рисунку 1.28 наведено криві зміни швидкості дифузії за часом за дифузії вольфраму в сталь за температур 1 000, 1 100 і 1 300 °С.

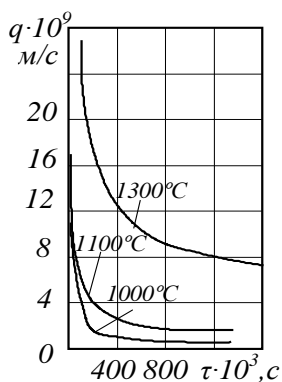


Рисунок 1.28 – Зміна швидкості q розчинення вольфраму в сталі залежно від часу дифузії τ

Особливо висока швидкість розчинення спостерігається за малого часу дифузії, що відповідає тривалості контакту під час різання. Наприклад, якщо порівняти середні швидкості дифузії під час різання, коли $\tau = 10^{-3}$ с, і за дифузійних відпалів, коли $\tau = 36 \cdot 10^3$ с, то їхнє відношення дорівнює $6 \cdot 10^3$. Отже, за законами дифузії швидкість дифузійного розчинення під час різання на кілька порядків вища, ніж за звичайних умов відпалу.

Як уже відмічалось, численними дослідженнями встановлено, що зростання дифузійного прошарку як під час гетеродифузії, так і під час реактивної дифузії залежно від часу за постійної температури відбувається приблизно за параболічним законом:

$$x^2 = 4AD\tau,$$

де x – товщина дифузійного шару в момент часу τ ; A – стала, залежна від концентрації елемента, що дифундує, на глибині x і на поверхні. Можна брати $A \approx 4/\pi$.

Наведене рівняння може бути одержане теоретичним шляхом із закону дифузії Фіка:

$$q = D \frac{\partial c}{\partial x}; \quad \frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}.$$

Важливим параметром процесу дифузії є коефіцієнт дифузії D . Найбільш сильний вплив на коефіцієнт дифузії має температура Θ . Температурна залежність коефіцієнта дифузії має вигляд

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{R\Theta}},$$

де D_0 – передекспоненціальний множник, що формально дорівнює коефіцієнту дифузії за температури, що дорівнює нескінченності, м²/с; Q – енергія активації за дифузії, віднесена до моля твердого розчину. З її величиною пов'язується поняття про розпушення кристалічної ґратки, що полягає в ослабленні міжатомних зв'язків і в збільшенні, в зв'язку з цим, можливості відриву і міграції атомів від своїх положень рівноваги, Дж/моль; R – газова стала, що дорівнює 8,314 Дж/(моль · К).

Значною мірою коефіцієнт дифузії залежить від з'єднання елементів, що дифундують, і розчинника, зокрема, від його хімічного складу, теплового стану системи тощо. Наприклад, у таблиці 1.1 наведені значення коефіцієнта дифузії кобальту, хрому й вольфраму в технічне залізо Армко і сталь У8 за різних температур підігріву.

У загальному випадку величина коефіцієнта дифузії значною мірою залежить від таких факторів:

1 *Енергії активації*, що помітно знижується в міру віддалення елемента, що дифундує, від групи періодичної системи, до якої належить розчинник.

Цей факт пояснюється тим, що викривлення силових полів у кристалі поблизу атома розчиненого металу повинне полегшити процес дифузії.

Викривлення ж силових полів тим сильніше, чим різкіше відрізняється природа розчиненого елемента від природи розчинника, а ця розбіжність і обумовлюється взаємним розміщенням обох елементів у періодичній системі.

2 *Типу твердого розчину.* Дифузія у твердих розчинах впровадження здійснюється простіше, ніж у розчинах заміщення. Атоми елемента, що дифундує, перебувають між вузлами, і в процесі дифузії робота на їхнє виривання з вузлів не витрачується.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнта дифузії за різних температур

Температура Θ , °C	Коефіцієнт дифузії $D \cdot 10^{16}$, м ² /с					
	в залізі			у сталі		
	C	Cr	W	C	Cr	W
700	2,9	–	0,7	0,8	–	0,4
750	5,4	0,5	2,0	2,7	1,4	0,9
775	–	–	–	–	–	2,0
800	10	4,9	7,8	10	2,0	3,8
850	37	19	34	17	–	6,0
875	20	–	16	–	5,7	–
900	24	14	10	17	–	13
950	25	24	19	15	13	7,5
1 000	47	44	14	17	18	15
1 050	24	58	12	24	33	17
1 100	16	23	18	27	39	44
1 150	43	90	69	120	67	190
1 200	170	130	210	340	190	230
1 250	490	870	460	640	370	560

Відповідно до цього енергія активації Q за дифузії під час утворення твердого розчину впровадження менша, ніж під час утворення розчину заміщення в тому самому розчиннику. У твердих розчинах дифузія того компонента, частина вузлів якого в кристалічній ґратці вакантна, здійснюється тим легше, чим більше вакансій у ґратці.

3 *Складу твердого розчину.* Наприклад, збільшення вмісту вуглецю викликає прискорення самодифузії заліза.

4 *Концентрації елемента, що дифундує, у розчиннику.* Ця залежність виражається тим сильніше, чим більше метал, що дифундує, відрізняється (за температурою плавлення, теплою випарювання й ін.) від розчинника.

5 *Кристалічної структури твердого розчину.* Чим компактніші ґратки, тим менша величина коефіцієнта дифузії. Наприклад, у γ -залізі швидкість дифузії менша, ніж в α -залізі.

6 *Величини зерна.* Звичайно дифузія в полікристалі відбувається швидше, ніж у монокристалі. Це обумовлено тим, що дифузія по межах зерен – гранична дифузія – відбувається швидше, ніж крізь товщину кристала – об’ємна дифузія. Через надзвичайно сильну викривленість кристалічних ґраток біля меж зерен знижується енергія активації. Викривленість усіх кристалічних ґраток також впливає на коефіцієнт дифузії.

7 *Неоднорідності напруженого стану,* що у складних системах створює різні потоки дифузії й появу хімічної неоднорідності.

8 *Кристаліграфічного спрямування.* У цьому разі говорять, що дифузія має структурну чутливість.

Для виявлення дифузійних шарів у контактвальних поверхнях під час різання під керівництвом проф. Т. М. Лоладзе проведений комплекс досліджень різних видів оброблення різанням на малих швидкостях (*мікрошвидкостях*) зі штучним підігрівом зони контакту твердосплавного інструменту (одно- і двокарбідного) з оброблюваною деталлю переважно із заліза Армко. У результаті проведених досліджень встановлено,

наприклад, що під час оброблення інструментом із твердого сплаву ВК8 з підігрівом до 800 °С на мікрошліфах коренів стружок не виявлявся який-небудь дифузійний шар. На рисунку

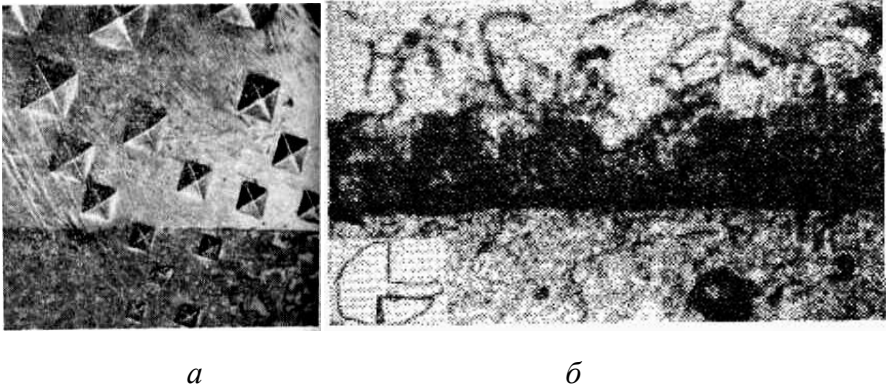


Рисунок 1.29 – Зміна мікротвердості в контактних шарах стружки під час різання з підігрівом (залізо Армко-ВК8; $v = 0,22$ мм/з; $b = 1,5$ мм; $a = 0,25$ мм; $\theta \approx 1\ 100$ °С; $\tau = 9$ с)

ку 1.29 а показана зона контакту по передній поверхні за температури підігріву зрізуваного шару трохи вище ніж 1 100 °С: видно, що твердість шару, який безпосередньо примикає до межі контакту, є найбільшою й поступово за віддалення від межі поділу вглиб стружки зменшується. Зміна мікротвердості контактних шарів заліза на відстані x від поверхні розділення наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Зміна мікротвердості за глибиною поверхневого шару

X , мкм	3,65	4,9	9,8	23	34	36,6	41,5	57,7	61
Мікротвердість, ГПа	8,0	4,5	2,9	1,5	1,2	1,0	0,9	1,0	1,0

Температура 1 100 °С значно перевищує температуру рекристалізації і відпалу заліза. Тому збільшення твердості

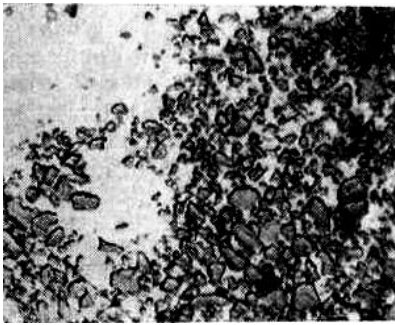


Рисунок 1.30 – Зона контакту передньої поверхні під час різання з підігрівом (косий зріз під кутом $\zeta = 2^\circ$)

(рис. 1.29 б), так і в місці виходу стружки з контакту, а також і в самій стружці становить 20–30 мкм. Очевидно, цементация заліза відбувається внаслідок дифузії вуглецю із твердого сплаву в γ -залізо.

На рисунку 1.30 чітко спостерігається розчинення карбідів твердого сплаву в залізі. Зафіксовано стадії розчинення карбідів: деякі карбіди встигли розчинитися і їх видно на мікросхліфі у вигляді окремих точок, деякі розширилися частково або перебувають у початковій стадії розчинення. Аналогічні явища спостерігаються й під час різання на мікросхвидкостях заліза

(рис. 1.29 а) не може бути результатом наклепу, а є наслідком термохімічних процесів, що відбуваються між твердим сплавом і залізом у період різання і подальшого охолодження. Травлення шліфа підтверджує це припущення: чітко виявляється наявність цементованого вуглецем шару заліза. Незважаючи на малий час різання (9 с), товщина науглецьованого шару як біля самої різальної кромки

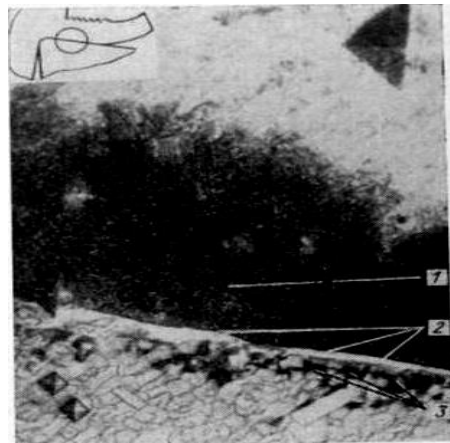


Рисунок 1.31 – Зона контакту передньої поверхні під час різання заліза з підігрівом (залізо Армко-ВК8;
 $v = 0,22$ мм/с;
 $b = 1,5$ мм; $a = 0,25$ мм;
 $\theta \approx 1200$ °С; $\tau = 16$ с)

двокарбідним твердим сплавом T15K6.

На рисунку 1.31 наведено мікрофотографію зони контакту передньої поверхні (~ 1 200 °C) зі стружкою. Чітко видно наявність структури науглецьованого шару 1. Тут також чітко виявляється білий дифузійний шар 2 і потемнілі ділянки твердого сплаву, що свідчать про проникнення в нього заліза. Експериментально доведено, що залізо може проникати у твердий сплав на глибину до 25 мкм і більше, тобто із твердого сплаву вуглець, вольфрам і кобальт дифундують у залізо, а залізо проникає у твердий сплав, причому проникнення вольфраму в залізо більше, ніж заліза у твердий сплав.

На рисунку 1.32 наведено знімок зони контакту після 16 с різання з підігрівом. За температури підігріву 1 100–1 200 °C, крім науглецьованого шару, біля самої межі поділу виявлено дифузійний шар товщиною 2–3 мкм у вигляді тонкого білого прошарку, який не травиться азотною кислотою. Під цим шаром на поверхні інструменту також спостерігаються окремі темні ділянки. Поява декількох дифузійних прошарків пов'язана з реакцією на ці процеси таких багатокомпонентних систем, як система «твердий сплав – залізо». Застосування косоного зрізу під малим кутом ($\zeta = 2\text{--}5^\circ$) дає можливість виявити картину взаємодії реагуючих пар на межі поділу. Доведено, що білий дифузійний шар являє собою інтерметалічну фазу. Сталість концентрації вольфраму й заліза в темному дифузійному шарі 2 свідчить про те, що цей шар складається з однієї або декількох відособлених фаз. Значна концентрація заліза в цьому шарі є ознакою того, що дифузія заліза у твердий сплав відіграє істотну роль у структурних перетвореннях поверхневих шарів твердого сплаву.

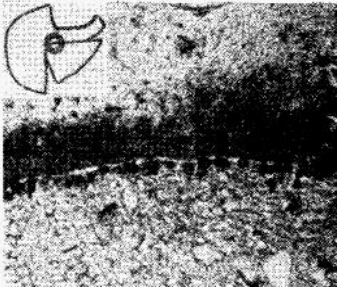


Рисунок 1.32 – Зона контакту біля межі поділу під час різання з підгрівом (залізо Армко-ВК8; $v = 0,22$ мм/с; $b = 1,5$ мм; $a = 0,2$ мм; $\theta \approx 1100$ °С; $\tau = 16$ с)

На підставі металографічного дослідження дифузійних шарів, вимірювання їхньої твердості й рентгеноструктурного аналізу обробленої поверхні можна зробити висновок, що на вищенаведених знімках темний шар у залізі є науглецьованим шаром, що являє собою твердий розчин вуглецю в γ -залізі. Значно більша товщина цього шару порівняно з іншими дифузійними шарами пояснюється рухливістю атомів вуглецю, які швидше від вольфраму, кобальту і титану дифундують у залізо і за той самий проміжок часу проникають на значно більшу глибину. Висока

твердість дифузійних шарів викликана загартуванням за швидкого охолодження зони контакту в момент припинення різання. Структура залежно від умов охолодження складається з мартенситу й залишкового аустеніту, а за більш повільного охолодження – з бейніту, трооститу, троосто-сорбіту та ін.

Білий шар, що не травиться, утворений за цементації заліза однокарбідним твердим сплавом типу ВК, є залізо-вольфрамівим карбідом. Між білим шаром і залізом є шар твердого розчину вольфраму, вуглецю й кобальту в γ -Fe – γ -фаза. За цементації заліза двокарбідним твердим сплавом ТК цей шар є складним залізо-вольфрамо-титановим карбідом, і над ним перебуває шар твердого розчину.

Характер дифузійного розчинення поверхонь леза інструменту, оснащеного твердим сплавом, у процесі мікрорізання сталей із підгрівом до високих температур аналогічний характеру дифузійного розчинення під час різання заліза з підгрівом. Досліди проводили зі зразками зі сталей 10, Ст. 3, 40, У7, 18Х2Н4ВА та ін. За температур підгріву вище ніж 900–950 °С

відбувається помітна дифузія компонентів твердого сплаву в сталь. Утворюється науглецьований шар сталі і під ним дифузійний шар твердого розчину вольфраму й вуглецю в γ -Fe. Відбуваються також знеуглецювання й структурні перетворення у твердому сплаві. Хімічний склад сталі впливає на швидкість розчинення компонентів твердого сплаву та на його знеуглецювання. Збільшення вуглецю в сталі, наприклад, до 0,8–1,2 %, знижує швидкість знеуглецювання твердого сплаву й трохи збільшує швидкість розчинення вольфраму. Всі досліджені марки сталей за високих температур різання (1 100–1 200 °C) навіть на мікрошвидкостях викликають катастрофічне зношування інструменту. Спостерігається руйнування шарів інструменту по задній поверхні. Стійкість інструменту – не більше ніж 2–6 хв. Різка зниження стійкості за підвищення температури від 950 °C до 1 250 °C і більше пояснюється інтенсифікацією дифузійного розчинення й структурних перетворень у твердому сплаві.

Цікавими є дослідження різання з підігрівом карбіднеутворювальних металів (цинку, міді, частково нікелю і кобальту), а також тугоплавких карбідоутворюваних металів (хрому, ванадію, молібдену, титану, цирконію та ін.). Досліди, проведені під час різання нікелю, титану і цирконію, показали, що дифузія компонентів стандартних твердих сплавів у ці оброблювані матеріали має меншу швидкість, ніж під час різання сталі. Наприклад, вимірювання твердості в контактних зонах і травлення шліфів не виявили дифузії компонентів твердого сплаву в нікель до температури 1 100 °C, що свідчить про те, що значення коефіцієнта дифузії вольфраму в нікель менша, ніж для заліза.

Усі попередні досліди з вивчення дифузійних процесів під час різання на малих швидкостях зі штучним підігрівом представляли імітацію реального процесу.

Під час різання матеріалів на високих швидкостях без попереднього підігріву навантажувальні напруження і температурне поле відрізняються від різання на мікрошвидкостях зі

штучним підігрівом. Водночас експериментально доведено, що ці відмінності не викликають якісної зміни процесу взаємодії реагуючих пар, якщо температури в зоні контакту будуть близькими до зазначених у проведених дослідженнях. Кількісні зміни, пов'язані зі зменшенням часу контакту, проявляються лише в зміні товщини i , мабуть, у характері дифузійних шарів. Насичення розчинника на межі поділу елементом, що дифундує, очевидно, не встигає відбуватися повністю, так само як не встигають утворюватися й інтерметалічні сполуки.

На рисунку 1.33 наведено зону контакту стружки з передньою поверхнею під час оброблення сталі 40 сплавом ВК8. На межі поділу видно розчинення карбідів і науглецьований шар 1 сталі у вигляді темної смуги. Характерно, що білий шар під час оброблення на зазначеному режимі виявити не вдалося. Очевидно, для насичення дифузійного шару вольфрамом у кількості, що відповідає стехіометричному складу фази Fe_2W_2C , часу занадто мало. Дифузійний шар розчину вольфраму в залізі також не виявлений.

1.3.1.3 Поняття про середній коефіцієнт тертя

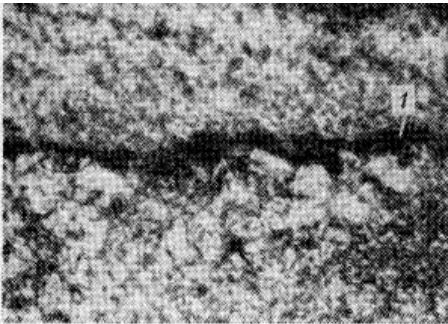


Рисунок 1.33 – Зона контакту передньої поверхні під час різання сталі (косий зріз $\zeta = 5-6^\circ$; сталь 40 - ВК8; $v = 230$ м/хв; $t = 1,2$ мм; $S = 2,17$ мм/об; $L = 9,5$ м; $\gamma = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 20^\circ$; $\lambda = 0^\circ$)

Численними дослідженнями контактної зони під час різання встановлено, що на різних її ділянках (див. рис. 1.19 б) є умови як для зовнішнього тертя (ділянка I), так і зварювання й внутрішнього зсуву (ділянка III) та перехідної ділянки II, де ці умови існують одночасно. За цих умов переміщення стружки по передній поверхні леза ін-

струменту не може бути адекватно описане із застосуванням термінів «ковзання» і «тертя» у їхньому звичайному розумінні. Традиційне поняття коефіцієнта тертя ковзання не придатне для розгляду взаємозв'язку між силами, що виникають у процесі різання, з двох причин: по-перше, немає простої залежності між силами, нормальними і паралельними поверхні лека, і, по-друге, сила, паралельна поверхні лека, залежить від площі контакту, що є дуже важливим параметром процесу різання металу. Умови, за яких відбувається зчеплення або з'єднання двох контактних поверхонь, розглядаються під час різання як умови схоплювання (адгезії) на відміну від умов ковзання на поверхні поділу двох контактувальних тіл для переважної більшості пар ковзання у вузлах тертя різних конструкцій машин.

Дуже часто в теорії різання (для спрощення) прийнято вважати, що поверхня тертя на передній поверхні лека складається не із трьох ділянок, як показано на рисунку 1.19, а із двох ділянок (рис. 1.34) загальною шириною $l = BD$: ділянки 1 – ВЕСF лише пластичного контакту шириною $l_0 = BC$ і ділянки 2 – ЕНДКFC лише пружного контакту, де зазвичай контакт переривчастий.

На ділянці 1 розміщений загальмований шар, у межах якого стружка рухається не по передній поверхні, а по загальмованому (привареному) шару, і опір переміщенню стружки

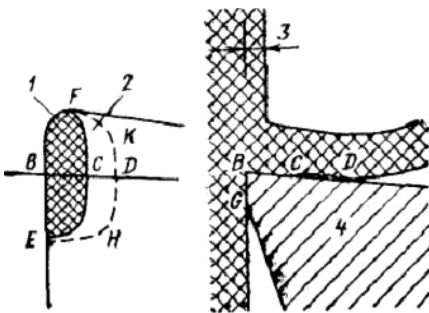


Рисунок 1.34 – Спрощена схема контакту між стружкою та передньою поверхнею

визначається опором зсуву в контактних шарах стружки з урахуванням температури цих шарів. На цій ділянці зовнішнє тертя ковзання відсутнє і замінюється більш енергетично вигідним – «внутрішнім» тертям між окремими шарами стружки. На ділянці 2 стружка контактує в умовах зовнішнього тертя ковзання, і опір руху

стружки визначається силою тертя між стружкою й передньою поверхнею інструменту. Відношення $\frac{l_0}{l}$ під час оброблення звичайних конструкційних матеріалів найчастіше становить 0,5 і не перевищує 0,7. Однак за певних умов довжина пластичного контакту може дорівнювати довжині загального контакту, тобто настане наче «герметизація» зони різання. Таке припущення підтверджують досліди з різання у вакуумі. У зв'язку з відсутністю достатньої кількості складових парогазової фази по довжині контакту взаємодіють очищена від окисних плівок і вторинних структур поверхня інструменту і ювенільна поверхня стружки. У результаті контактну поверхню інструменту по всій довжині покриває суцільний шар оброблюваного матеріалу.

Навпаки, за дуже малих швидкостей із застосуванням мастильно-охолодної рідини (МОР) пластичний контакт практично відсутній. Результати, одержані під час точіння сталі 12Х18Н10Т зі швидкостями, меншими за 1 м/хв, показали, що, дійсно, застосування МОР приводить до його ліквідації під час зменшення довжини загального контакту в 1,5–2,5 раза.

Товщина загальмованого шару лінійно залежить від довжини пластичного контакту l_0 (рис. 1.35). Це можна пояснити тим, що зі збільшенням довжини пластичного контакту відповідно зростає час проходження стружки через цю область і, як наслідок, об'єм металу, підданого деформації. Експериментально встановлено визначальний вплив на контактні процеси перехідної зони II (див. рис. 1.19 а), де існує рівновага між напруженнями зсуву внутрішніх шарів стружки й міцністю на зріз адгезійних зв'язків між стружкою й матеріалом інструменту. Вплив будь-якого фактора процесу різання миттєво призводить до порушення цієї рівноваги, переміщення перехідної зони в той або інший бік, зміни довжини контактної площадки, а потім і всіх параметрів, із нею пов'язаних.

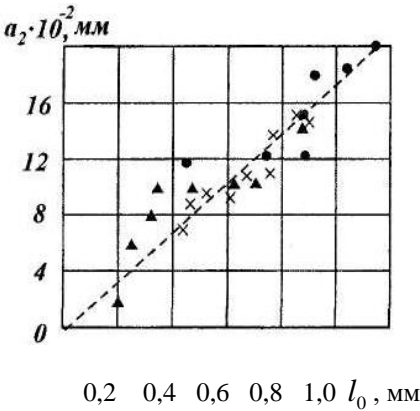


Рисунок 1.35 – Залежність товщини пластичної зони a_2 від довжини пластичного контакту під час точіння сталі 12Х18Н10Т: $S = 0,11-0,31$ мм/об; $V = 10-150$ м/хв; ● – без МОР; ▲ – сульфозфрезол; + – рідина НДІАТ

Необхідно відзначити, що коефіцієнт тертя, що розраховується для переважної більшості пар ковзання у вузлах тертя різних конструкцій машин за законом тертя Амонтона, відповідно до якого коефіцієнт тертя ковзання є константою контактувальних пар, який залежить від природи й стану тертьових поверхонь, під час різання лише умовно може вважатися коефіцієнтом тертя ковзання. Він мало або зовсім не залежить від розмірів площадки контакту й швидкості відносного переміщення. У той

самий час тертя на контактних ділянках поверхонь леза інструменту в умовах різання, особливо біля різальної кромки, можна вважати переважно тертям ювенільних поверхонь, яке характеризується відносно більшим коефіцієнтом тертя, величина якого залежно від властивостей контактувальних матеріалів (оброблюваного та інструментального) може перебувати в межах від 0,8 до 6 і більше (коефіцієнт тертя окиснених поверхонь становить 0,4–0,8). Тому коефіцієнт тертя під час різання, який прийнято називати *середнім коефіцієнтом тертя μ* , для пари «оброблюваний – інструментальний» матеріали дуже сильно реагує на зміну умов різання (товщини зрізуваного шару, швидкості різання, переднього кута, застосовуваної ЗОТС тощо), збільшуючись або зменшуючись за зміни зазначених факторів у широких межах.

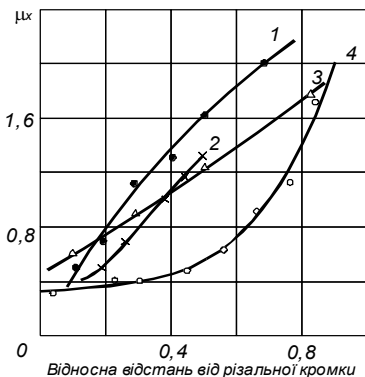


Рисунок 1.36 – Графіки зміни коефіцієнта тертя μ_x залежно від відстані різальної кромки, мм, за даними різних авторів:

- 1 – М. Ф. Полетики й Х. Утешева;
- 2 – Г. С. Андреева й М. Заварцевої;
- 3 – В. Катвинкеля;
- 4 – Х. Такеяма й С. Усуї

коефіцієнтом внутрішнього тертя за пластичної плинності (текучості) матеріалу, ні з коефіцієнтом зовнішнього тертя. Відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя сила тертя виражається залежністю

$$F = \mu_0(N + N_0) = \mu_0 N + \mu_0 N_0,$$

де N – нормальна сила; $N_0 = p_0 f_r$ – рівнодіючих сил молекулярного притягання між тертьовими поверхнями (p_0 – сила молекулярного притягання, що діє на одиниці площі дійсного контакту (див. рис. 1.22 та 1.53); f_r – площа істинного контакту дотичних тіл; μ_0 – «істинний» коефіцієнт тертя, що залежить від молекулярно-атомної шорсткості тертьових поверхонь.

Величина середніх коефіцієнтів тертя під час різання доходить до дуже високих значень (1,2–2 і більше (рис. 1.36)), не властивих навіть сухому тертю ковзання. Таким чином, середній коефіцієнт тертя під час різання ні за величиною, ні за фізичним змістом, ні за закономірностями зміни не збігається з коефіцієнтом зовнішнього тертя і не є константою тертьових пар.

Специфічне поведіння коефіцієнта тертя під час різання пов'язане із двоякою природою тертя на передній поверхні. Через наявність двох ділянок тертя (пластичного й пружного контакту) середній коефіцієнт тертя не можна ототожнювати ні з

1.3.1.4 Адгезійні процеси під час різання та їхній вплив на середній коефіцієнт тертя

Якщо прийняти частину сили тертя, обумовленої дією сил адгезії між тертьовими поверхнями, яка залежить від умов тертя $\mu_0 N_0 = A$, можна записати

$$F = \mu_0 N + A.$$

У цьому випадку, якщо прийняти середній коефіцієнт тертя під час різання μ_x як відношення середньої сили тертя F до середньої нормальної сили N , він буде дорівнювати

$$\mu_x = \mu_0 + \frac{A}{N}.$$

Оскільки $A = \bar{\tau}_N Cb$; $N = \bar{\sigma}_N Cb$, то

$$\mu_x = \mu_0 + \frac{\bar{\tau}_N}{\bar{\sigma}_N}.$$

Відношення $\frac{\bar{\tau}_N}{\bar{\sigma}_N}$ середніх контактних дотичного $\bar{\tau}_N$ й нормального $\bar{\sigma}_N$ напружень називають адгезійною складовою μ_a середнього коефіцієнта тертя μ .

Якщо взяти

$$\frac{\bar{\tau}_N}{\bar{\sigma}_N} = \mu_a,$$

можна записати, що

$$\mu = \mu_0 + \mu_a.$$

Необхідно мати на увазі те, що під час різання має місце контакт поверхонь із розвиненим рельєфом (див. рис. 1.19 б та 1.22), що супроводжується постійно змінюваними великими дійсними тисками p (рис. 1.37), що супроводжуються значним зростанням фактичних нормальних напружень, що можуть сягати межі міцності контактувальних матеріалів σ_s , а відповідно і фактичних дотичних напружень τ_s і зміцненням контактних ділянок. У результаті цього під час тертя мікроступи можуть руйнуватися, збільшуючи спротив процесу ковзання. Тобто коефіцієнт зовнішнього тертя (механічна складова) під час різання, по-перше, є більшим, ніж під час тертя в більшості вузлів машин, а, по-друге, також є величиною, змінною і залежною не лише від нормальних напружень σ_n , а й від дійсних дотичних напружень τ_s . Механічну складову середнього коефіцієнта тертя під час різання називають деформаційною складовою μ_δ . Зі збільшенням зміцнення контактної поверхні стружки (за інших рівних умов) фактична площа контакту буде зменшуватися, а отже, будуть зростати фактичні нормальні напруження та коефіцієнт μ_δ . За знеміцнення необхідно очікувати на зворотний процес.

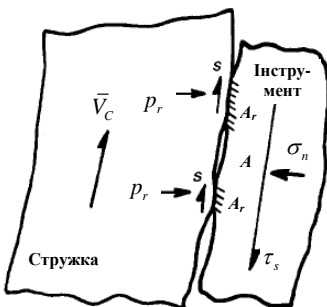


Рисунок 1.37 – Взаємодія поверхонь стружки та інструменту

Таким чином, середній коефіцієнт тертя під час різання складається, на відміну від прийнятих у деталях машин моделей тертя, зі змінних у часі деформаційної μ_δ і адгезійної μ_a складових:

$$\mu = \mu_\delta + \mu_a.$$

Саме через ці складові коефіцієнт μ_x реагує на зміну умов різання: товщини зрізуваного шару, швидкості різання, переднього кута та ін., і особливо тих, що змінюють температуру різання, яка значно впливає на співвідношення між цими складовими. За відносно невеликих температур (до 400 °С) деформаційна й адгезійна складові майже рівнозначні (рис. 1.38). Водночас за цих температур вплив деформаційної складової дотичних напружень τ_d на величину середнього коефіцієнта тертя зменшується, а адгезійної τ_a зростає, що пояснює деяке його збільшення підвищенням швидкості різання в діапазоні тих швидкостей різання, за яких має місце наростоутворення (див. рис. 1.44). За подальшого підвищення температури різання деформаційна складова зменшується, але її вплив на величину середнього коефіцієнта тертя збільшується, про що свідчить його зменшення в діапазоні температур 400–800 °С. За підвищення температури різання вище від 800 °С деформаційна й адгезійна складові, а відповідно і величина середнього коефіцієнта тертя зменшуються.

Необхідно зазначити, що величина середнього

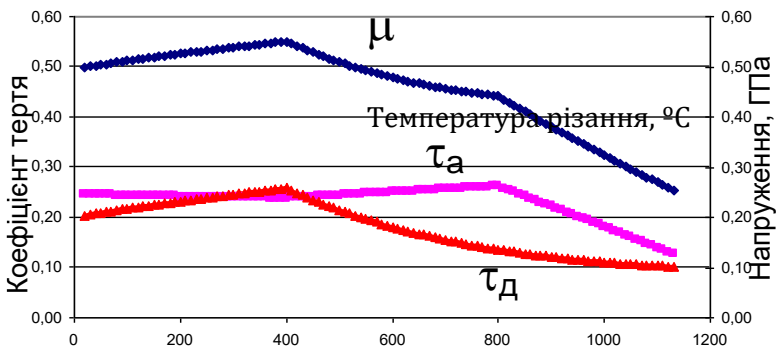


Рисунок 1.38 – Зміна співвідношення між адгезійною τ_a та деформаційною τ_d складовими дотичних напружень і середнього коефіцієнта тертя μ зі зміною температури різання:

Сталь 45 – Т15К6; $V = 150$ м/хв; $a = 0,2$ мм

коефіцієнта тертя для пари «стружка – передня поверхня» значною мірою залежить від здатності оброблюваного та інструментального матеріалів до адгезійної взаємодії. Утворення інтерметалічних зв'язків між стружкою та інструментом прямо залежить від здатності контактувальних матеріалів утворювати між собою хімічні сполуки й тверді розчини. Чим сильніше інтерметалічні зв'язки, що виникають у результаті дії сил адгезії між стружкою й інструментом, тим більший коефіцієнт μ_a і відповідно середній коефіцієнт тертя μ . З підвищенням механічних властивостей оброблюваного матеріалу одночасно зростають і середні нормальні й середні дотичні контактні напруження, тому за постійної температури середній коефіцієнт тертя змінюється порівняно мало. Наприклад, під час різання без мастильно-охолодної рідини за $\gamma = 20^\circ$, $a = 0,15$ мм і $v = 0,2$ м/хв середні коефіцієнти тертя для таких різних матеріалів, як мідь, сталі 10, 20Х, 1Х13 та Х18Н9Т коливаються в межах 0,76–0,7.

Інтенсивність адгезійного схоплювання інструментального матеріалу з оброблюваним багато в чому визначається здатністю першого до утворення на ньому під дією кисню повітря окисних плівок, що перешкоджають схоплюванню. Для інструментальних матеріалів, схильних до утворення більш міцних окисних плівок, коефіцієнт адгезійного тертя μ_a і середній коефіцієнт тертя менший. У зв'язку з цим середній коефіцієнт тертя для однокарбідних сплавів більший, ніж для двокарбідних, а для швидкорізальної сталі більший, ніж для однокарбідних сплавів. Зі збільшенням у твердому сплаві вмісту карбідів титану середній коефіцієнт тертя зменшується. Найменший коефіцієнт тертя для кубічного нітриду бору (КНБ) і алмазу.

1.3.1.5 Вплив на середній коефіцієнт тертя мастильно-охолодного середовища

На величину середнього коефіцієнта тертя і його складових, крім механічних і теплофізичних властивостей оброблюваного й інструментального матеріалів, значно впливають застосовуване мастильно-охолодне технологічне середовище (МОТС), передній кут інструменту, товщина зрізуваного шару (подача, головний кут у плані), швидкість різання тощо.

Вплив технологічного середовища (газоподібного, рідкого або твердого) на силу опору ковзанню на контактних поверхнях неоднозначний. З одного боку, повітря або інше газоподібне середовище досить легко проникає на площадку контакту і може призводити: а) до обмеження зон схоплювання (адгезії) незалежно від властивостей оброблюваного й інструментального матеріалів, а також режимів різання; б) до зменшення коефіцієнта тертя, особливо в зонах I і II (див. див. рис. 1.19), за рахунок утворення окисних плівок; в) до активації (під час оброблення, наприклад, титанових сплавів) або, навпаки, придушення (під час оброблення нержавіючої сталі) адгезійних процесів. З іншого боку, рідкому мастильно-охолодному технологічному середовищу важко проникати безпосередньо в зону щільного контакту тертьових поверхонь (див. рис. 1.19, зони II й III), особливо за швидкостей різання більше ніж 60 м/хв, і її вплив позначається лише за рахунок зменшення тертя в зоні I пружного контакту і відповідно зменшення температури різання.

І водночас, незважаючи на дуже великий тиск у зоні контакту стружки і передньої поверхні, навколишнє середовище й мастильно-охолодна рідина можуть усе ж таки проникнути на більшу частину площадки контакту. Пояснюється це низкою обставин. Передня поверхня інструменту після заточення і поверхня стружки покриті нерівностями, у результаті цього між ними немає суцільного контакту (див. рис. 1.19 б). Свіжоутворена хімічно чиста (ювенільна) контактна поверхня стружки має дуже високу поверхневу й хімічну активність, що сприяє мит-

тевому проникненню під стружку мастильно-охолодної рідини або інших факторів навколишнього середовища. У результаті цього на частині площадки контакту утворюється граничний шар змащення або плівки окислів, нітридів, гідридів і т. ін., і встановлюється режим напівсухого тертя. Граничний мастильний шар 1 (рис. 1.39) повністю або частково усуває дію сил адгезії, і опір руху стружки по передній поверхні обумовлюється не механічними властивостями оброблюваного матеріалу, а властивостями мастильно-охолодної рідини (МОР) або утвореної

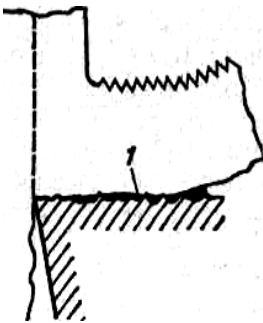


Рисунок 1.39 – Граничний мастильний шар на частині площі контакту стружки з передньою поверхнею

хімічної сполуки. Частинки МОР насамперед проникають у ту частину площадки контакту, де нормальні напруження невеликі, і тим самим переміщують ділянку пластичного контакту ближче до леза інструменту, одночасно зменшуючи і ширину площадки контакту.

За природою активності МОР можна розділити на дві групи: хімічно активні (наприклад, вода, чотирихлористий вуглець та ін.) і поверхнево-активні (наприклад, мінеральне масло, олеїнова кислота, етиловий спирт та ін.). Хімічно активні рідини, вступаючи в хімічні реакції з матеріалами стружки та інструменту, утворюють на площадці контакту проміжний шар із хімічних сполук. Поверхнево активні рідини утворюють на площадці контакту проміжний мастильний шар. Застосування обох груп рідин знижує середній коефіцієнт тертя, але більший ефект дають хімічно активні рідини. Під час різання із застосуванням хімічно активних мастильно-охолодних рідин адгезійна взаємодія між стружкою й інструментом практично відсутня, тобто адгезійна складова наближається до нуля, середній коефіцієнт тертя стає постійним і незалежним від умов різання. За підвищення температури на передній поверхні й середнього

нормального контактного напруження ефект від застосування мастильно-охолодної рідини знижується, що супроводжується більшенням величини середнього коефіцієнту тертя.

Якщо різання виконується із МОР з утворенням граничного мастильного шару, який перешкоджає утворенню інтерметалічних сполук, і загальмований шар на передній поверхні відсутній (тобто $\mu_a = 0$ й $\mu = \mu_0$), то вся площадка контакту може складатися з однієї ділянки пружного контакту стружки з передньою поверхнею. У цьому разі тертя між стружкою й передньою поверхнею стає зовнішнім кінетичним тертям, що підлягає закону тертя Амонтона, де середній коефіцієнт тертя не залежить від σ_N , будучи константою для тертьової пари. Тому середній коефіцієнт тертя в цих умовах майже не залежить ні від переднього кута, ні від товщини зрізуваного шару.

Якщо утворюваний загальмований шар охоплює всю ширину площадки контакту, то зовнішнього тертя немає і середній коефіцієнт тертя буде характеризувати процеси пластичної деформації, що відбуваються в контактному шарі стружки (тобто $\mu_0 = 0 + \mu_a$ і $\mu = \mu_a$). Опір руху стружки в цьому випадку буде визначатися величиною дотичних напружень у загальмованому шарі, що дорівнює або пропорційній межі плинності матеріалу стружки на зсув, тобто величиною, приблизно сталій. Тоді, прийнявши у формулі адгезійної складової $\mu_a \overline{\tau_N} = \text{const}$, одержимо вираз для визначення середнього коефіцієнта тертя за наявності загальмованого шару у вигляді

$$\mu = \mu_a = \frac{\text{const}}{\sigma_N}.$$

З виразу бачимо, що зростання середніх нормальних контактних напружень зменшує середній коефіцієнт тертя.

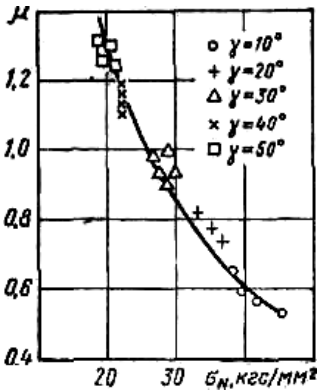


Рисунок 1.40 – Вплив середнього нормального напруження на середній коефіцієнт тертя за вільного різання в повітрі (сталь 20X; $b = 10$ мм; $v = 0,7$ м/хв)

Як відзначалося вище, під час різання здебільшого має місце змішаний контакт: пружний і пластичний. Тому вплив $\overline{\sigma_N}$ на μ повинен бути менш сильним, ніж у випадку повної відсутності пружного контакту. Але й у цьому випадку встановлена закономірність між $\overline{\sigma_N}$ і μ зберігається (рис. 1.40).

Експериментально встановлено, що за збільшення товщини зрізаного шару і зменшення переднього кута, що викликає зростання середніх нормальних контактних напружень, середній коефіцієнт тертя зменшується.

1.3.1.6 Наростотворення під час різання і його вплив на контактні процеси на лезі інструменту

Утворенню і збільшенню розмірів загальмованого шару значною мірою сприяє наявність застійної зони перед різальною кромкою залежно від величини її радіуса округлення ρ (рис. 1.41).

Наявність застійної зони в області різальної кромки обумовлено зменшенням швидкості ковзання в області округлення різальної кромки через зміну напрямку векторів швидкостей частинок оброблюваного матеріалу (рис. 1.41) і схоплюванням (адгезією) матеріалів зрізаного шару і леза інструменту. Чим більший радіус округлення різальної кромки ρ і сила адгезії



Рисунок 1.41 – Застійна зона в області різальної кромки

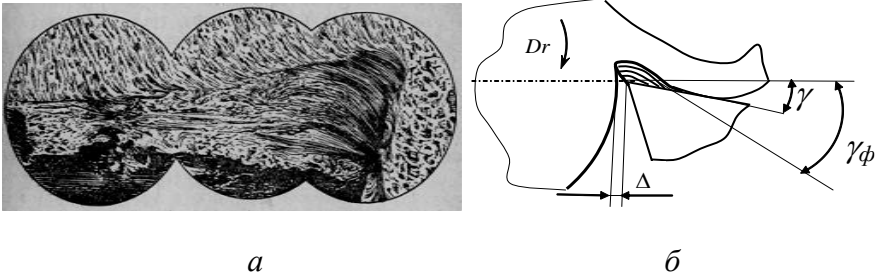


Рисунок 1.42 – Наріст під час різання

зійного зчеплення і вища здатність оброблюваного матеріалу до зміцнення, тим більше геометричні розміри застійної зони, що за певних умов може сформуватися у вигляді клинчастого тіла (рис. 1.42 а) зі зміцненого оброблюваного матеріалу, традиційно названого наростом, що має «шарувату» структуру (рис. 1.42) і підвищену твердість (у двічі – тричі вище від твердості матеріалу, з якого він утворений), що змінює геометричні параметри (рис. 1.42 б) леза (фактичний передній кут $\gamma\phi$ зростає зі збільшенням висоти наросту) і значною мірою, у зв'язку із цим, впливає на показники процесу різання (силу й температуру різання, зношування інструменту та ін.), а отже, і на середній коефіцієнт тертя.

Форма й міцність з'єднання наросту з інструментальним матеріалом можуть бути різними (рис. 1.43). Наріст періодично може руйнуватися (повністю або частково), зриватися з передньої поверхні й відновлюватися знову. Частота коливань висоти наросту може бути як відносно невеликою (до 10 Гц), так і значною (до 1 000 і більше Гц). Розвинений наріст може нависа-



Рисунок 1.43 – Види наростів

ти над задньою поверхнею леза на величину Δ і охороняти як частину передньої поверхні від контакту зі стружкою, так і задню поверхню – від контакту з поверхнею різання (рис. 1.43).

Здатність до утворення застійної зони (наросту) визначною мірою залежить від швидкості відносного ковзання V_k (див. рис. 1.19) тіл у парі тертя й нормальних напружень у контакті. У зв'язку зі збільшенням контактної температури за збільшення швидкості різання існує лише певний діапазон швидкостей ковзання, за яких утворення наросту відбувається найбільш інтенсивно. Наприклад, для конструкційних сталей це 6–75 м/хв. Необхідно зазначити, що вплив швидкості різання на

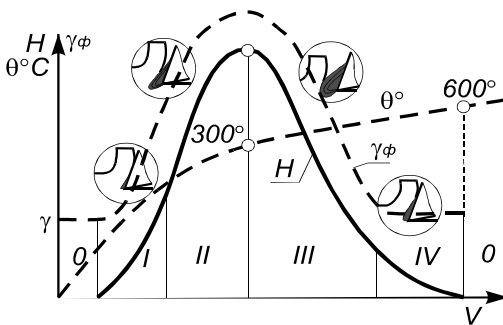


Рисунок 1.44 – Вплив швидкості різання на температуру різання θ , фактичний передній кут γ_{ϕ} і висоту наросту H під час оброблення сталей

середній коефіцієнт тертя μ , а отже, і на висоту наросту H , обумовлений, насамперед зміною теплового стану системи, тобто і зростанням температури різання за збільшення швидкості різання середній коефіцієнт тертя, а відповідно і висота наросту, і фактичний передній кут досягають, наприклад, під час оброблення конструкційних

сталей максимального значення за температури 300°C і мінімального – за 600°C (рис. 1.44).

Прямий вплив швидкості різання на середній коефіцієнт тертя проявляється як у зміні (збільшенні за підвищення швидкості різання) μ_a через посилення адгезійних зв'язків (збільшення середнього коефіцієнта тертя) внаслідок підвищення (за різання сталей – приблизно до 300°C) температури в зоні контакту, так і в зменшенні μ_0 (зменшення середнього коефіцієнта

тертя), характерному для процесів тертя в широкому діапазоні зміни швидкостей тертя внаслідок «надмірного» розм'якшення контактних шарів стружки за високих температур (для сталей – вище ніж 300 °С). Про це свідчить і той факт, що під час різання конструкційних сталей зі швидкостями, більшими за 90 м/хв, температура різання зазвичай вища за 600 °С, і нарід не утворюється (рис. 1.44).

Таким чином, наростоутворення під час різання є різновидом застійних процесів, які мають місце в межах пластичного контакту і які в результаті зводяться або до пригальмовування на передній поверхні контактних шарів зрізуваного шару, що прилягають до неї, і стружки, або до відділення від стружки і зрізуваного шару певних об'ємів матеріалу, з якого й формується власне нарід. До основних причин утворення наросту можна віднести:

- 1 Утворення застійної зони.
- 2 Високі температури і тиск (*розм'якшення оброблюваного матеріалу та підвищення його пластичності*).
- 3 Тертя і адгезію.
- 4 Наявність чистих (*ювенільних*) поверхонь.
- 5 Мікронерівності на контактних поверхнях інструменту.

Як бачимо з рисунка 1.44, стан оброблюваного матеріалу і відповідно значення середнього коефіцієнта тертя можуть за деяких умов, наприклад, під час оброблення деталей із конструкційних сталей, характеризуватися таким явищем, як утворення наросту. За малих швидкостей різання (до 2–3 м/хв) температури різання відносно невеликі. Тому стан матеріалу в зоні різання і середній коефіцієнт тертя, значення якого в цих умовах майже не відрізняється від коефіцієнта тертя між оброблюваним та інструментальним матеріалами за Амонотом, не сприяють утворенню наросту (рис. 1.44 період I). За подальшого підвищення швидкості різання висота наросту збільшується і досягає максимуму за 20–30 м/хв (період II), тому що температура

різання підвищується (до 300 °С), у результаті цього матеріал зрізуваного шару в зоні різання дещо «розм'якшується», і значення середнього коефіцієнта тертя збільшується, тобто створюються більш сприятливі умови для утворення наросту. Водночас за збільшення швидкості різання від 30 м/хв підвищена температура різання настільки «розм'якшує» матеріал зрізуваного шару в зоні різання, що середній коефіцієнт тертя починає зменшуватися. Це створює менш сприятливі умови утворення наросту, тобто його висота зменшується зі збільшенням швидкості різання від 20–30 до 60–80 м/хв (період III).

Примітка. Контактні нормальні напруження, високі температура і швидкість ковзання на границях контакту леза інструменту зі стружкою й поверхнями на заготовці змінюються в широких межах. Контактні поверхні зазвичай позбавлені плівок окислів і мають значну молекулярну й хімічну активність. За утворення застійної зони в умовах наростотворення має місце контакт однорідних матеріалів. Очевидно, що під час різання залежно від виду оброблення, властивостей оброблюваного і інструментального матеріалів та умов різання (геометричних параметрів різальної частини інструменту, елементів режиму різання (швидкості різання, подання і глибини різання), типу МОР та способу її подання в зону різання, динамічного стану системи та ін.) реалізуються різні механізми тертя ковзання в зоні контакту леза зі стружкою і поверхнями на заготовці: механізм внутрішнього тертя, сухого граничного і навіть рідинного зовнішнього тертя (під час оброблення з високими швидкостями різання, коли можуть виникати високі температури різання), кожний із яких характеризується своїм коефіцієнтом тертя (табл. 1.2)

Таблиця 1.2 – Коефіцієнти тертя для різних видів тертя ковзання

Вид тертя (зовнішнього)	Коефіцієнт тертя
1	2
1 Тертя ювенільних поверхонь	0,8–6,0
2 Тертя окиснених поверхонь	0,4–0,8

Продовження таблиці 1.3

1	2
3 Область приграничного (межового) тертя	0,2–0,6
4 Граничне тертя	0,015–0,4
5 Область межового режиму гідродинамічного тертя	0,005–0,02
6 Гідродинамічне тертя	0,01–0,2

1.3.2 Вплив зносостійких покриттів на контактні процеси на робочих поверхнях леза інструменту

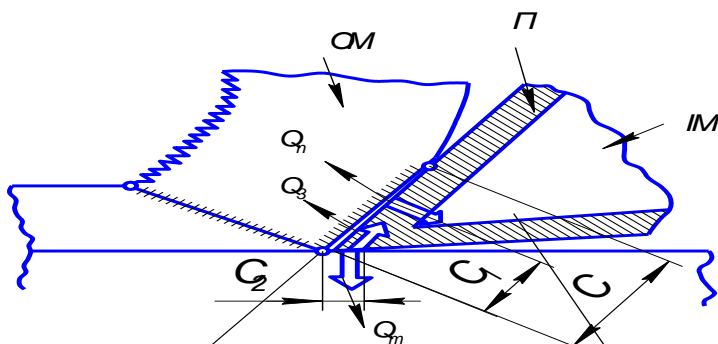
Застосування традиційних методів підвищення різальних властивостей інструментів за рахунок, наприклад, складного легування інструментальних матеріалів у наш час переважно обмежене через дефіцитність ряду елементів, наприклад, вольфраму. У зв'язку з цим актуальним завданням є створення принципово нових інструментальних матеріалів, так званих композиційних, які мають підвищену поверхневу зносостійкість і відносно високі міцність і в'язкість. До таких матеріалів відносять насамперед матеріали, на які нанесені зносостійкі покриття. Відомо, що зносостійкі покриття можуть істотно впливати на ті різальні властивості інструменту, які значною мірою залежать від його хімічного складу, структури та кристалохімічної будови решітки інструментального матеріалу і визначають найважливіші експлуатаційні властивості того чи іншого інструменту – мікротвердість, теплостійкість, теплопровідність, міцність, ударну в'язкість, корозійну стійкість і стійкість проти окиснення за підвищених температур, контактні характеристики, термомеханічний напружений стан і працездатність леза інструменту.

Кристалохімічна будова покриття, його фізико-механічні і теплофізичні властивості можуть значно відрізнятися від відповідних властивостей інструментального та оброблюваного матеріалів, тому покриття варто розглядати як своєрідне «третє середовище», яке, з одного боку, може помітно змінювати поверхневі властивості інструментального матеріалу щодо оброб-

люваного матеріалу (рис. 1.45), з іншого – впливати на контактні процеси, деформації, сили і температури різання, спрямованість теплових потоків, термодинамічний напружений стан різальної частини інструменту тощо (рис. 1.46).

Задаючи властивості покриття шляхом варіювання його хімічним складом і будовою, можна змінювати основні характеристики процесу різання (силовий і тепловий стан системи різання).

Зокрема, покриття може сприяти зниженню тертя в зонах фрикційного контакту (на передній і задній поверхнях леза) і зменшувати потужність фрикційних джерел тепла, підвищувати температурний поріг початку адгезії, а відповідно і процесу утворення застійної зони і наросту, а також знижувати активність дифузійних процесів, що може сприятливо впливати загалом на зниження інтенсивності зношування інструменту. Усе це дозволяє, в остаточному підсумку, керувати найважливішими вихідними параметрами процесу різання – зношуванням інструменту і якістю поверхневого шару оброблюваних деталей.



Роль покриття на границях контакту ОМ-П

- зниження фізико-хімічної активності ІМ щодо ОМ;
- зниження сил тертя на площадках контакту довжиною S і C_2 ;
- зниження роботи фрикційних вогнищ тепла $Q_{тл}$ і $Q_{тх}$;
- зниження інтенсивності теплових потоків $Q_з$, Q_n , Q_m ;
- зменшення інтенсивності дифузійних процесів між контактувальними ІМ та ОМ

Роль покриття на границях контакту П-І-М

- підвищення поверхневої твердості ІМ;
- підвищення поверхневої теплостійкості ІМ;
- підвищення зносостійкості ІМ;
- підвищення теплопровідності ІМ;
- створення бар'єрів дифузійним процесам між ОМ та ІМ;
- створення перешкод тепловим потокам в ІМ із зон тертя

Результат: зниження сил тертя, сил різання, контактної температури, зменшення теплової напруженості інструменту, деталі, системи різання загалом, зниження інтенсивності зношування інструменту

Рисунок 1.45 – Роль покриття на границях ОМ – П та П – ІМ

Крім того, процес нанесення покриття дозволяє спрямовано впливати на поверхневі дефекти інструментального матеріалу, що разом із можливістю формування стабільних харак-

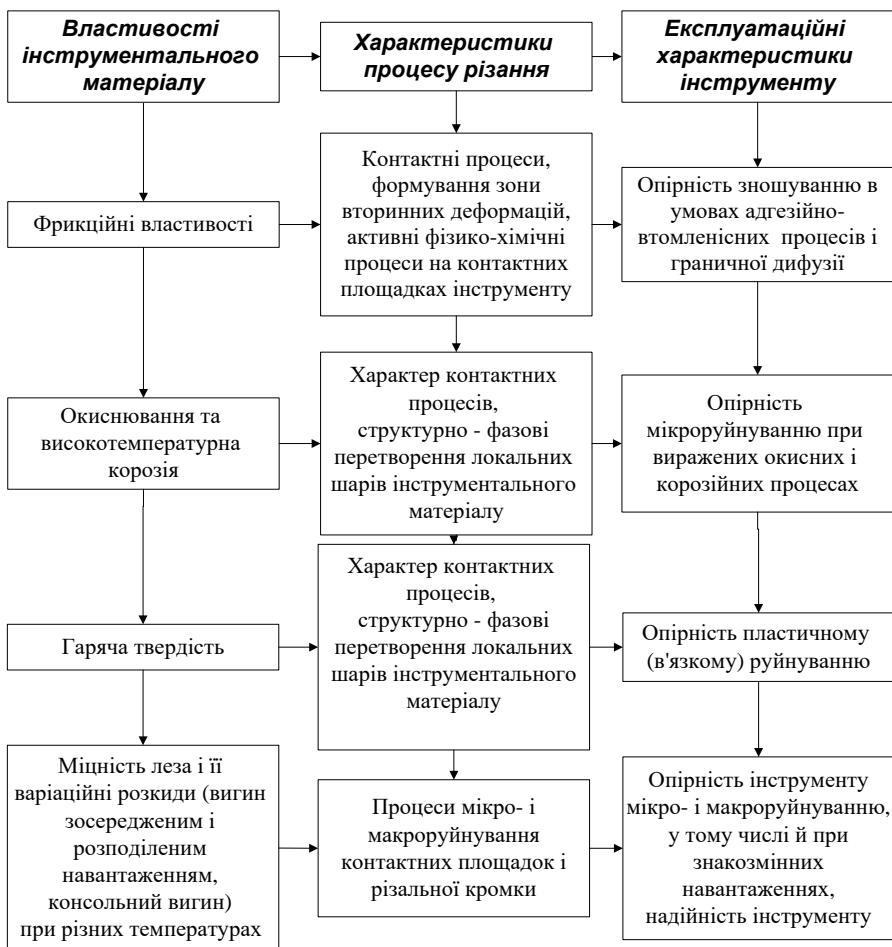


Рисунок 1.46 – Взаємозв'язок між властивостями інструментального матеріалу після нанесення покриття, характеристиками процесу різання та експлуатаційними характеристиками інструменту

теристик покриття може сприяти помітному підвищенню надійності інструменту. Таким чином, нанесення зносостійких покриттів на інструментальні матеріали дозволяє наблизитися до вирішення завдання створення «ідеального» інструментального матеріалу, який має високу зносостійкість разом із достатньою міцністю і в'язкістю.

Унікальність властивостей зносостійких покриттів, особливо таких, як висока твердість, що зберігається за підвищених температур (теплостійкість), хімічна інертність стосовно відповідного оброблюваного матеріалу, корозійна стійкість, здатність міцно утримуватися на основі тощо, а відповідно і їх ступінь впливу на контактні процеси в зоні різання значною мірою визначаються їхнім хімічним складом (TiN, TiC, TiCN та ін.), методом нанесення на інструментальний матеріал (хімічного (газофазного) осадження покриттів (ХОП) або методи CVD (Chemical Vapour Deposition), термодифузійне насичення поверхні (ТДН) і фізичне осадження покриттів у вакуумі (ФОП) або PVD (Physical Vapour Deposition)) та кількість шарів у покритті – одно- чи багатошарове.

У багатошаровому покритті шляхом вибору відповідних властивостей окремих шарів 1–3 (рис. 1.47) можна досягти потрібних для забезпечення високої працездатності інструменту ефектів: мінімальну хімічну активність інструментального матеріалу щодо оброблюваного (1), високі твердість, теплостійкість та в'язкість руйнування (2), а також високу міцність утримання покриття (3) на основі (4).

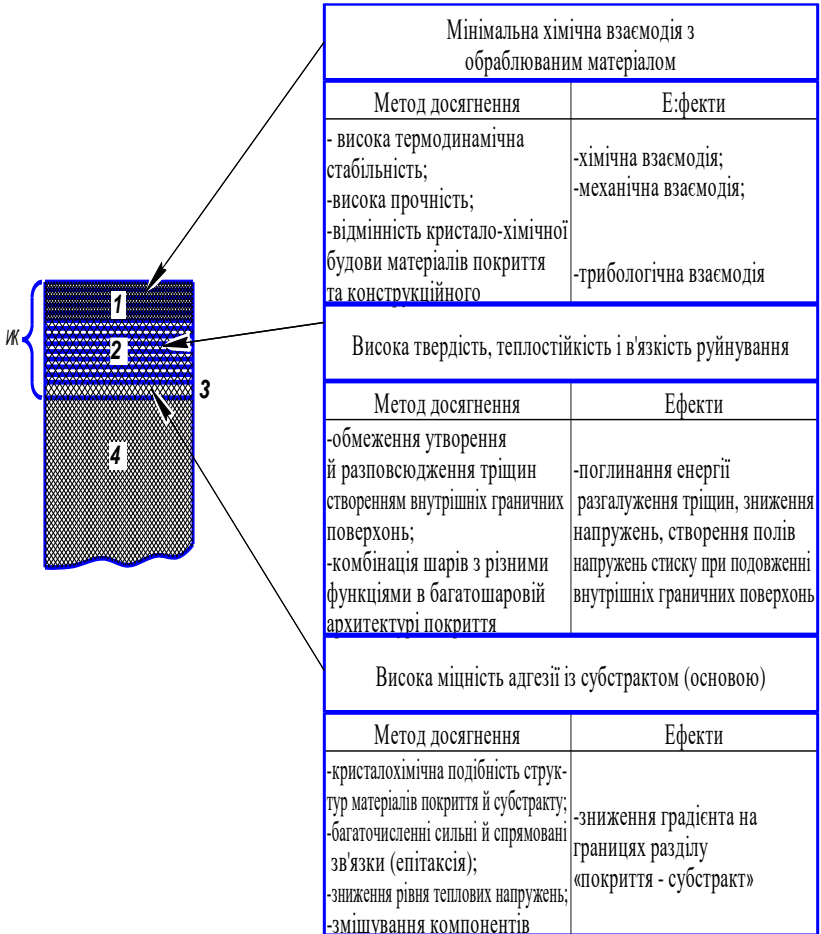


Рисунок 1.47 – Будова багат шарового покриття та призначення окремих шарів у ньому

1.3.3 Види і криві зношування різальної частини інструменту

Незалежно від типу та призначення всі інструменти можуть зношуватися переважно по задній поверхні (**перший вид зношування**) з однаковою інтенсивністю по задній і передній

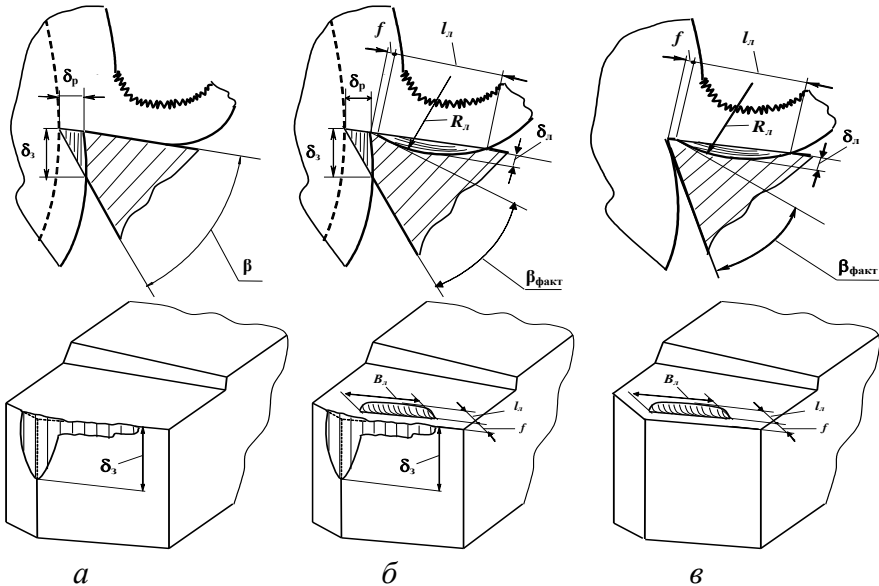


Рисунок 1.48 – Види зношування інструменту

поверхнях одночасно (**другий вид зношування**) або переважно по передній поверхні (**третій вид зношування**) (рис. 1.48).

Під час чистового оброблення характерним є **перший вид зношування** за чорнового оброблення (рис. 1.48 в) і в умовах стійкого наростуотворення (рис. 1.50) – **третій**.

В останньому випадку наріст виступає за різальну кромку і контактує з поверхнею різання. Унаслідок цього задня поверхня захищається від контакту з поверхнею різання, а отже, і зношування.

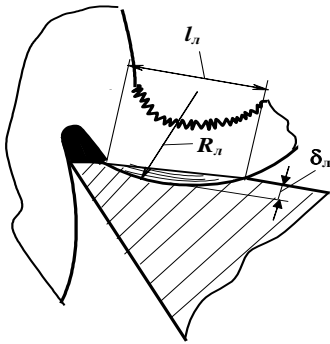


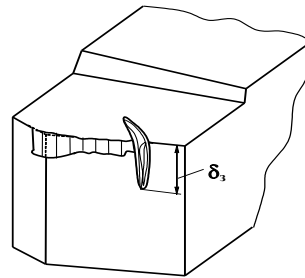
Рисунок 1.50 – Зношування інструменту по передній поверхні в умовах стійкого наростуотворення

неоднакова. Зазвичай максимальна ширина площадки зношування спостерігається біля вершини леза (рис. 1.48 а, б). У деяких випадках локальне зношування у вигляді проточини спостерігається в зоні торкання вільного краю стружки і оброблюваної поверхні (рис. 1.49 а).

За зношування за *другим видом* поряд зі зношуванням задньої поверхні має місце і зношування передньої поверхні. У результаті зношування передньої поверхні утворюється лунка, розміщена на деякій відстані від різальної кромки. У процесі різання довжина l_n і глибина δ_n лунки збільшуються, а

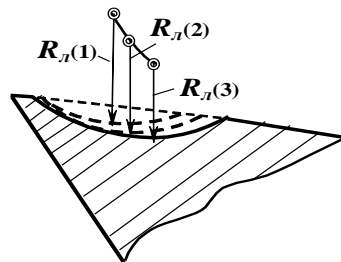
За зношування за *першим видом* (рис. 1.48 а) на задній поверхні інструменту утвориться площадка зношування шириною δ_n .

Обриси площадки зношування на задній поверхні в перерізі головною січною площиною приблизно нагадують форму поверхні різання. Уздовж головного леза ширина площадки зношування в загальному випадку



а

$$R_n(3) < R_n(2) < R_n(1)$$



б

Рисунок 1.49 – Проточини на лезі інструменту (а) та епюра зміни радіуса кривизни лунки на передній поверхні (б)

радіус її кривизни R_L зменшується (рис. 1.49 б).

Звичайно довжина лунки зростає у бік різальної кромки повільніше, ніж у протилежний бік. За одночасного зношування передньої й задньої поверхонь леза інструменту (див. рис. 1.48 б) ділянка передньої поверхні f , що перебуває між лункою зношування і різальною кромкою, поступово зменшується із двох боків. Зменшується також і кут загострення β (див. рис. 1.48 в). У результаті міцність різальної кромки знижується, відбувається викришування різальної кромки, і зростає дійсний радіус округлення різальної кромки $\rho_{\text{факт}}$, що супроводжується значним збільшенням питомих навантажень і призводить до крихкого або інтенсивного пластичного руйнування різальної частини інструменту на ділянці катастрофічного зношування (див. рис. 1.52, III).

Вид зношування визначається переважно родом матеріалу оброблюваної деталі, товщиною зрізаного шару (подачею) і швидкістю різання.

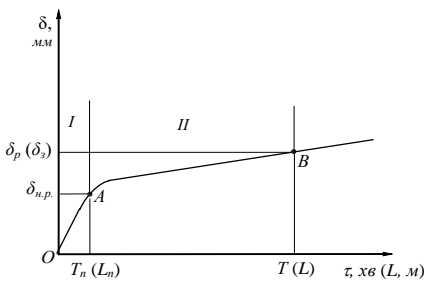


Рисунок 1.51 – Криві зношування інструменту за переважного зношуванні по задній поверхні – перший вид зношування

Під час оброблення пластичних матеріалів (наприклад, сталей) зношування інструментів за першим і другим видами зношування трапляється однаково часто.

Під час оброблення крихких матеріалів (наприклад, чавунів, кремнію та ін.) зношується переважно задня поверхня, тобто

спостерігається зазвичай *перший вид зношування* (рис. 1.51).

Найбільший вплив на вид зношування має товщина зрізаного шару a . Під час різання пластичних матеріалів на

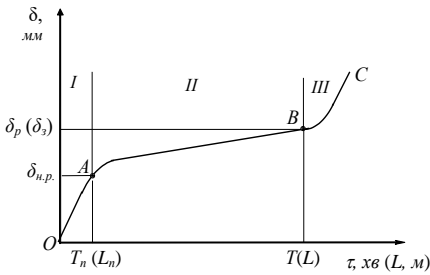


Рисунок 1.52 – Криві зношування інструменту за одночасного зношування по передній і задній поверхнях – другий вид зношування

II – нормального (поступового) зношування та III – катастрофічного зношування.

У міру збільшення товщини зрізу разом із задньою починає зношуватися й передня поверхня, причому за більших a (чорнове оброблення) передня поверхня зношується інтенсивніше задньої, тобто за чорнового оброблення має місце переважне зношування по передній поверхні – **третій вид зношування**. Наприклад, під час оброблення сталей така ситуація спостерігається за $a \geq 0,5$ мм. Характер впливу цих факторів можуть змінювати передній кут і властивості застосовуваного мастильно-охолоджувального технологічного середовища (МОТС). Наприклад, за збільшення переднього кута й застосуванні МОТС із високою охолодною дією перший вид зношування переходить у другий за більших значень a і V .

За міру зношування (затуплення) інструменту звичайно беруть одну з лінійних характеристик зношеної поверхні. Найчастіше про зношеність задньої поверхні говорять за максимальною шириною площадки зношування δ_z , а передньої поверхні – за максимальною глибиною лунки зношування δ_n . За чистового розмірного оброблення зношеність інструменту оцінюють величиною розмірного зношування δ_p (**точнісна**

малих товщинах зрізу (під час оброблення сталей із товщиною зрізу $a \leq 0,1$ мм) переважно зношується задня поверхня.

Класичні криві зношування мають зазвичай три ділянки (рис. 1.52), кожна з яких характеризує відповідну стадію зношування різального лека: I – припрацювання;

відмова), що характеризує переміщення вершини або перехідного леза інструменту в напрямку, перпендикулярному до обробленої поверхні, у результаті зношування його задньої поверхні. Величина розмірного зношування δ_r визначає збільшення, наприклад, під час обточування (див. рис. 1.48 а,б) або зменшення, наприклад, під час розточування, розміру оброблюваної деталі в процесі зношування інструменту. Під час дослідження впливу різних факторів, що визначають процес різання, на інтенсивність зношування інструменту використовують критерій *відносного зношування*. Під *відносним зношуванням* розуміють відношення лінійного або розмірного зношування до якого-небудь показника, що характеризує продуктивність роботи (наробіток) інструменту до моменту його затуплення. Такими показниками можуть бути: шлях, пройдений інструментом (*шляхове напрацювання*), площа обробленої поверхні (*поверхневе напрацювання*), об'єм зрізаного шару (*об'ємне напрацювання*) і т. ін. Найбільш часто величину зношування δ_z або δ_r відносять до шляху L , пройденого інструментом під час різання (*шляху різання*) за час його роботи. За точіння шлях різання, м, можна обчислити за формулою

$$L = \frac{\pi D l_p}{1000 \cdot S}, \quad (1.11)$$

де D – діаметр заготовки, мм; l_p – довжина робочого ходу інструменту (див. підрозд. 2.2.2), мм; S – подача на оберт заготовки, мм/об.

Тоді відносне лінійне (розмірне) зношування $\delta_{p.z}$, мкм/м, за час роботи інструменту T до досягнення зношування $\delta_z = \delta_r$ можна визначити за формулою (1.12):

$$d_{p.z} = \frac{d}{L}. \quad (1.12)$$

Графічне зображення закономірності зміни зношування за час роботи інструменту називають *кривою зношування* (рис. 1.51 та 1.52). Оскільки задня поверхня зношується практично в усіх випадках роботи інструменту, то криві зношування прийнято будувати за вимірювання максимального значення ширини площадки зношування на задній поверхні δ_z залежно від часу роботи інструменту τ або шляху різання L .

За *першого виду зношування* (рис. 1.48 а) крива зношування має вигляд, показаний на рисунку 1.51. На цій кривій є дві ділянки **ОА** і **АВ**. Початкова ділянка кривої зношування **ОА** характеризується інтенсивним зношуванням і називається ділянкою припрацювання (**I** – період припрацювання). На цій ділянці гостро заточений інструмент неначе «притосовується» до умов роботи. Площа контакту задньої поверхні леза з поверхнею різання відносно мала, внаслідок цього на ній розвиваються значні питомі навантаження, що призводять до інтенсивного зношування. З появою площадки контакту, шириною $\delta_{p.n} = 0,05\text{--}0,1$ мм напруження, що діють на ній, різко знижуються, і далі зношування переходить у стадію робочого (або нормального) зношування – ділянка **АВ** (**II** – період нормальної роботи). За досягнення зношуванням прийнятого критерію (див. підрозд. 1.3.5), наприклад, значення δ_p , процес оброблення припиняють і проводять заміну зношеного леза. Час роботи інструменту до цього моменту і є періодом стійкості **T** (див. підрозд. 1.1).

Якщо інструмент зношується одночасно по задній і по передній поверхнях (див. рис. 1.48 б) – *другий вид зношування*, – то на кривій зношування з'являється ділянка **ВС** (рис. 1.52), яка характеризується різким підвищенням зношування і називається ділянкою «катастрофічного» зношування (**III** – період катастрофічного зношування).

У цьому випадку розширення й поглиблення лунки зношування на передній поверхні відбувається одночасно зі збільшенням ширини площадки зношування на задній поверхні.

Фактичний кут загострення $\beta_{\text{факт}}$ (див. рис. 1.48 б) у процесі зношування стає значно меншим, ніж статичний (заданий кресленням) кут загострення леза. Зменшення кута β приводить до різкого зниження міцності леза й погіршення умов тепловідведення від об'ємів інструментального матеріалу біля різальної кромки. Тому зменшення кута β може призводити як до теплового розм'якшення (втрати твердості) і пластичного руйнування («змащування») різальної кромки леза за рахунок підвищення температури в цій зоні, так і до крихкого руйнування – відколів і викришування. Продовження експлуатації інструменту в зоні катастрофічного зношування (зона III, рис. 2.1) недоцільно через значне збільшення обсягів руйнування леза, що призводять до зменшення ресурсу інструменту P_u (*міри, що дорівнює або пропорційна сумарній кількості придатної продукції, виготовленої за термін експлуатації інструменту*). Тому за досягнення зношування, величина якого наближається до його граничного значення δ_p , роблять або переточування інструменту, або заміну різальної кромки (під час використання змінних багатограних непереточуваних пластин (ЗБП)).

У теорії різання часто використовують поняття «відносне граничне зношування» $\delta_{\text{в.з.з.}}$, мкм/м, величину якого можна визначити за формулою (див. (1.12))

$$\delta_{\text{в.з.з.}} = \frac{dd_p}{dL} = \frac{d_p - d_{p.n}}{L - L_n} = \frac{d_p - d_{p.n}}{V(T - T_n)},$$

де δ_p і $\delta_{p.n}$ – відповідно граничне розмірне зношування й початкове радіальне зношування (після періоду припрацювання), відповідно в точках В і А (рис. 1.52 та 2.1), мкм; L і L_n – шляхи різання і припрацювання (у точках В і А відповідно), м; T і T_n –

періоди розмірної стійкості і припрацювання (у точках В і А відповідно), хв.

Допустима (гранична) величина зношування інструменту δ_r визначається критеріями «технологічного» і «оптимального» зношування (див. підрозд. 1.3.5).

На величину зношування із параметрів режиму різання найбільший вплив мають швидкість різання, потім подача і найменше – глибина різання. Це свідчить про те, що характер впливу параметрів режиму різання на величину зношування задньої поверхні аналогічний їхньому впливу на температуру різання.

1.3.4 Механізми зношування інструменту

Природу зношування лез різальних інструментів можна пояснити такими механізмами появи площадки зношування: *механічним, адгезійно-утомним (адгезійним), абразивним, термоутомним (термічним), дифузійним, окисним (хімічним) і евтектичним.*

Принциповою особливістю умов контактування (тертя) під час різання є наявність тонкого шару оброблюваного матеріалу, загальмованого (прилиплого, привареного) на контактних поверхнях інструменту. Причому зі збільшенням швидкості різання (збільшенням температури) товщина цього шару може як збільшуватися, наприклад, під час оброблення сталей за температур різання до 300 °С, так і зменшуватися, а за дуже високих температур різання він може переходити навіть у рідкий стан. Таким чином, контактування оброблюваного матеріалу з інструментальним відбувається зазвичай через взаємодію із загальмованим шаром, стан якого залежить від прийнятих умов оброблення різанням: загальмований шар, що складається з оброблюваного матеріалу, може перебувати у стійкому стані схоплювання з інструментальним матеріалом або в нестійкому стані, коли спостерігається його переміщення щодо інструмен-

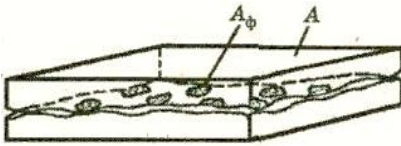


Рисунок 1.53 – Номінальна A та фактична A_f площі контакту шорсткуватих поверхонь

ного боку до різальної кромки, а з іншого – до початку лунки зношування (див. рис. 1.50).

В умовах нестійкого стану, коли в загальмованому шарі тривають пластичні деформації зрушення і він, руйнуючись, переміщається по контактній поверхні інструментального матеріалу, спостерігається процес зношування, тобто поступового руйнування у вигляді мікрочастинок (за механічного, абразивного, адгезійного і хімічного зношування), у вигляді перенесення хімічних компонентів, що входять до складу інструментального матеріалу, у результаті взаємного розчинення з контактним шаром оброблюваного матеріалу (дифузійне зношування) або у вигляді утворення рідкої фази з більш легкоплавких нових сполук, утворених у результаті хімічного синтезу компонентів інструментального й оброблюваного матеріалів і газів із навколишнього середовища (евтектичне зношування). Установлено, що на площадках контакту оброблюваного й інструментального матеріалів в основному спостерігається умова нестійкого стану загальмованого шару, що й призводить їх до поступового руйнування – зношування.

1.3.4.1 Механічне зношування

Під механічним зношуванням розуміють насамперед руйнування мікрооб'ємів поверхонь леза, що контактують у процесі різання зі стружкою й поверхнями на заготовці (різання й обробленої), у результаті тертя. Поверхні, що труться, шорсткуваті, тобто на них завжди є мікро- і субмікронерівності,

які за взаємного ковзання «перетинаються», у результаті фактична площа контакту завжди менша від номінальної (рис. 1.53). У зоні тертя навіть можуть з'являтися ділянки контакту, близького до точкового (рис. 1.54 а), через які передаються зусилля від одного елемента системи до іншого.

Цей процес супроводжується різким зростанням в об'ємах контактувальних мікровиступів напружень, які за певних умов можуть перевищити межу міцності поверхневих шарів інструментального матеріалу й привести або до його крихкого руйнування (особливо крихких оксидних та інших адсорбованих плівок) з утворенням і видаленням дрібних частинок граничного поверхневого шару контактних площадок леза у вигляді окремих дрібних частинок – продуктів зношування, або до пластичної деформації мікровиступів і зменшення їх висоти. Цей механізм зношування є характерним для періоду припрацювання (період I на рис. 1.51 та 1.52).

За зменшення висоти виступів відбувається збільшення опорної площі виступу S і зменшення основи западини S_1 (рис. 1.54 б), що супроводжується зменшенням питомих навантажень (тиску) і зниженням інтенсивності механічного руйнування виступів, яке триває доти, поки ширина площадки S не зробиться більшою від основи западини S_1 , тобто до того моменту, коли взаємне зачеплення виступів стає неможливим.

Механічне зношування тертям є однією з основних причин затуплення леза і має місце в усіх без винятку випадках і на всіх інструментах незалежно від їхнього типу й призначення. Крім того, цей процес може значно інтенсифікувати викришування різальної кромки, що особливо характерно для крихких

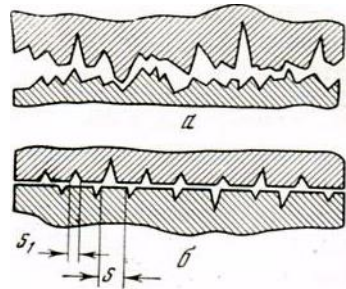


Рисунок 1.54 – Схема руйнування мікровиступів під час тертя

інструментальних матеріалів, наприклад, твердих сплавів, мінералокераміки й ін.

1.3.4.2 Адгезійно-утомне (адгезійне) зношування

Під адгезійним зношуванням інструменту розуміють відрив утримуваних силами адгезії («схоплювання», холодного зварювання) дрібних частинок інструментального матеріалу в процесі його переміщення стосовно оброблюваного матеріалу (див. підрозд. 0). Сприятливі для адгезії умови на контактних поверхнях інструменту створюються внаслідок високих тисків і утворення ювенільних (хімічно чистих) поверхонь. Напруження, що виникають під час розриву адгезійного зв'язку зазвичай недостатні для руйнування мікрооб'ємів інструментального матеріалу. Тому руйнування переважно виникають в окремих зонах, де вже є значна кількість тріщин утомленості, що з'являються в результаті циклічних навантажень під час руйнування загальмованого шару. Таким чином, відрив частинок інструментального матеріалу силою адгезії є лише завершальним етапом руйнування, що відбувається тоді, коли міцність з'єднання частинок з основою знижується внаслідок виникнення й розвитку утомних явищ у поверхневому шарі інструментального матеріалу.

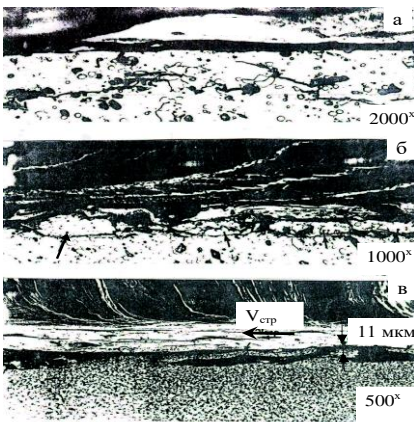


Рисунок 1.55 – Адгезійно-утомне руйнування поверхневого шару інструментального матеріалу (швидкорізальна сталь)

адгезійно-утомне зношування різального інструменту залежно від умов оброблення і стану інструментального матеріалу може відбуватися або шляхом відриву, або пластичного зрізу, і відповідно механізм зношування має або крихку, або пластичну природу. На

рисунку 1.55 а показаний механізм розвитку в поверхневому шарі інструментального матеріалу (швидкорізальна сталь) системи тріщин утомленості, які, просуваючись до контактної поверхні, формують частинки (рис. 1.55 б), що відриваються і вносяться приконтальною поверхнею стружки (рис. 1.55 в) з передньої поверхні або поверхнею різання із задньої поверхні інструменту. Кількість циклів навантаження до утомного руйнування мікрооб'ємів інструментальних матеріалів не є постійним, а залежить від їхніх фізико-механічних властивостей (тріщиностійкості, циклічної міцності) і температури різання.

Важливу роль в адгезійному зношуванні відіграють границі зерен. У полікристалічному матеріалі на границях зерен кристалічні ґратки викривлені. Границі зерен у металі поводяться так, ніби вони були областями великого опору деформації за низьких температур і великих швидкостей деформації й областями малого опору за високої температури. У цих умовах імовірний випадок відшаровування блоків матеріалу інструменту по границях зерен.

Маса інструментального матеріалу, що видаляється з контактних поверхонь інструменту на одиницю шляху різання, залежить від міцності й твердості оброблюваного матеріалу. За інших рівних умов: чим менше відношення твердостей інстру-

ментального H_i і оброблюваного H_m матеріалів $\frac{H_i}{H_m}$, тим інтен-

сивніше зношування інструменту. Наприклад, маса інструментального матеріалу, що видаляється з передньої поверхні різця із твердого сплаву ВК8 на шляху різання $L = 1,5\text{ м}$ із площі $0,044\text{ мм}^2$, становить: $16 \cdot 10^{-5}\text{ г}$ під час оброблення сталі 40Х

($\frac{H_i}{H_m} = 2,5$); $25 \cdot 10^{-5}\text{ г}$ під час оброблення жароміцного сплаву

ХН77ТЮР ($\frac{H_i}{H_m} = 2,33$); $54 \cdot 10^{-5}$ г під час оброблення жароміцного сплаву ЭИ929 ($\frac{H_i}{H_m} = 1,93$).

Ступінь адгезійного зношування визначається опором інструментальних матеріалів цьому виду зношування. Чим вища циклічна міцність і нижча крихкість інструментального матеріалу, тим вища його зносостійкість за однакової теплостійкості. Тому в зоні невисоких температур різання (відносно малих (до 20–40 м/хв) швидкостей різання), коли теплостійкість інструментального матеріалу не має вирішального значення, зносостійкість твердих сплавів може бути значно нижчою, ніж у швидкорізальних сталей, які мають більш високу міцність і кращий опір циклічним навантаженням.

За інтенсивністю проходження адгезійного зношування інструментальні матеріали по-різному реагують на зміну температури різання. Відносно зношування інструментів зі швидкорізальних сталей, що мають добрий опір циклічним контактним навантаженням, під час нагрівання до температур менше ніж $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ залишається майже постійним або навіть зменшується зі збільшенням температури різання. Нагрівання твердих сплавів також сприяє підвищенню їхнього опору контактним навантаженням за рахунок зменшення крихкості, про що свідчить деяке збільшення стійкості інструменту з підвищенням швидкості різання в певному діапазоні швидкостей (див. рис. 2.2, крива 2, ділянка бв). Саме тому в інтервалі температур $500\text{--}750\text{ }^{\circ}\text{C}$ підвищення температури різання супроводжується зменшенням відносного зношування твердосплавного інструменту.

Адгезійне зношування інструменту можна зменшити, застосовуючи мастильно-охолодні рідини, які створюють на контактних поверхнях «захисні» плівки (окисні, масляні й ін.), що

істотно зменшують сили адгезії й перешкоджають схоплюванню оброблюваного й інструментального матеріалів.

1.3.4.3 Абразивне зношування

Механізм абразивного зношування полягає в тому, що тверді включення оброблюваного матеріалу, проникаючи (вдавлюючись) у контактні поверхні інструменту, дряпають ці поверхні, залишаючи риски, причому мікрорізання зі зняттям стружки в цьому випадку відбувається не завжди. Найчастіше виникнення рисок на інструментальному матеріалі відбувається в результаті його пластичного відтискування в бічні сторони під час руху більш твердої частинки, яка входить до складу оброблюваного матеріалу і перебуває в загальмованому шарі, що за нестійкого стану переміщається щодо інструментального матеріалу. Таким чином, чим більше в складі оброблюваного матеріалу буде твердих фаз, тим більша кількість контактів із поверхнею леза інструменту відбудеться за їхнього взаємного переміщення. За кожного нового контакту буде відбуватися чергове «різання – дряпання» або «відтискування» інструментального матеріалу, у результаті цього поверхня тертя в мікрооб'ємах інструментального матеріалу буде зазнавати процесів пластичного передеформування. У розглянутому випадку, коли циклічні напруження викликають не пружні деформації, як за адгезійного зношування, а пластичні з утворенням рисок (слідів деформації), – найбільш імовірний прояв механізму малоциклової втоми.

Інтенсивність розвитку тріщин і руйнування при малоциклової втомі значно вище, ніж при багатоциклової втомі, коли напруження не перевищують межі пружності. Тому більш точною назвою для абразивного зношування є абразивно-утомне зношування.

Інтенсивність абразивно-утомного зношування зростає за збільшення вмісту в сталях цементиту (НВ 800) і складних карбідів, у чавунах – цементиту й фосфідів, у силумінах – карбиду кремнію, у жароміцних сплавах – інтерметалідів, які зберігають

високу твердість навіть за високих температур, характерних для процесу різання.

Із усіх структурних складових сталі найменшу стиральну здатність має ферит. За ним йде зернистий перліт, стиральна здатність якого тим менша, чим менші розміри зерен цементиту. Пластинчастий перліт значно інтенсивніше зношує різальний інструмент, тому що він має велику абразивну здатність через пилкоподібний характер третьової поверхні з гострими карбідними кромками. Аустенітні сталі з незначним вмістом карбідів мають слабку стиральну здатність. Важко обробляються сталі мартенситного класу з високим вмістом легувальних складових. Різальний інструмент особливо інтенсивно зношується елементами, що утворюють тверді карбіди (V, Mo; W, Ti).

Під час оброблення чавуну позитивне значення має графіт: він відіграє роль внутрішнього змащення, зменшуючи тенденції до утворення наросту. Але наявність твердих фосфористих сполучень, особливо цементиту, досить сильно збільшує стиральну здатність чавуну.

У таблиці 1.3 наведені значення твердостей різних компонентів сталі, чавуну і сплавів, що дають уявлення про їхню стиральну здатність.

Таблиця 1.3 – Твердість компонентів сталі, чавуну та твердих сплавів

Елемент сплаву	Твердість HV, МПа	Елемент сплаву	Твердість HV, МПа
Сульфід марганцю	6	Цементит	100
Чисте залізо	7	Тверді сплави: WC + 13% Co WC + 6% Co	130
Ферит	8		140
Зернистий перліт	15–20	Карбіди вольфраму	150
Пластинчастий перліт (евтектика)	20–35	Карбіди хрому	160
Аустеніт	15–35	Окис алюмінію	190

Мартенсит відпуску	25–80	Карбіди ванадію	210
Загартована вуглецева сталь	65–70	» титану	220
		» кремнію	220
Кварц	75	» бору	250
Стеліт (90% Fe + 10% P)	80	Алмаз	1 000

Особливо сильно зношується задня поверхня, на якій з'являються поглиблення у вигляді рисок і канавок, перпендикулярних до головної різальної кромки.

Абразивне зношування посилюється при різанні в хімічно активних середовищах (наприклад, у чотирихлористому вуглеці), що послабляють опірність контактних поверхонь інструменту дряпанню.

Абразивна дія оброблюваного матеріалу стає тим сильнішою, чим менше відношення $\frac{H_i}{H_m}$. Унаслідок цього абразивне

зношування помітніше проявляється під час роботи інструментами з вуглецевих інструментальних і швидкорізальних сталей, ніж під час роботи твердосплавними інструментами, тому що їхня твердість значно вища.

Абразивне зношування може відігравати вирішальну роль під час оброблення деталей із різко вираженими абразивними властивостями (чавун, силумін, зварні шви та ін.). Абразивного зношування зазнають переважно різальні інструменти, що працюють за відносно низьких швидкостей і температур різання (протяжки, мітчики, плашки і т. ін.).

1.3.4.4 Термоутомне (термічне) зношування

Місцеве нагрівання, неминуче під час різання, викликає в зоні термічного впливу пластичну деформацію, і зона, де температура досягає більше ніж 200–300 °С, за різкого охолодження може виявитися «окрихленою». Хоча деформація, обумовлена місцевим нагріванням, і невелика (не більше ніж 2 %), у деяких випадках можуть виникнути критичні умови,

особливо якщо в зоні термічного впливу вже є тріщина, наприклад, у результаті адгезійно-утомного руйнування, температурних деформацій за напоявання різального елемента, термооброблення за його виготовлення і т. ін. Біля неї виникає концентрація напружень, так що деформація безпосередньо в тріщині може досягти 40 % і більше. Більше того, метал під час нагрівання внаслідок стиску температурної деформації зазнає стиснення, і за подальшого швидкого охолодження виникають залишкові розтягувальні напруження. У результаті виникає небезпечний стан матеріалу. Якщо в металі, що містить тріщини, чергуються нагрівання й охолодження, під час охолодження може відбутися мимовільне руйнування від тріщин – термоутомне руйнування. Такий механізм зношування часто проявляється за переривчастого різання (див. рис. 1.5), наприклад, під час фрезерування, і особливо з використанням МОР на водній основі, які мають потужний охолодний ефект. Нагрівання леза під час різання й швидке його охолодження під час холостого ходу (особливо за використання водних МОР) викликають термічні «удари», тому що температурне поле в поверхневих шарах характеризується високим градієнтом (перепадом) температур і термічні напруги σ_{θ} за високих контактних температур досягають значних величин. Якщо величина σ_{θ} перевищить межу міцності інструментального матеріалу, то утвориться тріщина, і починається його крихке руйнування. Саме цим можна пояснити окрихлення зони термічного впливу під час різання із застосуванням МОР і крихке руйнування леза під дією відносно низьких напружень, тобто за відносно невеликих зусиль різання, наприклад, за чистового (тонкого) точіння із застосуванням водних МОР.

1.3.4.5 Окисне (хімічне) зношування

Гіпотеза окисного зношування ґрунтується на відомому факті корозії твердих сплавів під час нагрівання їх у середовищі кисню й за незмінності властивостей поверхневих шарів сплавів під час нагрівання їх в інертних газах (аргоні, азоті, гелії).

Відповідно до цієї гіпотези за температур різання 700–800 °С кисень повітря вступає в хімічну реакцію із твердим сплавом, причому із всіх можливих складових (фаз) у ньому (кобальт, карбіди вольфраму, титану, танталу) найбільш сильно окиснюється кобальт. Крім того, карбід титану утворює більш міцну плівку окислу порівняно з карбідом вольфраму. Унаслідок значної пористості металокерамічних твердих сплавів окисних процесів зазнають не лише контактні поверхні інструменту, а й зерна твердого сплаву, що є на деякій глибині від цих поверхонь. Продуктами окиснювання кобальтової фази є окисли Co_3O_4 і CoO і карбідів WO_3 і TiO_2 . Твердість продуктів окиснювання в 40–60 разів нижча від середньої твердості твердих сплавів. У результаті значного розм'якшення кобальтової фази порушується «монолітність» сплаву за рахунок ослаблення зв'язків між зернами карбідів і цементувальною зв'язкою. Це створює сприятливі умови для виривання карбідних зерен силами тертя й адгезії (див. рис. 1.56), що діють на передній і задній поверхнях леза, і різкого підвищення інтенсивності зношування цих поверхонь. Водночас у випадку утворення тонких і досить міцних окисних плівок адгезія відбувається між плівками, які захищають інструмент від більш інтенсивного зношування шляхом виривання частинок інструментального матеріалу. Під час утворення більш товстих і пухких окисних плівок інтенсивність зношування леза різко збільшується, тому що такі плівки легко руйнуються за їх взаємодії з контактними поверхнями оброблюваної деталі та стружкою.

Схильність твердих сплавів до окиснювання визначається їхнім хімічним складом. Однокарбідні сплави окиснюються сильніше, ніж двокарбідні. Зі збільшенням вмісту кобальту у твердому сплаві інтенсивність і швидкість окиснювання зростають. Розвитку корозійних явищ значною мірою перешкоджає застосування під час різання інертних газових середовищ, наприклад, аргону, гелію, азоту, що істотно зменшує інтенсивність зношування інструменту.

1.3.4.6 Дифузійне зношування

За температур різання вище ніж 800–850 °С зношування інструменту може переважно відбуватися в результаті дифузійного розчинення інструментального матеріалу в оброблюваному.

Можливість перебігу дифузійних процесів на контактних поверхнях лева інструменту обумовлюється параболічним законом збільшення дифузійного шару, за яким у початковий період дифузії швидкість розчинення надзвичайно велика, після цього з часом вона різко зменшується. Інтенсивність дифузійного зношування залежить від властивостей контактувальних пар металів. Інтенсивному дифузійному розчиненню матеріалів інструменту й оброблюваної деталі під час різання сприяють такі фактори:

а) високі температури, що перевищують температуру початку хімічної взаємодії твердого сплаву з оброблюваним матеріалом;

б) великі пластичні деформації контактних шарів;

в) безперервне відновлення поверхонь деталі й частково інструменту, тобто наявність контакту ювенільно чистих поверхонь;

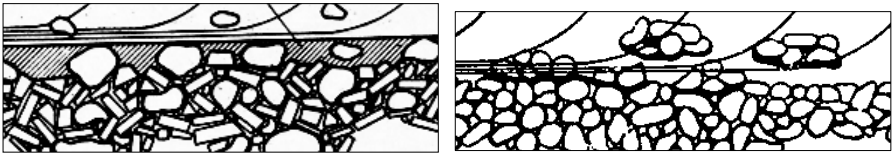
г) схоплювання (адгезія) у зонах контакту і утворення за руйнування осередків схоплювання впадин (кратерів) на поверхнях інструменту, негайно заповнюваних матеріалом деталі.

Як уже зазначалось у підрозділі 1.3.1 у процесі різання кожна мить вступають у взаємодію нові ділянки контактувальних поверхонь («передня поверхня – стружка» і «задня поверхня – поверхня різання»), у результаті цього постійно підтримується досить висока швидкість розчинення, властива початковому періоду дифузії. Причому зі збільшенням швидкості різання, а отже й температури різання, загальмований шар оброблюваного матеріалу на площадках контакту стає більш тонким і в'язко-текучим.

Різні компоненти твердого сплаву дифундують в оброблюваний матеріал із різною швидкістю (див. підрозд. 1.3.1.2). Найбільш швидко дифундує вуглець, повільніше – вольфрам, кобальт і титан. У результаті неоднакової швидкості розчинення між інструментом, стружкою й поверхнею різання утворюються три дифузійних шари (див. рис. 1.31). Найбільш віддаленим від контактних поверхонь є навуглецьований шар. Ближче до межі поділу розміщений шар білого кольору, що являє собою твердий розчин вуглецю і вольфраму або вуглецю, вольфраму і титану в γ -залізі. Третій шар є інтерметалідом у вигляді залізвольфрамового або більш складного карбіду. Структурні перетворення в цьому шарі, розміщеному практично на межі поділу твердого сплаву з оброблюваним матеріалом, відбуваються в результаті збіднення контактних поверхонь інструменту вуглецем і дифузії у твердий сплав заліза з оброблюваного матеріалу. Порівняно з основним масивом твердого сплаву третій шар є більш крихким і менш зміцненим, що призводить до зрізу з контактних поверхонь інструменту рухомими стружкою і поверхнею різання шарів інструментального матеріалу. Отже, дифузійне зношування залежить не лише від безпосереднього перенесення атомів інструментального матеріалу в деталь і стружку, а й від того, що у результаті дифузійних процесів у поверхневих шарах інструменту відбуваються структурні перетворення, які призводять до окрихчування й знеміцнення робочих поверхонь леза інструменту. Ослаблені дифузійними процесами як окремі карбіди (рис. 1.56 а), так і їх конгломерати (рис. 1.56 б) або навіть цілі шари з них зрізуються й видаляються оброблюваним матеріалом і стружкою.

Таким чином, дифузійне зношування необхідно розглядати як результат двох процесів: власне дифузійного розчинення та диспергування (здрібнювання) знеміцнених контактних поверхонь.

Під час різання інструментами з однокарбідних сплавів у їхньому дифузійному зношуванні тією або іншою мірою беруть участь обидва зазначених процеси. Зношування ж інструментів із двокарбідних сплавів відбувається трохи інакше. Титановольфрамкові карбіди в оброблюваному матеріалі розчиняються значно повільніше, ніж вольфрамкові. Тому на контактних поверхнях утворюються мікростави із зерен із титановольфрамкових карбідів, що ще не повністю розчинилися. Западини між



a

б

Рисунок 1.56 – Схема відділення частинок інструментального матеріалу по границях зерен (а) та їх конгломератів (б)

цими зернами заповнюються оброблюваним матеріалом із контактних шарів стружки або поверхні різання, створюючи осередки застою (рис. 1.56 а), що збільшує час дифузії й сповільнює дифузійне розчинення. Тому за високих швидкостей (температур) різання двокарбідні сплави мають більшу зносостійкість, ніж однокарбідні. Водночас за температур різання $\Theta < 800$ °С, коли дифузійне розчинення практично відсутнє, зносостійкість однокарбідних твердих сплавів мало відрізняється від зносостійкості двокарбідних, а іноді й перевищує її за рахунок зменшення частки адгезійних процесів у зв'язку з меншою кількістю осередків застою (рис. 1.56 а). Інтенсивність перебігу дифузійних процесів помітно зменшується за застосування інструмен-

тальних матеріалів або зносостійких покриттів, хімічно інертних стосовно оброблюваного матеріалу.

Частинки твердого сплаву у вигляді продуктів зношування за високих швидкостей мають відносно малі розміри, тоді як за низьких швидкостей відриваються конгломерати зерен карбідів і зв'язки. Це є свідомством того, що за низьких швидкостей різання визначальним фактором у зношуванні є знеміцнення й руйнування поверхневих дефектних шарів, тоді як за високих швидкостей різання домінувальним у певних умовах є дифузійне розчинення. Поява крихкого знеміцненого (дефектного) шару в поверхневих шарах інструменту є причиною відриву й зрізу блоків матеріалу інструменту уздовж передньої та задньої поверхонь і підвищення інтенсивності їх зношування.

Структурні перетворення й знеміцнення поверхневих шарів вирішальним чином впливають на інтенсивність зношування твердого сплаву. Знеміцнені шари окрихчуються й окремими блоками відриваються або зрізуються під дією навантажувальних напружень, і інструмент швидше виходить із ладу.

Зріз і руйнування окремих блоків матеріалу інструменту відбуваються періодично. Спочатку відбувається дифузія компонентів твердого сплаву в залізі, а також дифузія заліза у твердий сплав, потім настають структурні зміни в поверхневих шарах і вже потім їх знеміцнення і руйнування. Такий процес періодично повторюється. Особливо характерним він є для титано-вольфрамових твердих сплавів. Коли застій сталі в западинах на поверхні контакту триває довгий час, концентрація компонентів поступово вирівнюється, а градієнт концентрації знижується, що зменшує швидкість розчинення. Застій сталі в западинах триває доти, поки сталь не розчинить основу титано-вольфрамових карбідів і не відбудеться його відділення від основної маси твердого сплаву, далі знову відбувається утворення западини, і процес повторюється. Очевидно, час застою за інших однакових умов буде залежати від величини титано-

вольфрамових карбідів. Середня швидкість розчинення поверхні інструменту в сталі залежить також і від кількості титано-вольфрамових карбідів, і від їх розмірів.

Матеріал різального інструменту повинен бути по можливості хімічно інертним стосовно оброблюваного матеріалу, аж до температури плавлення останнього. Залежно від властивостей оброблюваного матеріалу різні марки інструментального матеріалу можуть по-різному проявити себе. Наприклад, під час оброблення сталі на високих швидкостях інструментальний матеріал на основі карбіду титану, танталу або титано-вольфрамових карбідів за дифузійною зносостійкістю дасть результати, кращі, ніж сплав, що містить лише карбід вольфраму. Однокарбідні сплави типу ВК не будуть поступатися двокарбідним твердим сплавам типу ТК під час оброблення сталі до початку інтенсивного дифузійного зношування. Те саме можна сказати щодо оброблення загартованих та інших важкооброблюваних сталей, якщо їхнє оброблення проводять в умовах, коли температура різання не перевищує 900 °С. У цих умовах більш міцні сплави ВК повинні давати результати не гірші, ніж сплави ТК.

Задовільні результати застосування вольфрамокобальтових твердих сплавів під час оброблення чавуну пояснюються тим, що температура різання під час оброблення чавуну звичайно нижча від температури початку інтенсивної дифузії між сталлю й карбідом вольфраму, а також через підвищену концентрацію вуглецю, у зв'язку з чим зневуглицювання твердого сплаву відбувається з меншою швидкістю. Успіх застосування вольфрамокобальтових твердих сплавів для оброблення багатьох кольорових металів (латунь, бронза, алюмінієві сплави, магнієві сплави тощо) обумовлений тим, що вони або не утворюють із карбідом вольфраму сплавів, або швидкість розчинення аж до температури плавлення цих матеріалів залишається незначною, тобто хімічна дія на кар-

біди вольфраму всіх цих металів навіть за температури плавлення останніх виявляється слабкою.

Оброблення титану і його сплавів титано-вольфрамовими твердими сплавами дає гірші результати порівнян з обробленням цих матеріалів вольфрамо-кобальтовим твердим сплавом, оскільки хімічна дія титану на карбід вольфраму є більш слабкою, ніж на карбід титану.

Таким чином, у період різання за рахунок перепаду концентрацій компонентів має місце процес взаємного розчинення, тобто і стружка, і оброблювана деталь можуть нести матеріал інструменту у вигляді продифундованих у них елементів інструментального матеріалу, причому продукти зношування на контактних поверхнях стружки і заготовки розподіляються дискретно. Тому сумарне зношування різального інструменту буде містити в собі й зношування, спричинене розчиненням матеріалу різального інструменту в оброблюваному матеріалі, тобто зношування, викликане процесом дифузії. За деяких умов оброблення, наприклад, за тонкого алмазного точіння заготовок із конструкційних сталей, яке характеризується великими швидкостями різання і відносно високими температурами, маса інструментального матеріалу, розчиненого за період різання в стружці та біля поверхні різання, може бути близькою до маси матеріалу, фактично вилученого з робочих ділянок поверхонь (передньої та задньої) леза інструменту.

1.3.4.7 Евтектичне зношування

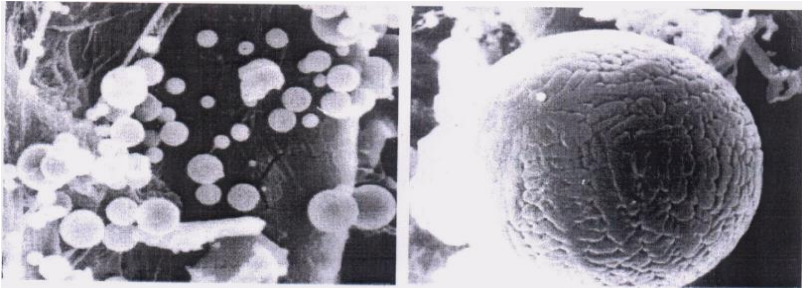
Евтектичне зношування (зношення оплавленням) досить часто проявляється під час оброблення з високими швидкостями різання, коли можуть виникати високі температури різання. Наприклад, під час оброблення металів на основі Fe інструментом із полікристалів на основі кубічного нітриду бору (КНБ) температура різання може досягати значень 1 200 °C і вище.

У цьому випадку процес різання супроводжується утворенням на контактних поверхнях інструменту тонкого шару

сполук, температура плавлення яких нижча, ніж температури плавлення оброблюваного й інструментального матеріалів. У результаті цього контакт інструменту зі стружкою й поверхнею різання відбувається через шар рідкої фази, тобто в зоні контакту реалізується механізм контактної-реактивного плавлення. Це припущення підтверджується тим, що, наприклад, евтектика Fe-Fe₂V плавиться за температури 1 177 °С, а евтектики CrV₃ і Fe₄N – за 1 000–1 100 °С. З огляду на те, що за контакту можуть утворюватися складні сполук, наприклад, потрійні, температура їхнього плавлення може бути ще нижчою. Додатковою причиною утворення рідкої фази на контактних поверхнях інструменту є окиснювання інструментального матеріалу, розм'якшення й плавлення борного ангідриду, наявного в складі КНБ.

З одного боку, утворення рідкої фази супроводжується зменшенням коефіцієнта тертя, що сприяє зменшенню відносного зношування, а з іншого – рідка фаза, що складається з хімічних елементів, що входять до складу інструментального й оброблюваного матеріалів і компонентів газового середовища, яке оточує контакт, виноситься із зони контакту й осідає у вигляді «нальоту» на поверхнях інструменту поблизу цих контактних зон, а також розпорошується в довкілля у вигляді дрібних крапель, тобто утворення рідкої фази супроводжується руйнуванням контактних зон поверхонь леза й збільшенням зношування інструменту. За певних умов цей фактор може істотно превалювати над першим.

На рисунку 1.57 показані частинки, що утворилися з матеріалу рідкої фази, викинутої із зони контакту в довкілля. Частинки сфероподібної форми мають яскраво виражену дендритну структуру литого матеріалу. На поверхні фільтра площею 10⁻⁵ мм² виявлено 150–200 таких частинок із розміром від декількох часток мкм до 30 мкм, що свідчить про значущість цього явища для процесу зношування робочих поверхонь інструменту із КНБ. Під час різання аналогічних матеріалів інструментами із твердого сплаву Т15К6 з покриттями TiC і TiN і



а

б

Рисунок 1.57 – Частинки, що утворилися з матеріалу рідкої фази і викинуті із зони контакту леза зі стружкою в доквіллія

різальної кераміки ОНТ-20, ВОК60 ефекту утворення евтектик зі зниженими температурами плавлення виявлено не було.

Ефективними заходами зниження евтектичного зношування інструментів із КНБ є застосування МОТС із змащувальною дією, наприклад, мастило з низькою в'язкістю.

1.3.4.8 *Інтегральне (сумарне) зношування інструменту*

До цього часу ще досить важко точно відповісти на запитання, які механізми зношування визначають працездатність інструменту в різних умовах його експлуатації. На рисунку 1.58 наведена умовна схема впливу на стійкість інструменту різних механізмів зношування залежно від швидкості (температури) різання під час точіння. Наприклад, механічне (1) та адгезійно-утомне руйнування (2) істотно обумовлюють інтенсивність зношування до середніх температур різання ($\sim 700^\circ\text{C}$), а абразивне зношування (3) має місце в усьому швидкісному (температурному) діапазоні.

Під час точіння на низьких швидкостях різання ($V < V_0$, де V_0 – швидкість різання, що відповідає мінімальній інтенсивності зношування, тобто максимальній стійкості інструменту) циклічний характер руйнування локальних зон адгезійного контакту (2) інструментального й оброблюваного матеріалів приво-

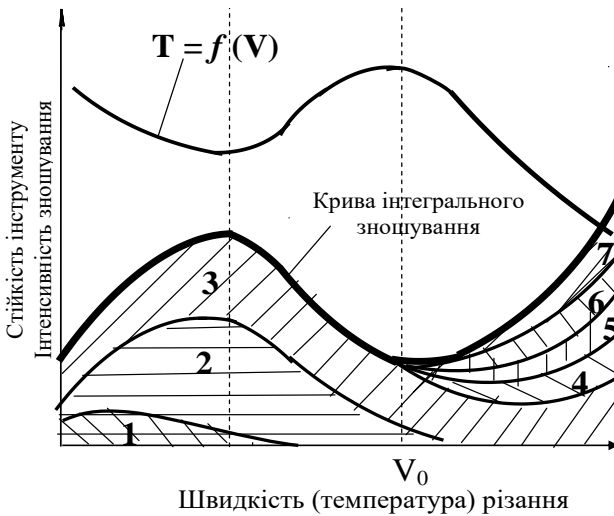


Рисунок 1.58 – Вплив швидкості (температури) різання на інтенсивність зношування і стійкість різального інструменту:

- 1 – механічне зношування; 2 – адгезійно-утомне зношування;
- 3 – абразивне зношування; 4 – термоутомне зношування;
- 5 – окисне (хімічне) зношування; 6 – дифузійне зношування;
- 7 – евтектичне зношування

дить до утомного руйнування поверхневих шарів інструментального матеріалу, тобто зношування відбувається вириванням й віднесенням частинок твердого сплаву, знеміцненого явищами утоми. Водночас зона найбільшого зношування (виривів) розміщена на деякій відстані від різальної кромки. Водночас усі поглиблення на поверхні тертя, що утворюються в результаті механічного й утомного руйнування, а також локальних виривань інструментального матеріалу через дію високих контактних навантажень, заповнюються оброблюваним матеріалом, який утворює на площадці зношування тонкий шар, утримуваний силами адгезії.

Абразивне зношування (3) інструменту, яке має місце під час роботи на всіх швидкостях різання, пов'язане не лише з «різанням – дряпанням» робочих поверхонь леза твердими ча-

стинками, що містяться в оброблюваному матеріалі, або зруйнованого наросту, а й із явищем «самозношування». Самозношування полягає в дряпанні контактних поверхонь інструменту зернами карбідів твердого сплаву, вирваними силами адгезії із цих самих поверхонь і які рухаються разом із контактним загальмованим шаром оброблюваного матеріалу. Під час роботи на високих швидкостях різання ($V > V_0$), тобто за температур різання вище ніж $750\text{ }^\circ\text{C}$ має місце підвищення інтенсивності зношування, що обумовлюється інтенсифікацією таких механізмів зношування, як термоутомне (4), окисне (5), дифузійне (6) та евтектичне (7). Дифузійні процеси в діапазоні низьких швидкостей різання ($V < V_0$) можуть відбуватися лише за температур різання вище ніж $750\text{ }^\circ\text{C}$ і зазвичай проявляються лише в місцях тривалого контакту інструментального й оброблюваного матеріалів. Водночас дифузія відбувається фронтально не лише між безпосередньо третювими поверхнями контактувальних матеріалів, а й між інструментальним матеріалом і тонким шаром оброблюваного матеріалу, утримуваним силами адгезії на поверхні тертя. Зношування, таким чином, відбувається не лише в результаті взаємного дифузійного розчинення матеріалів інструменту і деталі, але також і вириванням і видаленням силами адгезії частинок інструментального матеріалу, знеміщеного дифузійними процесами, тому що в результаті дифузійних процесів у поверхневих шарах відбуваються структурні перетворення, які призводять до окрихчування і знемічення робочих ділянок поверхонь леза інструменту. Деяке зниження інтенсивності зношування інструменту з підвищенням швидкості різання в діапазоні $V < V_0$ може бути пояснено зниженням адгезійних і утомних явищ. Підвищення швидкості різання в діапазоні $V > V_0$ приводить до зростання інтенсивності зношування інструменту за рахунок різкого збільшення, насамперед взаємного дифузійного розчинення інструментального й оброблюваного матеріалів з підключенням до процесу дифузії нових хімічних елементів. Окисний, дифузійний і евтектичний механізми зно-

шугвання є термоактивними процесами, і їхній внесок у сумарне зношування інтенсивно зростає з підвищенням температури. На механізми зношування можуть накладатися явища знеміцнення (повзучість) інструментального матеріалу в результаті дії високих температур і швидкостей деформації. Саме процеси повзучості й динамічної рекристалізації швидкорізальної сталі приводять до її інтенсивного зношування вже за температур різання вище ніж 650–700 °С.

Тому за невисоких швидкостей (температур) різання найкращу зносостійкість мають матеріали, які здатні протистояти утомленим процесам (більш тріщиностійкі) – швидкорізальні сталі, тверді сплави групи ВК і ТТК. Зі збільшенням швидкості (температури) різання з погляду прийнятної зносостійкості починають домінувати тверді сплави групи ТК, різальна кераміка та СТМ на основі алмаза і КНБ, що мають більш високу теплостійкість.

1.3.5 Критерії зношування різальних інструментів

За експлуатації інструменту в процесі його зношування настає момент, що характеризується порушенням працездатного стану (див. підрозд. 1.1), коли подальше різання інструментом повинне бути припинене і потрібна його заміна. Характеристиками непрацездатного стану різального інструменту (леза) є: **«відмова різального інструменту» («відмова»)**, **«раптова відмова різального інструменту» («раптова відмова»)** і **«поступова відмова різального інструменту» («поступова відмова»)**. **Раптова відмова** зазвичай настає внаслідок руйнування леза різального інструменту. **Поступова відмова різального інструменту** настає після досягнення хоча б одним із його встановлених параметрів, поступово змінюваним значенням вимог або характеристик оброблення (див. підрозд. 1.1) **критерію відмови**. **Критерій відмови різального інструменту (леза)** визначається залежно від вимог до оброблення за виконання конкретної технологічної операції. Наприклад, на операціях по-

переднього оброблення з невисокими вимогами до шорсткості поверхні й точності розмірів за критерій відмови можуть бути взяті гранично допустимі значення зношування інструменту по задній поверхні леза, визначені за умовою його раціональної експлуатації, значення сили різання та ін. На операціях остаточного оброблення різальним інструментом, де основними вимогами до оброблення є допуски розмірів, форми й розміщення оброблених поверхонь, критерієм відмови може бути прийняте їх гранично допустиме значення.

Частковим випадком критерію відмови є **критерій затуплення різального інструменту (леза)** («*критерій затуплення*»). Це критерій відмови різального інструменту (леза), який можна характеризувати максимально допустимим значенням відповідної ознаки (або суми ознак) зношування різального інструменту, наприклад, величини площадки зношування по задній поверхні леза (див. рис. 1.48), після досягнення якого настає його відмова. Час роботи інструменту до досягнення ним критерію зношування називають періодом стійкості **T** (див. підрозд. 1.1).

Надання після відмови робочої частини різальному інструменту (леза) працездатного стану називають **відновленням різального інструменту (леза)**.

Примітка. Відновлення різального інструменту (леза) здійснюється або його заточенням, або заміною леза, що відмовило

Періодичність відновлення інструментів («*призначена періодичність відновлення різального інструменту (леза)*») визначається з урахуванням їхнього функціонального призначення, конструктивного виконання, пристосованості до відновлення, а також обмежень умов технологічної операції, наприклад, забезпеченням найбільшої продуктивності або найменших зведених витрат на обробку. **Відновлюваність різального інструменту (леза)** – властивість різального інструменту (леза), що полягає в пристосованості його робочої частини (леза) до

відновлення, наприклад, заточуванням. Відновлення різального інструменту здійснюється за відмови або за призначеною періодичністю.

Виникає питання: як установити момент затуплення інструменту й коли робити його заміну? Інакше кажучи, який варто встановити критерій затуплення, під яким розуміють суму ознак (або одна вирішальна ознака), за яких робота інструментом повинна бути припинена. Якщо, наприклад, виконувати оброблення переточуванням інструментом і зношування доводити лише до т. *A* (див. рис. 1.51 та 1.52), а потім його переточувати, то таке зношування буде неекономічним, тому що інструмент доведеться переточувати занадто часто. З іншого боку, невигідно доводити інструмент і до занадто великого (катастрофічного) зношування, що відповідає точці *C*, тому що тоді за його переточування доведеться знімати з леза великий шар інструментального матеріалу, внаслідок цього зменшується кількість переточувань інструменту і його ресурс. Доводити інструмент до великого зношування не можна і тому, що за досягнення певної величини зношування по задній поверхні збільшуються сили різання, підвищується температура різання, погіршується якість обробленої поверхні, знижується точність оброблення, з'являються вібрації, що особливо недопустимо за чистового оброблення.

Існує кілька критеріїв (ознак) зношування інструментів: критерій блискучої смужки, силовий критерій, критерій рівного зношування, критерій оптимального зношування, критерій технологічного зношування.

1.3.5.1 Критерій блискучої смужки

Цей критерій використовують під час точіння. Різець вважається зношеним, і потрібна його заміна, коли під час оброблення сталі на поверхні різання з'являється блискуча смужка (рис. 1.59), а під час оброблення чавуну – темні плями. Поява блискучої смужки відповідає початку третього періоду зношування (див. рис. 1.52), коли процес зношування різця починає супроводжуватися інтенсивним викришуванням різальної кромки, у результаті цього в цих місцях відбувається змінання поверхні різання і неначе її полірування. За подальшої роботи впродовж 1–2 хв може відбутися повне руйнування різальної кромки, й різець остаточно вийде з ладу. Зазвичай під час роботи різцями із твердосплавними пластинками, особливо з малими та середніми товщинами зрізів, помітити блискучу смужку на поверхні різання буває досить важко. Якщо радіус вершини леза $r_b > 0$, то блискуча смужка може з'являтися на обробленій поверхні. Під час оброблення чавуну на поверхні різання або на обробленій поверхні можуть з'являтися темні плями.

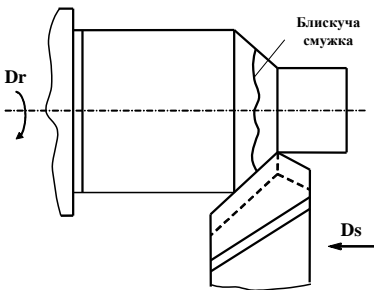


Рисунок 1.59 – Блискуча смужка на поверхні різання

Цей критерій у виробничих умовах використовується досить часто. Водночас цей критерій не можна застосовувати за чистового оброблення, а також під час роботи складним і дорогим інструментом.

1.3.5.2 Силовий критерій (критерій Шлізенгера)

Для оцінювання ступеня затуплення інструменту бажано мати об'єктивні й легко спостережувані показники, що не вимагають доведення інструменту до повного зношування, після якого його експлуатація стає явно нерентабельною. До таких показників можна віднести силовий

критерій, коли інструмент вважається затупленим, якщо починається різке збільшення сил різання. Були зроблені спроби встановити як критерій затуплення такі «жорсткі» показники, як підвищення складової сили різання P_z до 20 % або P_x до 100 % і збільшення затрачуваної потужності на 20 %. Практика показала істотні недоліки цього методу.

Потужність, що витрачається в процесі різання, не завжди характеризує ступінь затуплення інструменту, тому що процес утворення лунки й зміни її розмірів може супроводжуватися як підвищенням навантаження і збільшенням потужності, так і її зменшенням. Це пов'язане з тим, що під час утворення лунки, коли різальна кромка ще не зруйнована, зменшується фактичний кут різання δ_f (рис. 1.60), верстат починає працювати легше, а якщо при цьому мають місце вібрації, то вони зменшуються. Крім того, у цих умовах полегшується утворення стійкого наросту, що захищає різальну кромку разом з фаскою на передній поверхні різця, і це також супроводжується зменшенням сили різання. Усе це сприяє зменшенню потужності й більш спокійній роботі верстата. І лише в процесі подальшого збільшення площадки зношування на задній поверхні (одночасно зі зношуванням передньої поверхні зношується й задня) і викришування різальної кромки буде спостерігатися помітне підвищення потужності. Тому для ефективного використання цього критерію необхідно в кожному конкретному випадку експериментально установлювати значення складових сили різання, що відповідають допустимій величині зношування інструменту.

До переваг цього критерію можна віднести можливість авто-

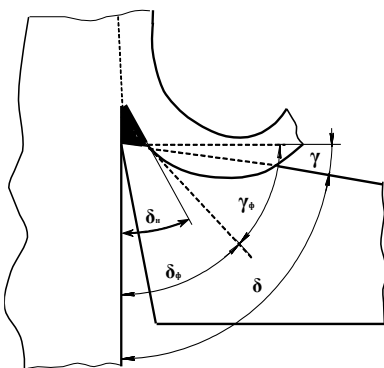


Рисунок 1.60 – Зміна кутів різання з утворенням лунки й наросту

матичного зупинення верстата за досягнення потужності, що відповідає критичному стану інструменту, а до його недоліків належить необхідність мати на верстаті спеціальні прилади для вимірювання сил або потужності, що діють під час різання. Тому силовий критерій зазвичай використовують у лабораторних умовах під час проведення досліджень, а у виробничих умовах застосовують рідко, переважно на спеціальних верстатах у багатосерійному і масовому виробництвах.

1.3.5.3 Критерій рівного зношування

Для оцінювання ступеня зношування інструменту за допомогою цього критерію за основу беруть лінійне зношування задньої поверхні, тому що задня поверхня інструменту зношується завжди під час оброблювання будь-яких матеріалів і за будь-яких режимів різання, і вимірювання ширини площадки зношування значно простіше й точніше, ніж глибини лунки зношування. Для різних груп інструментів, які можуть експлуатуватися за різних випадкових сполучень факторів (властивості оброблюваного й інструментального матеріалів, швидкість і глибина різання, подача, геометрія леза й ін.), що визначають інтенсивність зношування й відповідно вид кривої зношування, максимально допустиме лінійне зношування по задній поверхні леза встановлюють рівновеликим для всього сімейства кривих зношування. Його прийнято називати **критерієм рівного зношування**. На рисунку 1.61 показане сімейство кривих зношування для різних значень швидкості різання ($V_3 > V_2 > V_1$) за умови, що інші фактори залишаються незмінними.

Критерій рівного зношування $\delta_{p3} = \delta_{3(1,2,3)}$ являє собою горизонтальну лінію, що перетинає криві зношування $\delta_3(\tau)$ у точках 1, 2, 3, тобто для всіх кривих гранично допустима величина зношування $\delta_p = \delta_{p3} = \text{const}$. За використання критерію рівного зношування в цехових умовах необхідно стежити за станом зношування задньої поверхні леза зазвичай експериментально і

за досягнення встановленого критерію рівного зношування подалішу роботу необхідно припинити й зношений інструмент (лезо) замінити новим або переточеним. Для різних видів і типорозмірів різального інструменту допустимі значення зношування δ_p містяться в довідковій і нормативній літературі.

1.3.5.4 Критерій оптимального зношування

Цим критерієм користуються, якщо інструмент зношується одночасно як по задній, так і по передній поверхнях (другий вид зношування).

На кінцевих ділянках кожної із кривих (рис. 1.61) досить чітко позначаються точки перегину, за якими різко зростає інтенсивність зношування.

Критерій рівного зношування звичайно відповідає точці перегину кривої зношування для найменшої з досліджених швидкостей різання. Тому точки перегину для великих швидкостей різання розміщуються вище від лінії рівного зношування. Наявність прямолінійних відрізків кривих зношування (2-4, 3-5), що лежать між горизонтальною лінією рівного зношування та точками перегину, свідчить про те, що під час роботи зі швидкостями різання $V > V_1$ за використання критерію рівного зношування залишаються невикористаними резерви різальних властивостей інструментів ($T_2 < T_4$, $T_3 < T_5$). У зв'язку із цим у

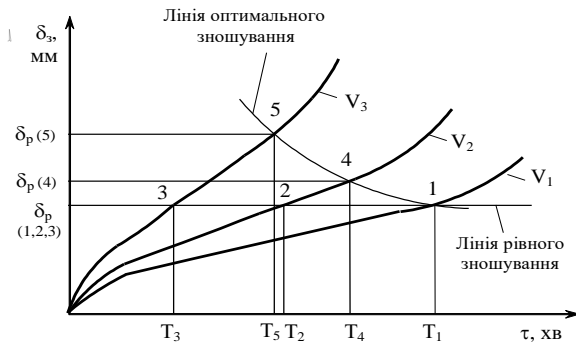


Рисунок 1.61 – Критерій рівного й оптимального зношування

низці практичних випадків доцільно замість критерію рівного зношування застосовувати більш продуктивний і економічний **критерій оптимального зношування**. Лінія критерію оптимального зношування криволінійна і проходить через точки 1, 4, 5 перегинів кривих зношування, як показано на рисунку 1.61.

Інструмент вважають затупленим, коли лінійне зношування задньої поверхні досягає значення, рівного оптимальному зношуванню, $\delta_p_{opt} = \delta_p(1,4,5)$. Під оптимальним зношуванням розуміють таку величину зношування, за якої **повний період стійкості різального інструменту** досягає максимальної величини ($T_\Sigma = \max$ функції (1.13)). **Повний період стійкості різального інструменту (леза)** («повний період стійкості»). Не допускається «**термін служби**») – сума періодів стійкості різального інструменту (леза) від початку різання новим інструментом (лезом) до досягнення граничного стану.

Повний період стійкості з достатньою точністю визначають за формулою

$$T_\Sigma = \kappa T, \quad (1.13)$$

де κ – число різальних кромки (непереточуваний інструмент); для інструменту, що **переточується**, $\kappa = i + 1$ (i – число переточувань, що допускаються інструментом до його повної амортизації (досягнення граничного стану)); T – період стійкості. Таким чином, **повний період стійкості T_Σ** чисельно характеризує **ресурс інструменту** до того, як він буде спрямований на утилізацію.

Коли конструкція різального інструменту передбачає застосування змінних багатогранних непереточуваних пластин (ЗБНП), відновлення різальних властивостей інструменту роблять їхнім поворотом на наступну кромку (грань). Норма зношування багатогранної пластини дорівнює значенню **максимального допустимого лінійного зношування** (див. підрозд. 1.3.5) кожної її грані (вершини).

Якщо надати робочій частині різального інструменту (леза) працездатного стану після відмови (*відновлення різального інструменту*) здійснюється заточенням, то число переточувань i можна визначити зі схеми, наведеної на рисунку 1.62, на якому зображена зношена частина леза різального інструменту з лінійним зношуванням δ_3 . Щоб інструмент став знову працездатним, під час переточування із задньої поверхні повинен бути знятий шар інструментального матеріалу (у цьому випадку – твердого сплаву), товщиною $h + \Delta h$, де h – частина

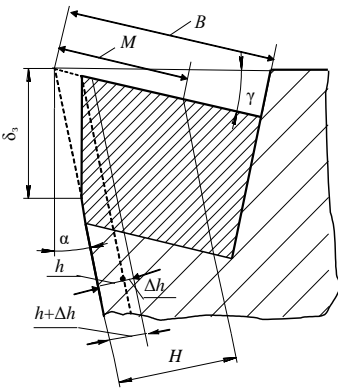


Рисунок 1.62 – Схема переточування твердосплавного інструменту

товщини сточуваного шару, що залежить від прийнятої гранично допустимої величини зношування $\delta_3 = \delta_p$, мм; Δh – додатковий шар ($\Delta h = 0,1-0,15$ мм), що включає допуск на заточення й шар матеріалу, що видаляється для усунення дефектів, які утворюються під зношеною частиною задньої поверхні. Величину $h + \Delta h$ називають *нормованою товщиною сточуваного шару*, або *нормою зношування інструменту*. Величину h можна визначити з виразу

$$h = \delta_3 \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos(\alpha + \gamma)}{\cos \gamma}. \quad (1.14)$$

Введемо позначення $\frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos(\alpha + \gamma)}{\cos \gamma} = c$,

тоді

$$h = c \delta_3. \quad (1.15)$$

Розмір M , вимірюваний уздовж передньої поверхні, називається допустимою величиною сточування, тобто він визначає досягнення інструментом свого граничного стану. Його конкретна величина обумовлюється конструкцією інструменту. Для різців $M = 2/3B$, де B – ширина пластинки, мм, у напрямку, перпендикулярному до головної різальної кромки. Розмір H шару інструментального матеріалу, що відповідає допустимій величині сточування, дорівнює $H = M \cdot \cos(\alpha + \gamma)$. Кількість *допустимих* переточувань i і повний період *стійкості* T_{Σ} (з урахуванням (1.15) можна визначити за такими формулами:

$$i = \frac{H}{h + \Delta h}; T_{\Sigma} = \left(\frac{H}{h + \Delta h} + 1 \right) T = \left(\frac{H}{c\delta_3 + \Delta h} + 1 \right) T. \quad (1.16)$$

З виразів (1.16) бачимо, що повний період стійкості є функцією зношування δ_3 . Для знаходження величини зношування $\delta_{3 \text{ опт}}$, за якого T_{Σ} буде найбільшим, необхідно вирішити завдання із знаходження максимуму цієї функції, тобто

$$\frac{dT_{\Sigma}}{d\delta_3} = 0. \quad (1.17)$$

Величину оптимального зношування $\delta_3 \text{ опт}$ можна визначити графічним методом. Для цього експериментально встановлюють криву зношування інструменту від часу різання, доводячи його до початку катастрофічної ділянки зношування (рис. 1.63 а). Далі на негативній осі ординат визначають точку **В**, що відстоїть від початку координат на відстані, що дорівнює $OB = \frac{\Delta h}{c} = \frac{0,15 \cos \gamma}{\text{tg} \alpha \cdot \cos(\alpha + \gamma)}$. Проводячи із точки **В** дотичну до кривої зношування, визначають на ній точку **А**. Величина зношування в точці **А** і буде критерієм оптимального зношування $\delta_3 \text{ опт}$, за якого повний період стійкості прагне до максимального значення (рис. 1.63 б):

$$T_{\Sigma \text{ max}} = (i+1)T \rightarrow \text{max} .$$

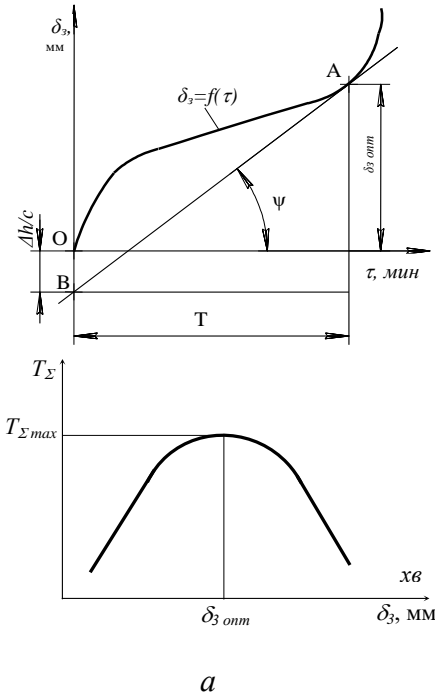


Рисунок 1.63 – Схема для визначення величини оптимального зношування

У разі якщо різання продовжувати до зношування по задній поверхні, що перевищує оптимальні значення $\delta_3 > \delta_{3\text{ опт}}$, то зменшиться можлива кількість переточувань через підвищене зношування на катастрофічній ділянці зношування, й повний період стійкості зменшиться, тобто $T_{\Sigma} < T_{\Sigma\text{ max}}$. У разі якщо різання припинити раніше, ніж величина зношування досягне оптимального значення $\delta_3 < \delta_{3\text{ опт}}$, то інструмент буде відправлятися на переточування ще до того, як будуть повністю використані його «різальні» можливості, тобто ще буде залишатися запас ресурсу за стійкістю. У цьому разі повний період стійкості також зменшиться, тобто $T_{\Sigma} < T_{\Sigma\text{ max}}$.

Критерій оптимального зношування широко застосовують у лабораторних умовах за встановлення стійкісних залежностей для інструментів, призначених для чорнового й напівчистового оброблення. Застосування цього критерію у виробничих умовах доцільно за масового виробництва, наприклад, на автоматичних лініях, під час експлуатації дорогого інструменту, зокрема фасонного, за використання інструменту на верстатах із числовим програмним керуванням і т. ін.

1.3.5.5 Критерій технологічного зношування

Під технологічним зношуванням розуміють такий, за якого роботу інструменту припиняють за технологічними обмеженнями: різке збільшення шорсткості обробленої поверхні, викикуване зношуванням інструменту; втрата інструментом необхідного розміру, особливо того, що визначає положення вершини леза; погіршення стану обробленої поверхні, наприклад, формування розтягувальних напружень у ній та тріщиноутворення тощо; виникнення вібрацій у технологічній системі; надмірне нагрівання деталі, яке може супроводжуватися структурними перетворюваннями, формуванням припиків і зменшенням твердості та ін. Цей критерій зазвичай застосовують до інструменту, призначеного для чистового (остаточного) або напівчист-

тового оброблення. Сутність його полягає в тому, що інструмент вважається зношеним (затупленим), коли стан оброблюваної системи або оброблена поверхня перестають відповідати технічним умовам. Зазвичай за цим критерієм інструмент потребує заміни в разі зношування, меншому, ніж за всіх інших критеріїв. Це пояснюється тим, що, наприклад, виникнення вібрацій або зміна розміру обробленої поверхні – **точнісна відмова різального інструменту** (вихід розміру деталі за поле допуску), погіршення її чистоти (мікрогеометрія) або зміна фізико-хіміко-механічного стану обробленої поверхні внаслідок зношування інструменту настає зазвичай раніше, ніж зношування досягне кінця другого періоду (див. рис. 2.1), тому що ці показники значною мірою можуть залежати не лише від величини зношування лез інструменту, а й від прийнятих умов оброблення (схеми базування, жорсткості елементів оброблюваної системи тощо).

Точнісна відмова різального інструменту. Наприклад, під час токарного оброблення вплив зношування вершини різця (у перетині її радіальною (в радіальному напрямку) січною площиною P_p) на зміну діаметра обробленої поверхні показаний на рисунку 1.64. За відсутності зношування (на початку роботи (рис. 1.64 а)) діаметр обробленої поверхні дорівнює d мм. За першого і другого видів зношування (див. рис. 1.48) у процесі збільшення зношування різця цей розмір збільшується, і за радіального зношування δ_p (рис. 1.64 б) він буде $(d + 2\delta_p)$ мм.

Поступову відмову різального інструменту (леза), що настає після досягнення розміром, формою або розміщенням обробленої поверхні межі поля допуску, називають **точнісною відмовою різального інструменту (леза)**, а стійкість різця, що відповідає граничній величині зношування в радіальному напрямку, називають **розмірною стійкістю**.

Критерій технологічного зношування переважно використовують під час дослідження процесу різання й експлуатації інструментів, призначених для чистового (остаточного, тонкого) оброблення.

1.3.6 Максимально допустиме зношування інструментів

У виробничій практиці під час експлуатації інструментів, що переточуються, широко використовують поняття **максимальне допустиме зношування (величина допустимого зношування) інструменту**.

За досягнення величини максимально допустимого зношування інструменту необхідно відновити його різальні здатності. Перевищення величини *максимально допустимого зношування* різко скорочує його ресурс і відповідно збільшує витрати інструментів на виконання відповідної технологічної операції. Останнє часто приводить до істотного зростання собівартості

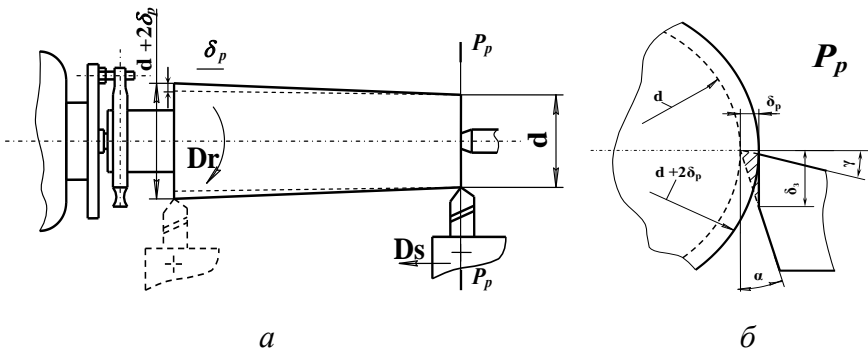


Рисунок 1.64 – Схема впливу зношування різця на розмір обробленої поверхні

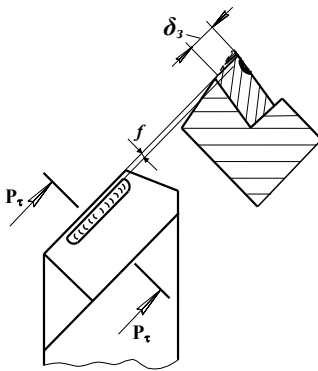


Рисунок 1.65 – Схема зношування токарного різця

інструменту, використовується для розрахунку норм витрат інструментів під час виконання тих чи інших технологічних операцій, їх собівартості, прогнозування необхідної кількості інструментів для виконання потрібної програми випуску виробів, ціни виробу і т. ін. Величина максимально допустимого зношування залежить від виду й матеріалу інструменту, умов його експлуатації на відповідній операції, типу виробництва тощо.

Токарні різці з пластинками із твердих сплавів під час оброблення сталей і чавуну можуть зношуватись як по задній, так і по передній поверхнях (рис. 1.65). Під час оцінювання ступеня зношування леза інструменту (величини допустимого зношування) зазвичай розглядають зношування по задній поверхні, тому що зношування по передній поверхні в меншому ступені позначається на проходженні процесу різання. Він різко проявляється лише за повного зношування різця, коли буде практично повністю знищена площадка f між різальною кромкою й лункою зношування (рис. 1.65 та 1.48 б, в). Найчастіше максимальну ширину δ_3 площадка зношування на задній поверхні має біля вершини різця або на її перехідній частині (див. рис. 1.48 а, б), тобто на ділянці леза різця з найгіршими умовами тепловідведення.

операції, виконуваної інструментом, оскільки в сумі витрат, що визначають собівартість операції, частка витрат, пов'язаних з експлуатацією інструменту, може бути досить великою. Тому дотримання у виробничих умовах допустимих норм зношування є основою раціональної експлуатації інструменту. Величина максимально допустимого зношування, що визначає норму зношування

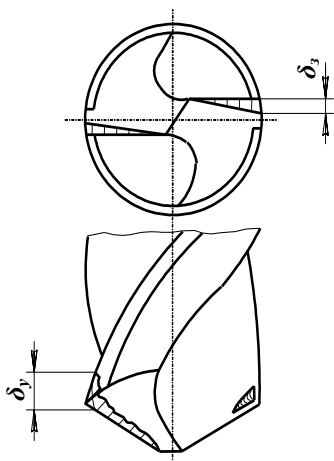


Рисунок 1.66 – Схема зношування гвинтового свердла

Допустима величина лінійного зношування задньої поверхні $\delta_{z. don}$ за чорнового оброблення прохідними різцями: сталі $\delta_{z. don} = 0,8-1$ мм; чавуну з подачею $S \leq 0,3$ мм/об $\delta_{z. don} = 1,4-1,7$ мм; чавуну з подачею $S > 0,3$ мм/об $\delta_{z. don} = 0,8-1,0$ мм. За чистового оброблення прохідними різцями: сталі $\delta_{z. don} = 0,5-0,6$ мм; чавуну $\delta_{z. don} = 0,6-0,8$ мм. Для різців із керамічними пластинками $\delta_{z. don} = 0,6-0,8$ мм. Для відрізних різців $\delta_{z. don} = 0,8-1,0$ мм. Зношування різців під час оброблення високоміцних і жароміцних сплавів про-

ходить більш інтенсивно, ніж під час різання звичайних чорних конструкційних сталей і сплавів, і набирає катастрофічного характеру за меншої величини зношування $\delta_{z. don} = 0,5-0,6$ мм.

Гвинтові свердла під час оброблення сталей зношуються по передній і задній поверхнях (рис. 1.66). Під час оброблення чавуну передня поверхня свердла практично не зношується. Зношування перемички вважається ненормальним, тому що воно може відбуватися лише або в результаті неправильного заточення свердла, або через недостатню твердість інструментального матеріалу після термооброблення.

Зношування задньої поверхні уздовж головного леза нерівномірне: ширина площадки зношування безупинно зростає за віддалення від перемички і наближення до його периферії. На відміну від різців лунка зношування на передній поверхні утворюється не уздовж усієї головної різальної кромки, а лише біля кутів леза в тих місцях, де головна кромка сполучається з допоміжною (стрічечкою). Таким чином, найбільше зношування під час свердління має місце біля кутів сполучених кромки (го-

ловних та допоміжних). Зношування також зазнає допоміжна задня поверхня, на якій також біля зазначених кутів свердла з'являються площадки зношування. Площадка зношування на головній задній поверхні «з'єднується» із площадкою зношування на стрічечці, що зазвичай приводить до округлення кутів сполучених кромek свердла на величину $\delta_в$ (рис. 1.66). Тому величина округлення кутів за певних умов може бути лімітувальним зношуванням, а $\delta_к$ братися як величина *максимально допустимого зношування* $\delta_к. доп$. Під час оброблення з охолодженням сталей і чавунів свердлами зі швидкорізальних сталей береться допустима величина зношування по задній поверхні біля периферії леза $\delta_з$: за діаметра до 20 мм $\delta_з. доп = 0,6-0,8$ мм; за діаметра більше ніж 20 мм $\delta_з. доп = 0,8-1,0$ мм. Під час роботи без МОР свердел зі швидкорізальних сталей як допустима величина зношування береться зношування по кутах сполучених кромek $\delta_в$: за діаметра до 20 мм

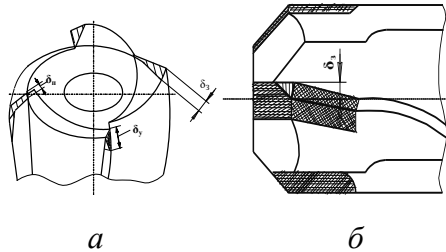


Рисунок 1.67 – Схема зношування
зенкерів:

a – швидкорізального; *б* – оснащеного
пластинками з твердих сплавів

до 20 мм $\delta_к. доп = 0,5-0,8$ мм; за діаметра більше ніж 20 мм $\delta_к. доп = 0,8-1,2$ мм. Під час свердління чавунних заготовок свердлами, оснащеними твердим сплавом, як допустима величина зношування береться $\delta_у. доп = 0,5-1,2$ мм. Під час свердління цими самими свердлами заготовок із важкооброблюваних матеріалів (жароміцних і титанових сплавів; тугоплавких металів, наприклад, вольфраму, молібдену та ін.) як допустима величина зношування береться зношування по задній поверхні $\delta_з. доп = 0,35-0,5$ мм.

Зенкери звичайно зношуються по задній поверхні, по передній поверхні (з утворенням невеликої лунки), по куточках і по стрічечці (рис. 1.67 а). За критерій затуплення зенкерів зі швидкорізальної сталі беруть зношування по задній поверхні δ_z (рис. 1.67 а): а) під час оброблення конструкційних вуглецевих і легованих сталей з охолодженням $\delta_z = 1,2-1,5$ мм; б) під час оброблення жароміцної сталі Х18Н9Т (ЭЯ1Т) з охолодженням $\delta_z = 0,4$ мм. Для зенкерів, оснащених пластинками із твердого сплаву, за критерій затуплення беруть зношування по задній поверхні стрічечки δ_z (рис. 1.67 б). Величина допустимого зношування наведена в промислових нормативах та відповідній довідковій літературі. Наприклад, під час оброблення хромокремніймарганцовистої сталі з охолодженням, що має $\sigma_B = 115-170$ кгс/мм² (1 150–1 700 МПа), допустима величина зношування – $\delta_z = 0,6$ мм.

Розгортки, що зрізують дуже тонкі шари металу, зношуються переважно по задній поверхні й кутках у місці переходу різальної частини в циліндричну (калібрувальну) частину (рис. 1.68). Водночас унаслідок викришування різальної кромки й зміни радіуса її округлення і розмірів розгортки збільшується шорсткість обробленої поверхні й знижується точність розмірів отвору. Тому за критерій затуплення розгортки беруть таку величину зношування, за якої оброблений розгорткою отвір перестає задовольняти технічні умови, тобто виходить за межі до-

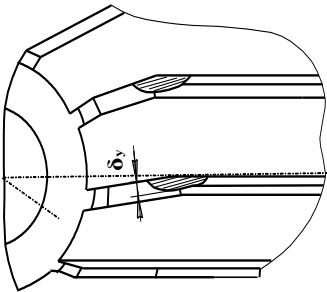


Рисунок 1.68 – Схема зношування розгортки

пуску й перестає задовольняти необхідний клас чистоти (технологічний критерій зношування інструменту). *Максимально допустимими величинами зношування розгортки зі швидкорізальної сталі є:* $\delta_w = 0,6-0,8$ мм під час оброблення вуглецевих і легованих сталей з охолодженням і $\delta_w = 0,25-0,3$ мм під час оброблення з охолод-

женням важкооброблюваних сталей і сплавів (жароміцних, нержавіючих і т. ін.).

За критерій затуплення твердосплавних розгортки беруть зношування по задній поверхні різальної частини: $\delta_s = 0,4-0,7$ мм – під час оброблення незагартованих сталей і $\delta_s = 0,35-0,4$ мм – під час оброблення загартованої сталі.

Мітчики й плашки під час оброблення як сталей, так і чавуну зношуються лише по задній поверхні. Максимальне зношування зосереджується в місці переходу головного леза в допоміжне, тобто в місці переходу від різальної частини до калібрувальної. Величина допустимого зношування машинних мітчиків і плашок під час оброблення сталей дорівнює $\delta_b = 0,125d_0$ мкм і чавуну – $\delta_b = 0,07d_0$ мкм.

Циліндричні осьові й дискові фрези зношуються лише по задній поверхні. Площадка зношування задньої поверхні розміщена уздовж робочої ділянки леза (рис. 1.69), поступово збільшуючись по ширині від точки початку контакту леза зі зрізуваним шаром (що входить у контакт) до кінця їхнього контакту (що виходить із контакту). Величини допустимих значень зношування задньої поверхні δ_s циліндричних фрез зі швидкорізальних сталей беруть: за чорнового оброблення сталей $\delta_s = 0,4-0,6$ мм, за чистового – $\delta_s = 0,15-0,25$ мм; за чорнового оброблення чавуну $\delta_s = 0,5-0,8$ мм, за чистового – $\delta_s = 0,2-0,3$ мм.

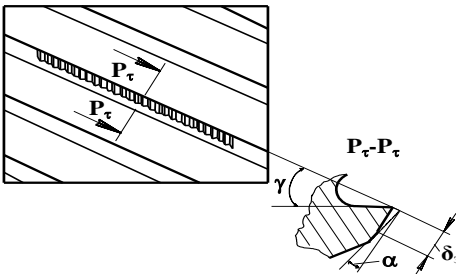


Рисунок 1.69 – Схема зношування осьової циліндричної фрези

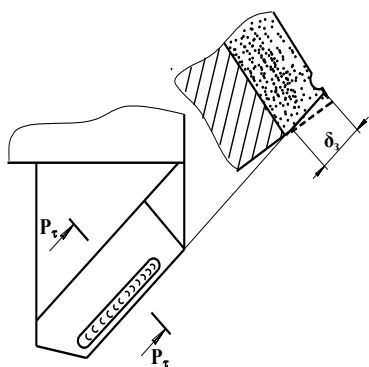


Рисунок 1.70 – Схема зношування ножа торцевої твердосплавної фрези

корізальної сталі за чорнового оброблення сталей і чавунів $\delta_z = 1,5-2$ мм, за чистового – $\delta_z = 0,3-0,5$ мм; з пластинами з твердих сплавів за оброблення сталей $\delta_z = 1-1,2$ мм, чавуну – $\delta_z = 1,5-2$ мм.

Протяжки зношуються лише по задній поверхні (рис. 1.71). Із зростанням ширини площадки зношування одночасно збільшується радіус округлення різальної кромки. Ширина площадки зношування уздовж головного лека в загальному випадку неоднакова. Найбільша ширина спостерігається біля країв стружковідвідних канавок і в точках перетину головного лека з допоміжними. Допустима ширина δ_y площадки зношування під час оброблення сталей і чавуну: у шпонкових і

Зношування **торцевих фрез** подібне до зношування різців (рис. 1.70): зі швидкорізальних сталей та з пластинками з твердих сплавів. Під час оброблення сталей зубці (ножі) фрези зношуються по задній і передній поверхнях. Фрези зі швидкорізальних сталей під час оброблення чавуну зношуються лише по задніх поверхнях, твердосплавні – по задніх і передніх поверхнях. Величини допустимих зношувань фрез беруть: зі швид-

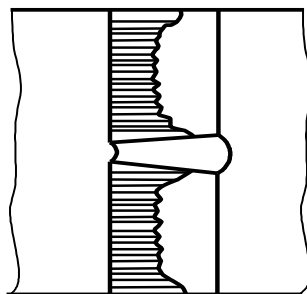
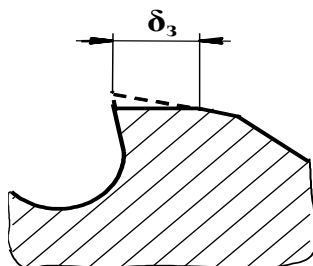


Рисунок 1.71 – Схема зношування протяжки

шліцевих протяжок $\delta_6 = 0,3-0,4$ мм, у круглих – $\delta_6 = 0,2-0,3$ мм.

Більш об'єктивним показником зношування протяжок є округлення різальної кромки. За досягнення радіусом округлення певного значення різко збільшується шорсткість обробленої поверхні, а на лезах протяжки з'являються сліди викришування. За протягання деталей із 5-м класом чистоти обробленої поверхні граничні величини радіуса округлення різальної кромки становлять: $\rho = 0,02$ мм за підйомів зубців $S_z = 0,01-0,04$ мм і $\rho = 0,03-0,04$ мм за підйомів зубців $S_z = 0,05-0,3$ мм.

Використання допустимої величини радіуса округлення різальної кромки ρ як критерію зношування у виробничих умовах є складним, що пов'язане із труднощами його вимірювання. Тому цей критерій можна використовувати лише в лабораторних умовах під час дослідження процесу протягування.

1.4 Особливості зношування інструментів із покриттями

Зношування інструментів із покриттями має свої особливості. Насамперед це обумовлюється зниженням адгезійної активності покриття, що зменшує довжину контакту по передній поверхні. За рахунок цього середній нормальний тиск на цій поверхні значно збільшується.

Як приклад розглянемо механізми формування площадок зношування на передній (лунки) та задній поверхнях леза під час оброблення вуглецевих сталей в умовах середніх швидкостей різання (15–50 м/хв) і з відносно малими ($a \approx 0,25$ мм) та великими ($a \approx 0,3$ мм) товщинами зрізів інструментами із швидкорізальних сталей із покриттями.

Під час роботи з малими товщинами зрізів за рахунок відносно невеликих контактних тисків на передній поверхні має місце переважне зношування по задній поверхні – *перший вид зношування* (див. підрозд. 1.3, рис. 1.48 а). Тому визначальну роль у підвищенні стійкості інструменту відіграє покриття саме на задній поверхні.

Під час роботи саме інструменту з відносно великими товщинами зрізів має місце переважне зношування лише по передній поверхні – *третій вид зношування* (див. підрозд. 1.3, рис. 1.48 в), тому визначальну роль у підвищенні стійкості інструменту в цьому разі буде відігравати покриття на передній поверхні і формування лунки, і зношування з покриттям буде відбуватися так. Уже через 2–3 хвилини роботи відбувається прорив (руйнування) покриття на передній поверхні в місці початку формування лунки. Однак за рахунок більш високих контактних тисків на задньому боці лунки відбувається гальмування прирізцевих шарів стружки і утворення щільного шару 3 (рис. 1.72 а), що захищає від подальшого збільшення лунки у бік

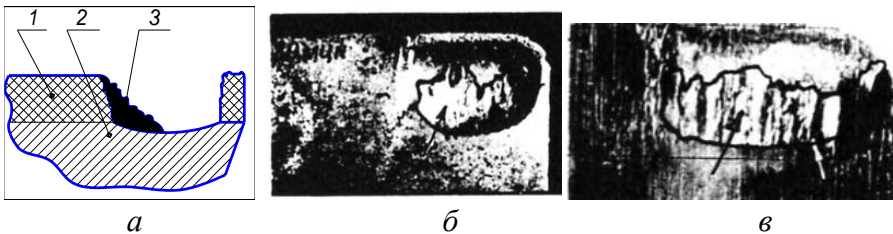


Рисунок 1.72 – Форма зношування передньої поверхні леза інструменту зі швидкорізальної сталі Р6М5 зі зносостійким покриттям TiN після 30 хв роботи: б – сталь 45; в – сталь 30 ХГСА
($V = 40$ м/хв, $S = 0,43$ мм/об, $t = 1,5$ мм)

від різальної кромки. Крім того, високі контактні тиски на фасці біля різальної кромки формують стійку застійну зону, що охороняє задню поверхню від зношування. Саме тому під час оброблення вуглецевих сталей в умовах середніх швидкостей різання інструментами із швидкорізальних сталей із покриттями домінуючим видом є зношування по передній поверхні.

За підвищеної швидкості різання або під час оброблення важкооброблюваних матеріалів високі контактні температури на передній поверхні не дозволяють сформувати стійкий загальмований шар ні біля різальної кромки, ні на задньому боці лунки, тобто зношування буде відбуватися як по передній, так і по зад-

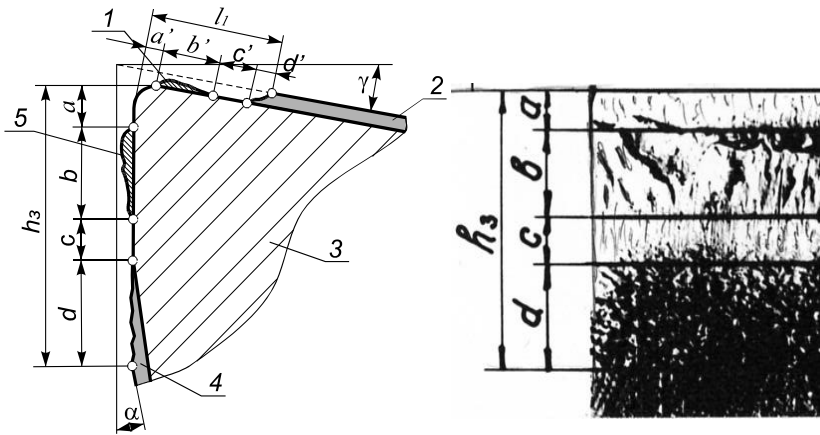


Рисунок 1.73 – Форма зношування інструменту зі швидкорізальної сталі зі зносостійким покриттям

ній поверхнях – *другий вид зношування* (див. підрозд. 1.3, рис. 1.48 б). У цьому разі захисна роль покриття проявляється на задній поверхні. Фаска зношування на ній складається з 4 зон (рис. 1.73).

Коротка зона постійної довжини a , що прилягає до різальної кромки, без покриття і без загальмованого шару; зона b – без покриття, але з міцним постійним загальмованим шаром, довжина якої збільшується в ході роботи; зона постійної довжини c – із тільки що зруйнованим покриттям і слідами виривань інструментального матеріалу; зона d – зношене покриття зі збільшенням його товщини від нуля до максимуму. Довжина цієї зони може займати до половини довжини усєї площадки зношування по задній поверхні h_3 .

Під час оброблення залізобетонних матеріалів із середніми й великими товщинами зрізу (вище ніж 0,025 мм) на передній поверхні перед лункою зношування зазвичай утво-

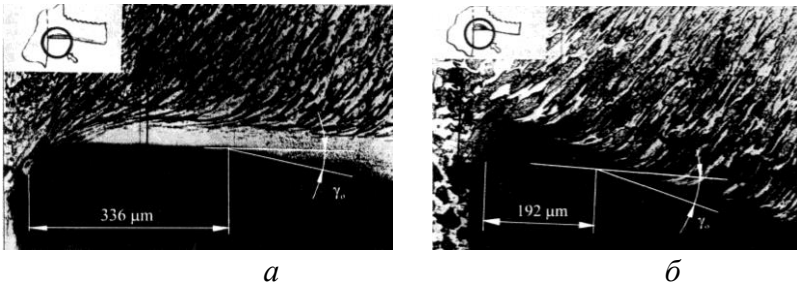


Рисунок 1.74 – Утворення застійної зони на інструменті із сталі Р6М5 без покриття (а) та з покриттям TiN (б)
 ($V = 40$ м/хв, $S = 0,43$ мм/об, $t = 1,4$ мм)

рюється поличка (рис. 1.72 а), на якій за добре сформованої лунки виникає застійна зона (рис. 1.74). На відміну від наросту застійна зона має місце й за високих швидкостей. Утворення застійної зони – явище переважно механічне, пов'язане з кінематичним загальмовуванням мас металу, що обтікають різальний клин (див. рис. 1.41).

На рисунку 1.74 наведені корені стружок під час різання сталі 45 інструментів без покриття і з покриттям після 5 хвилин роботи без ЗОТС. Бачимо, що застійна зона на поличці в інструменту з покриттям має більш раціональну форму (рис. 1.74 б), що дозволяє формувати більший фактичний передній кут, ніж на інструменті без покриття, хоча розмір полички в інструменту з покриттям менший. Більш раціональна форма застійної зони дозволяє краще прикривати від зношування й задню поверхню інструменту.

Основний вплив на форму застійної зони роблять умови обтікання стружкою різального клину, які залежать від розмірів і геометрії утворюваної лунки. Менша по ширині лунка дозволяє одержувати більш раціональну форму застійної зони. Таким чином, зносостійке покриття, стримуючи ріст лунки, у місцях відриву стружки від передньої поверхні (рис. 1.72 а) дозволяє тривалий час забезпечувати оптимальні умови обтікання леза

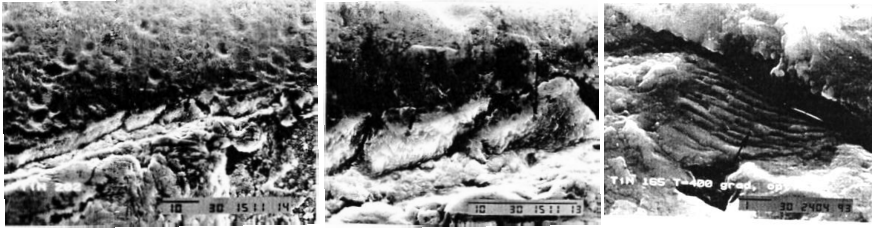
оброблюваним матеріалом, зберігати більш раціональну форму застійної зони на полиці й тим самим сприяти підвищенню стійкості інструменту.

Таким чином, роль зносостійкого покриття в механізмі підвищення стійкості швидкорізальних інструментів за утворення лунки на передній поверхні зводиться до забезпечення двох умов:

а) організації місця розташування зони початку формування площадки зношування за рахунок зміни адгезійної активності до оброблюваного матеріалу;

б) стримування росту ширини лунки в бік від різальної кромки за рахунок здатності покриття протистояти руйнуванню в місцях відриву стружки від передньої поверхні (рис. 1.72).

Дослідження характеру руйнування покриття TiN в місцях відриву стружки від передньої поверхні (див. рис. 1.72) через 10 хв роботи без ЗОТС показали (рис. 1.75), що в покритті може відбуватися як тріщиноутворення на всю глибину плівки (рис. 1.75 б), так і утомне руйнування (рис. 1.75 в), що призводить до відриву значних за розмірами частинок покриття. За товщини покриттів, що перевищують 6 мкм, або у випадках, коли покриття наносять в режимі, який не відповідає оптимальному, спостерігається зношування за допомогою його східчастого (механічного) руйнування.



800^x

2 400^x

7 500^x

a

б

в

Рисунок 1.75 – Характер руйнування покриття в місці відриву стружки від передньої поверхні (а): тріщиноутворення (б) та утомне (б) (умови оброблення: сталь ШХ15, $V = 30$ м/хв, $S = 0,43$ мм/об, $t = 1,5$ мм)

Таким чином, руйнування покриттів відбувається переважно тріщиноутворенням, що має зазвичай утомний характер. Під час розроблення нових складів покриттів або оптимізації технології їх нанесення вивчення механізму руйнування зносостійкого покриття за оброблення конструкційних сталей рекомендується робити саме в місці відриву стружки від передньої поверхні.

1.5 Аналіз шляхів усунення причин передчасного зношування інструментів

Багаторічна практика експлуатації різальних інструментів дозволила розробити шляхи усунення основних причин передчасного зношування інструментів за характером і місцем розташування осередку зношування. Ці шляхи зведені в таблицю 1.4, у якій наведені як причини передчасного зношування різальних інструменту для відповідного характеру його зношування – виду зношування і його впливу на вихідні показники процесу оброблення (погіршення якості обробленої поверхні, вихід за межі

розмірних допусків, ушкодження оброблюваної деталі тощо), так і перераховані найімовірніші шляхи (рекомендації) усунення цих причин або істотного зменшення їхньої дії, наприклад, зміна (зменшення або збільшення) швидкості різання або подачі, зміна геометричних параметрів леза інструменту (переднього або заднього кутів, радіусу вершини леза) тощо.

1.6 Поняття про надійність різальних інструментів

Однією із сукупностей властивостей, що обумовлюють якість різального інструменту, є «Надійність різального інструменту». *Надійність різального інструменту* – властивість інструменту зберігати до певного часу значення всіх параметрів, що характеризують його працездатний стан (див. підрозд. 1.1), вимог та характеристик оброблення, виконуваного цим інструментом, за встановленого порядку технічного обслуговування, відновлення, ремонту, транспортування та зберігання. Вона включає: безвідмовність, довговічність, ремонтоздатність, відновлюваність і збережність різального інструменту. Ці властивості забезпечуються під час проєктування, виготовлення й експлуатації інструменту і можуть розглядатися як окремо, так і в певному сполученні.

Безвідмовність є основною властивістю, що визначає надійність різальних інструментів, безперервне збереження працездатності яких необхідне для завершення оброблення.

Безвідмовність інструмента визначається ймовірністю його безвідмовної роботи й інтенсивністю відмов. Імовірність безвідмовної роботи характеризує ймовірність того, що в заданому інтервалі часу не виникне відмова інструмента. Іntenсивність відмов визначається ймовірністю відмови за одиницю часу після даного моменту оброблення за умови, що відмова до цього моменту не виникла. Таким чином, ця характеристика дозволяє розкрити причину відмови. Додатковими показниками безвідмовності інструменту є середня частота відмов, що визна-

час середню кількість відмов інструменту за одиницю часу, узята для розглянутого моменту часу, й середній час безвідмовної роботи.

Таблиця 1.4 – Характер і причини передчасного зношування інструменту й шляхи їх усунення

1	Характер зношування	Причина зношування	Усунення
Зношування по задній поверхні	<p>2</p> <p>Швидке зношування по задній поверхні, що викликає погіршення якості обробленої поверхні або вихід за межі розмірних допусків</p> <p>Утворення глибоких виїмок на задній поверхні, що спричинюють погіршення якості обробленої поверхні</p>	<p>3</p> <p>а) велика температура різання; б) недостатня зносостійкість твердого сплаву; в) невідповідність геометричних параметрів леза умовам оброблення; г) великий радіус округлення різальної кромки ρ; г) мала товщина зрізу</p> <p>а) окисне зношування; б) надмірне абразивне зношування</p>	<p>4</p> <p>1) зменшити швидкість різання; 2) вибрати більш зносостійку марку твердого сплаву; 3) збільшити задній кут; 4) збільшити радіус вершини леза; 5) вибрати марку інструментального матеріалу з меншим ρ; 6) збільшити подачу (товщину зрізу a) і виконати умову $a/\rho \geq 0,5$</p> <p>1) вибрати марку твердого сплаву зі зносостійким покриттям; 2) для матеріалів, оброблення яких супроводжується інтенсивним наклепом, вибрати менший кут у плані або більш зносостійку марку твердого сплаву</p>

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4
Лунко-утворення	Надмірне лунко-утворення, що призводить до ослаблення різальної кромки й лека	а) дифузійне зношування в результаті занадто високої температури на передній поверхні лека; б) невідповідність геометричних параметрів лека умовам обробки; в) великий тиск у зоні контакту лека зі зрізуваним шаром	1) вибрати марку сплаву з покриттям; 2) вибрати геометрію пластини з додатними передніми кутами і виступами, що перешкоджають лункоутворенню; 3) зменшити головний кут у плані; 4) зменшити швидкість різання; 5) зменшити подачу
Пластична деформація лека	Опускання різальної кромки або вдавнення задньої поверхні лека	а) занадто висока температура в зоні різання; б) великий тиск у зоні контакту лека зі зрізуваним шаром; в) невідповідність геометричних параметрів лека умовам оброблення	1) вибрати більш міцну марку сплаву зі збільшеним опором пластичної деформації; 2) полішити тепловідведення від вершини, вибравши пластину з більшим радіусом або кутом при вершині; 3) зменшити подачу; 4) зменшити швидкість різання

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4
Відколи (поломка) леза	<p>Поломка пластини, за якої можливі ушкодження або поломка опорної пластини і ушкодження оброблюваної деталі</p>	<p>а) занадто крихка марка сплаву; б) збільшене навантаження на різальну кромку; в) великі ударні навантаження (за переривчастого або нерівномірного різання); г) геометрія пластини не забезпечує достатньої міцності; д) невідповідність розміру пластини параметрам зрізаного шару; е) недостатня жорсткість технологічної системи</p>	<p>1) вибрати більш міцну марку сплаву; 2) зменшити подачу й (або) глибину різання; 3) вибрати пластину з іншою геометрією і з більш міцною різальною кромкою: з нульовою фаскою по задній поверхні, округленою («припуленою») різальною кромкою, з негативною фаскою на передній поверхні; 4) вибрати пластину більшої товщини або більшого розміру; 5) змінити характер навантаження леза (за переривчастого або нерівномірного різання) зміною переднього кута й кута нахилу різальної кромки; б) збільшити жорсткість технологічної системи</p>

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4
Викришування різальної кромки	Викришування різальної кромки, що призводить до погіршення якості обробленої поверхні і надмірного зношування по задній поверхні	а) занадто крихка марка твердого сплаву; б) геометрія пластини не забезпечує достатньої міцності; в) наростотворення; г) недостатня жорсткість технологічної системи	1) підсилити різальну кромку за допомогою фаски або збільшення ρ ; 2) збільшити (зменшити) швидкість різання або збільшити передній кут і виключити наростотворення; 3) вибрати більш міцну марку інструментального матеріалу; 4) зменшити подачу; 5) збільшити жорсткість технологічної системи
Утворення термічних тріщин	Дрібні (субмікро- і мікро-) тріщини завичай перпендикулярні до різальної кромки, що призводять до викришування її погіршення чистоти обробленої поверхні	Термічні тріщини утворюються за: а) напоявання різальної пластини; б) переточування інструменту; в) різких змін температури внаслідок: – переривання процесу різання (за переривчастого або нерівномірного різання); – мінливості подачі МОР	1) зменшити припуск на переточування; 2) застосувати непереточуваний інструмент; 3) вибрати більш міцну марку сплаву із кращою опірністю до тріщиноутворення при коливаннях температури різання; 4) виключити водні МОР; 5) забезпечити рівномірну подачу МОР; 6) зменшити швидкість різання; 7) зменшити подачу

Довговічність – властивість інструменту зберігати працездатність до граничного стану з необхідними перервами для

технічного обслуговування й ремонтів. Довговічність інструменту кількісно виражається тими самими характеристиками, що й безвідмовність, якщо розглядати лише непереможні відмови, тобто всі характеристики взяті у функції сумарного часу роботи, оскільки основною характеристикою є середня довговічність інструмента, обумовлена як середній сумарний час безвідмовної роботи. Довговічність як властивість, що визначає переважно ефективність використання інструменту, є найбільш значущою для складних дорогих різальних інструментів, наприклад, черв'ячних фрез, довбачів, протяжок та ін. Залежно від принципу обмеження наробітку, а також наслідків відмовлення надійність різального інструменту може оцінюватися одним або декількома показниками, що характеризують одну або декілька її властивостей.

Ремонтопридатність – властивість інструмента, що полягає в його пристосованості до попередження, виявлення й усунення відмов і несправностей проведенням технічного обслуговування й ремонтів. Час на *відновлення* інструменту складається із часу на його заточення, заміну або поворот різального елемента (пластини), регулювання складального інструменту, його зміну й налагодження. Ремонтопридатність інструменту оцінюється середнім часом або середнім сумарним часом відновлення його працездатного стану. Так, наприклад, інструмент із непереточуваними пластинками має більш високу ремонтпридатність у зв'язку зі зменшенням часу на відновлення його працездатності.

Під час оцінювання надійності інструмента доцільно знаходити розподіл часу не лише сумарно для всіх можливих відмов, а й роздільно – до відмов кожного виду. Тому поняття стійкості, обумовлене часом роботи інструмента до настання прийнятого критерію зношування, належить більше не до періоду стійкості, а до середнього часу безвідмовної роботи, тому що велика кількість відмов може бути не пов'язана зі зношуванням. До них насамперед відносять руйнування. Тому, напри-

клад, втрату працездатності твердосплавного інструменту варто оцінювати одночасно за двома параметрами – зносостійкістю й міцністю; водночас кількісними показниками кожного параметра повинні бути середні значення характеристики розсіювання цих показників і зміни їх у часі. Існуючі нормативи режимів різання розроблені на підставі функціональних стійкісних залежностей. Вони не містять рекомендацій із вибору умов оброблення з урахуванням їх впливу на інтенсивність відмов унаслідок руйнування інструмента. Вони не враховують також, що завжди має місце досить значний розкид значень стійкостей. Тому прийняті за існуючими нормативами режими оброблення необхідно коректувати на підставі експлуатаційних випробувань на надійність.

Для кожної групи інструментів можна рекомендувати типові показники рівня їх якості. Таким показником для чорнових твердосплавних, мінералокерамічних та інших типів інструментів, для яких характерні часті випадки викрашування, є середня довговічність; для чистового твердосплавного й швидкорізального інструменту – середній час безвідмовної роботи; для інструмента, що працює на автоматизованому обладнанні, або під час оброблення протяжних поверхонь – час безвідмовної роботи з ймовірністю не менше ніж 0,9. На цей час необхідно розробити зручну для практичного застосування методикау призначення режимів різання, що забезпечує заданий час роботи інструмента з певною ймовірністю його безвідмовної роботи. Вона повинна враховувати істотний вплив твердості елементів системи, СОТС і неминуче розсіювання експлуатаційних характеристик інструмента. Розкид стійкості, що не відіграє великої ролі під час одноінструментного неавтоматичного оброблення, має вирішальний вплив на працездатність налагодження за багатоінструментного оброблення. У цьому разі стійкісні властивості окремих інструментів і налагодження загалом вичерпно описуються функціями надійності. З їх використанням можна одержати всі інші окремі характеристики роботи налагодження,

наприклад середню стійкість, частку відмов кожного інструменту, питомі витрати на відновлення налагодження за різних схем відновлення, оптимальний режим різання тощо.

Збережність – властивість інструмента зберігати свої експлуатаційні показники впродовж (і після) строку зберігання й транспортування, установленого в технічній документації.

Контрольні запитання

1 Охарактеризуйте поняття: «*відмова інструменту*» і «*напрацювання між відмовами різального інструменту*».

2 Охарактеризуйте схему сучасних уявлень про причини втрати працездатності різальних інструментів.

3 Що називають *періодом стійкості*? Охарактеризуйте зв'язок між періодом стійкості і напрацюванням між відмовами.

4 Чим відрізняється викришування від відколу за крихкого руйнування різальної частини інструменту?

5 Які геометричні параметри леза й фізико-механічні властивості інструментального й оброблюваного матеріалу визначають величину граничної товщини зрізу a_{gr} ?

6 Чому під час фрезерування й стругання гранична товщина зрізу менша, ніж під час точіння?

7 Охарактеризуйте руйнування леза інструменту за переривчастого різання.

8 Охарактеризуйте вплив кутів γ і λ на крихке руйнування леза за переривчастого різання.

9 Що таке «зворотний удар» і як він впливає на крихке руйнування леза за переривчастого різання?

10 Чому твердість інструментального матеріалу повинна бути вищою від твердості оброблюваного матеріалу?

11 Яка характеристика інструментального матеріалу забезпечує йому високу пластичну міцність? Поясніть.

12 Який фізичний зміст поняття «гранична швидкість різання» V_{gr} ?

13 Що характеризує комплексний критерій міцності інструментального матеріалу *П*?

14 Охарактеризуйте деформаційну та адгезійну складові середнього коефіцієнта тертя під час різання.

15 Охарактеризуйте особливості зношування за першим і другим видами. Як впливають характеристики оброблюваного матеріалу й режими різання на місце розташування зношування на інструменті?

16 Охарактеризуйте вплив зносостійких покриттів на контактні процеси на робочих поверхнях леза інструменту.

17 Охарактеризуйте вплив застійної зони та наросту на зношування інструменту.

18 Охарактеризуйте особливості зношування за третім видом.

19 Охарактеризуйте механізми зношування інструменту.

20 Що розуміють під критерієм затуплення різального інструменту («*критерієм затуплення*»)?

21 Охарактеризуйте критерії зношування: критерій блискучої смужки і силовий.

22 Охарактеризуйте критерій рівного зношування.

23 Охарактеризуйте критерій оптимального зношування.

24 Охарактеризуйте технологічний критерій зношування.

25 Охарактеризуйте особливості зношування інструментів зі зносостійкими покриттями.

26 Для яких цілей необхідне знання максимально припустимого зношування інструменту?

27 Охарактеризуйте причини зношування задньої поверхні леза і практичних заходів щодо зниження цього виду зношування.

28 Охарактеризуйте причини зношування передньої поверхні у вигляді лункоутворення й практичні заходи щодо зниження цього виду зношування.

29 Охарактеризуйте практичні заходи щодо зниження крихкого руйнування леза у вигляді його відколу й викришування різальної кромки.

30 Охарактеризуйте причини виникнення термічних тріщин і практичні заходи щодо зниження зношування в результаті їхнього утворення.

2 РУЙНУВАННЯ ТА ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ІНСТРУМЕНТУ

2.1 Залежність «V-T». Поняття про показник відносної стійкості інструменту

Період стійкості будь-якого інструменту залежить від роду, механічних і теплофізичних властивостей оброблюваного (m) та інструментального (i) матеріалів, геометричних параметрів інструменту ($\gamma, \alpha, \varphi, r_e, \rho, \dots$), параметрів режиму різання (V, S, t) та ін., наприклад, застосовуваного МОТС (ω):

$$T = f(m, i, \gamma, \alpha, \varphi, r_e, \rho, \dots, V, S, t, \dots, \omega, \dots).$$

Зв'язок між періодом стійкості T і швидкістю різання V (залежність « $V - T$ ») у цей час установлюють винятково експериментально. Для цього всі фактори процесу різання (*оброблюваний та інструментальний матеріали, геометричні параметри інструменту, глибина різання, подача, МОТС*), крім швидкості різання, зберігають строго постійними. Потім послідовно вста-

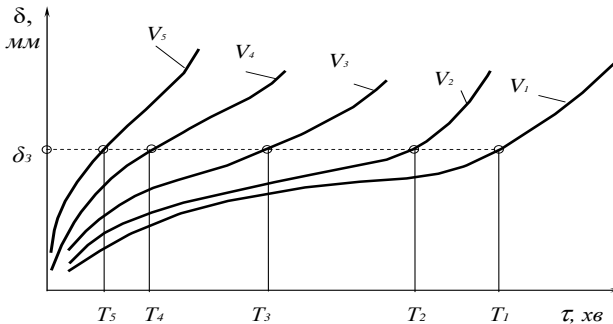


Рисунок 2.1 – Криві зношення інструментів

новлюють швидкість різання й за кожного її значення зношують інструмент і будують криві зношування $\delta = f(T)$ (рис. 2.1).

Криві зношування є основним експериментальним матеріалом для одержання залежності $T = f(V)$. Беручи рівні або оптимальні величини зношування, наприклад, задньої поверхні $\delta_3 = \text{const}$ або $\delta_3 = \delta_{opt}$ для кожної швидкості різання за кривою зношування знаходять відповідний час роботи інструменту – його період стійкості T :

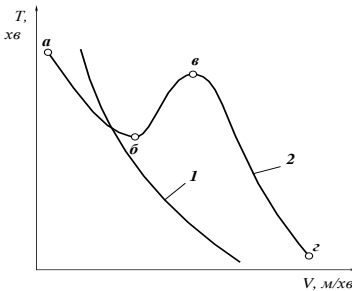


Рисунок 2.2 – Загальна залежність періоду стійкості T інструменту від швидкості різання V

V	V_1	V_2	V_3	...	V_n
T	T_1	T_2	T_3	...	T_n

Зв'язок між швидкістю різання V і періодом стійкості T під час оброблення чавуну інструментами зі швидкорізальних сталей і однокарбідних твердих сплавів виражається безупинно спадною кривою 1 (рис. 2.2), що нагадує гіперболу.

Такою самою кривою зображується зв'язок між V і T за оброблення вуглецевих і легованих конструкційних сталей інструментами зі швидкорізальних сталей. Під час оброблення конструкційних вуглецевих і легованих сталей, жароміцних сталей і сплавів і деяких інших матеріалів інструментами з однокарбідних і двокарбідних твердих сплавів зв'язок між V і T зображується більш складною кривою 2, що має кілька перегинів.

Апроксимацію кривої 1 і ділянки $вг$ кривої 2 роблять ступеневою функцією

$$V = \frac{C_v}{T^m}, \quad (2.1)$$

у якій показник ступеня m називають показником відносної стійкості. Стала C_v характеризує оброблюваний та інструментальний матеріали, геометричні параметри інструменту, застосовуване МОТС, а також глибину різання й подачу, з якими проводять оброблення під час одержання цієї емпіричної формули, тобто для заданих умов оброблення $C_v = \text{const}$, із чого бачимо, що $VT^m = \text{const}$.

Величину показника відносної стійкості m легко визначити графічно, якщо застосувати метод випрямлення експериментальних кривих логарифмуванням функції (2.1). Якщо на координатних осях відкладати не абсолютні числові значення V і T , а їх логарифми, то одержимо рівняння прямої $lg V = lg C_v - m lg T$, тангенс кута нахилу якої до осі T і є показником відносної стійкості m (рис. 2.3):

$$m = \text{tg} \alpha = \frac{a}{b}.$$

Показник відносної стійкості характеризує ступінь зміни стійкості різця зі зміною швидкості різання. З фізичного погляду він характеризує «чутливість» інструментального матеріалу до зміни швидкості різання за різних видів оброблення: чим він більший, тим у меншому ступені буде зменшуватися стійкість інструменту зі збільшенням швидкості різання і навпаки ($T = \frac{C_v}{V^{1/m}}$). Показник відносної стійкості m визначається до-слідно і залежить від оброблюваного матеріалу різальної части-ни інструменту, товщини зрізу, виду й умов оброблення.

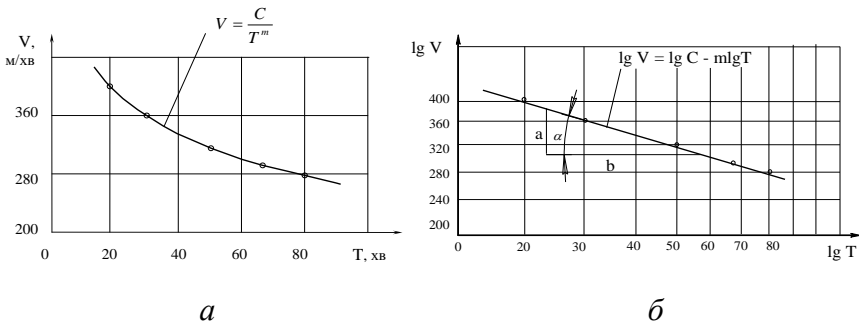


Рисунок 2.3 – Залежність між швидкістю різання й періодом стійкості:
a – у простих координатах; *б* – у логарифмічних координатах
 (сталь 45; σ_b – 450 МПа; Т15К6; $t = 2$ мм; $S = 0,4$ мм/об)

Чим нижча зносостійкість матеріалу різальної частини інструменту і важчі умови різання, що викликають підвищення тепловиділення, тим менша величина m . Для прохідних, підрізних і розточувальних різців зі швидкорізальної сталі під час оброблення сталі і ковкого чавуну з охолодженням $m = 0,125$; для інструментів, оснащених пластинками із твердих сплавів, залежно від виду оброблення $m = 0,125-0,3$. Експериментально

встановлено, що під час точіння більшості оброблюваних матеріалів інструментами із твердих сплавів $m = 0,2$.

Знаючи стійкість T_1 за швидкості V_1 , за зазначеною вище залежністю (2.1) можна визначити стійкість T_2 за швидкості V_2 (за інших однакових умов різання) або швидкість V_2 за стійкості T_2 . З рівняння $VT^m = \text{const}$ бачимо, що

$$V_1 T_1^m = V_2 T_2^m, \quad (2.2)$$

звідки

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^m = \frac{V_1}{V_2}, \quad T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{1}{m}}. \quad (2.3)$$

Залежність (2.1) уперше була встановлена Ф. Тейлором, тому має назву «формула Тейлора». Визначення стійкості за співвідношенням (2.3) правомірне лише в діапазоні швидкостей, де функція $V = f(T)$ має спадний характер (див. рис. 2.2). У зонах низьких швидкостей, що практично не застосовуються для твердих сплавів, залежність $V = f(T)$ не монотонна, і співвідношення (2.3) дає багаторазово завищені й нереальні значення стійкості інструменту.

2.2 Зв'язок між стійкістю інструменту і швидкістю різання

Визначення раціональних швидкостей різання є найважливішим для практики завданням.

Розрізняють 4 характерні значення швидкості різання (рис. 2.4 та 2.5).

1 Швидкість різання, за якої фактична стійкість інструменту T є найбільшою, називають *швидкістю максимальної стійкості* (V_m – рис. 2.4; V_I – рис. 2.5).

2 Швидкість різання, за якої витрати інструментів на одиницю пройденого шляху і похибки оброблення, пов'язані з його відносним радіальним зношуванням $\delta_{р. о. л.}$, найменші, називають *оптимальною швидкістю* (V_o – рис. 2.4).

3 Швидкість різання, за якої забезпечуються мінімальні витрати C_{min} на механічне оброблення, називають *економічною швидкістю різання* (V_e – рис. 2.4; V_2 – рис. 2.5).

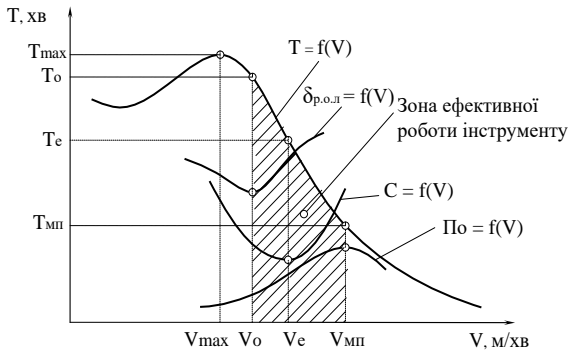


Рисунок 2.4 – Залежність періоду стійкості інструменту T , відносного радіального зношування $\delta_{р. о. л.}$, мкм/м, витрат на механічне оброблення C , грн, і продуктивності оброблення $По$, шт./годину, від швидкості різання V

4 Швидкість різання, за якої забезпечується максимальна продуктивність оброблення $По$ (кількість виготовлених деталей за встановлений період часу, наприклад, за період стійкості, за одну годину, за одну зміну і т. ін.), називають *швидкістю максимальної продуктивності* ($V_{mн}$ – рис. 2.4; V_3 – рис. 2.5).

Між цими швидкостями існують співвідношення

$$V_m < V_o < V_e < V_{mн}. \quad (2.4)$$

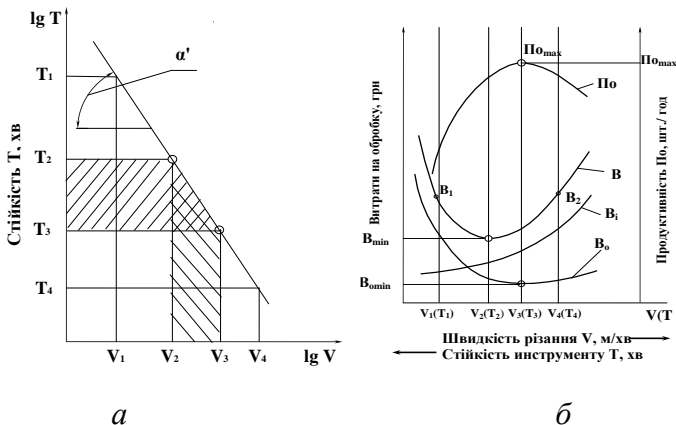


Рисунок 2.5 – Взаємозв'язок між періодом стійкості інструменту T , витратами на експлуатацію обладнання B_o , продуктивністю оброблення P_o , витратами на інструмент B_i , витратами на механічне оброблення B і швидкість різання V

На рисунку 2.4 наведена крива стійкості від швидкості різання $T = f(V)$, на якій показані максимальна стійкість T_{max} , оптимальна стійкість T_o , економічна стійкість T_e і стійкість $T_{mт}$, що забезпечує максимальну продуктивність оброблення.

На швидкості V_m , що дає максимальну фактичну стійкість інструменту T_{max} , працювати неефективно, тому що за такої швидкості різання має місце низька продуктивність оброблення P_o , а собівартість оброблення C і витрати інструменту є високими. Значно ефективніше працювати на оптимальній швидкості V_o (рис. 2.4), що відповідає мініимальному значенню відносного розмірного зношування інструменту δ_r , *о. л.*

2.2.1 Визначення оптимальної швидкості різання

А. Д. Макаров показав, що оптимальну швидкість різання V_o можна визначити, знаючи температуру різання, яка залежить

лише від сполучення інструментального та оброблюваного матеріалів.

Він сформулював положення (закон), що оптимальним швидкостям різання для заданої пари «інструментальний – оброблюваний матеріал» за різних комбінацій швидкості різання, подачі і глибини різання відповідає одна й та сама постійна температура в зоні різання, яку він назвав оптимальною температурою різання Θ_{opt} .

Таким чином, якщо відомо оптимальну температуру різання Θ_{opt} для заданої пари «інструментальний – оброблюваний матеріал», то за будь-яких значень подач, глибин різання, геометрії інструменту, визначаючи температуру Θ , наприклад, методом природної термопари, можна встановити значення та оптимальної швидкості V_o .

У таблиці 2.1 наведені значення оптимальних швидкостей V_o і відповідних їм оптимальних температур Θ_{opt} для ряду жароміцних сплавів, оброблюваних інструментами із твердого сплаву ВК6М.

Мінімальне зношування інструментів із твердих сплавів за оптимальних температур Θ_{opt} , що відповідають оптимальним швидкостям V_o , можна пояснити так.

Таблиця 2.1 – Оптимальні температури й швидкості різання під час оброблення жароміцних сплавів інструментом із ВК6М

Параметр	Жароміцний сплав					
	ХН77ТЮ	ХН77ТЮР	ХН70ВМТЮ	ХН70ВМФТЮ	ХН55ВМТФК Ю	ХН51ВМТЮК ФР
Оптимальна швидкість V_o , м/хв	35	30	25	25	30	25
Оптимальна температура різання Θ_{opt} , °C	710	720	720	730	730	850

Зі збільшенням швидкості до значення V_o за рахунок підвищення температури знижується міцність адгезійних зв'язків τ_a між оброблюваним та інструментальним матеріалами, зменшуючи тим самим адгезійне зношування. Зі збільшенням швидкості вище від значення V_o починають інтенсивно розвиватися дифузійні процеси, що призводять до підвищеного дифузійного зношування леза інструменту.

Спадна ділянка кривої $T = f(V)$ (рис. 2.4) у логарифмічних координатах (рис. 2.5 а) являє собою пряму лінію, тангенс кута нахилу якої до осі V

$$\operatorname{tg} \alpha' = \mu = \frac{1}{m},$$

$$\text{тобто } T = \frac{C_T}{V^\mu} = \frac{C_T}{V^{\frac{1}{m}}}.$$

На підставі цього можна побудувати криві витрат на інструмент і експлуатаційні витрати на обладнання залежно від швидкості різання. Зі зростанням швидкості різання збільшуються й витрати на інструмент B_i у перерахуванні на 1 деталь, тому що ресурс інструменту за період стійкості $P_{ит}$ (кількість виготовлених за період стійкості інструменту деталей) зменшується. У той самий час зі збільшенням швидкості різання знижується трудомісткість виготовлення деталі в станкових хвилинах і відповідно витрати B_o на експлуатацію металорізального обладнання. Склавши B_i й B_o , одержуємо сумарні витрати B на механічне оброблення деталі. Точка мінімуму на кривій сумарних витрат B_{min} відповідає економічно обґрунтованій швидкості різання $V_e = V_2$ або економічно доцільному періоду стійкості $T_e = T_2$ (рис. 2.5).

Примітка. На графіках (рис. 2.5 а): $V_1 < V_2 < V_3 < V_4$ і $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$

На практиці одержати криву B можна за допомогою розрахунку сумарної вартості механічного оброблення для різних значень швидкості різання. Наприклад, для обладнання помірної вартості під час роботи твердосплавним інструментом точка B_{min} зазвичай відповідає періоду стійкості $T_e = 15\text{--}30$ хв, а для дорогих верстатів, наприклад, верстатів із ЧПК, T_e виявляється таким, що дорівнює 7–15 хв. Із графіка бачимо, що зниження режимів із метою підвищення стійкості інструменту з економічного погляду зовсім недоцільно, тому що приводить до збільшення сумарної вартості оброблення до точки B_1 (див.

рис. 2.5 б), що рівносильно зниженню рентабельності й подовженню строків окупності металорізального обладнання.

Можна також побудувати в координатах графіка (див. рис. 2.5 б) залежність продуктивності оброблення P_o від швидкості різання й стійкості інструменту. Спочатку продуктивність буде зростати практично пропорційно швидкості різання. Потім інтенсивність зростання продуктивності зменшується і вона навіть почне спадати, тому що зі зменшенням стійкості зростає вплив часу простоїв, необхідних на заміну інструменту. Можна виділити точку максимальної продуктивності $P_{o_{max}}$ і відповідну їй швидкість різання $V_{mn} = V_3$. Робота на швидкостях, близьких до V_e , дозволяє мінімізувати витрати й знизити собівартість. Наближення до швидкостей V_{mn} дозволяє підняти продуктивність і одержати максимальний об'єм випуску продукції за обмеженого верстатного парку. Робота зі швидкостями різання вище V_{mn} може виявитися економічно недоцільною, тому що практично немає приросту продуктивності, але потрібні більші витрати на реалізацію процесу оброблення (точка B_2). Під час оброблення важкооброблюваних матеріалів (матеріалів з особливими властивостями: високоміцних, корозійностійких, жароміцних і т. ін.) V_e практично збігається з V_o .

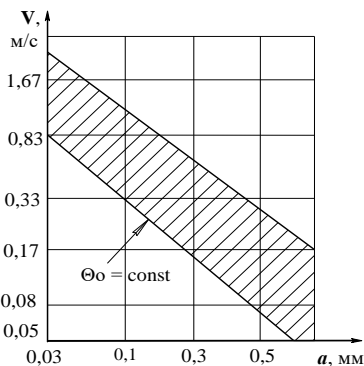
Таким чином, залежно від вимог, запропонованих до конкретного виду й умов оброблення, зона ефективної роботи інструменту зазвичай буде перебувати між швидкостями V_o і V_{mn} (заштрихована зона на рис. 2.4) або для важкооброблюваних матеріалів – між швидкостями V_e і V_{mn} (заштрихована зона на рис. 2.5).

Т. М. Лоладзе запропонував прискорений метод визначення поля рекомендованих швидкостей різання. Поняття граничної товщини зрізу за крихкою міцністю, а також граничною

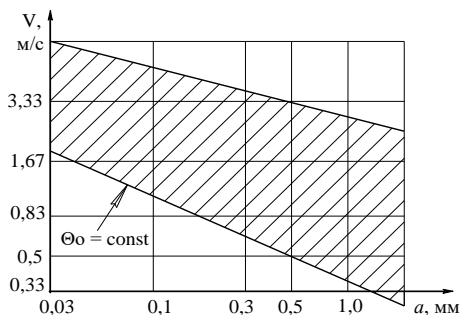
температурою Θ_{in} і швидкістю різання за пластичною міцністю (див. підрозд. 1.2.2) дозволяють установити поле можливих сполучень швидкостей різання й товщин зрізу (V і a), що залежать від прийнятого критерію ефективності процесу різання: максимальної продуктивності оброблення, економічності оброблення, мінімальних витрат на різальний інструмент та ін.

На рисунку 2.6 наведені поля раціональних сполучень швидкостей різання й товщин зрізу для різних пар «інструментальний – оброблюваний матеріали». Нижня межа поля режимів різання визначає сполучення швидкості різання й товщини зрізу, за яких температура різання для заданої пари досягає оптимального значення Θ_{opt} , що характеризується мінімальним відносним зношуванням інструменту. Тому на нижній межі кожному значенню товщини зрізу a відповідає оптимальна швидкість різання V_o . Таким чином, нижня межа являє собою лінію однакових температур (ізотерму) зі значенням температури, що дорівнює оптимальній Θ_o .

Верхня межа поля сполучень швидкостей різання й товщин зрізу визначається за величиною граничної температури різання за пластичною міцністю для розглянутої пари «інструментальний-оброблюваний матеріал» Θ_{in} , зменшеної на 50 °С.



a



б

Рисунок 2.6 – Поле рекомендованих режимів різання для пар «оброблюваний – інструментальний матеріали»:
a – XH70MBTЮБ - BK8; *б* – сталь 40X - T15K6

Таким чином, отримане поле сполучень швидкостей різання й товщин зрізу (заштрихована частина на рис. 2.6) охоплює: режими максимальної продуктивності, розташовані ближче до верхньої граничної лінії; режими мінімального відносного зношування інструменту, які знаходяться ближче до нижньої граничної лінії, і економічні режими, що займають проміжне положення.

Проілюструємо це на найпростішому прикладі обточування сталевого валика твердосплавним різцем (табл. 2.2).

Аналіз таблиці показує, що за швидкості різання 100 м/хв машинний час становитиме 1 хв, а стійкість різця – 90 хв. Після оброблення 90 деталей виробляється заміна затупленого різця, на що затрачається 4 хв. Водночас собівартість оброблення становитиме 33 к. Зі збільшенням швидкості різання до 110 м/хв машинний час зменшується до 0,9 хв, стійкість різця спадає до 55 хв. Отже, тепер уже після оброблення $55 : 0,9 =$

= 60 деталей потрібно буде зупиняти верстат і 4 хв затрачати на заміну затупленого різця. Але, незважаючи на це, собівартість оброблення зменшується до 30 к.

Таблиця 2.2 – Залежність змінної продуктивності верста- та, стійкості різця й вартості оброблення від швидкості різання

Режим різання	Швидкість різання V, м/хв	Кількість обертів шпинделя, об/хв	Стійкість різця, хв	Машинний час, хв	Кількість деталей, оброблених дозатуплення різця Р, шт.	Час на заміну різця, хв	Кількість деталей, оброблених за 7 годин	Собівартість оброблення однієї деталі З, к.
1	100	500	90	1,0	90	4	270	33
2	110	550	55	0,9	60	4	285	30
3	140	700	14	0,7	20	4	300	35
4	200	1 000	3	0,5	6	4	250	46

За швидкості різання 200 м/хв машинний час скоротиться вдвічі, але водночас стійкість різця зменшиться в 30 разів і складе всього 3 хв. Різке зниження стійкості інструменту супроводжується збільшенням собівартості оброблення до 46 к., тобто за такої високої швидкості різання переваги, одержувані за рахунок зменшення машинного часу, «з’їдаються» простоями верста- та, спричинені заміною різців.

Дійсно, як бачимо з таблиці 2.2, змінна продуктивність верста- та за подальшого збільшення швидкості різання спочатку зростає до 300, але потім спадає до 250 оброблених деталей з одночасним зростанням вартості оброблення.

Подібний характер закономірності зміни продуктивності верста- та за збільшення швидкості різання зберігається практично завжди під час роботи різними різальними інструментами у

найрізноманітніших умовах (див. рис. 2.5, крива Р): завжди є певні значення швидкостей різання й відповідні їм певні періоди стійкості різальних інструментів, які забезпечують найбільшу змінну продуктивність (стійкість найбільшої продуктивності T_{mn}) або найменшу собівартість (стійкість найменшої собівартості оброблення або економічна стійкість $T_{ек}$). Періоди стійкості найбільшої продуктивності T_{mn} і економічної стійкості $T_{ек}$ можна визначити в результаті пробних розрахунків (див. табл. 2.2 відповідно режими 3 і 2), але такий метод дуже трудомісткий і малоефективний для рішення практичних завдань. Е. І. Фільдштейн запропонував залежності, одержані аналітичним шляхом.

2.2.2 *Визначення періоду стійкості найбільшої продуктивності*

Виразимо продуктивність верстата за кількістю деталей, оброблюваних на ньому за одиницю часу:

$$Po = \frac{1}{t_o + t_a + t'_{cm}}, \quad (2.5)$$

де t_o – основний (машинний) час оброблення однієї деталі, хв; t_a – допоміжний час або втрати часу, що затрачуються на установку й зняття деталі, підведення й відведення інструменту і т. д., хв; t'_{cm} – втрати часу на зміну затупленого інструменту і настроювання його на розміри, віднесені до однієї деталі, хв.

Основний час затрачається на безпосередню зміну розмірів, форми, фізико-хімічних властивостей або зовнішнього вигляду оброблюваної заготовки. Під час оброблення на металорізальних верстатах основний час

$$t_0 = \frac{l_p}{S_M} i, \quad (2.6)$$

де l_p – розрахункова довжина оброблення, тобто довжина робочого ходу інструменту в русі подачі (робочого ходу), мм; i – кількість робочих ходів інструменту (число проходів); S_M – хвилинна подача інструменту (швидкість руху подачі V_S), мм/хв.

Розрахункова довжина оброблення (рис. 2.7):

$$l_p = l + l_1 + l_n, \quad (2.7)$$

де l – довжина оброблюваної поверхні; $l_1 = l' + l''$ – величини врізання l' й перебігу l'' інструменту; l_n – величина підведення інструменту.

Значення l'' й l_n беруть за нормативними таблицями. За ручного підведення й відведення інструменту зазвичай беруть

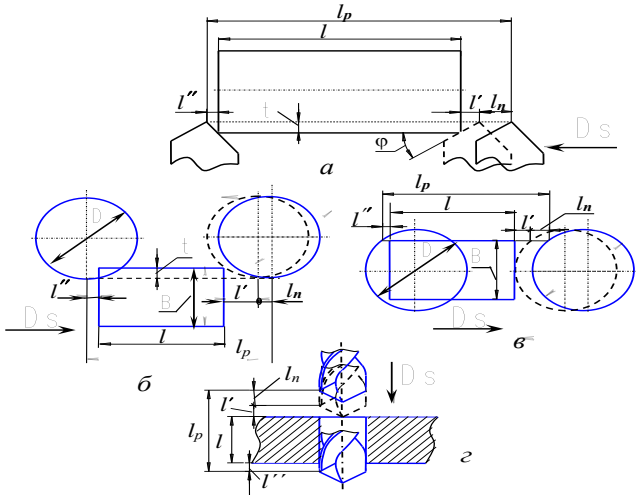


Рисунок 2.7 – Схеми для визначення робочого ходу інструменту під час точіння (а), циліндричного (б) і чорнового (в) торцевого фрезерування та свердління (г)

$l_n = 0$, $l'' = 2 - 5$ мм. За чистового торцевого фрезерування величину перебігу беруть $l'' = D + (2 - 5)$ мм; за оброблення «в упор» – $l'' = 0$.

Значення l' можна розрахувати за такими формулами:

– під час обточування (рис. 2.7 а):

$$l' = t \operatorname{ctg} \varphi ;$$

– за циліндричного фрезерування (рис. 2.7):

$$l' = \sqrt{t(D-t)} ;$$

– за чорнового торцевого симетричного фрезерування (рис. 2.7 в):

$$l' = 0,5(D - \sqrt{D^2 - B^2}) ;$$

– під час свердління (рис. 2.7 г):

$$l' = 0,5D \operatorname{ctg} \varphi ,$$

де t – глибина різання, мм; φ – головний кут у плані, град.; D – діаметр фрези й свердла, мм; B – ширина фрезерування, мм.

Швидкість руху подачі (хвилинна подача)

$$S_M = V_S = nS ,$$

де n – частота обертання шпинделя, об/хв; S – подача, мм/об.

Час на зміну затупленого інструменту, затрачуваний за період його стійкості:

$$t'_{cm} = \frac{t_{cm}}{По_T} = t_{cm} \cdot \frac{t_o}{T} , \quad (2.8)$$

де t_{cm} – час на зміну затупленого інструменту, затрачуваний за період стійкості інструменту T , хв; $По_T$ – кількість деталей, оброблених за період стійкості інструменту, шт.:

$$Po_T = \frac{T}{t_o} . \quad (2.9)$$

Зважаючи на те, що допоміжний час t_o не залежить від режимів різання й для конкретного розглянутого випадку є величиною постійною, формулу (2.5) можна подати у вигляді

$$Po = \frac{M}{t_o + t'_{cm}} , \quad (2.10)$$

де $M = \text{const}$ – деяка стала величина.

Під час оброблення деталі за один прохід $i = 1$ і основний час

$$t_0 = \frac{l_p}{nS} ,$$

де $n = \frac{1000V}{\pi D}$ (D – діаметр оброблюваної поверхні або інструменту, мм; V – швидкість різання, м/хв).

Оскільки $v = \frac{C_v}{T^m}$ (див. (2.1)), то $n = \frac{1000C_v}{T^m \pi D}$.

Отже,

$$t_0 = \frac{l_p \pi D T^m}{1000 C_v S} = C T^m , \quad (2.11)$$

де $C = \frac{l_p \pi D}{1000 C_v S} = \text{const}$.

Підставивши (2.8) і (2.11) у формулу (2.10), одержимо

$$Po = \frac{M}{t_o + t_{cm} + \frac{t_M}{T}} = \frac{M}{CT^m + t_{cm}CT^{m-1}}.$$

Для забезпечення найбільшої продуктивності необхідно, щоб знаменник останньої формули був мінімальним. Із цією метою візьмемо похідну за T цього рівняння й прирівняємо її до нуля:

$$\frac{d}{dT} [CT^m + t_{cm}CT^{m-1}] = CmT^{m-1} + Ct_{cm}(m-1)T^{m-2} = 0.$$

Розділивши обидва члени рівняння на mCT^{m-2} , одержимо

$$T + \left(\frac{m-1}{m}\right)t_{cm} = 0, \quad T = \left(\frac{1-m}{m}\right)t_{cm}.$$

Таким чином, *період стійкості найбільшої продуктивності*

$$T_{mn} = \left(\frac{1-m}{m}\right)t_{cm}, \quad \text{або} \quad T_{mn} = (\mu-1)t_{cm}, \quad (2.12)$$

де $\mu = \frac{1}{m}$ – величина, зворотна до показника відносної стійкості.

2.2.3 *Визначення періоду стійкості найменшої собівартості оброблення*

Елементи собівартості операції **З** (див. рис. 2.4) можна розбити на дві групи:

1) елементи собівартості, які не залежать від швидкості різання й від стійкості інструменту й можуть бути взяті постійними на одиницю виробу, наприклад, вартість матеріалу, електроенергії, витрати на внутрішньозаводський транспорт і т. д.;

2) елементи собівартості, величина яких на одиницю виробу змінюється залежно від швидкості різання й стійкості інструменту.

Змінна частина собівартості C_{nep} , грн, може бути виражена сумою таких елементів:

$$C_{nep} = t_o Z + \frac{t_{cm}}{Пo_r} Z + \frac{C_{e.in}}{Пo_r}, \quad (2.13)$$

де Z – заробітна плата верстатника за 1 хв (основна й додаткова з накладними витратами) та витрати, пов'язані із заміною інструменту, що затупився, та експлуатацією верстата впродовж 1 хв його роботи, грн; $C_{e.in}$ – витрати, пов'язані з виготовленням та експлуатацією інструменту, грн:

$$C_{e.in} = \frac{C_{in}}{k+1} + C_{zam}, \quad (2.14)$$

де C_{in} – вартість нового інструменту, грн; k – кількість припустимих переточувань інструменту до повного його зношування; C_{zam} – витрати на одне переточування інструменту, грн.

Примітка. Якщо інструмент оснащений змінними різальними елементами, що не переточуються, наприклад, змінними непереточуваними багатогранними твердосплавними пластинами, то

$$C_{e.in} = \frac{C_{in}}{k}, \quad (2.15)$$

де κ – кількість різальних кромок непереточуваного елемента (пласти-ни)

Таким чином, за розрахунку C_{nep} враховується не лише жива праця, затрачувана на даному верстаті, а й уся сукупність витрат живої й упредметненої праці, пов'язаної з різальним ін-струментом.

Очевидно, що найменша собівартість оброблення буде за мінімального значення C_{nep} . Розділивши обидві частини рівнян-ня (2.13) на 3, одержимо

$$\frac{C_{nep}}{3} = t_o + \frac{t_{cm} + \frac{C_{e.in}}{3}}{По_T} = t_o + \frac{E}{По_T}, \quad (2.16)$$

де $E = t_{cm} + \frac{C_{e.in}}{3}$ являє собою витрати на виготовлення й експлуатацію інструменту, виражені у хвилинах часу роботи верстатника, хв.

Використовуючи співвідношення (2.9) і (2.11), можна (2.16) виразити через значення періоду стійкості або через час роботи верстатника (у хвилинах основного часу):

$$\frac{C_{nep}}{3} = t_o + \frac{E}{По_T} = t_o + \frac{E t_o}{T} = CT^m + CET^{m-1}.$$

Для визначення умов, за яких собівартість оброблення буде найменшою, візьмемо похідну за T і прирівняємо її до ну-ля:

$$\frac{d}{dT} [CT^m + t_{cm} CET^{m-1}] = CmT^{m-1} + CEt_{cm} (m-1)T^{m-2} = 0.$$

Розділивши обидва члени рівняння на mCT^{m-2} , одержимо

$$T + \left(\frac{m-1}{m}\right)E = 0, \quad T = \left(\frac{1-m}{m}\right)E.$$

Таким чином, період стійкості найменшої собівартості оброблення

$$T_s = (\mu - 1)E = (\mu - 1)\left(t_{cm} + \frac{C_{e.in}}{3}\right). \quad (2.17)$$

Оскільки співмножник t_{cm} у формулі (2.12) менший від співмножника $\left(t_{cm} + \frac{C_{e.in}}{E}\right)$ у формулі (2.17), то економічний період стійкості T_e завжди більший від періоду стійкості найбільшої продуктивності верстата T_{mp} . Період стійкості найменшої собівартості тим більший, чим дорожчий інструмент, більші витрати на його експлуатацію і час на його зміну. Тому стійкість найменшої собівартості оброблення для фасонного різця більша, ніж для прохідного або відрізного різців; для свердла більшого діаметра більша, ніж для меншого свердла; для складного зуборізального інструменту більша, ніж для простої фрези, і т. д. Крім того, чим дорожчий металорізальний верстат, на якому використовується даний інструмент, тим меншим повинен бути період стійкості останнього, тому що при цьому більші витрати на експлуатацію верстата, що входять до величини Z .

2.2.4 *Визначення найвигідніших періодів стійкості інструментів*

Періоди стійкості різальних інструментів залежать від конкретних умов виробництва. Тому вони не є однаковими для

різних виробництв і навіть для різних підрозділів (цехів) того самого заводу. Однак унаслідок досить великої складності точного визначення їхньої величини на практиці наведену процедуру аналітичних розрахунків використовують переважно для масового й багатосерійного виробництв, а для інших використовують дані, одержані для різних інструментів у деяких середніх умовах його експлуатації (табл. 2.3).

У залежностях, що зв'язують період стійкості інструменту з умовами його роботи, і в розрахункових формулах для визначення швидкостей різання та розроблених на їхній основі нормативах режимів різання, величину стійкості необхідно виражати у хвилинах часу різання t_{piz} , тобто враховувати не основний час t_o , обчислений за (2.6), зважаючи на розрахункову довжину оброблення l_p (див. рис. 2.7), а лише час, упродовж якого інструмент зрізує стружку. За реального виконання технологічної операції з автоматичною подачею практично завжди $t_o > t_{piz}$, тому що до розрахункової довжини оброблення входять значення довжин підведення інструменту оброблення на верстатах із ЧПК), врізання й перебігу (точіння «на прохід», свердління наскрізного отвору (рис. 2.8 а – $\lambda = \frac{20}{28} = 0.71$).

У деяких випадках t_o може значно перевищувати t_{piz} , наприклад:

– під час оброблення переривчастих поверхонь (рис. 2.8 б – $\lambda = 0.5$), коли в напрямку головного руху різання D_r є ділянки (порожнечі) на всій глибині зрізуваного шару, на яких різання відсутнє;

– за багатоінструментального оброблення (рис. 2.8 в – $\lambda = \frac{5}{80} = 0.06$), коли основний час визначається довжиною різання одним інструментом (прохідний різець 1), а інші інструменти перебувають у контакті із заготовкою менший час (фасонний різець 2);

Таблиця 2.3 – Рекомендовані періоди стійкості різальних інструментів (у хвилинах основного (машинного) часу)

Найменування інструменту	Розмір інструменту, мм	Період стійкості, хв
1	2	3
Різці токарні зі швидкорізальної сталі	12 × 20	45
Те саме	30 × 45	60
Різці токарні з пластинками із твердого сплаву	12 × 20	60
Те саме	40 × 60	90
Свердла спіральні зі швидкорізальної сталі	D = 20	45–60
Те саме	D = 60	100–170
Розгортки суцільні зі швидкорізальної сталі	D = 30	80
Фрези циліндричні зі вставними ножами	D = 110	180
Фрези циліндричні з дрібним зубом	D = 60	120
Фрези торцеві зі швидкорізальної сталі	D = 50	120
Те саме	D = 100	180
Фрези торцеві з ножами, оснащеними твердим сплавом	D = 320	300

Продовження таблиці 2.3

Фрези дискові тристоронні	D = 90	120
Фрези кінцеві з конічним хвостовиком	D = 20	30–40
Те саме	D = 50	60–90
Мітчики машинні	D ≤ 10	30–40
Те саме	D > 10	60–90
Гребінки круглі для різенарізних головок	–	120
Фрези черв'ячні чорнові	Модуль 6	300–600
Довбачі зуборізальні чорнові	Модуль 6	400
Довбачі зуборізальні чистові	–	240

– під час стругання (рис. 2.8 г – $\lambda = \frac{50}{110} = 0.45$), коли до

основного часу входить не лише час зворотного руху інструменту в головному зворотно-поступальному русі різання на довжині

$$l_{x.x} = L (L = l + (l_1 + l_2)),$$

а й періоди часу, що входять під час прямого ходу в напрямку головного руху різання D_r , необхідні для «розгону» на довжині l_1 і «зупинки» на довжині l_2 інструменти або заготовки, що залежать від швидкості різання й типу стругального верстата (рекомендується брати $l_1 + l_2 = 35–75$ мм – для поперечно-стругальних верстатів і $l_1 + l_2 = 200–475$ мм – для поздовжньо-стругальних) і впродовж яких різання відсутнє. Водночас може бути й ситуація, коли $l < (l_1 + l_2)$.

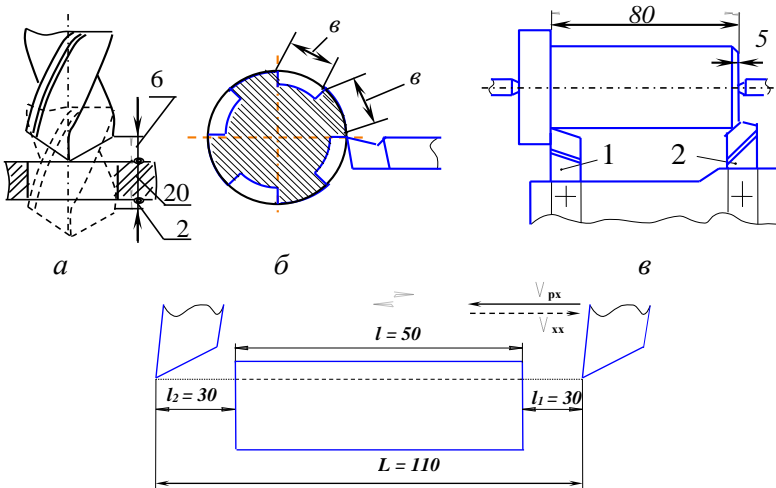
Щоб перейти від основного (машинного) часу t_o до часу різання t_{piz} і виразити період стійкості інструменту (розрахункового або найвигіднішого) не у хвилинах основного часу T , а у

хвилинах часу різання T' , вводиться так званий коефіцієнт часу різання

$$\lambda = \frac{t_{piz}}{t_o} = \frac{l_{piz}}{l_p},$$

де l_{piz} – довжина ділянок на оброблюваній поверхні (як у напрямку руху подачі D_s , так і в напрямку головного руху різання D_r), на яких реалізується процес різання, тобто формується стружка.

У тих випадках, коли $l_{piz} < l_p$, коефіцієнт часу різання $\lambda < 1$. Тому період стійкості інструменту, виражений у хвилинах часу різання T' , менший від періоду стійкості інструменту, вираженого в хвилинах основного часу T .



2

Рисунок 2.8 – До розрахунку коефіцієнта часу різання λ

З урахуванням коефіцієнта часу різання можна записати:

$$T' = \lambda T, T'_{mn} = \lambda T_{mn} = \lambda(\mu - 1)t_{cm},$$

$$T'_e = \lambda T_e = \lambda(\mu - 1)E.$$

2.3 Вплив умов різання на стійкість інструменту та допустиму швидкість різання

Під час різання матеріалів уведене поняття швидкості різання, за якої інструмент має певну (незмінну) стійкість за будь-яких змін умов різання, зокрема глибини різання й подачі. Цю швидкість називають швидкістю різання, що допускається різальними властивостями інструменту, або просто допустимою швидкістю різання. Таку швидкість позначають V_T , де індекс « T » показує стійкість інструменту, що відповідає зазначеній швидкості, тобто позначення $V_{60} = 100$ м/хв свідчить про те, що швидкість різання, за якої стійкість інструменту буде дорівнювати 60 хвилинам, дорівнює 100 м/хв.

У розрахунках щодо визначення режимів різання період стійкості після його призначення є величиною відомою, й завдання зводиться до обчислення такої швидкості різання, за якої інструмент забезпечить цю задану стійкість.

Величини періоду стійкості й відповідної йому швидкості різання залежать від умов оброблення, конструкції різального інструменту, моделі верстата, загального технічного рівня виробництва й техніко-економічних умов експлуатації верстата та інструменту й ін. Як уже було зазначено (див. підрозд. 2.2), чим більш складна й дорога конструкція інструменту, тим більше часу витрачається на його переточування після затуплення,

більші витрати матеріалів різальної частини інструменту за переточування та абразивного круга, яким проводять переточування, більше часу затрачають на зняття з верстата затупленого інструменту й установку нового (переточеного), менший показник відносної стійкості інструменту, тим більшим необхідно призначати період стійкості інструменту (див. табл. 2.3) за того самого значення швидкості різання або за того самого (прийнятого або заданого) періоду стійкості для різних інструментів із того самого інструментального матеріалу, повинні бути менші швидкості різання (див. (2.1)). Наприклад, період стійкості для фасонного різця як більш складного повинен бути більшим, ніж для прохідного токарного різця.

За багатоінструментального оброблення (на автоматах і напівавтоматах), коли заміна затупленого інструменту та його підналагодження пов'язані зазвичай із більшими витратами часу й праці, стійкість інструменту повинна бути вищою, ніж для одноінструментальних більш простих робіт. Ще більша величина періоду стійкості (до однієї-двох змін) встановлюється в автоматичних лініях, тому що тут заміна затупленого інструменту на одному верстаті призводить до зупинення (простою) всіх верстатів лінії.

У деяких випадках рівень швидкості різання, а отже, і стійкості інструменту визначається технологічними факторами, наприклад, вимогами до шорсткості поверхні або до точності розмірів, або економічними – для складнопрофільних інструментів, багатоінструментальних налагоджень і т. п. (див. підрозд. 2.2.3 і 2.2.4). Наприклад, технологічно низькі швидкості різання встановлюються для мітчиків й інших різеутворювальних інструментів, розгортки, протяжок і деяких інших складно-

профільних інструментів, що обумовлено необхідністю призначення більших значень періодів стійкості (див. табл. 2.3).

На практиці під час призначення швидкості різання зазвичай використовують економічний період стійкості T_e , тобто зважаючи на найменшу собівартість оброблення.

Для звичайних токарних різців, оснащених твердим сплавом, за одноінструментального оброблення економічна стійкість $T_e = 30\text{--}60$ хв. Якщо за $T = 60$ хв швидкість різання, що допускається твердосплавним різцем, взяти за одиницю, то для іншого значення стійкості швидкість різання в кількісному відношенні можна виразити за допомогою поправкового коефіцієнта K_T :

Стійкість різця T , хв	30	45	60	90	120
Коефіцієнт K_T	1,15	1,06	1,0	0,92	0,87

Таким чином, швидкість різання для деякого значення періоду стійкості T можна визначити, знаючи значення допустимої швидкості різання, м/хв, за стійкості 60 хв і коефіцієнта K_T :

$$V_T = V_{60} \cdot K_T,$$

Іноді через недостатню продуктивність якого-небудь верстата може мати місце «недовантаження» інших верстатів на дільниці, наприклад, за передачі заготовок на наступній операції на інший верстат. У цьому разі доводиться спеціально зменшувати стійкість і відповідно збільшувати швидкість різання, тобто переходити до періоду стійкості найбільшої продуктивності T_{mn} і відповідно до швидкості V_{mn} .

2.3.1 Вплив подачі та глибини різання на допустиму швидкість різання

Залежність між швидкістю різання й стійкістю інструменту $v = \frac{C_v}{T^m}$ встановлюється за постійних значень подачі й глибини різання. Однак зміна цих параметрів режиму різання також впливає на рівень швидкості різання за збереження постійної стійкості інструменту.

Чим більші подача й глибина різання, тим більша площа зрізу ($f = t \cdot S$) і об'єм матеріалу, що зрізується, а отже, і об'єм деформацій, тим вищі сили, що діють на різець, і температура різання, тим інтенсивніше зношування різця, тим меншу швидкість різання буде допускати різець за однієї і тієї самої стійкості. Залежність між швидкістю різання, подачею і глибиною різання, наприклад, під час точіння зі стійкістю різця $T = 60$ хв можна виразити такою формулою:

$$V_{60} = \frac{C_{V_{60}}}{t^{x_v} \cdot S^{y_v}}, \quad (2.18)$$

де $C_{V_{60}}$ – постійний коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу, матеріалу різальної частини різця, геометричних параметрів різця, охолодження й інших умов оброблення, зокрема стійкість різця, що дорівнює 60 хв, взятих незмінними під час одержання цієї емпіричної залежності; x_v і y_v – показники ступенів, що характеризують ступінь впливу відповідно до глибини різання t , мм, і подачі S , мм/об за їхньої зміни в процесі експерименту.

Значення показників ступенів різні для різних оброблюваних матеріалів, матеріалу різця й умов оброблення.

Під час обточування й розточування заготовок із вуглецевої сталі різцями зі швидкорізальної сталі за подачі $S \leq 0,25$ мм/об – $x_v = 0,25$, $y_v = 0,33$; за подачі $S > 0,25$ мм/об – $x_v = 0,25$, $y_v = 0,66$.

Показник ступеня за подачі більший, ніж за глибини різання, тобто збільшення подачі більшою мірою позначається на зменшенні швидкості різання, ніж за такого самого (у стільки само разів) збільшення глибини різання. Це пояснюється більш інтенсивним зношуванням різця за збільшення S , ніж за збільшення t , що обумовлено більшим термодинамічним навантаженням на одиницю довжини різальної кромки, тому що за збільшення S збільшується товщина зрізу ($a = S \cdot \sin \varphi$) за незмінної довжини активної частини різальної кромки, тобто має місце збільшення теплового потоку за практично незмінних умов тепловідведення.

За однакової площі поперечного перерізу зрізу для різця більш сприятливою є робота з меншою подачею й більшою глибиною різання; для верстата ж, навпаки, більш сприятливою є робота з більшою подачею й меншою глибиною різання, тому що на силу різання, а отже, і на потужність глибина різання впливає більше, ніж подача.

Для визначення значень допустимої швидкості різання за заданої величини стійкості інструменту вплив подачі й глибини у формулі (2.18) визначається показниками ступенів x_v і y_v , а вплив інших умов оброблення, відмінних від умов, у яких була одержана ця формула (видів оброблюваного й інструментального матеріалів, геометрії інструменту, умов його охолодження й зношування та ін.), враховується відповідними поправковими коефіцієнтами, наприклад, K_{M_v} – властивості (міцність, твердість, теплопровідність та ін.) оброблюваного матеріалу;

K_{I_v} – властивості (теплопровідність, коефіцієнт тертя та ін.) інструментального матеріалу і т. д.

Знаючи значення поправкових коефіцієнтів, що враховують вплив на допустиму швидкість різання різних умов оброблення, можна визначити величину узагальненого коефіцієнта K_V :

$$K_V = K_{M_v} \cdot K_{I_v} \cdot K_{\gamma_v} \cdot K_{\alpha_v} \cdot K_{\varphi_v} \cdot K_{\varphi_{1v}} \cdot K_{\tau_{1v}} \cdot K_{\omega_v} \cdot K_{\delta_{3v}} \dots (2.19)$$

Чим більше за допомогою поправкових коефіцієнтів буде враховано факторів, тим значення допустимої швидкості різання буде більше відповідати призначеному періоду стійкості інструменту.

2.3.2 Вплив умов оброблення на допустиму швидкість різання

2.3.2.1 Вплив оброблюваного матеріалу

На допустиму швидкість різання значний вплив мають фізико-механічні властивості оброблюваного металу. Цей вплив визначається переважно тепловиділенням у процесі різання й розподілом теплоти між стружкою, заготівкою, різцем і навколишнім середовищем.

Вплив оброблюваного матеріалу на допустиму швидкість різання враховується поправковим коефіцієнтом K_{M_v} .

Швидкість різання, з якою можна обробляти даний матеріал, за прийнятої стійкості інструменту є однією з характеристик його оброблюваності. Чим вища допустима швидкість різання, тим за інших рівних умов краща оброблюваність даного матеріалу.

Залежно від межі міцності сталі за розтягування σ_b допустима швидкість різання за заданої стійкості виражається залежністю

$$V = \frac{C_1}{\sigma_b^x}$$

Під час оброблення конструкційних, вуглецевих і легуваних незагартованих сталей різцями, оснащеними твердим сплавом,

$$x = 1.$$

У цьому разі, якщо під час оброблення з $\sigma_b = 750$ МПа швидкість різання, що допускається різцем, взяти за одиницю, то за інших значень σ_b поправковими коефіцієнтами на швидкість різання будуть значення $K_{M_v} = \frac{75}{\sigma_b}$:

$\sigma_b, \text{ МПа}$	400– 500	500– 600	600– 700	700– 800	800– 900	900– 1 000
Коефіцієнт K_{M_v}	1,66	1,36	1,15	1	0,88	0,79

З урахуванням коефіцієнта K_{M_v} швидкість різання для оброблення сталі з деяким іншим значенням σ_b можна визначити за формулою

$$V_{\sigma_b} = V_{75} \cdot K_{M_v}$$

Залежно від твердості чавуну *НВ* швидкість різання, що допускається різцем за визначеної стійкості:

$$V = \frac{C'_1}{HB^y}.$$

Під час роботи різцями, оснащеними пластинами із твердих сплавів, $y = 1,25$.

На швидкість різання, що допускається різальними властивостями різця, впливає стан оброблюваного матеріалу і поверхні заготовки. Так, якщо для гарячекатаної сталі швидкість різання взяти за одиницю, то для холоднотягнутої сталі необхідно ввести коефіцієнт, що дорівнює 1,1, тобто можна взяти швидкість різання на 10 % вище. Для нормалізованої сталі цей коефіцієнт буде дорівнювати 0,95, для відпаленої – 0,9 і для поліпшеної – 0,8.

Якщо під час оброблення сталеві заготовки з прокату або кування без кірки (кірка зрізана на попередньому проході або протравлена) швидкість різання взяти за одиницю, то у випадку оброблення сталевих виливків швидкість різання зменшується (коефіцієнт дорівнює 0,9). Тверда кірка, що вийшла на чавунній заготовці після лиття, окалина – після кування й гарячого прокату сталі – різко підвищують зношування інструменту, й у зв'язку з цим знижують швидкість різання (окалина – на 10–20 %, кірка – на 20–40 %).

2.3.2.2 Вплив матеріалу різальної частини інструменту

Зношування і стійкість інструменту, а отже, і допустима швидкість різання багато в чому визначаються фізико-механічними властивостями інструментального матеріалу, що враховується поправковим коефіцієнтом K_{IV} .

Якщо для швидкорізальних сталей допустиму швидкість різання взяти за одиницю, то для інших інструментальних ста-

лей (легованих і вуглецевих) поправковий коефіцієнт K_{Iv} буде меншим від одиниці.

Нижче наведені значення коефіцієнта K_{Iv} для різних марок інструментальних сталей.

<i>Марка сталі різальної частини різця</i>	<i>P18, P9</i>	<i>9XC</i>	<i>Y10A, Y12A</i>
<i>Коефіцієнт K_{Iv}</i>	<i>1</i>	<i>0,5</i>	<i>0,5</i>

Якщо для твердого сплаву Т15К6 швидкість різання взяти за одиницю, то для інших становитиме

<i>Марка твердого сплаву</i>	<i>T5K6</i>	<i>T14K8</i>	<i>T15K6</i>	<i>T30K4</i>
<i>Коефіцієнт K_{Iv}</i>	<i>0,65</i>	<i>0,83</i>	<i>1</i>	<i>1,4 (за напівчистового й чистового точіння)</i>

Взявши для сплаву ВК6 швидкість різання за одиницю, для інших сплавів цієї групи K_{Iv} становитиме

<i>Марка твердого сплаву</i>	<i>BK2</i>	<i>BK3M</i>	<i>BK4</i>	<i>BK6</i>	<i>BK8</i>
<i>Коефіцієнт K_{Iv}</i>	<i>1,17</i>	<i>1,15</i>	<i>1,12</i>	<i>1</i>	<i>0,83</i>

Інструменти з керамічними пластинками за чистового і напівчистового оброблення сталей допускають швидкість різання в 1,1–1,3 раза більшу, ніж із пластинками зі сплаву Т15К6; за чистового і напівчистового оброблення чавуну – в 1,5 раза більшу, ніж зі сплаву ВК6; на окремих операціях ці коефіцієнти ще вищі – в 3 і більше разів.

2.3.2.3 Вплив геометричних елементів леза

Вплив геометричних елементів леза на допустиму швидкість різання враховується відповідними поправковими коефіцієнтами: $\gamma - K_{\gamma_v}$; $\alpha - K_{\alpha_v}$; $\varphi - K_{\varphi_v}$ і т. ін.

Передній кут γ . За збільшення переднього кута з однієї сторони деформації сили різання й тепловиділення зменшуються, що сприяє зниженню температури різання, а отже, підвищенню стійкості інструменту. Але водночас зменшуються кут загострення й об'єм (маса) різального клина, що обов'язково повинне супроводжуватися погіршенням умов тепловідведення, а отже, зростанням температури різання й збільшенням зношування інструменту. Підвищеному зношуванню інструменту сприяє й зменшення міцності різальної кромки зі збільшенням переднього кута. Тому за малих значень переднього кута, зокре-

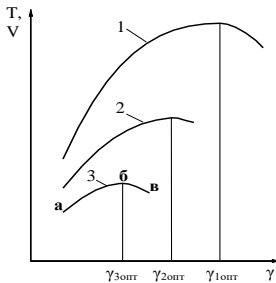


Рисунок 2.9 – Залежність стійкості інструменту T і допустимої швидкості різання v від переднього кута γ за міцності оброблюваного матеріалу (сталі):

- 1 – $\sigma_b < 800$ МПа;
- 2 – $\sigma_b \cong 1\,000$ МПа;
- 3 – $\sigma_b > 1\,200$ МПа

ма й негативних, превалює перший фактор (поліпшення умов різання), що приводить до зменшення зношування й підвищення стійкості інструменту зі збільшенням переднього кута (рис. 2.9, ділянка **аб**). Це дозволяє за збереження заданого значення періоду стійкості підвищувати швидкість різання. Однак із деякого значення переднього кута починає превалювати другий фактор (погіршення умов тепловідведення), що приводить до збільшення зношування

(можливо, і викришування різальної кромки) і зниження стійкості (рис. 2.9, ділянка **бв**).

Тому для кожного оброблюваного матеріалу, матеріалу лека й інших умов оброблення є своє оптимальне значення переднього кута $\gamma_i \text{ опт}$, за якого стійкість T , а отже (за однакової стійкості), і допустима швидкість різання V будуть найбільшими.

Задній кут α . Чим більший задній кут лека, тим, з одного боку, менше тертя задньої поверхні об заготовку, менша кількість тепла, яке виділяється, що сприяє зменшенню температури різання, а отже, зменшенню його зношування й підвищенню стійкості. Водночас зі збільшенням заднього кута одночасно зменшуються кут загострення й об'єм (маса) різальної частини, що супроводжується погіршенням умов тепловідведення і зменшенням міцності лека, а отже зростанням температури різання й викришуванням різальної кромки (особливо лез із твердих сплавів). Тому в діапазоні значень заднього кута, коли превалює перший фактор (рис. 2.10, ділянка кривої **аб**), стійкість підвищується, допустима швидкість різання зростає зі збільшенням α . Починаючи з деякого значення α , стійкість різко спадає у зв'язку зі збільшенням зношування інструменту, а отже, за однієї і тієї самої стійкості зменшується швидкість різання (рис. 2.10, ділянка кривої **бв**), тому що починає превалювати другий фактор. Таким чином, так само, як і для переднього кута, кожному оброблюваному матеріалу, матеріалу лека інструменту й інших умов оброблення, наприклад, значенню подачі (рис. 2.10), є своє оптимальне значення заднього кута $\alpha_i \text{ опт}$, за якого стійкість T , а отже (за однакової стійкості), і швидкість різання V будуть найбільшими.

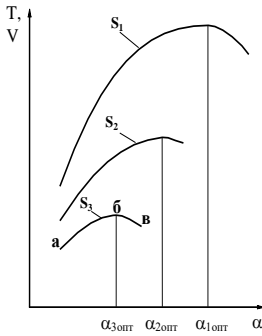


Рисунок 2.10 – Залежність стійкості інструменту T і допустимої швидкості різання v від заднього кута (за різних подач S ($S_1 < S_2 < S_3$))

ту леза з поверхнею різання, тобто погіршуються умови тепловідведення, у результаті цього зношування різця зростає, а отже, зменшується його стійкість. Тому різці з малими кутами в плані допускають (за інших однакових умов) більшу швидкість різання (рис. 2.11) і, зважаючи на ці міркування, головний кут у плані ϕ варто брати як можна меншим.

Головний кут у плані ϕ . Одним із геометричних елементів, що дуже впливають на допустиму швидкість різання, є головний кут у плані ϕ . Вплив величини головного кута в плані на допустиму швидкість різання враховується поправковим коефіцієнтом $K_{\phi v}$. Чим більший цей кут, тим вища температура різання, вище термодинамічне навантаження на одиницю довжини кромки, тому що збільшується товщина зрізу ($a = S \cdot \sin \phi$) і, відповідно, сила тиску стружки на передню поверхню, а також зменшується його ширина ($b = t / \sin \phi$) і відповідно, площа контак-

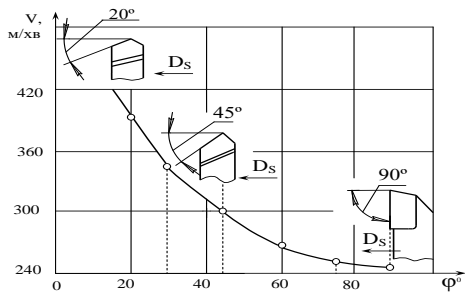


Рисунок 2.11 – Залежність допустимої швидкості різання v від головного кута в плані ϕ (сталь 45, твердий сплав Т15К6, $t = 2,0$ мм, $S = 0,3$ мм/об)

Водночас зі зменшенням φ одночасно зростає радіальна складова сили різання, що за недостатньої жорсткості технологічної системи може призвести до виникнення вібрацій та інтенсифікації зношування за рахунок крихкого руйнування різальної кромки (сколювання і викришування), тобто зменшення стійкості інструменту. Якщо для твердосплавного різця з кутом $\varphi = 45^\circ$ під час різання сталі швидкість різання взяти за одиницю, то для інших значень головного кута в плані швидкість різання виразиться такими коефіцієнтами $K\varphi_V$:

Головний кут у плані φ°	10	20	30	45	60	75	90
Коефіцієнт $K\varphi_V$	1,55	1,3	1,13	1	0,92	0,86	0,81

Допоміжний кут у плані φ_l . Допоміжний кут у плані також впливає на зношування різця, а отже, і на його стійкість. Зі зменшенням допоміжного кута в плані φ_l , особливо за $\varphi_l < 5^\circ$, збільшується активна довжина допоміжної різальної кромки (істотно зростає питома вага побічного різання), що призводить до збільшення роботи тертя як на передній, так і на допоміжній задній поверхнях та інтенсифікації тепловиділення й зношування різця, а отже, до зниження його стійкості.

У міру збільшення кута φ_l робота різання в зоні контакту допоміжної різальної кромки з обробленою поверхнею зменшується, що приводить до деякого підвищення стійкості, і внаслідок цього до підвищення швидкості, що допускається різцем за однакової стійкості (рис. 2.12). Однак, починаючи з $\varphi_l = 5-10^\circ$, більшою мірою позначається зменшення об'єму головки різця, що призводить до погіршення тепловідведення і до більшої температурної концентрації на контактних поверхнях леза,

що знижує допустиму швидкість різання внаслідок зростання температури різання й зменшення стійкості інструменту. Вплив кута φ_1 на допустиму швидкість різання враховується поправковим коефіцієнтом $K_{\varphi_{IV}}$.

Якщо взяти швидкість різання за $\varphi_1 = 10^\circ$ за одиницю, то $K_{\varphi_{IV}}$ становитиме

Допоміжний кут у плані φ_1°	10	15	20	30	45
--	----	----	----	----	----

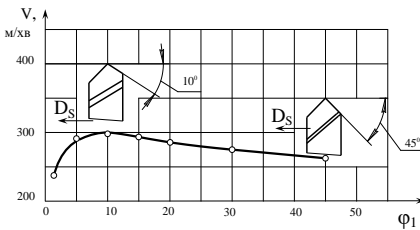


Рисунок 2.12 – Залежність допустимої швидкості різання v від допоміжного кута в плані φ_1

в плані φ_1
(сталь 45, твердий сплав Т15К6,
 $t = 2,0$ мм, $S = 0,3$ мм/об)

Поправковий коефіцієнт $K_{\varphi_{IV}}$	1,0	0,97	0,94	0,91	0,87
---	-----	------	------	------	------

Радіус вершини леза r_s . За збільшення радіуса вершини леза зменшується поточне значення товщини зрізу за рахунок зменшення заточного, збільшується активна (робоча) довжина різальної кромки, тобто зменшуються питомі навантаження на лезо інструменту й поліпшуються умови тепловідведення, внаслідок цього температура різання зменшується, що приводить до деякого підвищення стійкості і допустимої швидкості різання. Вплив радіуса при вершині на величину до-

пустимої швидкості різання також враховується поправковим коефіцієнтом $K_{\text{в}}$:

Радіус при вершині $r_{\text{в}}$, мм	1	2	3	5
Поправковий коефіцієнт $K_{\text{в}}$	0,94	1,0	1,03	1,13

Кут нахилу головної різальної кромки λ . У зв'язку з тим, що зміна кута нахилу головної різальної кромки змінює положення передньої поверхні інструменту стосовно напрямку його руху і відношення робочої довжини головної кромки до товщини зрізаного шару, залежність стійкості від кута нахилу різальної кромки λ має складний характер (рис. 2.13). Цьому сприяє й та обставина, що за $\lambda \neq 0$ має місце об'ємний деформований стан у зоні різання у той час, як за $\lambda = 0$ – плоский.

Крім того, величина і знак кута нахилу головної кромки визначають напрямок сходу стружки по передній поверхні. Будь-яке значення кута λ , що не дорівнює нулю, викликає додатковий рух стружки уздовж різальної кромки, що підвищує середній коефіцієнт тертя по передній поверхні. Це неминуче

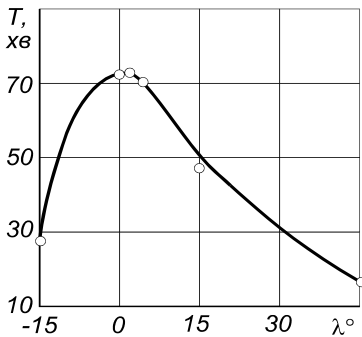


Рисунок 2.13 – Залежність стійкості від кута нахилу різальної кромки λ (сталь 45, твердий сплав Т15К6, $t = 2,0$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $v = 220$ м/хв)

викликає деяке зростання ступеня деформації, сил і температури різання. Зважаючи на названі обставини, безперервне різання з кутами $\lambda \neq 0$ є недоцільним (рис. 2.13).

Водночас кут нахилу головної різальної кромки λ може істотно впливати на інтенсивність зношування інструменту, його стійкість, а отже, і на допустиму

швидкість різання за переривчастого різання, тому що він впливає на характер зміни вихідної (початкової) контактної площадки на передній поверхні (точка, лінія, площина), про що детально викладено вище (див. підрозд. 1.2.1, рис. 1.6 та 1.9). Це приводить до зміни силового й теплового напруження на контактних площадках передньої й задньої поверхонь леза. Крім того, зміна кута λ впливає на величину і співвідношення складових сили різання. Ця обставина використовується під час проектування інструментів, призначених для оброблення загартованих сталей і чавунів. Для цих умов роботи оптимальна величина кута λ може доходити до 45° .

Позитивне значення кута нахилу головної різальної кромки λ дуже впливає на зміцнення різальної частини (леза) різця, що особливо важливо за ударного (переривчастого) різання, під час роботи з кіркою й під час роботи з нерівномірним припуском. У зв'язку з цим за переривчастого різання (стругання, торцевого фрезерування й ін.) у міру переходу від від'ємного значення кута λ до додатного (від -15° до $+40^\circ$) стійкість інструменту, а відповідно й допустима швидкість різання підвищуються за рахунок більш плавного врізання й виходу з різання, а отже, «зм'якшення» впливу ударних навантажень на різальну частину інструменту, зокрема й за рахунок зменшення ймовірності виникнення вібрацій. Оптимальна величина кута λ у цих випадках береться такою, що дорівнює $+15-25^\circ$. У діапазоні кутів $\lambda = 0-10^\circ$ зміна стійкості незначна і впливом кута λ на неї можна знехтувати.

2.3.2.4 Вплив форми передньої поверхні леза

Форма передньої поверхні леза (плоска, плоска з фаскою, криволінійна (радіусна) без фаски, криволінійна з фаскою тощо)

також впливає на допустиму швидкість різання. Якщо для різця, оснащеного пластинкою із твердого сплаву, із плоскою формою передньої поверхні з переднім кутом $\gamma = 0^\circ$ швидкість різання прийняти такою, що дорівнює одиниці, то для радіусної форми передньої поверхні з негативною фаскою коефіцієнт на швидкість різання дорівнює 1,15, а для плоскої форми передньої поверхні з фаскою з від'ємним переднім кутом $\gamma_f = -10^\circ$ цей коефіцієнт дорівнює 1,2.

2.3.2.5 Вплив мастильно-охолодних технологічних середовищ

Застосування мастильно-охолодних технологічних середовищ (МОТС) під час різання з малими й середніми швидкостями різання дозволяє значно знизити температуру і сили різання, що зі свого боку відкриває можливості збільшувати допустиму швидкість різання до 30–40 % залежно від умов оброблення. Вплив МОТС на допустиму швидкість різання враховується поправковим коефіцієнтом

$K_{\omega v}$, величина якого залежить від виду МОТС і способу подачі її в зону оброблення.

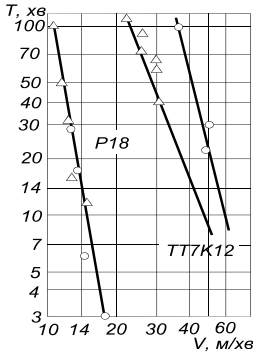


Рисунок 2.14 – Вплив швидкості різання V на період стійкості T різця за безперервного точіння (O) і стругання (Δ) сталі 50 ($t = 10$ мм; $S = 2$ мм на один оберт і подвійний хід різця)

2.3.2.6 Вплив переривчастості процесу різання

За переривчастого різання (див. підрозд. 1.2.1) періодично повторювані силові та теплові навантаження і розвантаження контактних поверхонь можуть істотно позначатися на стійкості інструментів, особливо під час роботи інструментом із крихких

інструментальних матеріалів, наприклад, із твердих сплавів, для яких стійкість за переривчастого різання може бути значно нижчою, ніж за безперервного.

Стійкість інструментів із високоміцних швидкорізальних сталей практично майже не залежить від того, у яких умовах різання (переривчасте або безперервне) працює інструмент. Як бачимо з рисунка 2.14, точки, одержані в дослідях щодо точіння і стругання (якщо виключити час, затрачуваний на холості ходи), лежать на одній прямій. Водночас період стійкості різця із твердого сплаву ТТ7К12, що працює, наприклад, зі швидкістю різання $V = 35$ м/хв, під час стругання в 4 рази менше, ніж під час точіння (рис. 2.14). Для менш міцних твердих сплавів, ніж сплав ТТ7К12 (а також кераміки і НТМ), зниження періоду стійкості буде ще значнішим. Основною причиною зниження стійкості твердосплавних інструментів за переривчастого різання є поява мікро- і макротріщин, у яких концентрується зношування передньої і задньої поверхонь, що часто переходить у крихке руйнування різального леза (див. підрозд. 1.2.1).

2.3.2.7 Вплив допустимої величини зношування інструменту δ_z

Чим більша допустима величина зношування, тим більшу швидкість різання можна призначити для різального інструменту. Нижче наведені поправкові коефіцієнти $K_{\delta v}$ на швидкість різання під час оброблення незагартованої сталі залежно від допустимої величини зношування по задній поверхні для інструментів, оснащених пластинками із твердого сплаву:

Зношування δ_z , мм	0,8–1	1,5–2
Коефіцієнт $K_{\delta v}$	1	1,33

2.4 Діагностика стану різального леза інструменту

В умовах сучасного автоматизованого виробництва необхідним є використання методів та систем діагностики стану інструменту і процесу різання:

- діагностика стану зношуваних робочих поверхонь леза та виявлення кінцевого періоду стійкості;
- встановлення моменту катастрофічного затуплення (поломки) леза різального інструменту;
- діагностика виду утворюваної стружки;
- діагностика динамічного стану як системи різання, так і оброблюваної системи загалом;
- інші, такі, як виявлення наросту, контроль процесу виникнення задирок на торцях деталі, виявлення аварійного стану елементів оброблюваної системи тощо.

На рисунку 2.15 наведено загальну структуру системи діагностики стану інструменту та процесу різання.

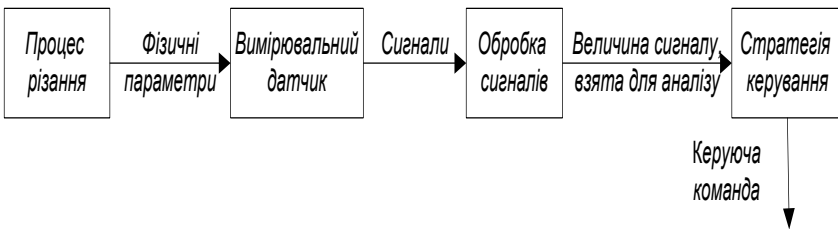


Рисунок 2.15 – Структура системи діагностики стану інструменту та процесу різання

Існуючі методи діагностики процесу різання і стану інструменту можна розділити на *прямі* й *непрямі* (рис. 2.16):

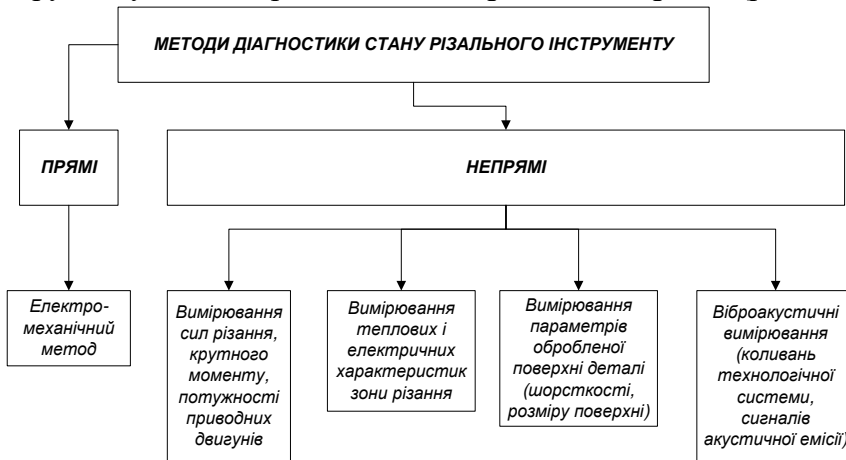


Рисунок 2.16 – Методи діагностики процесу різання

Прямі методи діагностики процесу різання. Ці методи найчастіше передбачають безпосереднє вимірювання електро-механічним методом параметрів зношування інструменту, зазвичай розмірного. Прямий метод реалізується у спеціальних зонах робочого простору верстата, в яких за допомогою контактних датчиків та додаткових пристроїв відбувається вимірювання відповідного параметра, наприклад, величини зміщення вершини леза у міру зношування його робочих поверхонь. Перевагою цього способу є відсутність впливу умов оброблення на результати вимірювання. Однак цей спосіб може бути використаний не на всіх верстатах, оскільки наявність у робочому просторі верстата додаткового пристрою знижує його

універсальність і зменшує надійність. Наявність у зоні роботи інструменту стружки та МОР у низці випадків зменшують точність цього методу діагностики. Крім того, через додаткові переміщення інструменту в позицію вимірювання знижується продуктивність верстата.

Непрямі методи діагностики процесу різання. Вони дозволяють оцінювати стан інструменту за допомогою вимірювання різних фізичних величин, що супроводжують процес різання.

Вимірювання параметрів обробленої поверхні деталі, наприклад, її розмірів або шорсткості, з обов'язковим встановленням їх зв'язку, зазвичай експериментально, зі зношуванням інструменту. За механічного непрямого вимірювання контроль розмірів деталі здійснюється за допомогою щупів або спеціальних приладів (пневматичних, оптичних, фотоелектричних, індуктивних, ємнісних, електронних тощо). Цей метод вимагає значних додаткових витрат, а також високої точності верстата і його вимірювальної системи. Точність вимірюваних параметрів зношування відносно невисока, тому що вона значною мірою залежить від похибок, спричинених пружними деформаціями в системі різання, температурними деформаціями, динамічним станом системи тощо.

Вимірювання температури різання й електричних характеристик зони різання. Метод ґрунтується на відомій (установленій) залежності між температурою різання (наприклад, на задній поверхні) і параметрами зношування інструменту для заданої комбінації матеріалу заготовки, інструменту і режимів оброблення. Найчастіше вимірюють не саму температуру, а термоелектрорушійну силу (термоЕРС), що фіксується, наприклад, методом натуральної термопари.

Існують результати досліджень впливу умов оброблення і зношування інструменту на параметри термоЕРС (постійну й змінну складові), інтенсивність і спектр її коливань у різних частотних діапазонах. Проте необхідно мати на увазі, що термоЕРС характеризує деяку усереднену температуру на лезі інструменту (передній і задній поверхнях), закони зміни яких не завжди відповідають закономірностям зміни фаски зношування по задній поверхні або лунки на передній. Потрібно відмитити, що на сьогодні ще не встановлено чітких загальних залежностей між термоелектричними явищами й зношуванням різального інструменту в широкому діапазоні змінювання умов оброблення, і тому для кожного конкретного випадку необхідно цю залежність установлювати, зазвичай експериментально.

Вимірювання потужності різання. Через зміну крутного моменту на валу двигуна внаслідок затуплення різального інструменту змінюється споживана верстатом потужність. Тому реєстрація коливань споживаної з мережі потужності приводними електродвигунами може слугувати параметром, за яким можна оцінити зношування різального інструменту. До переваг цього способу контролю варто віднести його простоту, невисоку вартість, доступність інформативного параметра і відсутність істотної модернізації обладнання.

Використання цього способу є практично неможливим у разі оброблення деталей малого діаметра і на чистових операціях, за яких потужність, що розвивається приводним електродвигуном, практично не відрізняється від потужності холостого ходу.

Силові вимірювання. Одним із найбільш відомих непрямих способів контролю стану різального інструменту є спосіб, що базується на вимірюванні сил різання й крутного моменту.

Сила різання є параметром, що характеризує безпосередню взаємодію різального інструменту й заготовки. Численними експериментами було встановлено факт зростання складових сил різання із збільшенням фаски зношування інструменту на задній поверхні. Величину сил різання встановлюють на підставі показів спеціальних динамометричних датчиків чи вимірюванням деформацій елементів технологічної системи, навантажених цими силами.

Віброакустичні вимірювання. Існує низка праць, де встановлюються залежності між вібраціями технологічної системи різання і зношуванням інструменту. Усі вони можуть бути розділені на дві групи залежно від спектра частот, використовуваних для аналізу:

– коливання, що генеруються в зоні різання в діапазоні від 20 Гц до 60 кГц (вібраційний метод);

– сигнали акустичної емісії (АЕ) – коливання, що надходять із зони різання з частотою, більшою ніж 100 кГц.

Вібраційний метод базується на реєстрації характеристик вібрації інструменту в процесі оброблення. Пропонується розкладати віброакустичний сигнал на низькочастотні й високочастотні складові, за співвідношенням параметрів яких роблять висновок про зношування різального леза.

З метою збільшення достовірності оцінювання стану інструменту використовують інтегровані сигнали від різних фізичних параметрів. Для цього використовують два шляхи:

- 1) одержання багатьох параметрів з одного датчика;
- 2) застосування декількох різних датчиків для вимірювання вибраних фізичних величин або датчиків, що інтегрують різні ознаки того самого середнього сигналу.

Наприклад, контроль за станом різального леза під час точіння базується на характерних закономірностях перебігу зношування від початку різання до настання стану затуплення (точка В на кривих зношування (див. рис. 1.51 та 1.52)). З цього погляду необхідно відокремити етапи прискореного зношування у період припрацювання (період I до точки А (див. рис. 1.51 та 1.52)) й усталеного зношування леза (період II між точками А та В), а також настання періоду III катастрофічного стану або сколювання інструменту. Більшість стратегій діагностики стану різального інструменту розроблено на основі залежностей сил різання від величини зношування леза, тобто найпростішою із застосовуваних на практиці є стратегія відстежування сигналу з датчика сили і порівняння його із заданою пороговою величиною. За досягнення значення допустимого порогу сили настає планова заміна інструменту на новий. Різке зростання сили вище від допустимого порога викликає екстрену зупинку руху різання і відповідо заміну аварійно зношеного (зламаного) інструменту.

2.5 Формули для визначення допустимої швидкості різання за різних методів оброблення

За *обточування* й *розточування* різцями із твердих сплавів допустиму швидкість різання V , м/хв, визначають за формулою

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v}} K_v, \quad (2.20)$$

де C_v – стала, що враховує вплив на швидкість різання деяких постійних умов різання і, зокрема, тих, для яких поправкові коефіцієнти взяті такими, що дорівнюють одиниці, тобто для

умов, за яких була одержана ця емпірична залежність; T – період стійкості, хв; t – глибина різання, мм; S – подача, мм/об; m – показник відносної стійкості; x_v і y_v – показники ступеня за глибини і подачі, що характеризують інтенсивність впливу кожного із цих факторів на швидкість різання, за умови збереження сталої (заданої) стійкості; K_v – узагальнений швидкісний коефіцієнт, що враховує вплив розглянутих вище показників на величину швидкості різання, і розрахований за формулою (2.19).

Під час *свердління* допустиму швидкість різання V , м/хв, визначають за формулою

$$V = \frac{C_v \cdot D^{x_v}}{T^m \cdot S^{y_v}} K_v, \quad (2.21)$$

де D – діаметр свердла, мм.

Під час свердління глибина різання t дорівнює половині діаметра D . Однак на відміну від точіння з формули (2.21) видно, що зі збільшенням діаметра свердла швидкість різання може бути підвищена. Причиною такого різного впливу глибини різання під час свердління є те, що зі збільшенням діаметра свердла збільшується його жорсткість, поліпшуються умови тепловідведення із зони різання в тіло свердла за рахунок збільшення його маси, поліпшуються умови розміщення стружки в стружковій канавці. Усе це підвищує стійкість свердла і компенсує зниження стійкості за рахунок збільшення глибини різання.

Під час *нарізування різі мітчиком* допустиму швидкість різання V , м/хв, розраховують за формулою

$$V = \frac{C_v \cdot d_0^{x_v}}{T^m \cdot P^{y_v}} K_v, \quad (2.22)$$

де d_0 – середній діаметр різі; P – крок нарізуваної різі.

Діаметр мітчика впливає на умови нарізування різі й стійкість мітчика аналогічно до впливу діаметра свердла під час свердління. Крок різі P визначає навантаження на робоче лезо мітчика. Зі збільшенням кроку пропорційно зростають висота профілю різі й товщина зрізу, що припадає на кожний різальний елемент (зубець). Тому за збільшення кроку різі швидкість різання, що допускається мітчиком, повинна бути зменшена.

Під час *фрезерування циліндричними, дисковими і кінцевими фрезами* швидкість різання V , м/хв, що допускається фрезою, визначають за формулою

$$V = \frac{C_v \cdot D^{Z_v}}{T^m \cdot t^{X_v} \cdot S_z^{Y_v} \cdot B^{Q_v} \cdot Z_p^{P_v}} K_v, \quad (2.23)$$

де D – діаметр фрези, мм; t – глибина фрезерування, мм; S_z – подача на 1 зуб фрези, мм/зуб; B – ширина фрезерування, мм; z_p – кількість зубів фрези, що одночасно працюють.

Із формули (2.10) бачимо, що зі збільшенням параметрів режиму різання t , S_z , B , z_p , що визначають під час фрезерування розміри перерізу зрізаного шару, допустима швидкість різання зменшується за рахунок зростання сил і потужності різання, а отже, і теплового навантаження на фрезу. Крім того, під час фрезерування циліндричними, дисковими і кінцевими фрезами зі збільшенням кількості зубців фрези за незмінного її діаметра їхня стійкість зменшується, тому що зменшуються розміри стружкових канавок, що також супроводжується підвищенням температури різання за рахунок погіршення відведення стружки й збільшення часу контакту гарячої стружки із зубцями фрези. За *торцевого фрезерування* збільшення ширини фрезерування

V супроводжується зростанням шляху різання зубця за один оберт фрези і зменшенням частки «холостого ходу», тобто часу охолодження зуба, збільшенням кількості зубців, що беруть участь у роботі, а отже, сумарної площі перерізу зрізаного шару, роботи різання й тепловиділення, що також знижує стійкість фрези.

Зі збільшенням діаметра фрези ***D*** швидкість різання можна збільшувати. Це пояснюється тим, що за інших однакових умов, наприклад, незмінної кількості зубців z , зменшується товщина зрізу, а отже, знижується навантаження на лезо і зменшується кількість зубців z_p , що одночасно працюють, що супроводжується зменшенням теплонапруження процесу. Змінюється також довжина дуги контакту, крок зубців і маса фрези. Усе це приведе до кращого тепловідведення і збільшення стійкості фрези. Цьому сприяє й збільшення частки «холостого ходу» у циклі роботи кожного зубця фрези, під час якого має місце більш інтенсивне його охолодження й надійне екранування МОТС.

Примітка. Під час визначення узагальненого швидкісного коефіцієнта ***K_v*** для ***торцевого фрезерування*** бажано враховувати поправковий коефіцієнт на симетричність розміщення фрези стосовно ширини оброблюваної заготовки ***K_{cv}***

Чим більший *період стійкості* (за інших однакових умов), тим менша допустима швидкість різання. Інтенсивність зменшення швидкості визначається показником ***m***, величина якого залежить від умов фрезерування: для фрез зі швидкорізальної сталі $m = 0,15-0,33$, а для тврдосплавних фрез – $m = 0,2-0,6$.

За ***протягування*** формула для розрахунку швидкості різання має вигляд

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot S_Z^{y_v}} K_{I_v}, \quad (2.24)$$

де K_{I_v} – поправковий коефіцієнт, що враховує марку інструментального матеріалу.

Примітки:

1 У формулах визначення припустимої швидкості (2.20)–(2.24) розташування (у чисельнику або знаменнику) факторів, що визначають умови різання, насамперед характеризує їхній вплив на зміну температури різання: за її збільшення вони розміщуються в знаменнику, а за зниження – у чисельнику, тому що стійкість інструменту переважно визначають за тепловою напруженістю процесу різання. Чим вища температура в зоні контакту інструменту зі стружкою й оброблюваною заготовкою, тим час роботи інструменту до затуплення менший, тобто стійкість нижча.

2 У формулах для розрахунку швидкості різання значення коефіцієнта C_v , показників ступенів і поправкових коефіцієнтів вибирають для заданих умов оброблення з відповідних таблиць, наявних у довідковій літературі

2.6 Уніфікована формула швидкості різання

Легко помітити, що формули (2.20)–(2.24) ідентичні та їх можна привести для всіх розглянутих видів оброблення до єдиного вигляду:

$$V = \frac{C_v \cdot D^{q_v}}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v} \cdot B^{u_v} \cdot Z_p^{p_v}} K_v. \quad (2.25)$$

Водночас позначення змінних і показників ступенів вибирають із таблиці 2.4 для відповідного виду оброблення.

Таблиця 2.4 – Позначення показників ступенів і змінних у формулах допустимої швидкості різання для відповідного виду оброблення

Вид оброблення	Параметр							
	t	y_v	x_v	q_v	u_v	r_v	p_v	S
Точіння	+	+	+	0	0	0	0	+
Свердління	+	+	0	x_v	0	0	0	+
Розсвердлювання	+	+	+	+	0	0	0	+
Зенкерування	+	+	+	+	0	0	+	S_z
Фрезерування	+	+	+	+	+	+	+	S_z
Нарізування мітчиком різі	+	0	+	x_v	0	0	+	P
Протягування	+	+	0	0	0	0	+	S_z

Примітки:

- 1 Знак «+» свідчить про відповідність позначення параметра в таблиці його позначенню у відповідній формулі.
- 2 Уніфіковану формулу швидкості різання доцільно застосовувати за формалізації процедури розрахунку режиму різання за допомогою ЕОМ.
- 3 У формулі допустимої швидкості різання під час нарізування різі замість D беруть d_0 .

2.7 Ефективність застосування зносостійких покриттів

Досвід експлуатації інструментів із покриттям дозволяє визначати й умови, за яких досягається найбільше підвищення їхньої працездатності.

Досвід експлуатації інструментів із покриттям дозволяє визначати й умови, за яких досягається найбільше підвищення їхньої працездатності.

Ефективність покриттів визначальною мірою залежить не лише від їхніх властивостей (твердості, термостабільності, хімічної інертності до оброблюваного матеріалу, стійкості до утворення лунки зношення, розміру зерна та ін. (табл. 2.5), які змінюють характер перебігу контактних процесів під час різання, а й можливої зміни властивостей матриці (основи) у процесі нанесення покриття, що супроводжується зміною насамперед його міцнісних характеристик.

Таблиця 2.5 – Ефективність покриттів залежно від їхніх властивостей

Властивість покриттів	Покриття за спаданням ефективності
Термостабільність, хімічна інертність до конструкційної сталі, стійкість до утворення лунки зношення	Al ₂ O ₃ , TiN, TiC
Твердість	TiC, TiN, Al ₂ O ₃
Стійкість до зношення під час оброблення конструкційної сталі	Al ₂ O ₃ , TiC, TiN
Коефіцієнт тертя щодо конструкційних сталей	TiN, Al ₂ O ₃ , CTi
Мінімально допустимий розмір зерна	TiN, TiC, Al ₂ O ₃

Для високотемпературних методів нанесення покриттів найбільш характерними процесами, що призводять до сильних змін властивостей твёрдосплавної матриці, є дифузійна взаємодія конденсату і твёрдого сплаву, а також тепловий вплив на його структуру за об'ємом. У результаті під час осадження покриття на твёрдий сплав змінюються не лише його поверхневі властивості (мікротвёрдість, стійкість проти окиснювання, опірність мікроруйнуванню та ін.), а й властивості, що проявля-

ються в об'ємі всього матеріалу (в'язкість руйнування, міцність, мікроповзучість тощо). Процес фізичного осадження покриттів відбувається за значно менших температур, тому він впливає лише на поверхневі структури і мікрогеометрію інструментального матеріалу.

Слабка дифузійна взаємодія покриттів, отриманих методом ФОП, та інструментальної матриці основною причиною меншої міцності їхнього зчеплення порівняно з міцністю зчеплення матеріалу і покриття, отриманого методами хімічного осадження покриттів (ХОП). Ця обставина визначає специфічну сферу використання інструментів із покриттями, які одержані цими методами.

Сприятлива зміна властивостей інструментальної матриці після нанесення покриття приводить до істотного поліпшення експлуатаційних характеристик інструменту і до збільшення його працездатності. Наприклад, за більшої мікротвердості і теплостійкості, збільшення стійкості проти окиснювання спостерігається зростання зносостійкості контактних площадок інструменту. Стабілізація міцнісних властивостей інструментального матеріалу, зростання опірності контактних площадок макро- і мікроруйнуванню в умовах дії стосовно високих напруг і температур, особливо якщо вони мають змінний характер, приводять до поліпшення різальних властивостей інструменту і збільшення його експлуатаційної надійності.

Таким чином, існує взаємозв'язок між зміною основних властивостей інструментального матеріалу за нанесення покриття, характером перебігу контактних процесів під час різання та основними експлуатаційними характеристиками різального інструменту (рис. 1.46).

Широке промислове використання різального інструменту зі зносостійким покриттям дозволяє вирішувати такі завдання:

1) підвищення стійкості та надійності металорізального інструменту;

2) збільшення продуктивності процесів оброблення деталей різанням;

3) скорочення питомих витрат дорогих інструментальних матеріалів і гостродефіцитних елементів (вольфрам, молібден, тантал, кобальт) для їхнього виготовлення;

4) розширення ефективної сфери використання твердих сплавів і скорочення номенклатури застосовуваних сплавів стандартних марок;

5) збільшення якості поверхневого шару і точності розмірів оброблених деталей;

6) поліпшення оброблюваності складнолегованих сталей і сплавів;

7) підвищення різальної здатності інструментів, виготовлених із низьколегованих матеріалів.

Під час оброблення матеріалів зносостійкі покриття дозволяють на 20–30 % збільшити швидкість різання, а отже, і продуктивність за одночасного підвищення стійкості інструменту. Найбільший ефект застосування інструментів досягається під час різання з малими ($a < 0,05$ мм) і середніми ($a = 0,1–0,25$ мм) значеннями товщини зрізу. У першому випадку – за рахунок підвищення зносостійкості задньої поверхні інструменту, а в другому випадку – за рахунок гальмування зростання лунки зношення на передній поверхні.

За товщин зрізу $a = 0,05–0,1$ мм, а також $a > 0,3$ мм покриття інтенсивно руйнується: у першому випадку – через ви-

сокі навантаження на покриття з боку задньої поверхні, а в другому – з боку передньої поверхні. Ці рекомендації необхідно враховувати під час призначення режимів різання.

Інструменти зі швидкорізальної сталі з покриттями показують значне підвищення стійкості за різних видів оброблення вуглецевих, конструкційних і низьколегованих сталей, а також сірих чавунів низької і середньої твердості. Водночас під час оброблення титанових і жароміцних сплавів на основі нікелю, високолегованих і високоміцних сплавів ефективність від застосування швидкорізальних інструментів із покриттям істотно нижча, а в низці випадків стійкість може навіть знижуватися.

Твердосплавні пластини з покриттями з карбиду і нітриду титану ефективні для більшості найпоширеніших видів оброблення різанням конструкційних сталей і сірих чавунів, особливо для точіння, а також чистового і напівчистового фрезерування з помірними подачами.

За важких умов різання, коли спостерігаються викришування та відколи, на сплавах без покриттів ефективність пластин зі зносостійкими покриттями знижується. Результати випробування пластин із різними покриттями під час оброблення важкооброблюваних матеріалів різних груп оброблюваності показують, що чим важче обробляється матеріал різанням (чим вища група оброблюваності), тим менше проявляється ефект покриття.

Необхідно відзначити, що, незважаючи на більш високу вартість інструментів із покриттям, витрати споживача на оброблення одиниці продукції порівняно з аналогічними витратами під час застосування непокритих інструментів нижчі завдяки підвищенню або стійкості інструменту, або швидкості різання та продуктивності оброблення.

У промислово розвинених країнах випуск СМП зі зносостійкими покриттями становить 60–90 % від загального випуску твердосплавних пластин і близько 70 % від усіх типів інструментів зі швидкорізальної сталі.

Ефективність застосування зносостійкого покриття значною мірою залежить від його товщини, вибір оптимального значення якої багато в чому визначається не лише складом покриття і його міцністю (крихкістю), а й також умовами перебігу процесу різання та фізико-хіміко-механічними властивостями власне самої інструментальної матриці. Наприклад, ефективність покриттів зростає зі збільшенням твердості матриці та її здатностей опиратися термопластичній деформації.

Значною мірою на товщину покриття впливають умови перебігу процесу різання. З одного боку, «товсте» покриття помітно підвищує зносостійкість інструментальної матриці за рахунок зростання твердості, температурної стійкості проти окиснення і корозії, зростання пасивності інструментального матеріалу проти твердофазних і рідкофазних дифузійних реакцій з оброблюваним матеріалом, зниження граничної адгезії. З іншого боку, зростання товщини покриття приводить до помітного збільшення кількості дефектів в об'ємі покриття, причому таких небезпечних дефектів, як макро- і мікропори, мікротріщини, нестехіометрія (ступінь сталості) складу, неоднорідність зерна та зростання його розміру по перетину покриття залежно від віддалення від матриці та ін. Таким чином, зі збільшенням товщини покриття різко зростає ймовірність появи того або іншого небезпечного дефекту, що може призвести до динамічного руйнування покриття. Звідси й зв'язок оптимальної товщини покриття з умовами перебігу процесу різання.

Для квазістаціонарних процесів різання з утворенням зливних стружок (тобто процесів під час оброблення пластичних матеріалів, що відбуваються за високих швидкостей різання та відносно малих товщин зрізу) товщина покриттів може бути гранично збільшеною. Для нестаціонарного і переривчастого різання (тобто під час формування дискретних типів стружок, у виражених адгезійно-утомних процесах за різких коливань за часом швидкості, перетину зрізу, напруг і температур) товщину покриттів необхідно знижувати через їхню здатність до крихкого руйнування. Наприклад, оптимальна товщина покриття TiC GT (рис. 2.17) знижується до 5,0–7,0 мкм під час точіння чавуну (крива 3) і збільшується до 6,0–10 мкм під час точіння сталі (криві 1 і 4). Водночас покриття TiC більш ефективно на сплаві ВК6 (криві 1 і 3), ніж на сплаві Т5К10 (крива 4): за оптимальної товщини 8 мкм для пластин із ВК6 їхня стійкість у 1,5–2,0 рази вища, ніж для пластин із Т5К10 з оптимальною товщиною покриття 6 мкм.

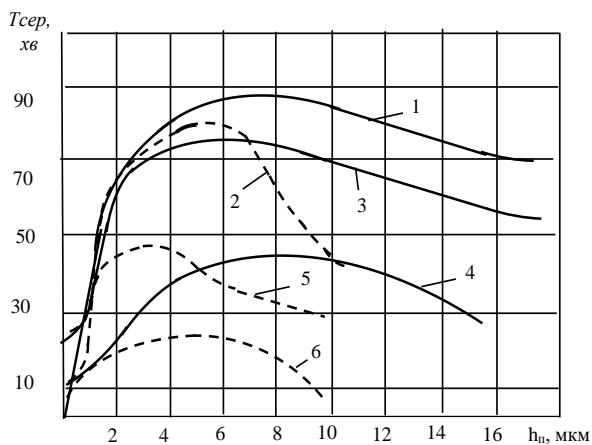


Рисунок 2.17 – Вплив товщини h_p покриття на середню стійкість $T_{сер}$ твердосплавних інструментів під час точіння (1, 3, 4) сталі 45 (1, 4) і чавуну СЧ32 (3) і фрезерування сталі 40Х (2, 5, 6) пластинами:

- 1 – ВК6 – TiC ГТ ($v = 150$ м/хв, $S = 0,15$ мм/об, $t = 1$ мм);
- 2 – ТТ10К8Б – TiN КІБ ($v = 170$ м/хв, $S_z = 0,32$ мм/об, $t = 2$ мм, $z = 1$, $B = 140$ мм);
- 3 – ВК6 – TiC ГТ ($v = 130$ м/хв, $S = 0,15$ мм/об, $t = 2$ мм);
- 4 – Т5К10 – TiC ГТ ($v = 170$ м/хв, $S_z = 0,32$ мм/об, $t = 2$ мм, $z = 1$, $B = 140$ мм);
- 5 – ТТ10К8Б – TiC ГТ ($v = 170$ м/хв, $S_z = 0,32$ мм/об, $t = 2$ мм, $z = 1$, $B = 140$ мм);
- 6 – ВК6 – TiN КІБ ($v = 170$ м/хв, $S_z = 0,32$ мм/об, $t = 2$ мм, $z = 1$, $B = 140$ мм)

Для операцій переривчастого різання (фрезерування, зубодовбання, стругання та ін.) екстремальний характер залежності стійкості від товщини покриття проявляється в значно більшому ступені, ніж для безперервного різання, причому оптимальне значення товщини покриття зрушується в менший бік (рис. 2.17 криві 2, 5 й 6). Так, для покриття TiC ГТ це значення перебуває в межах 2,5–3,0 мкм (крива 5), для покриття TiN КІБ

оптимальна товщина покриття коливається в межах 4,0–6,0 мкм (криві 2 і 6).

Таким чином, товщина покриття є параметром, який підлягає оптимізації в кожному конкретному випадку. У загальному випадку оптимальні товщини покриттів для твердосплавних інструментів широкої області використання наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Оптимальні товщини покриттів для твердосплавних пластин

Покриття	h _п , мкм, для твердосплавних пластин					
	ВК6	T5K10	TT10K8Б	ВК6	TT10K8Б	TT7K12
	Точіння			Фрезерування		
	чавун	сталь	сталь			
TiC ГТ, TiCN ГТ, TiN ГТ, TiC-TiCN-TiN ГТ	4–6	6–8	3–6			
TiC ДТ	8–10	14–18	6–10			
TiN КИБ, ZrN КИБ, (Ti-Cr)N КИБ, MoN КИБ, CrN КИБ	6–8	6–8	3–5			

Максимальна ефективність різального інструменту зі зносостійкими покриттями, які мають оптимальну величину, досягається на швидкостях різання, що перевищують на 20–60 % від швидкості різання для звичайного інструменту. Водночас доцільно використовувати низькі й середні значення подач.

Можливість використання більш високих швидкостей різання для інструменту з покриттям пов'язана зі зниженням рівня термомеханічного напруження контактних площадок леза (зменшення температур, тертя, контактних напруг, фізико-хімічних процесів).

Ефективність різального інструменту з покриттям значною мірою визначається оптимальністю його складу для заданих оброблюваного матеріалу і вимог до оброблення. У таблиці 2. поданий рекомендований склад покриттів для широкого діапазону умов оброблення і гама оброблюваних матеріалів. Експериментально підтверджено, що застосування інструментів зі зносостійкими покриттями дозволяє вирішувати досить широку гаму технологічних завдань щодо забезпечення надійної ефективності процесу оброблення: підвищення продуктивності праці, зниження трудомісткості виготовлення виробів, а отже, і зниження їхньої собівартості; підвищення стійкості та надійності різальних інструментів; підвищення точності і якості оброблених поверхонь тощо.

Таблиця 2.7 – Покриття, рекомендовані для різального інструменту

Оброблюваний матеріал	Операція	Інструментальний матеріал основи	Рекомендований склад покриттів	V, м/хв	Кст
1	2	3	4	5	6
Конструкційні сталі	Точіння	T5K10, TT10K8Б, MC221	TiC-TiCN-TiN, TiC-TiN, (Ti-Cr)N, TiC-Al ₂ O ₃	200–280 (150–200)	3–5

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4	5	6
(45, 40X, 38XC, 35XГA, ШХ15 та ін.)		P6M5	TiN, (Ti- Al)N, (Ti-Cr)N	60–100 (40–70)	2–4
	Фрезу- рування	ТТ7К12, МС146	TiC-TiCN- TiN, (Ti-Cr)N, (Ti-Mo)N	140–200 (100–150)	2,5–3
		P6M5	TiN (Ti-Al)N	50–80 (20–60)	2–3
Чавуни	Точіння	ВК6, ВК10-ХОМ, МС321	TiC-TiCN- TiN, (Ti-Cr)N, TiC-Al ₂ O ₃ - TiN	160–250 (120–180)	3–5
	Фрезу- рування	P6M5	TiCN, (Ti-Al)N	40–80 (20–60)	2–2,5

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4	5	6
Аустенітні сталі (X18H10T, X18H12T, X23H18, X15H5 та ін.)	Точіння, фрезерування	ВК6-М, ВК6 ВК10-ХОМ Р6М5К5, Р12Ф4К5	TiC-TiCN-TiN (Ti-Mo)N (Ti-Cr)N, TiCN, (Ti-Al)N (Hf-Zr-Cr)N	150–180 (120–150) 15–30 (10–20)	2–2,8 1,5– 2,2
Жароміцні деформівні сплави (ХН608, ХН77ТЮ, ХН35ВТЮ та ін.)	Точіння	ВК6, ВК8 ВК10-ХОМ	TiCN, (Ti-Al)N, (Ti-Cr)N, (Ti-Mo)N	25–60 (20–45)	1,8– 2,5
Сплави на титановій основі	Точіння, фрезерування	ВК6, ВК8 ВК10-ХОМ	(Ni-Zr)N (Ti-Cr)N (Mo-Zr)N	50–100 (40–60)	1,8– 2,5
<p><i>Примітки:</i></p> <p>1 У колонці «5» без дужок зазначені швидкості різання інструменту з покриттям, у дужках – без покриття.</p> <p>2 Кст – коефіцієнт підвищення стійкості: визначається як відношення середнього значення періоду стійкості інструменту з покриттям до відповідного значення стійкості інструменту без покриття</p>					

Контрольні запитання

1 Дайте визначення понять «стійкість» і «період стійкості» інструменту.

2 Який фізичний зміст показника відносної стійкості m у формулі Тейлора й від яких умов процесу різання залежить його величина?

3 Які з інструментальних матеріалів (швидкорізальні сталі або тверді сплави) більш «чутливі» до зміни (збільшення або зменшення) швидкості різання? Чому?

4 У яких випадках формула Тейлора незастосовна для використання її в розрахунках? Чому?

5 Охарактеризуйте умови експлуатації інструменту під час роботи на швидкостях: V_M , V_0 , V_E й $V_{МП}$.

6 Охарактеризуйте зони ефективної роботи інструменту.

7 Охарактеризуйте періоди економічної стійкості T_e і стійкості найбільшої продуктивності $T_{мп}$.

8 Охарактеризуйте поняття «*допустима швидкість різання*».

9 Як впливають на величину *допустимої швидкості різання* зміни значень глибини різання t і подачі S ?

10 Які умови різання враховують узагальненим швидкісним коефіцієнтом K_v ?

11 Охарактеризуйте вплив властивостей оброблюваних та інструментальних матеріалів на допустиму швидкість різання.

12 Охарактеризуйте вплив геометричних параметрів леза на допустиму швидкість різання.

13 Чому зі збільшенням діаметра інструменту під час свердління і фрезерування допустима швидкість різання зростає?

14 Поясніть, як температура різання впливає на стійкість інструменту і як цей вплив урахований у формулах

для визначення *допустимої швидкості різання* за різних видів оброблення?

15 Користуючись узагальненою залежністю (2.25) і таблицею 2.4, запишіть формули *допустимої швидкості різання* для точіння, свердління, розсвердлювання, фрезерування, протягання й ін.

16 Охарактеризуйте взаємозв'язок між властивостями інструментального матеріалу після нанесення покриття, характеристиками процесу різання та експлуатаційними характеристиками інструменту.

ТИПОВІ ТЕСТИ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ТА МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

Тема «Зношування інструментів»

1 До умов оброблення відносять:

- а) оброблюваний матеріал;
- б) допуски на розмір;
- в) режим різання;
- г) шорсткість обробленої поверхні;
- г) правильної відповіді немає.

2 До вимог оброблення відносять:

- а) оброблюваний матеріал;
- б) допуски на розмір;
- в) режим різання;
- г) шорсткість обробленої поверхні;
- г) правильної відповіді немає.

3 До характеристик оброблення відносять:

- а) оброблюваний матеріал;
- б) допуски на розмір;
- в) режим різання;
- г) шорсткість обробленої поверхні;

г) правильної відповіді немає.

4 До руйнування різального клина (леза) відносять:

а) сколювання;

б) адгезійну утому;

в) термічну утому;

г) опускання різальної кромки;

г) правильної відповіді немає.

5 До зношування різального клина (леза) відносять:

а) сколювання;

б) адгезійну утому;

в) термічну утому;

г) опускання різальної кромки;

г) правильної відповіді немає.

6 Як зміниться гранична товщина зрізу a_{zp} зі зменшенням переднього кута:

а) збільшиться;

б) зменшиться;

в) практично не зміниться;

г) правильної відповіді немає?

7 Як зміниться гранична товщина зрізу a_{zp} зі збільшенням заднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

8 Як зміниться гранична товщина зрізу $a_{зр}$ зі зменшенням кута загострення леза:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

9 Які з інструментальних матеріалів мають найменший опір крихкому руйнуванню:

- а) тверді сплави групи ТК;
- б) тверді сплави групи ВК і ТТК;
- в) різальна кераміка;
- г) швидкорізальні сталі;
- г) правильної відповіді немає?

10 Які з інструментальних матеріалів мають найбільший опір крихкому руйнуванню:

- а) тверді сплави групи ТК;
- б) тверді сплави групи ВК і ТТК;

- в) різальна кераміка;
- г) швидкорізальні сталі;
- г) правильної відповіді немає?

11 Який з інструментальних матеріалів має найменший коефіцієнт запасу пластичної міцності:

- а) ВК8;
- б) ЦМ332;
- в) Р18;
- г) Т15К6;
- г) правильної відповіді немає?

12 Який з інструментальних матеріалів має найбільший коефіцієнт запасу пластичної міцності:

- а) ВК8;
- б) ЦМ332;
- в) Р18;
- г) Т15К6;
- г) правильної відповіді немає?

13 Перший вид зношування (переважно по задній поверхні) є характерним за:

- а) чистового оброблення;
- б) напівчистового оброблення;

- в) чорнового оброблення;
- г) в умовах стійкого наростуотворення;
- г) правильної відповіді немає.

14 Другий вид зношування (переважно по передній поверхні) є характерним за:

- а) чистового оброблення;
- б) напівчистового оброблення;
- в) чорнового оброблення;
- г) в умовах стійкого наростуотворення;
- г) правильної відповіді немає.

15 Третій вид зношування (з однаковою інтенсивністю по задній і передній поверхнях одночасно) є характерним за:

- а) чистового оброблення;
- б) напівчистового оброблення;
- в) чорнового оброблення;
- г) в умовах стійкого наростуотворення.

16 Евтектичне зношування має місце за чистового оброблення металів на основі Fe (сталей) інструментами з різальною частиною із:

- а) ВOK60;
- б) різальної кераміки ОНТ-20;

- в) на основі кубічного нітриду бору (КНБ);
- г) Т15К6 з покриттями TiC і TiN;
- г) правильної відповіді немає.

17 За великих швидкостей різання ($V > V_0$) стійкість інструменту знижується у зв'язку з підсиленням зношування:

- а) механічного;
- б) адгезійно-усталеного;
- в) дифузійного;
- г) евтектичного;
- г) правильної відповіді немає.

18 Який із факторів найбільше впливає на зношування інструменту:

- а) швидкість різання;
- б) глибина різання;
- в) подача;
- г) практично однакове;
- г) правильної відповіді немає?

19 Який із факторів найменше впливає на зношування інструменту:

- а) швидкість різання;

- б) глибина різання;
- в) подача;
- г) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

20 Який із факторів найбільше впливає на зношування інструменту:

- а) глибина різання;
- б) подача;
- в) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

21 Який із факторів менше впливає на зношування інструменту:

- а) глибина різання;
- б) подача;
- в) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

22 Як зміниться величина зношування інструменту зі збільшенням переднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;

г) правильної відповіді немає?

23 Як зміниться величина зношування інструменту зі зменшенням переднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

24 Як зміниться величина зношування інструменту зі збільшенням заднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

25 Як зміниться величина зношування інструменту зі зменшенням заднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

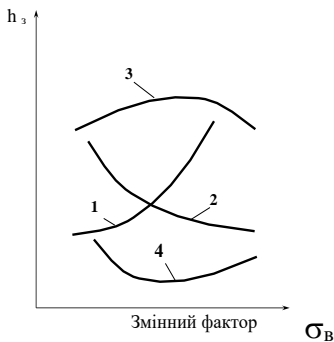
26 Як зміниться величина зношування інструменту зі збільшенням головного кута в плані:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

27 Як зміниться величина зношування інструменту зі зменшенням головного кута в плані:

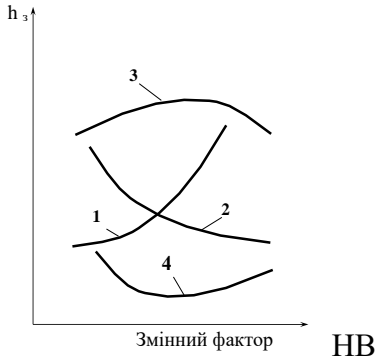
- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

28 Залежність величини зношування інструменту від міцності оброблюваного матеріалу:



- г) правильної відповіді немає?

29 Залежність величини зношування інструменту від твердості оброблюваного матеріалу:



г) правильної відповіді немає.

30 Зі зменшенням міцності оброблюваного матеріалу зношування інструменту:

- а) збільшується;
- б) зменшується;
- в) практично не змінюється;
- г) правильної відповіді немає.

31 Зі зменшенням твердості оброблюваного матеріалу зношування інструменту:

- а) збільшується;
- б) зменшується;

- в) практично не змінюється;
- г) правильної відповіді немає.

32 Як зміниться зношування інструменту зі збільшенням швидкості різання:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

Тема «Стійкість інструментів»

33 Який із факторів найбільше впливає на стійкість інструменту:

- а) швидкість різання;
- б) глибина різання;
- в) подача;
- г) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

34 Який із факторів найменше впливає на стійкість інструменту:

- а) швидкість різання;
- б) глибина різання;

- в) подача;
- г) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

35 Який із факторів більше впливає на стійкість інструменту:

- а) глибина різання;
- б) подача;
- в) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

36 Який із факторів менше впливає на стійкість інструменту:

- а) глибина різання;
- б) подача;
- в) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

37 Як зміниться стійкість інструменту зі збільшенням головного кута в плані:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

38 Як зміниться стійкість інструменту зі зменшенням головного кута в плані:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

39 Як зміниться стійкість інструменту зі збільшенням переднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

40 Як зміниться стійкість інструменту зі зменшенням переднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

41 Як зміниться стійкість інструменту зі збільшенням заднього кута:

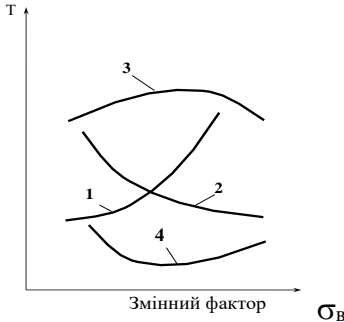
- а) збільшиться;

- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

42 Як зміниться стійкість інструменту зі зменшенням заднього кута:

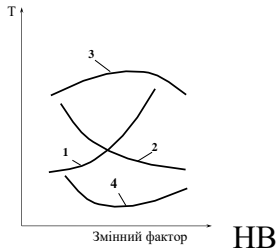
- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

43 Залежність стійкості інструменту від міцності оброблюваного матеріалу:



- г) правильної відповіді немає.

44 Залежність стійкості інструменту від твердості оброблюваного матеріалу:



г) правильної відповіді немає.

45 Зі зменшенням міцності оброблюваного матеріалу стійкість інструменту:

- а) збільшується;
- б) зменшується;
- в) практично не змінюється;
- г) правильної відповіді немає.

46 Зі зменшенням твердості оброблюваного матеріалу стійкість інструменту:

- а) збільшується;
- б) зменшується;
- в) практично не змінюється;
- г) правильної відповіді немає.

47 Як зміниться стійкість інструменту зі зменшенням швидкості різання:

- а) збільшиться;

- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

48 Як зміниться стійкість інструменту зі збільшенням швидкості різання:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

49 Як зміниться стійкість інструменту зі зменшенням швидкості різання:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

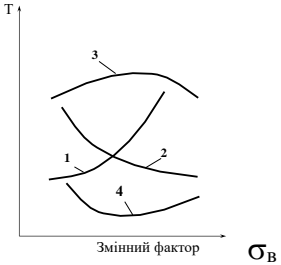
50 Як зміниться стійкість інструменту зі збільшенням коефіцієнта теплопровідності інструментального матеріалу:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

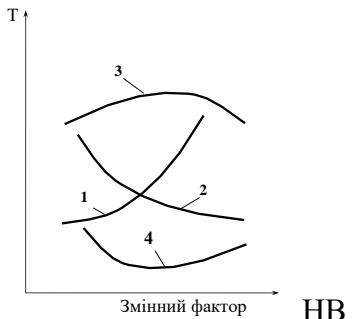
51 За якою формулою можна визначити стійкість інструменту під час різання:

- а) $P_z \cdot v / 427$;
- б) $C'_v / v^{1/m}$;
- в) C_v / T^m ;
- г) $P_z \cdot v / 6120$;
- г) правильної відповіді немає?

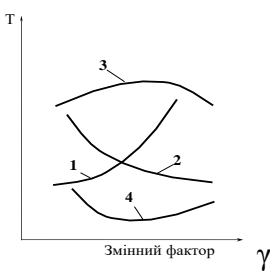
52

<p>Яка залежність стійкості інструменту від міцності оброблюваного матеріалу?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<ul style="list-style-type: none"> а) погіршенням умов тепловідведення; б) збільшенням сили різання; в) зменшенням сили різання; г) збільшенням коефіцієнта тертя; г) правильної відповіді немає.

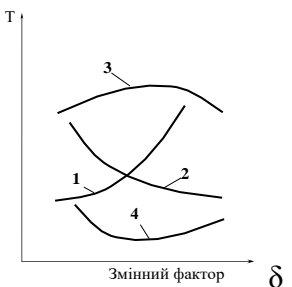
53

<p>Яка залежність стійкості інструменту від твердості оброблюваного матеріалу?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>Змінний фактор HV</p> <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) збільшенням сили тертя; в) зменшенням сили різання; г) збільшенням коефіцієнта тертя; ґ) правильної відповіді немає.</p>

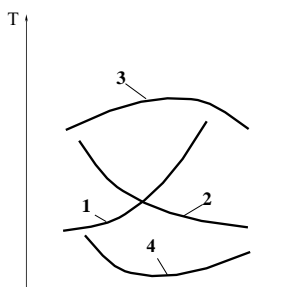
54

<p>Яка залежність стійкості інструменту від переднього кута?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>Змінний фактор γ</p> <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) збільшенням сили тертя; в) зменшенням температури різання; г) збільшенням кута різання; ґ) правильної відповіді немає.</p>

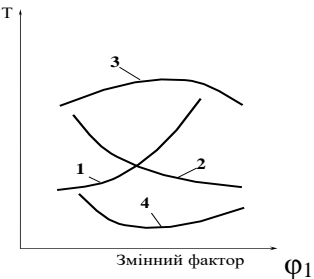
55

<p>Яка залежність стійкості інструменту від кута різання?</p>	<p>у зв'язку зі</p>
 <p>Змінний фактор δ</p> <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) зміною умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) зменшенням сили різання; г) збільшенням переднього кута; ґ) правильної відповіді немає.</p>

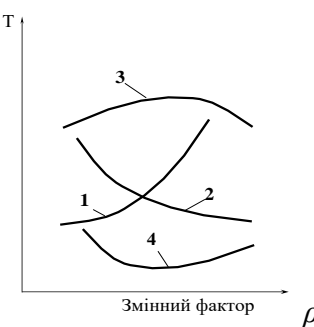
56

<p>Яка залежність стійкості інструменту головного кута в плані?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>Змінний фактор ϕ</p> <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) поліпшенням умов тепловідведення; б) збільшенням сили тертя; в) зменшенням сили різання; г) збільшенням температури різання; ґ) правильної відповіді немає.</p>

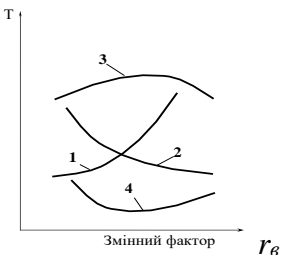
57

<p>Яка залежність стійкості інструменту допоміжного кута в плані?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршення умов тепловідведення; б) збільшенням сили тертя; в) зменшенням температури різання; г) збільшенням кута різання; ґ) правильної відповіді немає.</p>

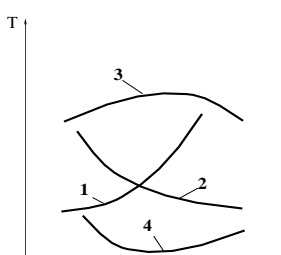
58

<p>Яка залежність стійкості інструменту від радіуса округлення різальної кромки?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршення умов тепловідведення; б) збільшенням температури різання; в) зменшенням сили різання; г) збільшенням кута різання; ґ) правильної відповіді немає.</p>

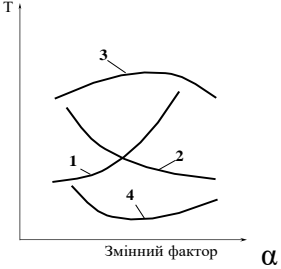
59

<p>Яка залежність стійкості інструменту від радіуса вершини леза?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) зменшенням температури різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; г) правильної відповіді немає.</p>

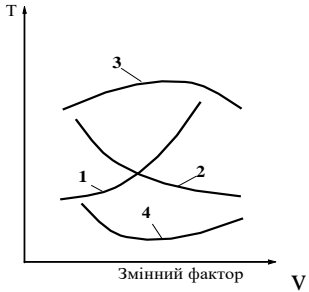
60

<p>Яка залежність стійкості інструменту від кута нахилу різальної кромки?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) збільшенням сили різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; г) правильної відповіді немає.</p>

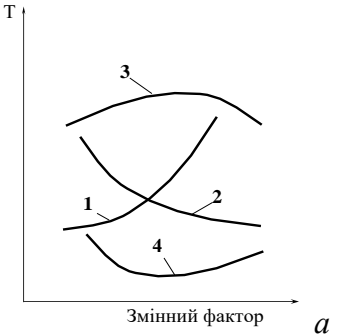
61

Яка залежність стійкості інструменту від заднього кута?	у зв'язку із
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням температури різання; в) збільшенням сили різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; г) правильної відповіді немає.

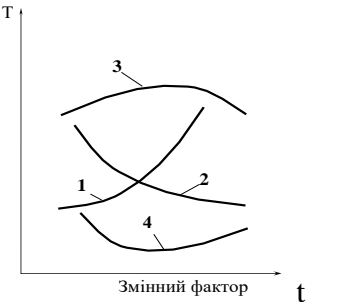
62

Яка залежність стійкості інструменту від швидкості різання?	у зв'язку із
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) зменшенням сили різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; г) правильної відповіді немає.

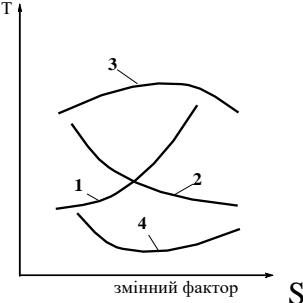
63

<p>Яка залежність стійкості інструменту від товщини зрізу?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршення умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) збільшенням температури різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; г) правильної відповіді немає.</p>

64

<p>Яка залежність стійкості інструменту від глибини різання?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршення умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) збільшенням сили різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; г) правильної відповіді немає.</p>

65

<p>Яка залежність стійкості інструменту від подачі?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршення умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) збільшенням потужності різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; ґ) правильної відповіді немає.</p>

66

<p>Зі зменшенням твердості оброблюваного матеріалу стійкість інструменту</p>	<p>у зв'язку із</p>
<p>1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) зменшення товщини зрізу; б) збільшенням сили тертя; в) зменшенням коефіцієнта тертя; г) зменшенням температури різання; ґ) правильної відповіді немає.</p>

67

Зі зменшенням міцності оброблюваного матеріалу стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршення умов тепловідведення; б) збільшенням сили тертя; в) зменшенням коефіцієнта тертя; г) зменшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

68

Зі зменшенням переднього кута стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршення умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) зменшенням коефіцієнта тертя; г) зменшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

69

Зі зменшенням кута різання стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршення умов тепловідведення; б) збільшенням сили тертя; в) збільшенням сили різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; г) правильної відповіді немає.

70

Зі зменшенням головного кута в плані стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) зменшенням товщини зрізу; б) погіршенням умов тепловідведення; в) зменшенням сили тертя; г) зменшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

71

Зі зменшенням допоміжного кута в плані стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) зменшенням товщини зрізу; б) поліпшенням умов тепловідведення; в) зі зменшенням сили тертя; г) збільшенням ширини зрізу; г) правильної відповіді немає.

72

Зі зменшенням радіуса округлення різальної кромки стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) поліпшенням умов тепловідведення; б) зменшенням температури різання; в) збільшенням сили різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; г) правильної відповіді немає.

73

Зі зменшенням радіуса вершини леза стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) поліпшенням умов тепловідведення; б) збільшенням сили тертя; в) збільшенням сили різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; ґ) правильної відповіді немає.

74

Зі зменшенням кута нахилу різальної кромки стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) поліпшенням умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) зменшенням температури різання; г) зменшенням коефіцієнта тертя; ґ) правильної відповіді немає.

75

Зі зменшенням заднього кута стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) зменшенням коефіцієнта тертя; г) зменшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

76

Зі зменшенням товщини зрізу стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) збільшенням сили тертя; в) зменшенням коефіцієнта тертя; г) зменшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

77

Зі зменшенням глибини різання стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршення умов тепловідведення; б) збільшенням сили тертя; в) зменшенням коефіцієнта тертя; г) зменшенням сили різання; г) правильної відповіді немає.

78

Зі зменшенням подачі стійкість інструменту	у зв'язку зі
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) збільшенням товщини зрізу; б) поліпшенням умов тепловідведення; в) збільшенням сили тертя; г) зменшенням ширини зрізу; г) правильної відповіді немає.

Зі зменшенням швидкості різання стійкість інструменту	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршення умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) зменшенням коефіцієнта тертя; г) зменшенням температури різання; ґ) правильної відповіді немає.

Тема «Допустима швидкість різання»

80 Який із факторів найбільше впливає на допустиму швидкість різання:

- а) стійкість інструменту;
- б) глибина різання;
- в) подача;
- г) практично однаково;
- ґ) правильної відповіді немає?

81 Який із факторів найменше впливає на допустиму швидкість різання:

- а) стійкість інструменту;
- б) глибина різання;
- в) подача;
- г) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

82 Який із факторів більше впливає на допустиму швидкість різання:

- а) глибина різання;
- б) подача;
- в) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

83 Який із факторів менше впливає на допустиму швидкість різання:

- а) глибина різання;
- б) подача;
- в) практично однаково;
- г) правильної відповіді немає?

84 Як зміниться допустима швидкість різання зі збільшенням головного кута в плані:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;

- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

85 Як зміниться допустима швидкість різання зі зменшенням головного кута в плані:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

86 Як зміниться допустима швидкість різання зі збільшенням переднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

87 Як зміниться допустима швидкість різання зі зменшенням переднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

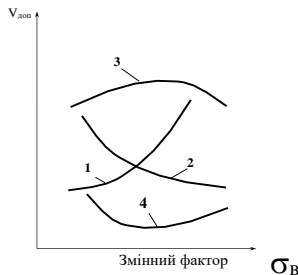
88 Як зміниться допустима швидкість різання зі збільшенням заднього кута:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

89 Як зміниться допустима швидкість різання зі зменшенням заднього кута:

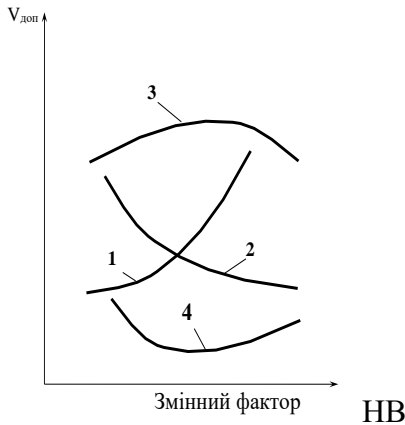
- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

90 Залежність допустимої швидкості різання від міцності оброблюваного матеріалу:



- г) правильної відповіді немає?

91 Залежність допустимої швидкості різання від твердості оброблюваного матеріалу:



г) правильної відповіді немає?

92 Зі зменшенням міцності оброблюваного матеріалу допустима швидкість різання:

- а) збільшується;
- б) зменшується;
- в) практично не змінюється;
- г) правильної відповіді немає.

93 Зі зменшенням твердості оброблюваного матеріалу допустима швидкість різання:

- а) збільшується;
- б) зменшується;

- в) практично не змінюється;
- г) правильної відповіді немає.

94 Як зміниться допустима швидкість різання зі збільшенням стійкості інструменту:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

95 Як зміниться допустима швидкість різання зі зменшенням стійкості інструменту:

- а) збільшиться;
- б) зменшиться;
- в) практично не зміниться;
- г) правильної відповіді немає?

96 За якою формулою можна визначити допустиму швидкість різання під час точіння:

а) $\frac{C_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v}} K_v$;

б) $\frac{C_v}{T^m \cdot S_z^{y_v}} K_{i_v}$;

в) $\pi Dn/1000$;

$$\text{г) } \frac{C_v \cdot D^{X_v}}{T^m \cdot S^{Y_v}} K_v ;$$

г) правильної відповіді немає?

97 За якою формулою можна визначити допустиму швидкість різання під час свердління:

$$\text{а) } \frac{C_v}{T^m \cdot t^{X_v} \cdot S^{Y_v}} K_v ;$$

$$\text{б) } \frac{C_v}{T^m \cdot S_Z^{Y_v}} K_{i_v} ;$$

в) $\pi Dn/1000$;

$$\text{г) } \frac{C_v \cdot D^{X_v}}{T^m \cdot S^{Y_v}} K_v ;$$

г) правильної відповіді немає?

98 Як зміниться допустима швидкість різання зі збільшенням коефіцієнта теплопровідності інструментального матеріалу:

а) збільшиться;

б) зменшиться;

в) практично не зміниться;

г) правильної відповіді немає?

99 За якою формулою можна визначити допустиму швидкість різання під час розсвердлювання:

а) $\frac{C_v}{T^m \cdot t^{X_v} \cdot S^{Y_v}} K_v$;

б) $\frac{C_v}{T^m \cdot S_Z^{Y_v}} K_{i_v}$;

в) $\pi Dn/1000$;

г) $\frac{C_v \cdot D^{X_v}}{T^m \cdot S^{Y_v}} K_v$;

г) правильної відповіді немає?

100 За якою формулою можна визначити допустиму швидкість різання під час розточування:

а) $\frac{C_v}{T^m \cdot t^{X_v} \cdot S^{Y_v}} K_v$;

б) $\frac{C_v}{T^m \cdot S_Z^{Y_v}} K_{i_v}$;

в) $\pi Dn/1000$;

г) $\frac{C_v \cdot D^{X_v}}{T^m \cdot S^{Y_v}} K_v$;

г) правильної відповіді немає?

101 За якою формулою можна визначити допустиму швидкість різання під час фрезерування:

а) $\frac{C_v}{T^m \cdot t^{X_v} \cdot S^{Y_v}} K_v$;

б) $\frac{C_v}{T^m \cdot S_Z^{Y_v}} K_{i_v}$;

в) $\pi D n / 1000$;

г) $\frac{C_v \cdot D^{X_v}}{T^m \cdot S^{Y_v}} K_v$;

г) правильної відповіді немає?

102 За якою формулою можна визначити допустиму швидкість різання під час протягування:

а) $\frac{C_v}{T^m \cdot t^{X_v} \cdot S^{Y_v}} K_v$;

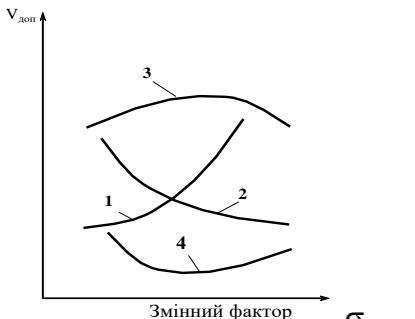
б) $\frac{C_v}{T^m \cdot S_Z^{Y_v}} K_{i_v}$;

в) $\pi D n / 1000$;

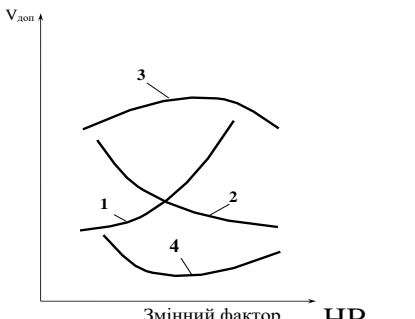
г) $\frac{C_v \cdot D^{X_v}}{T^m \cdot S^{Y_v}} K_v$;

г) правильної відповіді немає?

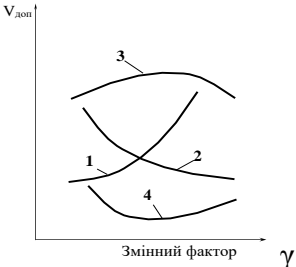
103

Яка залежність допустимої швидкості різання від міцності оброблюваного матеріалу?	у зв'язку із
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) поліпшенням умов тепловідведення; г) збільшенням стійкості інструменту; ґ) правильної відповіді немає.

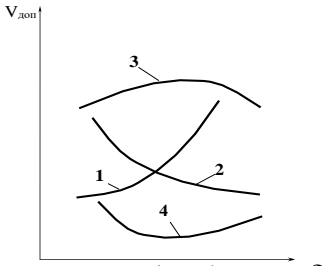
104

Яка залежність допустимої швидкості різання від твердості оброблюваного матеріалу?	у зв'язку із
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	а) погіршенням умов тепловідведення; б) збільшенням сили зрізання; в) зменшенням сили різання; г) збільшенням стійкості інструменту; ґ) правильної відповіді немає.

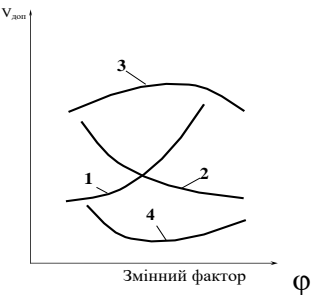
105

<p>Яка залежність допустимої швидкості різання від переднього кута?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) збільшенням сили різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.</p>

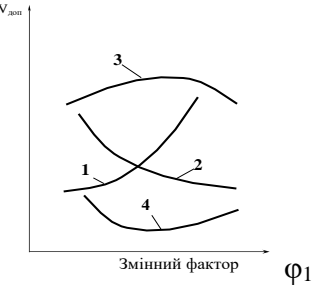
106

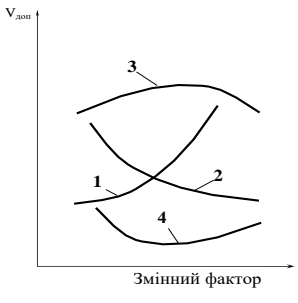
<p>Яка залежність допустимої швидкості різання від кута різання?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) зменшенням зношування інструменту; б) зменшенням стійкості інструменту; в) зменшенням сили різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.</p>

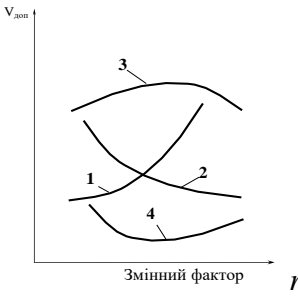
107

<p>Яка залежність допустимої швидкості різання головного кута в плані?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) поліпшенням умов тепловідведення; б) зменшенням зношування інструменту; в) збільшенням стійкості інструменту; г) збільшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.</p>

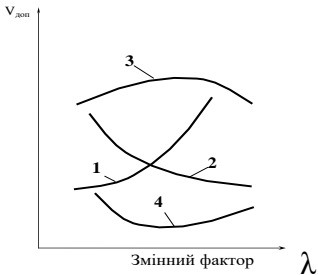
108

<p>Яка залежність допустимої швидкості різання допоміжного кута в плані?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) збільшенням сили різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.</p>

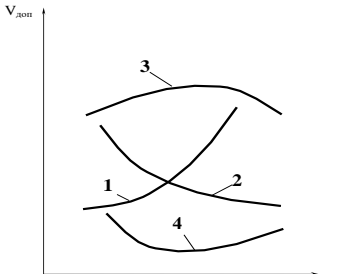
<p>Яка залежність допустимої швидкості різання від радіуса округлення різальної кромки?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) збільшенням температури різання; в) зменшенням сили різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.</p>

<p>Яка залежність допустимої швидкості різання від радіуса вершини леза?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням сили різання; в) зменшенням температури різання; г) зменшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає</p>

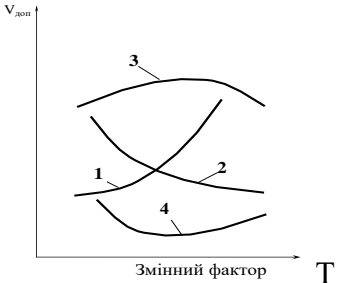
111

Яка залежність допустимої швидкості різання від кута нахилу різальної кромки?	у зв'язку із
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) збільшенням сили різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.

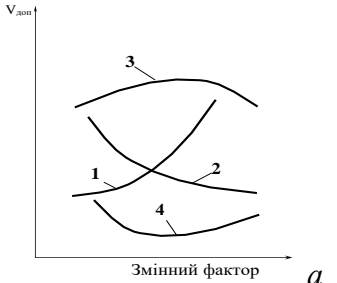
112

Яка залежність допустимої швидкості різання від заднього кута?	у зв'язку із
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) збільшенням сили різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.

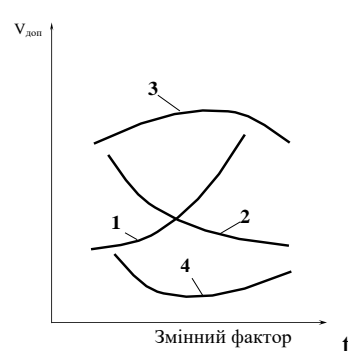
113

<p>Яка залежність допустимої швидкості різання від періоду стійкості?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) зменшенням температури різання; г) збільшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.</p>

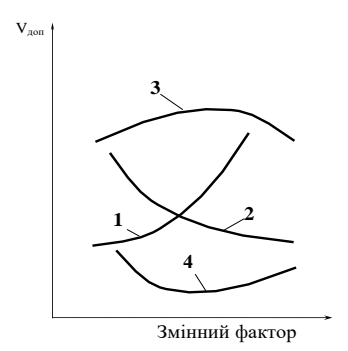
114

<p>Яка залежність допустимої швидкості різання від товщини зрізу?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<p>а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) зменшенням температури різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.</p>

115

<p>Яка залежність допустимої швидкості різання від глибини різання?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<ul style="list-style-type: none"> а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) зменшенням сили різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.

116

<p>Яка залежність допустимої швидкості різання від подачі?</p>	<p>у зв'язку із</p>
 <p>5) правильної відповіді немає.</p>	<ul style="list-style-type: none"> а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) зменшенням потужності різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.

117

Зі зменшенням твердості оброблюваного матеріалу допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) зменшенням товщини зрізу; б) збільшенням стійкості інструменту; в) зменшенням стійкості інструменту; г) зменшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

118

Зі зменшенням міцності оброблюваного матеріалу допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) збільшенням стійкості інструменту; в) зменшенням стійкості інструменту; г) збільшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

119

Зі зменшенням переднього кута допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) збільшенням температури різання; в) збільшенням стійкості інструменту; г) зменшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

120

Зі зменшенням кута різання допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) збільшенням температури різання; в) зменшенням стійкості інструменту; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.

121

Зі зменшенням головного кута в плані допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) зменшенням стійкості інструменту; б) погіршенням умов тепловідведення; в) збільшенням стійкості інструменту; г) збільшенням температури різання; ґ) правильної відповіді немає.

122

Зі зменшенням допоміжного кута в плані допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) зменшенням стійкості інструменту; б) поліпшенням умов тепловідведення; в) погіршенням умов тепловідведення; г) збільшенням стійкості інструменту; ґ) правильної відповіді немає.

123

Зі зменшенням радіуса округлення різальної кромки допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) поліпшенням умов тепловідведення; б) зменшенням температури різання; в) погіршенням умов тепловідведення; г) зменшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.

124

Зі зменшенням радіуса вершини леза допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням температури різання; в) збільшенням стійкості інструменту; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.

125

Зі зменшенням кута нахилу різальної кромки допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) поліпшенням умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) зменшенням температури різання; г) збільшенням стійкості інструменту; г) правильної відповіді немає.

126

Зі зменшенням заднього кута допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) збільшенням стійкості інструменту; г) зменшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

127

Зі зменшенням товщини зрізу допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) збільшенням стійкості інструменту; г) збільшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

128

Зі зменшенням глибини різання допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням стійкості інструменту; в) збільшенням стійкості інструменту; г) збільшенням сили різання; г) правильної відповіді немає.

129

Зі зменшенням стійкості інструменту допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) погіршенням умов тепловідведення; б) зменшенням сили тертя; в) збільшенням стійкості інструменту; г) зменшенням температури різання; г) правильної відповіді немає.

130

Зі зменшенням подачі допустима швидкість різання	у зв'язку із
1) збільшується; 2) зменшується; 3) практично не змінюється; 4) правильної відповіді немає.	а) зменшенням стійкості інструменту; б) поліпшенням умов тепловідведення; в) збільшенням стійкості інструменту; г) зменшенням ширини зрізу; г) правильної відповіді немає.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко та ін. ; за заг. ред. М. П. Мазура. – 4-те вид., переробл. і допов. – Львів : Новий Світ-2000, 2022. – 471 с. – ISBN 978-966-418-105-82.
2. Внуков Ю. М. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навчальний посібник / Ю. М. Внуков, В. О. Залога. – Суми : Вид-во СумДУ, 2010. – 243 с.
3. Залога В. А. Разработка научных основ и принципов практического применения нестационарных видов обработки резанием на базе попутного тангенциального течения : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / В. А. Залога. – Харьков, 2000. – 327 с.
4. Внуков Ю. Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследования условий их трения с обрабатываемыми материалами и реализации новых технологических возможностей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Ю. Н. Внуков. – Москва, 1992. – 370 с.
5. ДСТУ 2233 – 93. Інструменти різальні. Терміни та визначення. – Київ : Держстандарт України, 1993. – 27 с.
6. Залога В. О. Прогнозування деформаційної складової сил тертя на контактних поверхнях різального інструменту / В. О. Залога, Д. В. Криворучко, О. О. Залога // Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки». – 2009. – № 3 (50). – С. 38–45.
7. Klimentko S. A. Cutting of Superhard Materials / S. A. Klimentko, Yu. A. Mukovoz, L. G. Polonsky // Advanced Ceramic Tools for Machining Application-2 / Edited by I. M. Low and X. S. Li. – Trans Tech Publications : Switzerland – Germany – UK – USA, 1991. – P. 1–68.

8. Конспект лекций по курсу «Теория резания» на тему «Износ и стойкость режущих инструментов» : в 2 ч. / составители: Ю. Н. Внуков, В. А. Залого. – Сумы : Изд-во СумГУ, 2005. – Ч. I. – 73 с. ; Ч. II. – 45 с.

9. Нормы износа, стойкости и расхода режущего инструмента. Научно-исследовательское бюро технических нормативов. – Москва : Машгиз, 1961.

10. Остафьев В. А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В. А. Остафьев. – Москва : Машиностроение, 1979. – 168 с.

11. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва : Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 496 с.

Електронне видання

**Внуков Юрій Миколайович,
Залога Вільям Олександрович**

ЗНОШУВАННЯ І СТІЙКІСТЬ РІЗАЛЬНИХ ЛЕЗОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Навчальний посібник

Друге видання, стереотипне

Художнє оформлення обкладинки В. О. Залоги
Редактор Н. З. Ключко
Комп'ютерне верстання В. О. Залоги

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 15,93. Обл.-вид. арк. 15,54.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.