

**М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І. Грабченко, В.Л.
Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов**

Основи теорії різання матеріалів

Підручник

*Затверджено Міністерством освіти і науки України як підручник
для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за
напрямами підготовки «Інженерна механіка» та
«Машинобудування»*

«Новий Світ – 2000»
Львів 2020

УДК 621.91. (075.8)
ББК 34.63-1я73
М 75

Затверджено Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямами підготовки «Інженерна механіка» та «Машинобудування». Лист № 1/11-4006 від 10.06.2009.

Рецензенти: доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи ІНМ ім. В.М.Бакуля НАН України, лауреат Державної премії України С.А.Клименко
доктор технічних наук, професор, директор Інституту промислових технологій, дизайну та менеджменту Одеського національного політехнічного університету В.М.Тонконогий

Рекомендовано до друку Вченими радами Запорізького національного технічного університету (Протокол №3 від 10.11.2008 року) та Хмельницького національного університету (Протокол №5 від 19.11.2008 року).

Видання 3-є перероблене і доповнене

М 75 Мазур М.П. та інш.

Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І.Грабченко, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 3-є вид. перероб. і доп. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с.

В підручнику висвітлені основні процеси, що мають місце при обробленні різанням різних матеріалів, як то: кінематика процесів оброблення, геометричні параметри лез інструментів та зрізуваного шару, стружкоутворення, контактні явища на поверхнях інструменту, теплові процеси, зношування інструментів, формування обробленої поверхні заданої якості. Подані рекомендації щодо раціональної експлуатації інструментів та призначення оптимальних режимів різання. Розглянуті особливості різання на сучасному автоматизованому устаткуванні, оброблюваності матеріалів та способів її покращення, в тому числі: вібраційне різання, різання з підігрівом, тощо. Приведений аналіз особливостей надшвидкісного оброблення матеріалів, а також мікро- і нанорізання у нанометричному діапазоні деталей та інструментів.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями «Прикладна механіка» та «Галузеве машинобудування», а також магістрів, аспірантів машинобудівних спеціальностей та інженерно-технічних працівників машинобудівних підприємств.

© Мазур М.П., Внуков Ю.М., Грабченко А.І., Доброскок В.Л., Залога В.О., Новосьолов Ю.К., Якубов Ф.Я., 2020
© ХНУ, оригінал макет, 2018, © ЗНТУ, оригінал макет, 2020
© «Новий Світ – 2000», ФОП Піча С.В., 2020

ISBN 978-966-418-105-8

ВСТУП

1.1. Місце і значення оброблення різанням серед інших методів формоутворення поверхонь деталей

Машинобудування покликане грати провідну роль у прискоренні науково-технічного прогресу у народному господарстві нашої країни. Характерними рисами його розвитку є автоматизація технологічних процесів, широке впровадження робототехніки, висока продуктивність праці. Серед різних технологій, вживаних у машинобудуванні, оброблення різанням є одним із основних методів отримання точних деталей машин. Оскільки вимоги до точності машин і приладів постійно підвищуються, стає безперечною перспективність розвитку процесів механічного оброблення. Їх універсальність і гнучкість забезпечують переваги перед іншими способами виготовлення деталей, особливо для невеликих партій виробів в індивідуальному і серійному виробництві.

Аналіз показує, що обробленням різанням одержується найвища точність і якнайкраща якість обробленої поверхні. Процес різання є найбільш економічним. Способи різання мають ту істотну перевагу, що при частій зміні об'єктів виробництва вони характеризуються високою маневреністю, а тривалість підготовки операцій нового виробництва та їх вартість менші для оброблення різанням, чим при виготовленні деталей методами прецизійного литва або штампуванням. Енергоємність процесу різання значно менша, ніж енергоємність процесів литва чи оброблення тиском. Процес різання дуже добре піддається автоматизації (перші системи ЧПК були створені саме для металорізальних верстатів).

Одним з основних недоліків процесу різання є перетворення частини оброблюваного матеріалу у стружку, тобто, відходи. Аналіз, проведений у 1957 р. у США [4], показав, що за рік було виплавлено 100 млн. тонн сталі, з яких більше 15 млн. тонн було переведено у стружку, що складає, приблизно 10%. Тому довгий час вважалося, що процес різання у майбутньому буде замінений іншими методами механічного оброблення, будуть створені так звані безвідходні технології виготовлення деталей (методи точного литва, пластичної деформації, порошкової металургії та ін.). Проте, не дивлячись на ці прогнози, питома вага оброблення різанням на машинобудівних підприємствах за багато десятиліть фактично не міняється і складає 50–70%.

Передбачалося також, що процес різання буде замінений сучасними спеціальними методами оброблення: електрофізичними і електрохімічними. Проте, як виявилось, енергоємність цих методів значно вища, ніж при обробленні різанням (табл. 1.1 і 1.2). Це і визначило найбільш ефективну сферу застосування перерахованих методів: оброблення виробів з матеріалів, що важко, або зовсім не піддаються різанню і формуванню на výroбах складних профілів або отворів особливо малих діаметрів.

Таким чином, не дивлячись на значні досягнення у розробці технологічних процесів отримання точних заготовок, що наближаються до форми остаточно обробленого виробу, а також, не дивлячись на великий прогрес, досягнутий у створенні електрофізичних і електрохімічних методів оброблення матеріалів, є всі підстави вважати, що і надалі оброблення матеріалів різанням займатиме значне місце у технології виготовлення машин. Проте його об'єм скорочуватиметься за рахунок зменшення чорнових обдирних операцій і зростатиме при виконанні чистових і викінчувальних операцій

**Таблиця 1.1. Енергетичні показники різних способів оброблення різанням
(за даними В.Н. Подурасва)**

Спосіб різання	Площа зрізуваного шару, мм ²	Питома енергія 10 ³ , Дж/см ³	Швидкість різання, м/с	Продуктивність об'ємна, см ³ /с
Обточування	1,0	0,5...0,7	1,5...7,5	5×10 ⁻² ...5×10
Протягування	0,5	2,5...3,7	0,01...0,1	4×10 ⁻³ ...1×10 ⁻¹
Фрезерування	0,3	5,0...7,5	2...6	2×10 ⁻³ ...1,0
Розсвердлювання	0,1	12...30	0,15...1,6	5×10 ⁻³ ...5×10 ⁻¹
Шліфування	5×10 ⁻⁵	55...70	25...30	5×10 ⁻³ ...2×10 ⁻²

Таблиця 1.2. Енергосміність різних процесів зняття поверхневого шару металу з виробу (за даними акад. В.І.Дікушина)

Вид оброблення	Необхідна потужність для видалення 1 кг припуску за 1 хв при обробленні сталі, кВт
Різання лезовим інструментом	1...1,5
Різання абразивним інструментом	10
Електроіскрове оброблення	100
Оброблення електронним променем	1000
Оброблення лазерним променем	5000...10000

Вдосконалення існуючих і створення нових методів та практичних прийомів оброблення матеріалів різанням неможливе без використання досягнень науки про різання матеріалів, яка є базою для галузі технології машинобудування. Якщо не спиратися на теоретичні основи процесу різання матеріалів, то неможливо ні спроектувати науково обґрунтований технологічний процес, ні дати оцінку його ефективності. Продуктивність і собівартість технологічного процесу визначаються часом, який витрачається на виконання окремих операцій, і залежить від встановлених на них режимів різання. Призначення режиму різання неможливе без знання основних законів продуктивного різання, що базуються на процесах, які відбуваються у зоні деформації і на контактних поверхнях інструменту.

Якість деталей, що випускаються, визначається точністю їх геометричних форм і шорсткістю обробленої поверхні. При певній жорсткості деталі похибки форми залежать від величини і напрямку сил, діючих у процесі оброблення. Таким чином, їх потрібно знати й уміти визначати.

Похибки форми деталі, викликані розігріванням заготовки та інструменту, можна розрахувати, знаючи їх температуру, для чого необхідно мати дані про теплові явища, супутні перетворенню зрізуваного шару, на стружку.

Надійність функціонування технологічного процесу визначається можливими відмовами по точності оброблення і втрати різальної здатності інструменту. Це можливо встановити на підставі вивчення фізичної природи і закономірностей зношування та руйнування інструментів і знання теорії їх стійкості.

Проектування металорізальних інструментів починається з вибору геометричних параметрів їх різальної частини. Оптимальні величини цих параметрів, при яких

період стійкості інструменту максимальний, визначаються фізичними процесами, що відбуваються на контактних поверхнях інструменту.

Для підвищення довговічності інструменту велике значення має правильний вибір інструментального матеріалу. Його проводять на підставі знання закономірностей контактування пари: матеріал інструменту та оброблюваний матеріал, а також контактних напружень.

При проектуванні металорізальних верстатів задають діапазони зміни подачі, числа обертів шпинделя та ефективну потужність верстата. Вибір цих параметрів проводять на основі раціональних режимів різання при одноінструментному і багатоінструментному обробленні. Розрахунки на міцність, жорсткість і довговічність, вібросійкість окремих деталей і вузлів верстата здійснюють, використовуючи силові і динамічні закономірності процесу різання.

Застосування у машинобудуванні нових важкооброблюваних конструкційних матеріалів, підвищення рівня автоматизації металорізальних операцій і створення самоналагоджувальних систем, підвищені вимоги до точності і якості оброблення ставлять перед наукою про різання матеріалів ряд нових проблем [1]. Наприклад, різання важкооброблюваних, пірофорних і отруйних матеріалів показало необхідність іншого підходу до призначення режимів різання і конструкції інструментів, чим традиційний. Для оброблення конструкційних матеріалів у космосі потрібні нові методи, оскільки виключно високий вакуум руйнує окисні плівки і приводить до зварювання інструментів із заготовкою.

Сучасне машинобудування значно відрізняється від традиційного з його потоковою технологією і автоматичними лініями. Гнучкі виробничі системи працюють у постійно змінюваних умовах, що, поза сумнівом, накладає відбиток на фізичні закономірності процесів, що відбуваються у зоні різання. Прогресивне металообробне устаткування дозволяє широко використовувати комбінації різних видів енергії, наприклад механічної і теплової, механічної та хімічної і т.п. Кількість подібних проблем вельми велика.

У цьому плані все більше відкривається значний потенціал вдосконалення процесів оброблення різанням стосовно нанометричного діапазону. Перехід у нанообласть дозволяє вирішувати технологічні задачі на атомно-молекулярному рівні і добиватися таких вихідних показників процесу оброблення, яких традиційними методами досягти неможливо. З'явилися передумови для використання ідеальних (граничних) систем нанорізання, усі складові яких є нанооб'єктами. Величезного прогресу добилися творці інструментарію нанотехнологій, насамперед зондових скануючих мікроскопів.

Тому вивчення теорії різання як базової дисципліни машинобудування дозволить майбутньому фахівцеві успішно оволодіти питаннями проектування металорізальних верстатів, інструментів і технології механічного оброблення деталей машин і приладів.

1.2. Історія розвитку науки про різання матеріалів

Процес різання почав широко використовуватися на машинобудівних підприємствах з другої половини XVIII сторіччя. Відповідно все більше виникало питань, пов'язаних з його використанням, через що необхідно було проводити відповідні дослідження.

Наука про різання матеріалів – відносно молода наука. Перша опублікована праця у цій області відноситься до 1848 р. і належать Кокільє, який визначив сили опору різанню, що виникають при свердлінні стволів гармат із кованого заліза. У 1850 і 1864 р.р. досліди Кокільє для обточування повторюють Кларінваль і Жоссель (Жосселен). Проте ці дослідники обмежувалися тільки фіксацією отриманих результатів, не вдаючись до суті явищ, що їх визначають.

Розвиток науки про різання можна умовно розділити на чотири періоди [2]. У перший період (1848–1917 р.р.) визначалося, що потрібно вивчати у процесі різання і як вивчати, створювалися перші вимірювальні прилади (динамометри та ін.). Основоположником наукового підходу до різання матеріалів є російський учений І.А.Тіме, який у 1868–1869 р.р. на Луганському паровозобудівельному заводі проводив досліди по струганню різних матеріалів, описані ним у книзі «Опір металів і дерева різанню» (1870 р.). Запропонована ним класифікація типів стружок, встановлене явище усадки стружки, поняття про кут сколювання, перша формула для визначення сили різання при струганні різних за властивостями матеріалів – використовуються у науці про різання і понині [3].

Теорія І.А.Тіме знайшла подальший розвиток у роботах В.Л.Чебишева, А.П.Афанасьєва, А.В. Гадоліна, Т.І. Тихонова, Б.Г. Соколова Я.Г. Усачова, А.А.Брікса і, особливо, К.О.Зворикіна, який поставив у Харківському технологічному інституті ряд видатних за методикою і результатами дослідів із визначення сил при різанні. У 1914 р. з'являються дослідження Я.Г.Усачова в області стружкоутворення, вивчення наросту і теплових явищ при різанні.

Із зарубіжних учених у цей період, перш за все, слід зазначити роботу американського промисловця і економіста Ф.Тейлора, творця швидкорізальної сталі. У своїй роботі «Мистецтво різати метали» (1896 р.) він вперше розглядає питання зносу і стійкості різального інструменту, пропонує емпіричні формули степеневого типу, що зв'язують швидкість різання з подачею і глибиною різання.

Другий період (1918–1945 р.р.) характерний створенням наукових шкіл як у колишньому Радянському Союзі, так і за кордоном; організацією на крупних заводах лабораторій різання (ГАЗ, ЗІЛ, Уралмаш, ХТЗ та ін.), створенням спеціальних науково-дослідних інститутів (ВНДІінструмент, ЭНИМС, ЦНДІТМАШ, НДІавтопром та ін.), накопиченням експериментального матеріалу при дослідженні сил різання, зносу інструменту, допустимої швидкості різання та ін. У цих роках спочатку у Німеччині і США (1927р.), а потім у СРСР (1929р.) був створений принципово новий інструментальний матеріал – твердий сплав. Становлення галузі виробництва цих сплавів в Україні пов'язано з «Укртвєрдосплавом», пізніше – Інститутом надтвердих матеріалів і його засновником – В.М.Бакулем.

У цей період були створені наукові школи у МВТУ ім. Н.Е. Баумана (І.М. Беспрозванний, Г.І.Грановський), МАІ (В.А.Кривоухов), МАТІ (А.І.Каширін, А.М.Данієлян), Томському політехнічному інституті (А.М.Розенберг), Горьковському політехнічному інституті (М.І.Клушин), Київському політехнічному інституті (С.С.Рудник), Харківському політехнічному інституті (Н.Й.Резников, М.Ф.Семко) та в ін.

Одним з підсумків цих робіт у НДІ, заводських лабораторіях і ВУЗах була розробка загальномашинобудівних нормативів з режимів різання під спільним керівництвом комісії з різання металів при Народному комісаріаті важкої промисловості (голова Е.П.Надеїнська).

За кордоном у цьому періоді були створені наукові школи І.Д.Армарего (Австралія), П.Окслі (Англія), М.Мерченга (США), Х.Опитца, І.Г.Шлезінгера (Німеччина), Н.Такоями (Японія).

Третій період (1946–1990 р.р.) слід вважати часом розквіту наукових досліджень в області оброблення матеріалів різанням. Різко зросло число учених, що працюють у цій області. Зміцнилися (кількісно і якісно) вже створені наукові школи, створювалися нові: ЦНДІТМАШ (М.М.Зорев), Грузинський політехнічний інститут (Т.Н.Лоладзе), Київський політехнічний інститут (В.А.Остаф'єв), Куйбишевські авіаційний і політехнічний інститути (Н.Й.Резников, А.Н.Резников, Б.А.Кравченко), Тульський політехнічний інститут (С.С.Петрухін, В.Ф.Бобров), Уфимський авіаційний інститут (А.Д.Макаров), Рибінський авіаційний інститут (С.С.Силін), Харківський політехнічний інститут (М.Ф. Семко, В.І.Дрожжин, А.І.Грабченко) [5] та ін.

Для вивчення різних сторін процесу різання широко застосовуються високошвидкісна кінозйомка, поляризаційно-оптичний метод, метод радіоактивних ізотопів, рентгеноскопія і електроноскопія, сканування і тому подібне. Розроблена спеціальна апаратура, що дозволяє проводити фізичні дослідження процесу різання. Великий експериментальний матеріал, накопичений у результаті проведених досліджень, дозволив приступити до розробки загальної теорії процесу різання. Цей період характерний створенням теоретичних моделей процесу різання, теоретичних методів розрахунку основних характеристик процесу – сил різання, температур, характеристик руйнування і зносу різальних інструментів та ін.

На підставі цих досліджень з'явилось багато наукових монографій і підручників, а узагальнюючою працею на багато років стала книга «Розвиток науки про різання металів» (велика група авторів, голова редакційної колегії М.М.Зорев).

Четвертий період (1991р.– по наш час) пов'язаний зі зниженням наукової діяльності у зв'язку з розривом наукових зв'язків між колишніми республіками СРСР, відсутністю фінансування, розпадом багатьох машинобудівних підприємств та ін. Проте і у цей час в Україні продовжуються роботи з дослідження фізики процесу різання (Запоріжжя, Київ, Харків, Хмельницький), вивчення напруженого стану у різальному інструменті (Запоріжжя, Київ, Суми, Харків, Хмельницький), застосуванню екологічно чистого мастильно-охолоджувального технологічного середовища (Сімферополь), створенню теоретичних моделей зносу різального інструменту (Хмельницький), вивченню і практичному використанню процесів абразивного і алмазного оброблення (Донецьк, Київ, Севастополь, Харків, Одеса) і т.д.

В той же час у всьому світі та і у нас (Київ, Суми, Одеса, Харків, Хмельницький) поширення набув напрям комп'ютерного моделювання процесів, що відбуваються при різанні матеріалів: тертя, напруженого стану зони різання, теплових процесів тощо. Стало можливим:

- 1) створення методів і систем комп'ютерного розрахунку оптимальних режимів різання;
- 2) створення методів прогнозуючого моделювання і автоматизованої підготовки керуючих програм для верстатів з ЧПК;
- 3) визначення оптимальних конструкцій різальних інструментів і умов застосування адаптивних систем керування, тощо.

Прогрес у технології механічного оброблення досягається у результаті винахідливості і досвіду, логічного мислення і наполегливої праці багатьох тисяч практичних працівників і учених, пов'язаних з областями різання матеріалів. Всі вони постійно

намагаються знайти вирішення нових проблем, викликаних появою невідомих раніше матеріалів, обмеженням швидкості оброблення або необхідністю забезпечення достатньої точності та багатьма іншими причинами. Проте якими б компетентними вони не були, мало знайдеться фахівців, хто б не розумів, що вони зможуть краще вирішувати проблеми, що виникають перед ними, володіючи більш глибокими знаннями про процеси, що виникають у зоні різання і на поверхнях інструмента.

Саме те, що відбувається у дуже невеликому об'ємі матеріалу навколо різальної кромки, визначає показники роботи різального інструмента, оброблюваність матеріалів і сплавів, якість обробленої поверхні.

У цій книзі зроблена спроба узагальнити накопичені знання про процеси у зоні різання на підставі раніше опублікованих робіт, власних досліджень авторів і досліджень багатьох їх колег.

Підручник складається із 14 розділів і післямови. Авторами розділів є: д.т.н., проф. М.П. Мазур (вступ, розділи 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 14), д.т.н., проф. Ю.М. Внуков (розділи 2, 3, 5, 7, 8), д.т.н., проф. А.І. Грабченко (розділи 4, 7, 8, 13, 15), д.т.н., проф. В.Л. Доброскок (розділ 13), д.т.н., проф. В.О. Залога (розділи 2, 7, 9, 10, післямова), д.т.н., проф. Ю.К.Новосолов (розділ 13), д.т.н., проф. Ф.Я. Якубов (розділ 12).

Автори виражають подяку рецензентам С.А. Клименко і В.М. Тонконогому, які приклали багато зусиль і часу на рецензування підручника, за їх зауваження і побажання, направлені на його покращення, а також усім, хто сприяв підготовці і публікації цієї книги.

Література

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов : учебник / В.Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
2. Розенберг Ю.А. Резание материалов : учебник [для студ. техн. вузов] / Ю.А. Розенберг. – Курган: ОАО «Полиграфический комбинат», Зауралье, 2007. – 294 с.
3. Русские ученые – основоположники науки о резании металлов / под. ред. К.П. Панченко. – М. : Машгиз, 1952. – 480 с.
4. Трент Е.М. Резание металлов / Е.М. Трент ; пер. с англ. Г.И. Айзенштока. – М. : Машиностроение, 1980. – 263 с.
5. Жорнік Н.І. Діяльність науково-технічної школи професора М.Ф.Семка у контексті розвитку науки про різання матеріалів в Україні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.28.01 / Н.І. Жорнік ; Харк. націон. техн. ун-т «ХПІ». – Харків, 2005. – 20 с.

ЗМІСТ

1. ВСТУП	3
1.1 Місце і значення оброблення різанням серед інших методів формування поверхонь деталей.....	3
1.2 Історія розвитку науки про різання металів.....	5
2. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРІЇ РІЗАННЯ МАТЕРІАЛІВ	9
2.1 Класифікація основних способів і видів оброблення поверхонь різанням	9
2.2 Елементи конструкції і геометричні параметри різальної частини інструмента (на прикладі токарного різця).....	16
2.2.1 Інструментальні геометричні параметри леза різця (кути загострення).....	18
2.2.2 Статичні кути різальної частини різця.....	20
2.2.3 Кінематичні (робочі) кути різальної частини інструмента.....	24
2.2.4 Особливості вибору геометричних параметрів різального леза токарних різців.....	25
2.3 Елементи режиму різання і розміри зрізуваного шару при обточуванні	28
2.4 Кінематика процесу, елементи конструкції, геометричні параметри гвинтового свердла і характеристики перерізу зрізуваного шару при свердлінні.....	31
2.5 Кінематика процесу, елементи конструкції, геометричні параметри інструментів і характеристики перерізу зрізуваного шару при фрезеруванні	36
2.5.1 Схеми різання і характеристики перерізу зрізуваного шару при фрезеруванні циліндричними фрезами.....	39
2.5.2 Схеми різання і характеристики перерізу зрізуваного шару при фрезеруванні торцевими фрезами.....	43
2.6 Елементи конструкції і геометричні параметри протяжки. Кінематика процесу та характеристики перерізу зрізуваного шару при протягуванні... ..	44
2.7 Кінематика процесу, елементи конструкції і геометричні параметри різальної частини мітчика. Характеристики перерізу зрізуваного шару при нарізанні різьби мітчиком.....	50
Список літератури до розділу 2.....	56
3. ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ	57
3.1 Вимоги, що висуваються до інструментальних матеріалів.....	57
3.2 Інструментальні сталі.....	59
3.2.1 Вуглецеві і леговані інструментальні сталі.....	59
3.2.2 Швидкорізальні сталі	59
3.3 Тверді сплави.....	63
3.3.1 Вольфрамо-кобальтові сплави (ВК).....	63
3.3.2 Титано-вольфрамо-кобальтові сплави (ТК).....	65
3.3.3 Титано-тантало-вольфрамо-кобальтові сплави (ТТК).....	65
3.3.4 Безвольфрамові (титанові) тверді сплави (БВТС).....	66
3.3.5 Короткі рекомендації з вибору твердих сплавів.....	67
3.3.6 Міжнародна класифікація сучасних інструментальних матеріалів за стандартом ISO і визначення умов ефективного використання твердих сплавів.....	68

3.4 Різальна кераміка.....	73
3.5 Надтверді матеріали інструментального призначення.....	75
3.5.1 Особливості одержання інструментальних матеріалів на основі алмаза і кубічного нітриду бору.....	75
3.5.2 Основні властивості та області застосування полікристалів синтетичного алмазу (ПКА).....	78
3.5.3 Основні властивості та області застосування ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору VN.....	79
3.6 Інструментальні матеріали зі зносостійкими покриттями.....	80
Список літератури до розділу 3.....	84
4. ОСНОВИ ФІЗИКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ	85
4.1 Деякі відомості про пластичну деформацію металів.....	85
4.2 Способи вивчення зони утворення стружки.....	90
4.3 Типи стружок при різанні пластичних і крихких матеріалів.....	92
4.4 Процес утворення зливної стружки при прямокутному вільному різанні	96
4.5 Схема утворення зливної стружки з єдиною площиною зсуву. Визначення степеню деформації стружки.....	100
4.6 Особливості косокутного і невірального різання.....	107
4.7 Схема утворення елементної стружки.....	110
4.8 Методи моделювання процесів деформації при різанні пластичних матеріалів.....	112
4.9 Трибологія процесу різання матеріалів.....	115
4.10 Наростоутворення при різанні матеріалів.....	124
4.11 Контактні явища на задній поверхні інструмента.....	128
4.12 Взаємозв'язок явищ у процесі стружкоутворення.....	135
Список літератури до розділу 4.....	140
5. СТАТИКА І ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ	144
5.1 Сила і потужність при різанні.....	144
5.1.1 Система сил при різанні.....	144
5.1.2 Теоретичні методи розрахунку сил різання.....	148
5.1.3 Експериментальні прилади і методи вимірювання складових сил різання. Побудова емпіричних формул для їх визначення.....	159
5.1.4 Закономірності впливу умов різання на силу і потужність різання.....	162
5.1.5. практичне використання силових залежностей. Розрахунок сил і потужності для різних видів оброблення.....	169
5.2 Коливання при різанні (динаміка різання).....	184
5.2.1 Вимушені коливання.....	184
5.2.2 Автоколивання при різанні.....	184
5.2.3 Вплив умов різання на інтенсивність автоколивань.....	188
5.2.4 Вплив коливань при різанні на стійкість інструментів і якість обробленої поверхні.....	189
5.2.5 Способи гасіння автоколивань.....	191
Список літератури до розділу 5.....	193
6. ТЕПЛОВІ ЯВИЩА У ПРОЦЕСІ РІЗАННЯ	195
6.1 Джерела виділення тепла і його баланс при різанні матеріалів.....	195
6.2 Експериментальні методи дослідження теплових процесів при різанні	197

6.3 Аналітичні методи розрахунку температурних полів у системі різання..	205
6.3.1 Аналітичний метод розв'язання задачі теплопровідності у різальному лезі.....	205
6.3.2 Метод джерел теплоти.....	206
6.4 Методи числового моделювання теплових явищ	216
6.5 Середня температура різання і вплив на неї основних факторів процесу оброблення.....	223
6.5.1 Залежність температури різання від умов оброблення.....	224
6.5.2. Оптимальна температура різання.....	227
Список літератури до розділу 6.....	231
7 . РУЙНУВАННЯ І ЗНОШУВАННЯ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ІНСТРУМЕНТІВ. СТІЙКІСТЬ ІНСТРУМЕНТІВ	234
7.1 Працездатність інструментів.....	234
7.2 Втрата працездатності через недостатню міцність різальної частини інструмента	234
7.2.1 Крихке руйнування леза.....	235
7.2.2 Пластичне руйнування різального леза.....	239
7.3 Зношування різальної частини інструмента.....	241
7.3.1 Зовнішній прояв зношування різальної частини інструмента.....	242
7.3.2 Фізична природа зношування різального інструменту.....	246
7.3.3 Критерії зношування різальних інструментів.....	253
7.3.4 Рекомендації із призначення максимально допустимого зношування інструментів.....	256
7.4 Стійкість інструмента і швидкість різання, що допускається його різальними властивостями	259
7.4.1 Основні поняття про стійкість інструмента. Методи одержання стійкісних залежностей.....	259
7.4.2 Вплив умов оброблення на період стійкості інструмента.....	263
7.5 Діагностика стану різального леза інструмента.....	269
7.5.1. Стратегії контролю	273
7.5.2. Приклад системи діагностики лезового оброблення	275
7.5.3. Приклад системи діагностики процесу шліфування	277
Список літератури до розділу 7.....	279
8. ФОРМУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ У ПРОЦЕСІ РІЗАННЯ	282
8.1 Поняття якості поверхні, обробленої різанням. Геометричні показники якості	282
8.2 Природа утворення шорсткості обробленої поверхні.....	285
8.2.1 Вплив параметрів процесу різання на шорсткість обробленої поверхні.....	287
8.3 Механізми формування фізико-механічних властивостей поверхневого шару.....	289
8.3.1 Зміцнення поверхневого шару.....	289
8.3.2 Формування залишкових напружень.....	291
8.3.3 Структурно-фазові зміни у матеріалі виробу	293
8.4 Вплив основних показників якості на експлуатаційні властивості дета-	

лей.....	293
8.4.1 Вплив шорсткості.....	293
8.4.2 Вплив зміцнення (мікротвердості) поверхневого шару.....	294
8.4.3 Вплив залишкових напружень.....	295
8.4.4 Вплив структури поверхневого шару.....	295
Список літератури до розділу 8.....	296
9. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО СИСТЕМУ РІЗАННЯ ТА ЇЇ СКЛАДОВІ.....	298
9.1 Поняття про систему різання.....	298
9.2 Робочий процес, як фізико-хімічна взаємодія елементів процесу різання.....	302
Список літератури до розділу 9.....	303
10. ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ.....	304
10.1 Основні правила вибору послідовності визначення елементів режимів різання.....	304
10.2 Загальні методичні вказівки для розрахунку режимів різання при то- чінні, свердлінні, фрезеруванні.....	305
10.2.1 Вихідні дані.....	305
10.2.2 Вибір устаткування.....	305
10.2.3 Вибір різального інструменту.....	306
10.2.4 Призначення глибини різання.....	306
10.2.5 Розрахунок (вибір) періоду стійкості інструмента.....	307
10.2.6 Критерії оптимізації при визначенні режимів різання і при- значенні стійкості різального інструменту.....	307
10.2.7 Аналітичний спосіб розрахунку режиму різання.....	308
10.2.8 Табличний спосіб розрахунку режимів різання.....	311
10.2.9 Розрахунок режимів різання за допомогою теоретичних про- гнозуючих моделей.....	313
10.3 Розрахунок режимів різання для багатоінструментного оброблення на автоматизованому обладнанні.....	313
10.4 Особливості розрахунку режимів різання при обробленні на верстатах із ЧПК.....	315
Список літератури до розділу 10.....	318
11. ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ.....	320
11.1 Постановка задачі оптимізації.....	320
11.2 Види критеріїв оптимізації параметрів процесу різання.....	320
11.3 Приклади використання економічних критеріїв для оптимізації режи- му різання.....	323
11.3.1 Оптимізація режиму різання тільки по швидкості різання.....	323
11.3.1.1 Визначення швидкості різання і періоду стійкості, як- що зв'язок між ними монотонний і може бути описаний сте- пенною функцією.....	323
11.3.1.2 Визначення швидкості різання і періоду стійкості, як- що зв'язок між ними немонотонний.....	326
11.3.2. Оптимізація режиму різання по подачі і швидкості різання.....	327
11.3.2.1 Визначення подачі і швидкості різання, якщо зв'язок між ними і періодом стійкості монотонний і може бути описа- ний степенною функцією.....	327
11.3.2.2. Визначення подачі і швидкості різання, якщо зв'язок	

між швидкістю різання і періодом стійкості немонотонний.....	329
11.4 Використання технологічних критеріїв для оптимізації процесу різання	332
11.5 Особливості оптимізації процесу різання при наявності технологічних обмежень.....	332
Список літератури до розділу 11.....	334
12. МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ СЕРЕДОВИЩА ПРИ ОБРОБЛЕННІ РІЗАННЯМ	335
12.1 Мастильна дія МОТС.....	335
12.2 Охолоджувальна дія МОТС.....	339
12.3 Зміцнююча дія МОТС.....	342
12.4 Руйнуюча (розклинуюча) дія МОТС.....	344
12.5 Миюча дія МОТС.....	345
12.6 Захисна дія МОТС.....	346
12.7 Застосування газових середовищ у якості МОТС.....	346
12.8 Застосування металевих розплавів і суспензій порошків у якості МОТС	349
12.9 Тверді і пластичні мастильні матеріали.....	350
12.10 Способи подачі технологічних середовищ у зону різання.....	351
12.11 Принципи вибору оптимальних технологічних засобів, їх асортимент і області застосування.....	357
Список літератури до розділу 12.....	360
13. ПРОЦЕСИ АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ	362
13.1 Абразивні матеріали та інструменти.....	362
13.1.1 Абразивні матеріали.....	363
13.1.2 Порошки з синтетичних алмазів і кубічного нітриду бору.....	365
13.1.3 Абразивні інструменти.....	365
13.2 Види шліфування. Елементи режиму різання при шліфуванні.....	368
13.2.1 Зовнішнє кругле шліфування.....	368
13.2.2 Внутрішнє кругле шліфування.....	369
13.2.3 Плоске шліфування.....	370
13.2.4 Безцентрове шліфування.....	371
13.3 Особливості абразивного оброблення матеріалів.....	371
13.4 Основи будови абразивних інструментів.....	372
13.4.1 Розподіл розмірів абразивних зерен.....	373
13.4.2 Кількість зерен в одиниці об'єму абразивного інструменту.....	376
13.4.3 Кількість зерен на одиниці площі робочої поверхні абразивного інструменту.....	376
13.4.4 Розподіл вершин зерен на робочій поверхні.....	377
13.4.5 Кількість зерен на одиниці довжини робочої поверхні.....	380
13.5 Закономірності процесу різання одиничним зерном.....	380
13.5.1 Дуга контакту шліфувального зерна із заготовкою.....	381
13.5.2 Миттєві параметри зрізуваного шару при шліфуванні.....	382
13.5.3 Параметри шару, що зрізується одним абразивним зерном.....	383
13.6. Закономірності знімання матеріалу при абразивному обробленні.....	384
13.7 Сили різання і потужність при шліфуванні.....	389
13.8 Теплові явища при абразивному обробленні і методи керування ними	389
10.8.1 Особливості теплових явищ при шліфуванні.....	390

10.8.2 Основні шляхи регулювання теплових процесів.....	390
13.9 Особливості процесу алмазного шліфування.....	391
13.9.1. Алмазне шліфування матеріалів звичайної твердості	391
13.9.2. Особливості алмазного шліфування надтвердих матеріалів	392
13.10 Зношування абразивних інструментів і методи відновлення їх різальних властивостей.....	394
13.10.1 Особливості зносу абразивних зерен.....	394
13.10.2 Особливості відновлення різальної здатності шліфувальних кругів.....	395
13.10.3 Правка шліфувальних кругів.....	396
13.10.4 Формотворення робочої поверхні абразивних інструментів на струмопровідних зв'язках у процесі роботи.....	396
13.10.5 Період стійкості шліфувальних кругів.....	397
13.11 Призначення режимів різання при шліфуванні.....	398
13.12 Викінчувально-абразивні методи оброблення.....	399
13.12.1 Хонінгування.....	399
13.12.2 Суперфінішування.....	399
13.12.3 Доведення.....	400
13.12.4 Полірування і стрічкове шліфування.....	400
13.12.5 Віброабразивне оброблення.....	401
13.12.6 Магнітно-абразивне оброблення.....	401
13.12.7 Оброблення потоком вільного абразиву.....	402
13.13 Високопродуктивні і комбіновані процеси абразивного оброблення.....	402
13.13.1 Глибинне і швидкісне шліфування.....	402
13.13.2 Абразивне оброблення з використанням ультразвукових коливань	402
Список літератури до розділу 13.....	404
14. ОБРОБЛЮВАНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ РІЗАННЯМ	407
14.1 Основні характеристики оброблюваності та методи їх визначення.....	407
14.2 Методи визначення оброблюваності.....	408
14.3 Основні фактори, що впливають на оброблюваність матеріалів різанням і способи її поліпшення.....	411
14.3.1 Введення спеціальних добавок на стадії металургійного виробництва.....	411
14.3.2 Зміна структури матеріалів термічним обробленням.....	413
14.3.3 Застосування мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ (МОТС).....	413
14.3.4 Введення у зону різання додаткової енергії.....	414
14.3.4.1 Різання з попереднім підігрівом оброблюваного матеріалу	414
14.3.4.2 Введення у зону різання додаткових вимушених коливань (вібраційне різання).....	415
14.3.4.3 Різання з попереднім пластичним деформуванням (ППД).	417
14.3.5 Надшвидкісне різання.....	417
Список літератури до розділу 14.....	422
15. ПРОЦЕСИ МІКРО- І НАНОРІЗАННЯ	424
15.1. Основні поняття й визначення.....	424
15.2. Нанооб'єкти системи нанорізання та їх розмірний діапазон.....	426
15.3. Способи одержання і види наноструктурованих матеріалів.....	427

15.4. Нанотехнології у виготовленні різальних інструментів як на- нооб'єктів системи різання.....	429
15.5. Основні властивості наноматеріалів системи нанорізання.....	429
15.5.1. Фактори, що визначають особливі властивості наноматеріалів.....	429
15.5.2. Властивості оброблюваних наноматеріалів.....	431
15.5.3. Властивості інструментальних наноматеріалів і нано- покрить.....	433
15.6. Умови реалізації процесу нанорізання.....	435
15.7. Процеси, що відбуваються в системі нанорізання матеріалів.....	436
15.7.1. Особливості механізмів взаємодії інструменту з поверх- нями заготовки й стружкою в нанометричному діапазоні.....	436
15.7.2. Трансформація механізмів руйнування матеріалів при стружкоутворенні в системах нанорізання.....	438
15.7.3. Алмазне нанообточування крихких матеріалів.....	440
15.8. Моделювання процесів нанорізання матеріалів.....	442
15.8.1. Загальна характеристика методу молекулярної динаміки в процесах моделювання нанорізання.....	443
15.8.2. Можливості застосування методу MD до вивчення процесів нанорізання матеріалів.....	444
15.8.3. Моделювання процесів нанорізання в пластичному режимі стружкоутворення.....	446
15.8.4. Моделювання процесу нанорізання крихких матеріалів.....	448
15.8.5. Сили різання, температура й напруження при нанорізанні.....	450
15.9. Особливості різання наноструктурованих матеріалів.....	454
15.10. Порівняння процесів традиційного й мікро- нанорізання... Список літератури до розділу 15.....	456
ПІСЛЯМОВА. Перспективи розвитку науки про різання	462
Зміст	465

**МАЗУР Микола Петрович, ВНУКОВ Юрій Миколайович,
А.І. Грабченко,
ДОБРОСКОК Володимир Ленінмирович,
ЗАЛОГА Вільям Олександрович,
НОВОСЬОЛОВ Юрій Костянтинович,
ЯКУБОВ Февзі Якубович**

Основи теорії різання матеріалів

Підручник

Підписано до друку 21.05.2018 р.
Формат 60x84/16. Папір друк. №2. Гарнітура Times New
Roman Умовн. друк. арк. 7,5.
Тираж 300 прим.
Замовлення 21-05-18

Видавець ФОП Піча С.В.
а/с 5026, м. Львів-53, 79053, Україна
e-mail: novsv2016@ukr.net

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції: серія ДК № 5069 від 22.03.2016 року,
видане Державним комітетом інформаційної політики,
телебачення та радіомовлення України