

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра механічної та електричної інженерії**

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

*магістр*

на тему: «Скінчено-елементне дослідження процесу виготовлення деталей  
малої товщини теплового двигуна»

КРМ.133ГМмд\_21.22.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
*«Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва»*  
спеціальності 133 «Галузеве  
*машинобудування»*  
ступеня вищої освіти *магістр*  
групи 133ГМмд\_21  
ТВЕРДОХЛІБ Ігор

Керівник: канд. техн. наук, доцент  
ПОПОВ Станіслав

**Полтава – 2023 року**

## ВСТУП

У сучасному світі за умов ринку та конкурентної боротьби кожне підприємство повинно орієнтуватися на випуск якісної продукції, що відповідає вимогам і запитам споживачів. Для машинобудівних підприємств вимоги часто зводяться до необхідності поліпшення таких показників якості виробу як надійність, довговічність, безпечність, ресурс. Ці показники якості є комплексними, залежать від величезної кількості різних факторів і забезпечуються на різних етапах життєвого циклу продукції. Тому, при усій простоті формулювання виконати вимоги буває дуже важко. Дуже часто надійність, довговічність і ресурс виробу залежать не тільки від того, наскільки вдалою вийшла його конструкція, але і від того, як цей виріб було зібрано, і за яких умов були отримані деталі, що його утворюють. Для досягнення необхідного рівня якості, доводиться вносити зміни не тільки до конструкцію виробу, але і в технологічний процес його виготовлення. І якщо в конструкції виробів часто закладено те, що неможливо змінити або виправити, то зміна технологічних процесів виготовлення деталей і складання виробу дає широкі можливості по забезпеченню необхідних показників якості. У першу чергу це відноситься до умов обробки, що визначають стан поверхневого шару деталі, її напружено-деформований стан, що надає прямий вплив на експлуатаційні характеристики виробу.

Вирішити ці проблеми можна розробкою математичних моделей формування і перерозподілу залишкових напружень у поверхневому шарі деталей за різних умов. Це дозволить виявити закономірності їх формування і перерозподілу, і дає можливість керувати ними шляхом зміни технологічних умов обробки.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Аналіз актуальності проблеми

У будь-якому виробництві складання є завершальним і найбільш відповідальним виробничим етапом створення виробу. Якість складання багато в чому визначає його майбутні експлуатаційні характеристики. Мета складання – створення виробу із забезпеченням його надійного функціонування протягом встановленого періоду часу. При цьому необхідно забезпечити підтримку всіх його експлуатаційних характеристик в межах, визначених конструкторськими, технічними та іншими вимогами. У зв'язку з цим процесу складання необхідно приділяти значну увагу, постійно вдосконалюючи даний процес. На стабільність і надійність виробу впливає не тільки сам процес складання, але також стан деталей, що входять у виріб. Ресурс і надійність газотурбінного двигуна (ГТД) сільськогосподарської авіації повністю залежить від надійності його деталей і складальних одиниць, серед яких найбільше значення мають ротори (рисунок 1.1), що є одними з найбільш відповідальних і складних вузлів, від характеристик якості та точності виготовлення яких залежать майже всі експлуатаційні показники ГТД.

Рисунок 1.1 – Схема ротора дискового типу ГТД

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю конструкції ротора є те, що до його складу входить значна кількість маложорстких тонкостінних деталей: валів, дисків, кілець тощо.

Так кільця мають значні діаметри при малій товщині стінки. Диски роторів компресора і турбіни мають полегшену конструкцію, за рахунок мінімальної товщини стрічки диска (може досягати 3 мм) з посиленою маточиною і бандажним вінцем. Вали мають велику довжину при малих діаметрах і товщині стінки. Подібні деталі зустрічаються і в інших вузлах ГТД, наприклад, в підшипникових опорах, лабіринтах, трансмісіях і т. д.

Крім того, практично на всіх цих деталях присутні різні конструктивні елементи, такі як канавки, отвори, пази, шліци і т. п., що також знижує їх жорсткість. Це видно на прикладі конструкцій дисків роторів (рисунок 1.2).

Рисунок 1.2 – Приклад конструкцій дисків роторів:

- а – диск 8-го ступеня КВД ТВД – 1500; б – диск 2-го ступеня КВД ГТД Д – 30 КУ;
- в – диск 10-го ступеня КВД ГТД Д – 30 КУ;
- г – диск 11-го ступеня КВД ГТД Д – 30 КУ

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Разом із тим ротор працює в дуже важких умовах, так як експлуатується при високих швидкостях обертання (до 12000-15000 об/хв), в агресивному середовищі при високих робочих температурах (порядку 400-1100°C), при значних відцентрових і осьових навантаженнях в умовах вібрації.

Все це, разом з відносно малою жорсткістю більшості деталей, сприяє зміні їх геометричної форми під час експлуатації, причому дуже важливу роль в цьому відіграють залишкові напруження, сформовані у поверхневому шарі деталей при їх механічній обробці. Така зміна геометрії деталей вкрай негативно позначається на надійності виробу, під якою розуміється можливість зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих умовах застосування, зберігання і транспортування.

Зміна форми деталей під час експлуатації призводить до зміни лінійних розмірів, невизначеності осьового положення деталей щодо вала і, як наслідок, стають невизначеними величини зазорів між кромками лопаток ротора і направляючого апарату, що викликає істотну зміну експлуатаційних характеристик ГТД, які можуть призвести до відмов та аварії.

Наприклад, у зв'язку з виникненням відхилень від перпендикулярності торцевих поверхонь дисків щодо їх осей під час експлуатації, внаслідок появи пари сил, виникають додаткові згинальні моменти. Це може призвести до зміни схеми базування диска на валу, до локального викривлення осі вала, появи дисбалансу ротора, підвищення навантаження на опори ротора, а також до порушення величини осьового і радіального зазору між кромками лопаток ротора і направляючого апарату в межах одного ступеня (рисунки 1.3). Тому, для забезпечення нормального функціонування, величини замикаючих ланок розмірних ланцюгів ротора не повинні вимірюватись понад значень, що встановлені допуском. Для цього слід визначити ті фактори, які є причиною нестабільності геометричної форми деталей ротора, розробити методику мінімізації їх впливу на експлуатаційні властивості.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 1.3 – Вплив відхилень від перпендикулярності торцевих поверхонь дисків на розмірні характеристики зібраного ротора:

$S_{i\ max}$  і  $S_{i\ min}$  – максимальний і мінімальний осьовий зазор між кромками лопаток ротора і направляючого апарату в межах  $i$ -го ступеня;

$\delta$  – радіальний зазор між кінцевою частиною пера лопатки і напрямним апаратом в межах  $i$ -го ступеня

Залишкові напруження у поверхневому шарі деталей можуть виникати після точіння, фрезерування, шліфування та інших методів механічної обробки. Їх поява пов'язана з пластичною деформацією матеріалу заготовки при впливі на нього ріжучого інструменту і нагріванням поверхневих шарів теплотою в процесі різання, що виділяється, (так звані силовий і температурний фактори). Залишкові напруження, сформовані в поверхневому шарі деталей, впливають не тільки на їх геометричну точність але і можуть суттєво знизити їх втомну міцність [1], [2].

Величина залишкових напружень безпосередньо пов'язана з технологічними умовами виготовлення деталей, а характер їх розподілу багато в чому залежить від геометрії і матеріалу оброблюваних деталей.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для розглянутих раніше деталей фінішною операцією обробки є точіння. Це продиктовано особливостями їх геометрії і вимогами креслень. Саме при фінішному точінні в поверхневий шар цих деталей закладаються залишкові напруження, які залежать від технологічних умов.

До технічним вимог, які найбільш часто задаються на кресленнях розглянутих деталей, належать вимоги до допустимих величин торцевих та радіального биттів поверхонь, які є конструкторськими базами (рисунок 1.4). У більшості випадків ці вимоги досить високі (величини допусків складають соті частки міліметра), а, враховуючи великі діаметральні розміри деталей, виконати їх досить складно. Зустрічаються на кресленнях вимоги до паралельності, перпендикулярності, а також до форми поверхонь, наприклад, у вигляді допусків на відхилення від циліндричності, круглості та площинності.

Рисунок 1.4 – Технічні вимоги до розташування поверхонь дисків ГТД

Забезпечують задані кресленням вимоги в процесі механічної обробки. Причому для жорстких деталей, з невисокими вимогами до точності форми і

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розташування поверхонь, достатнім підтвердженням їх придатності є операції остаточного контролю. Для точних маложорстких деталей технологія виготовлення повинна бути такою, щоб забезпечити виконання вимог не тільки після обробки деталей, але і протягом усього строку їх служби, а геометричні відхилення, викликані перерозподілом залишкових напружень, не могли порушити ці вимоги. Тобто, розробляючи технологію виготовлення таких деталей потрібно мати можливість прогнозувати величини залишкових деформацій, порівнюючи їх із заданими вимогами до форми, розмірів і розташування поверхонь та керувати ними за рахунок зміни технологічних умов обробки.

Отже, необхідність обліку необхідної величини залишкових напружень при призначенні технологічних умов пояснюється тим, що залишкові напруження часто чинять негативний вплив на якість готових деталей та виробів. Наприклад, призводять до появи неприпустимих залишкових деформацій і викривлень деталей, до появи тріщин і навіть до руйнування деталей. Поява залишкових деформацій деталей порушує експлуатаційні характеристики виробів, так як при порушенні геометрії деталей, змінюється форма і розташування поверхонь, змінюються передбачені конструкцією зазори, з'являються биття і вібрації. Таким чином, облік залишкових напружень під час призначення технологічних умов обробки дозволить забезпечити незмінюваність геометричної форми і розмірів деталей понад своїх граничних відхилень у процесі складання і експлуатації.

Таким чином, базуючись на розглянутих проблемах, у якості об'єкта дослідження приймаємо групу тонкостінних деталей ГТД, фінішним етапом обробки яких є точіння, а основним напрямком дослідження буде аналіз залишкових напружень і деформацій таких деталей після обробки різанням.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2 Аналіз факторів, що впливають на експлуатаційні характеристики високоточних виробів

Основною причиною зміни геометричної форми деталей у процесі експлуатації є перерозподіл залишкових напружень внаслідок релаксації і, як наслідок, поява залишкових деформацій, так як природа зміни форми деталі у часі лежить у створенні в матеріалі деталей нерівномірних напружень. Чим вище рівень залишкових напружень у різноманітних поверхневих шарах деталей, чим істотніше несиметричне розташування епюр залишкових напружень, тим інтенсивніше деформуються деталі.

Особливе значення це має для високоточних деталей у зв'язку з тим, що виникаючі похибки можуть бути порівняні з допусками [2]. Результати контролю дисків КВД Д30-КУ після їх експлуатації у складі виробу наглядно стверджують факти наведені вище.

Поява таких відхилень неприйнятна, так як може призвести до значного погіршення робочих характеристик і навіть до виходу з ладу виробу. Для усунення негативного впливу залишкових напружень необхідно знайти шляхи ефективного управління їх формування в процесі обробки.

Для початку розглянемо причини виникнення залишкових напружень.

Ці причини можна класифікувати за кількома основними групами:

- конструктивні, коли в самій конструкції деталі закладені передумови для виникнення залишкових напружень;
- виробничо-технологічні при виготовленні деталей, зумовлені технологічними причинами, такими як маршрут обробки, що використовується, а також режими термічної і механічної обробки;
- виробничо-технологічні при складанні вузлів та виробів, що зумовлені особливостями технологічного процесу складання;
- експлуатаційні, викликані специфікою експлуатації та технічного обслуговування виробу.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Так як відомий факт впливу конструктивних параметрів на виникнення в поверхневих шарах деталей складної картини нерівномірного напруженого стану, то одним із способів впливу на ступінь і розподіл залишкових деформацій може бути використання оптимального матеріалу, раціональної конструкції деталей із найменшою кількістю концентраторів напружень, а також збільшення жорсткості деталі. Але оскільки основою розробки високо надійних двигунів є досвід створення подібних або аналогічних типів виробів, то в нових виробках найчастіше використовуються принципові конструктивні схеми, що виправдали себе в експлуатації, як двигуна у цілому, так і окремих його частин, вузлів і деталей. Тому в переважній більшості випадків зміна конструкції деталей з метою зменшення концентраторів напружень, як правило, не проводиться. Так само, як правило, не підвищують жорсткість деталей, так як це призводить до збільшення маси, що негативно позначається на експлуатаційних характеристиках.

Складання, як найбільш відповідальна частина технологічного процесу виробництва ротора, з-за своєї специфіки істотно впливає на виникнення і розподіл залишкових напружень. На цьому етапі виробництва часто мають місце технології, що ведуть до значного збільшення рівня напружень на контактуючих поверхнях деталей, наприклад, обтискання ротора на пресі. При цьому номінальні напруження можуть досягати половини межі міцності матеріалу, але застосування сучасних методів складання, зокрема використання віртуального складання, дозволяють мінімізувати вплив складання на збільшення або перерозподіл залишкових напружень. Але навіть застосування прогресивних технологій складання, що дозволяють складати ротори без прикладання до них значних навантажень, ведуть до виникнення залишкових напружень, не надасть повністю позитивного ефекту на експлуатаційну надійність та безпечність.

Тому необхідно використовувати методики з управління величиною залишкових напружень і деформацій на етапі виготовлення окремих деталей, так як в основному саме при механічній і термічній обробці відбувається формування їх напружено-деформованого стану.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У технології виготовлення деталей можна виділити два найбільш загальних підходи щодо зменшення рівня залишкових напружень: перший, традиційний шлях, – введення в технологічний процес спеціальних операцій для зниження залишкових напружень, і другий, прогресивніший, – використання такого технологічного процесу, у якому, завдяки його маршруту, а також режимам обробки на конкретних операціях, буде закладатися необхідний розподіл і рівень залишкових напружень з урахуванням явищ технологічної спадковості.

Розглянемо традиційні технологічні методи зниження залишкових напружень. Існують наступні основні групи методів зниження залишкових напружень і деформацій: термообробка, правка, спеціальні технологічні методи обробки. До методів холодної правки відноситься статичне перевантаження, коли до деталі прикладається навантаження протилежне напрямку наявних деформацій. Даний метод не може бути застосований до деталей після чистової обробки, так як для високоточних деталей для уникнення виникнення додаткових напружень і деформацій правка деталей забороняється.

До термічних методів зменшення залишкових деформацій відносять метод природного старіння. Як встановлено практикою, основне короблення багатьох деталей відбувається за перші 3-4 місяці вилежування, а через 9-12 місяців короблення різко сповільнюється. Для відповідальних деталей природне старіння може стати дієвим методом, тільки, якщо воно триватиме близько 12 місяців. При штучному старінні здійснюють нагрівання до певної температури, витримку при цій температурі і охолодження.

Однак величини деформацій після старіння і вилежування деталей можуть перевищувати допуски на розміри, форму та розташування поверхонь, до того ж у сучасних умовах підприємство не може дозволити собі такі тривалі виробничі цикли, як процес природного старіння.

До термомеханічної обробки відносять: зміцнююче теплове старіння, що представляє собою нагрівання, витримку та охолодження разом з піччю; термоудар (прискорені методи термостаріння); відпалювання (нагрів до певної температури,

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

витримка певний час та охолодження), види відпалювання розрізняються температурою, часом охолодження. Відпалювання дозволяє усунути до 60% напружень; стабілізуюче відпалювання (високе, середнє і низьке).

Для зняття напружень застосовують також дробоструменеву і вібраційну обробку, коли до заготовки прикладаються вібрації певної частоти. Однак багато із перерахованих методів можуть бути застосовні лише до заготовок і деталей після чорнового етапу обробки, так як після перерозподілу внутрішніх напружень виникає їх короблення.

Таким чином, більшість традиційних методів зниження рівня залишкових деформацій (належать здебільшого до термічних і термомеханічних методів) має ряд істотних недоліків. Основні з них: непридатність багатьох методів після чистової обробки; як правило, значне збільшення виробничих циклів; введення додаткових операцій, що веде до збільшення собівартості виробництва деталей і всього виробу в цілому.

Очевидно, що недоліки традиційних способів викликані тим, що вони використовують принцип усунення вже наявних залишкових напружень, які були закладені при лезовій обробці. Якщо ж при останній закладати необхідний рівень залишкових напружень, то введення в технологічний процес додаткових операцій по їх зниженню або перерозподілу не потрібно. Отже, необхідна методика, яка встановить зв'язок між технологічними умовами обробки деталі і залишковими напруженнями, що формуються в її поверхневому шарі.

### **1.3 Напружений стан деталей при механічній обробці**

Так як основним інструментом формоутворення при механічній обробці є різання матеріалу заготовки, а процес різання неможливий без прикладання значних сил зі сторони різального інструменту, а також появи температурних полів, які призводять до виникнення напружень і деформацій у поверхневому шарі деталі, то очевидно, що технологічні процеси виготовлення деталей, особливо при

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробці різанням, надають безпосередній вплив на формування їх напружено-деформованого стану. У свою чергу нерівномірність розподілу залишкових напружень є однією з головних причин деформації високоточних деталей ротора в процесі його експлуатації. Від того, які будуть напруження при обробці, залежить поведінка деталі при експлуатації.

Тому до процесу механічної обробки слід пред'являти високі вимоги, для забезпечення яких вимагається рішення широкого кола практичних питань, які можна розділити на дві великі групи. Першу групу становлять питання удосконалення технологічних процесів в напрямку підвищення якості деталей, головним чином, шляхом формування високої якості поверхневого шару та оптимального рівня залишкових напружень, що роблять істотний вплив на довговічність, витривалість та інші характеристики надійності. У другу групу входять питання підвищення ефективності, точності і стабільності на всіх етапах виробництва, які вирішуються застосуванням ефективних методів управління стабільністю виробничих процесів та контролю якості виробів.

Найбільшу складність представляє рішення питань першої групи, так як на формування структури поверхневого шару надає певний вплив явище технологічної спадковості, яка проявляється у впливі маршруту обробки на формування фізико-механічних властивостей матеріалу деталі, а також похибок обробки. Тобто, на формування властивостей поверхневого шару впливають тією чи іншою мірою всі операції лезової обробки технологічного процесу, їх режими, ріжучий інструмент, характер взаємодії різального інструменту та заготовки і так далі.

Двома основними факторами, що впливають на утворення залишкових напружень при лезовій обробці, є величина сил різання і температурні поля в зоні обробки. Отже, необхідно визначити набір параметрів, що впливають на величину сил різання і температуру, виявити які з них надають найбільше значення, а також якими з них можливо найбільш доцільно управляти для досягнення поставленої мети.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для управління величиною залишкових деформацій необхідно добре знати характер взаємозв'язку технологічно забезпечених і контрольованих параметрів поверхні з умовами її обробки.

В таблиці 1.1 представлений взаємозв'язок між технологічними умовами обробки значень залишкових напружень [3].

Таблиця 1.1 – Вплив технологічних умов на утворення залишкових напружень

Режим різання			Геометрія різального інструмента					Властивості матеріалу заготовки			Властивості технологічної системи			
Подача, $S$ , мм/об	Швидкість різання, $v$ , м/хв	Глибина різання, $t$ , мм	Головний кут в плані, $\phi$	Допоміжний кут в плані, $\phi_1$	Передній кут $\gamma > 0$	Передній кут $\gamma < 0$	Радіус при вершині, $r$	Радіус заокруглення різальної кромки, $\rho$	Шорсткість різальної Кромки, $Rz_{in}$	Нерівномірність твердості заготовки, $\Delta HB$	Межа текучості матеріалу заготовки, $\sigma_m$	Молекулярна спорідненість різального матеріалу та матеріалу заготовки, $L_a$	МОТЗ	Жорсткість технологічної системи, $J_{mc}$
+	*	+	-	0	-	+	+	+	-	0	-	+	+	+
<p>Примітки:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) „+” означає, що збільшення або зменшення цього параметра сприяє збільшенню або зменшенню залишкових напружень;</li> <li>2) „-” означає, що збільшення або зменшення цього параметра сприяє зменшенню або збільшенню залишкових напружень;</li> <li>3) „*” означає, що даний параметр робить основний вплив на формування залишкових напружень.</li> </ol>														

Як видно з таблиці, найбільш суттєвими факторами, що впливають на величину залишкових напружень, є режими різання, наявність і вид МОТЗ, а також деякі елементи геометрії ріжучої частини інструменту – передній кут  $\gamma$ , радіус при вершині  $r$  і радіус заокруглення різальної кромки  $\rho$ . При деяких умовах істотними можуть виявитися й інші фактори: фізико-механічні та теплофізичні властивості заготовки, умови тепловіддачі (при обробці тонкостінних деталей) та ін. Крім того,

нерівномірний розподіл напружень по поверхні деталі відбувається також внаслідок видалення різних за величиною шарів матеріалу (тобто із-за знімання нерівномірних припусків), яке практично завжди супроводжує механічну обробку високоточних деталей. Крім того, в тих місцях, де ріжучий інструмент знімає більший припуск, виникає більш інтенсивне теплове поле, що приводить до створення в даній зоні місцевих напружень. Останні, релаксуючи, викликають пружні переміщення - форма деталей порушується.

Представляється доцільним управляти величиною залишкових деформацій за допомогою режимів різання, тобто за допомогою зміни швидкості різання, подачі і глибини різання.

Основною перевагою використання цих параметрів для управління величиною залишкових напружень, крім того, що вони чинять найбільший вплив на формування напружено-деформованого стану деталі, є простота їх зміни технологом, що дозволяє використовувати вже існуючий технологічний процес, внівши в нього мінімальні зміни.

Використання у якості керуючих таких параметрів, як геометрія ріжучого інструменту, використання МОТЗ і т. п., призводить до більш істотної зміни існуючого технологічного процесу, що є в більшості випадків небажаним. Крім того, так як більшість матеріалів деталей двигунів є важкооброблюваними, то це накладає певні вимоги до інструментальних матеріалів і геометрії ріжучого інструменту, що також робить використання геометрії інструмента в якості керуючого параметра небажаним.

Проведемо порівняльний аналіз, перерахованих вище методів, з метою виявлення можливості врахування ними різних факторів, що роблять вплив на процес різання (таблиця 1.2).

Багато з наведених методик розрахунку сил різання мають ряд обмежень. Основними недоліками експериментальних методів є: частковий характер залежностей параметрів, використання лише невеликого числа факторів, що впливають на сили різання, більшість важливих факторів, такі як геометрія

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інструменту, фізико-механічний стан оброблюваного матеріалу враховуються тільки через поправочні коефіцієнти.

Отримані експериментальним шляхом ступеневі формули мають обмежене застосування, так як результати експериментів не можна переносити на інші процеси, що виходять за межі поставлених дослідів.

Кожна експериментальна формула не може бути використана для режимів обробки матеріалів, що мають інші механічні, хімічні і теплофізичні властивості. Окрім того, для визначення складових експериментальної формули для нового матеріалу потрібно постановка нової серії великої кількості дослідів, що досить трудомістко і до того ж часом вимагає великих витрат на матеріал.

Теоретичні методи через їх велику спільність дозволяють точно визначати взаємозв'язаний вплив факторів, що впливають на сили різання, але для реальних розрахунків, що використовуються на виробництві такі складні формули є важко здійсними.

Зокрема у формулах, що представляють теоретичний метод, у явному вигляді не присутня швидкість різання, з-за чого складно отримати зв'язок керуємого параметра (сили) і керуючого (режими різання).

Ця обставина негативно позначається на можливості використання цієї методики у виробничих умовах.

Теоретико-експериментальні формули, як це видно з таблиці 1.2, найбільш повно відображають увесь взаємозв'язок факторів, що впливають на сили різання, і можуть використовуватися при розробці технологічних процесів.

Тому представляється доцільним для розрахунку складових сил різання використовувати методику, викладену в роботі [4]. Точність і адекватність цієї методики підтверджена численними дослідженнями і великою кількістю наукових робіт в даному напрямку.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз методів визначення сил різання

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ця методика дозволяє здійснити розрахунок, враховуючи всі основні фактори, що впливають на складові сили різання, облік яких можливий і необхідний у виробничих умовах, це режими обробки, геометрія інструменту, теплофізичні і механічні властивості оброблюваного та інструментального матеріалу.

Останні роки усе більшу популярність для вирішення завдань теорії різання отримує метод скінчених елементів. Головною перевагою якого є точність обчислень, наочність отриманих результатів і висока гнучкість у виконанні розрахунків. Розглянемо детальніше його особливості і можливості щодо вирішення поставлених задач.

#### **1.4 Загальні відомості про метод скінчених елементів**

Метод скінчених елементів (МСЕ) є чисельним методом рішення диференціальних рівнянь з частними похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при вирішенні завдань в техніці та прикладній фізиці. В перших публікаціях з допомогою даного методу вирішувалися завдання поширення тепла. Потім метод був застосований до завдань механіки і гідравліки, згодом область застосування МСЕ істотно розширилася. На даний час він широко використовується для вирішення завдань механіки деформованого твердого тіла, теплообміну, гідродинаміки, електродинаміки. Цей прогрес був досягнутий за рахунок вдосконалення обчислювальної техніки, яка дозволила прискорити проведення багатьох складних чисельних розрахунків.

Основна ідея МСЕ полягає в тому, що будь-яку безперервну величину, таку, як температура, сила, переміщення, напруження можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується із безлічі кусково-неперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей.

Кусково-неперервні функції визначаються за допомогою значень безперервної величини в кінцевому числі точок розглянутої області. У загальному випадку безперервна величина завчасно відома, і необхідно визначити значення цієї

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

величини у деяких внутрішніх точках області. Дискретну модель, однак, дуже легко побудувати, якщо спочатку припустити, що числові значення цієї величини в кожній внутрішній точці області відомі. Після цього можна перейти до загального випадку.

При побудові дискретної моделі безперервної величини поступають наступним чином:

1) у розглянутій області фіксується кінцеве число точок. Ці точки називаються вузловими точками або просто вузлами (рисунок 1.5);

Рисунок 1.5 – Ілюстрація застосування МСЕ для розв'язку задач механіки

2) значення неперервної величини у кожній вузловій точці вважається змінною, яка повинна бути визначена;

3) галузь визначення неперервної величини розбивається на кінцеве число підобластей, званих елементами. Ці елементи мають загальні вузлові точки і в сукупності апроксимують форму області.

4) неперервна величина апроксимується на кожному елементі поліномом, який визначається за допомогою вузлових значень цієї величини.

Для кожного елемента визначається свій поліном, але поліноми підбираються таким чином, щоб зберігалася безперервність величини вздовж меж елемента. Для величини переміщень вузлів в площині  $XU$  маємо:

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{cases} u_x = a_1 + a_2x + a_3y \\ u_y = a_4 + a_5x + a_6y \end{cases} \quad (1.1)$$

Знаючи переміщення, обчислюються деформації у відповідних координатах, наприклад:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} = a_2 = \frac{(y_i - y_k) + (y_k - y_i)u_{x,j} + (y_i - y_j)u_{x,k}}{2\Delta} \quad (1.2)$$

В даний час область застосування СМЕ обширна і охоплює всі фізичні задачі, які можуть бути описані диференційними рівняннями. Найбільш важливими перевагами МСЕ, завдяки яким він широко використовується, є наступне:

1) властивості матеріалів суміжних елементів не повинні бути обов'язково однаковими. Це дозволяє застосовувати метод до тіл, складених з декількох матеріалів;

2) криволінійна область може бути апроксимована за допомогою прямолінійних елементів або точно описана з допомогою криволінійних елементів. Таким чином, методом можна користуватися не лише для областей з «хорошою» формою межі;

3) розміри елементів можуть бути змінними. Це дозволяє укрупнити або подрібнити мережу розбиття області на елементи, якщо в цьому є необхідність;

4) за допомогою МСЕ не важко розглядати граничні умови з розривним поверхневим навантаженням, а також змішаних граничних умов.

Зазначені вище переваги СМЕ можуть бути використані при складанні досить загальної програми для рішення часткових завдань певного класу. Наприклад, за допомогою програми для осесиметричної задачі про поширення тепла можна вирішувати будь-яку часткову задачу цього типу. Факторами, що перешкоджають

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розширенню кола задач, що вирішуються МСЕ, є обмеженість машинної пам'яті, і висока вартість обчислювальних робіт.

Головний недолік МСЕ полягає в необхідності складання обчислювальних програм і застосування обчислювальної техніки. Обчислення, які потрібно проводити при використанні МСЕ, занадто громіздкі для ручного рахунку навіть у разі рішення дуже простих завдань. Для вирішення складних завдань необхідно використовувати швидкодіючу ЕОМ, що володіє великою пам'яттю.

В даний час є технологічні можливості для створення досить потужних ЕОМ. Деякі комерційні та керуючі організації володіють великими комплектами обчислювальних програм. Пом'якшити основний недолік МСЕ можуть вдосконалення обчислювальних програм і створення потужних ЕОМ.

## **Висновки до розділу 1**

З вищевикладеного матеріалу випливає:

1 Необхідність врахування необхідної величини залишкових напружень при призначенні технологічних умов пояснюється тим, що залишкові напруження чинять негативний вплив на якість готових деталей і виробів.

2 Поява залишкових деформацій деталей порушує експлуатаційні характеристики виробів, так як при порушенні геометрії деталей, змінюється форма і розташування поверхонь, змінюються передбачені конструкцією зазори, з'являються биття і вібрації. Таким чином, облік залишкових напружень при призначенні технологічних умов обробки дозволить забезпечити незмінюваність геометричної форми і розмірів деталей понад своїх граничних відхилень у процесі складання і експлуатації.

3 В даний час є велика кількість наукових робіт, в яких пропонуються різні методи по визначенню величини залишкових напружень, що виникають у поверхневому шарі деталей після механічної обробки. Проте всі вони в тій чи іншій мірі мають певні обмеження, не враховують ряд важливих факторів і часто

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розглядають виникнення залишкових напружень тільки з точки зору дії силового фактора, виключаючи вплив температурного, або враховують його спрощено. Виникають складнощі і з урахуванням геометрії деталі.

4 Представляється доцільним уточнити існуючі методики визначення величини і характеру розподілу залишкових напружень, а також виникає необхідність у створенні такої методики розрахунку, яка дозволяла б вирішувати перераховані задачі і ефективно застосовуватися у виробництві. Запропонована методика визначення залишкових напружень повинна відповідати наступним вимогам: враховувати особливості геометрії деталі і різального інструменту, враховувати температуру і її вплив на фізико-механічні властивості матеріалу деталі, використовувати адекватну модель пластичності матеріалу, мати можливість визначати усі необхідні технологічні умови обробки, мати можливість отримувати поле розподілу температури у зоні різання і аналізувати напружено-деформований стан заготовки, мати можливість прогнозувати деформації, бути точною, забезпечувати швидкість і зручність розрахунків.

5 Для вирішення поставлених завдань доцільно застосувати комп'ютерне моделювання за методом скінчених елементів, проте усі можливості цього методу можуть бути повною мірою використані тільки тоді, коли є науково опрацьована методика виконання розрахунків, розроблені математичні моделі, що описують фізичні явища аналізованого процесу, розроблено розрахункові схеми, а також методики обробки і аналізу результатів. Не маючи адекватних моделей отримати достовірне рішення, навіть за допомогою самих сучасних комп'ютерних систем, не представляється можливим.

Отже, **мета дослідження** – визначення залишкових напружень і геометричної точності деталей із застосуванням комп'ютерного моделювання за методом скінчених елементів для тонкостінних виробів двигунів малої сільськогосподарської авіації. **Об'єктом** розробки є процес підвищення точності деталей двигунів внутрішнього згоряння, а **предметом** – вплив факторів технологічного процесу обробки точінням.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

- проаналізувати літературні джерела, які розглядають питання розрахунку і оцінки напружено-деформованого стану високоточних деталей після механічної обробки, в тому числі з використанням засобів комп'ютерного моделювання;

- розробити комп'ютерну чисельну модель процесу різання на основі МСЕ, що враховує температурно-залежні фізико-механічні властивості матеріалу деталі та ріжучого інструменту;

- розробити метод комп'ютерного моделювання процесу формування в поверхневому шарі деталей залишкових напружень з урахуванням особливостей геометрії деталей, їх матеріалу та заданих технологічних умов обробки;

- надати інженерні рішення і пропозиції щодо забезпечення безпеки при роботі на технологічному обладнанні, приділити увагу питанням захисту довкілля та економічної ефективності.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

### 2.1 Особливості скінчено-елементного аналізу

Метод скінчених елементів (МСЕ) є чисельним методом рішення диференціальних рівнянь з частковими похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при вирішенні завдань в техніці та прикладній фізиці. В перших публікаціях за допомогою МСЕ вирішувалися завдання поширення тепла. Потім метод був застосований до завдань механіки і гідравліки, згодом область застосування МСЕ істотно розширилася. В даний час він широко використовується для рішення задач механіки твердого тіла, що деформується, теплообміну, гідродинаміки та електродинаміки. Цей прогрес був досягнутий за рахунок вдосконалення обчислювальних техніки, яка дозволила прискорити проведення багатьох складних чисельних розрахунків.

Основна ідея МСЕ полягає в тому, що будь-яку безперервну величину, таку, як температура, сила, переміщення, напруження можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на множині кусково-неперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей.

Розглянемо основні математично залежності, що використовуються в рамках даного методу. Найбільш значущими є залежності, що зв'язують такі фізичні величини як переміщення, деформації і напруження.

В МСЕ виділяють два типи моделей: лінійні та нелінійні. Причому лінійність і нелінійність може відноситися як до геометрії моделі, так і до її матеріалу. Модель вважається лінійною якщо під дією навантажень вона має невеликі деформації, а зв'язок між деформаціями і напруженнями лінійний, тобто підпорядковується закону Гука.

Нелінійність передбачає великі деформації та напруження із складним законом їх взаємозв'язку, що характерно для процесу різання.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.2 Вибір типу елементів для скінчено-елементного аналізу в ANSYS

Одним з найбільш важливих етапів скінчено-елементного аналізу є побудова сітки скінчених елементів, при цьому точність розрахунків залежить від правильного вибору типів і розмірів елементів. В ANSYS передбачаються два основних методи: побудова довільної сітки та побудова впорядкованої сітки. Як показує практика розрахунків із застосуванням МСЕ [5], [6] і [7] найбільш кращим є упорядкована сітка, причому прямокутна сітка більш вигідна, ніж сітка з трикутними елементами. Дрібна сітка потрібна там, де очікується великий градієнт деформацій або напружень, наприклад, із-за наявності концентраторів, тріщин або розривів зв'язків елементів. Велика сітка може застосовуватися в зонах з мало мінливими відносними деформаціями або напруженнями, а також у областях, що не представляють особливого інтересу для розрахунку.

При дослідженні текучості якої-небудь області існує два способи розбиття її на елементи – елементи або фіксуються в просторі і передбачають текучість матеріалу через них (рівняння Ейлера), або елементи фіксуються на матеріалі, що тече, так, щоб переміщатися разом з ним (рівняння Лагранжа) [8]. З одного боку перевагою аналізу за методом Лагранжа є простота відстеження змін властивостей матеріалу, а з іншого боку складність обчислень. Простота обчислень методом Ейлера не дозволяє повністю здійснити моделювання процесу утворення стружки в умовах великих вільних переміщень поверхонь.

Тип елемента повинен відповідати завданню з точки зору фізики процесу і мати відповідне її математичний опис і ступені вільності. Так, для виконання скінчено-елементного аналізу процесу різання, необхідно використовувати кілька елементів і моделей, орієнтованих на своє завдання.

Орієнтуючись на [9, 10] можливо рекомендувати використання елементів наступних типів, вказаних у таблиці 2.1.

Елемент SOLID70, використовуваний для температурного аналізу, дозволяє проводити розрахунок теплопередачі і обчислювати значення температури у своїх

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вузлових точках. Підтримує нагрівання тертям, нелінійність матеріалу і дозволяє задати основний набір її властивостей: щільність, теплопровідність, теплоємність, коефіцієнти температурного розширення і ін. В якості навантаження можна використовувати різні джерела тепла. В результаті розрахунку формуються поля розподілу температур і теплові потоки.

Таблиця 2.1 – Рекомендовані типи скінчених елементів

Задача, що розв'язується	Середовище моделювання	Тип елемента
Визначення температури та її розподілу у зоні різання	ANSYS	SOLID70
Розрахунок сил різання, напружень та деформацій у зоні різання		SOLID164
Розрахунок залишкових деформацій		SOLID185

Елемент SOLID185, що використовується для аналізу залишкових напружень і деформацій, має одну важливу особливість – дозволяє задати в якості вихідного навантаження напруження по всіх вузлових точках сітки і розрахувати деформацію на їх основі. Підтримує різні моделі матеріалів, в тому числі і нелінійні моделі пластичності.

При моделюванні динаміки процесу різання в якості елемента для побудови сітки використовується елемент SOLID164. Цей елемент дозволяє отримувати досить щільну точну рівномірну сітку, підтримує різні моделі матеріалів, в тому числі пружно-пластичні. Застосовується для динамічного 3D-аналізу, дозволяє визначати переміщення, швидкість, і прискорення вузлових точок, на основі яких

розраховуються деформації і напруження. Підтримує моделі руйнування і текучості, метод аналізу за Лагранжем.

Елемент SOLID164 може сприймати в якості навантажень сили, переміщення, температуру, тиск і ін. Характеристики і можливості даного елемента у повній мірі задовольняють умовам розрахунків і дозволяють реалізувати запропонований алгоритм моделювання процесу різання та формування напружено-деформованого стану деталі. Модель ріжучого клина передбачається абсолютно жорсткою, але з можливістю відведення та підведення теплових і силових навантажень.

Усі перераховані елементи використовуються для побудови об'ємних твердотільних моделей і мають восьмивузлову геометричну структуру (вузли I, J, K, L, M, N, O, P), показану на рисунку 2.1.

Рисунок 2.1 –Геометрія восьми вузлових елементів типу SOLID:

а – основна геометрія; б – похідна геометрія (призма, піраміда, тетраedr)

Опис ступенів вільності елементів можна виконати математично. Наприклад, для елемента SOLID164 переміщення  $u$ ,  $v$ ,  $w$  по осях координат можна записати у вигляді наступних функцій (2.1).

Аналогічним чином можна уявити такі ступені вільності елемента як температуру  $T$ , тиск  $P$ , кінетичну енергію  $E_k$  та енергію розриву зв'язків елементів

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$E_p$ . Знаючи величини зміщення вузлових точок і зміни інших ступенів вільності елемента і його вузлів, розрахунком визначаються величини деформації, напруження, сили і т. д.

$$\begin{cases}
 u = \frac{1}{8} [u_I(1-s)(1-t)(1-r) + u_J(1+s)(1-t)(1-r) + \\
 + u_K(1+s)(1+t)(1-r) + u_L(1-s)(1+t)(1-r) + \\
 + u_M(1-s)(1-t)(1+r) + u_N(1+s)(1-t)(1+r) + \\
 + u_O(1+s)(1+t)(1+r) + u_P(1-s)(1+t)(1+r)] + \\
 + u_1(1-s^2) + u_2(1-t^2) + u_3(1-r^2); \\
 \\
 v = \frac{1}{8} [v_I(1-s)(1-t)(1-r) + v_J(1+s)(1-t)(1-r) + \\
 + v_K(1+s)(1+t)(1-r) + v_L(1-s)(1+t)(1-r) + \\
 + v_M(1-s)(1-t)(1+r) + v_N(1+s)(1-t)(1+r) + \\
 + v_O(1+s)(1+t)(1+r) + v_P(1-s)(1+t)(1+r)] + \\
 + v_1(1-s^2) + v_2(1-t^2) + v_3(1-r^2); \\
 \\
 w = \frac{1}{8} [w_I(1-s)(1-t)(1-r) + w_J(1+s)(1-t)(1-r) + \\
 + w_K(1+s)(1+t)(1-r) + w_L(1-s)(1+t)(1-r) + \\
 + w_M(1-s)(1-t)(1+r) + w_N(1+s)(1-t)(1+r) + \\
 + w_O(1+s)(1+t)(1+r) + w_P(1-s)(1+t)(1+r)] + \\
 + w_1(1-s^2) + w_2(1-t^2) + w_3(1-r^2)
 \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $u, v, w$  – переміщення вузлових точок елемента по осях  $Ox, Oy$  і  $Oz$  відповідно;

$I, J, K, L, M, N, O, P$  – позначення вузлових точок елемента;

$s, t, r$  – вектора нормалі до бічних гранях елемента по осях  $Ox, Oy$  і  $Oz$ .

Отже, у якості елементів для побудови сітки при скінчено-елементному аналізі використовуємо елементи типу SOLID. Передбачається застосування

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впорядкованої сітки, нанесеної з використанням методу Лагранжа. Розмір сітки безпосередньо в зоні різання повинен бути менше ніж у інших зонах, особливо це стосується площині зсуву. Розмір елемента сітки необхідно буде уточнити при розробці методики розрахунку.

### 2.3 Визначення зусиль і температур при токарній обробці

Процес формування залишкових напружень у поверхневому шарі заготовки протікає під дією теплових, так і силових навантажень. До теплових навантажень належить температура в зоні різання, а до силових навантажень – деформація металу в зоні обробки.

У відповідності з цим, завдання по розрахунку залишкових напружень можна розбити на три частини: визначення температурних полів в заготовці, визначення поля напружень від дії ріжучого інструменту при знятті припуску, визначення полів залишкових напружень і деформацій в заготовці після зняття навантаження.

Таким чином, виконуваний в ANSYS аналіз буде складатися з двох взаємопов'язаних видів аналізу: теплового (розрахунок температурних полів) і силового (розрахунок напружень і деформацій). Причому кожен аналіз включає в себе етап навантаження (прикладання навантажень і граничних умов до моделі) та розвантаження з метою отримання поля залишкових напружень.

При виконанні розрахунків необхідно враховувати геометрію заготовки та ріжучого інструменту, властивості матеріалу і задані технологічні умови обробки. Алгоритм виконання розрахунків представлено раніше.

В якості розрахункових моделей передбачається використання твердотілих об'ємних моделей заготовки й різального інструменту. Різець передбачається абсолютно жорстким. Модель генерується за заданими початковими даними (геометрія інструменту, умови різання).

Особливістю розрахунку залишкових напружень є визначення моменту кінця навантаження. У даній методиці передбачається використовувати метод малих

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переміщень. Його суть полягає в наступному. Різець переміщається в напрямку швидкості різання невеликими кроками. На кожному кроці переміщення проводиться аналіз напружень, що виникли в зоні обробки. За цими напруженнями і визначається момент закінчення навантаження.

## 2.4 Побудова скінчено-елементних моделей заготовки, що оброблюється, і різального інструмента

Через те, що в дослідженнях передбачається розглядати напружено-деформований стан заготовки, а не ріжучого інструменту, а також для підвищення продуктивності обчислень і зменшення вимог до обчислювальної потужності комп'ютерів у якості моделі ріжучого інструменту будемо використовувати лише його частину – ріжучий клин. Модель ріжучого клина повинна генеруватися автоматично у відповідності із заданою геометрією ріжучого інструменту. Повинні бути враховані наступні параметри: головний  $\varphi$  і допоміжний  $\varphi_1$  кути в плані, передній  $\gamma$  і задній  $\alpha$  кути, радіус при вершині  $r$ , товщина ріжучого клина  $H$ , довжини різальних кромek  $e$  та  $e_1$ , а також фізико-механічні властивості матеріалу. Такий набір параметрів дозволяє змодельовати ріжучий клин практично будь-якої конструкції [11], причому як для цільного інструменту, так і для складеного інструмента, оснащеного змінними пластинами. А фізико-механічні властивості матеріалу дозволяють використовувати в розрахунках будь-який матеріал від вуглецевої інструментальної сталі до сучасних твердих сплавів з різними покриттями. На рисунку 2.2 представлена розрахункова схема клина, прийнята в подальших розрахунках.

Ця розрахункова схема дозволяє отримати математичні залежності для розрахунку координат ключових точок необхідних для побудови моделі ріжучого клина в системі скінчено-елементного аналізу.

Так у системі координат  $X'OY'$  для точки 1 маємо (див. рисунок 2.2):

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$X_1 = \frac{\Delta}{\operatorname{tg}(\varepsilon / 2)}, Y_1 = \Delta, Z_1 = 0. \quad (2.2)$$

Для точки 2 у системі  $X'OY'$ :

$$X_2 = e_1, Y_2 = \Delta, Z_2 = 0. \quad (2.3)$$

Для точки 3 в системі  $X''OY''$ :

$$X_3 = e, Y_3 = -\Delta, Z_3 = 0. \quad (2.4)$$

У формулах позначено:  $\Delta = H \operatorname{tg} \alpha$ ,  $\varepsilon = 180^\circ - \varphi - \varphi_1$ .

Рисунок 2.2 – Розрахункова схема отримання математичних залежностей для побудови твердотільної моделі різального клину токарного різця

Аналогічним чином можуть бути визначені координати інших точок схеми (точки 4, 5, 6 в площині  $X'''OY'''$ ). В результаті розрахунків може бути побудована модель ріжучого клина. На рисунку 2.3 показана 3D-модель для різця з такою геометрією:  $\varphi = 95^\circ$ ,  $\varphi_1 = 5^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ ,  $r = 0,8$  мм,  $H = 10$  мм,  $e = e_1 =$

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25 мм. Дана модель є параметричною та може гнучко змінюватися в залежності від заданих параметрів. Сітка елементів відповідає рекомендаціям, розглянутим вище.

Рисунок 2.3 – Приклад побудови параметричної 3D-моделі різального клину із нанесеною упорядкованою сіткою кінцевих елементів у ANSYS

Для розрахунку температур, сил, деформацій і напружень можна використовувати модель у вигляді фрагмента заготовки, що описує зону різання і прилеглі до неї ділянки. Причому таке спрощення сприяє підвищенню продуктивності розрахунків і не впливає на їх точність, так як межі поширення температур, напружень та деформацій при різанні відносно площини зсуву невеликі. В результаті аналізу літературних джерел було встановлено, що межі розповсюдження деформацій і температур залежать від перетину зрізу, глибини і швидкості різання.

У роботі для побудови моделі фрагмента заготовки будемо використовувати залежність її розмірів від глибини різання: довжина фрагмента заготовки  $L = 10t$ ; висота фрагмента заготовки  $H = 5t$ ; товщина фрагмента заготовки  $W = 8t$ .

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 2.4 показана 3D-модель фрагмента заготовки, разом із моделлю ріжучого клина, генеровані ANSYS по заданим вихідним даним.

Для моделювання силових впливів на заготовку з метою встановлення її деформацій і просторових відхилень необхідно використовувати повнорозмірну модель, до вузлових точках якої вимагається докласти сили різання і температури у відповідні моменти часу.

Рисунок 2.4 – Моделі для скінчено-елементного аналізу процесу різання

Схема впливу на модель заготовки представлена на рисунку 2.5.

Крок навантаження  $\Delta$  (рисунок 2.5) може бути визначений з урахуванням довжини ділянки, на якій відбувається відділення (сколювання) стружки наступним чином:

$$\Delta \leq l_{ск} \cos \beta_1 = \frac{a_1}{\sin \beta_1} \cos \beta_1, \quad (2.5)$$

при цьому кутовий крок знаходиться з наступного співвідношення:

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta\alpha = 2 \arccos \frac{\Delta 2}{2d} = 2 \arccos \frac{\Delta}{d} = 2 \arccos \frac{\frac{a_1}{\sin \beta_1} \cos \beta_1}{d} = 2 \arccos \left( \frac{a_1}{d} \operatorname{ctg} \beta_1 \right), \quad (2.6)$$

де  $a$  – товщина елемента зрізу  $a_1 = S \sin \varphi$ ;  $d$  – діаметр оброблюваної поверхні;  
 $\beta_1$  – кут загострення різця;  $\varphi$  – головний кут у плані.

Рисунок 2.5 – Розрахункова схема навантаження скінчено-елементної моделі заготовки силами різання і температурою по вузловим точкам сітки:

$\varnothing d$  – діаметр оброблюваної поверхні заготовки,  $P_x, P_y, P_z$  – складові сили різання,

$\Delta$  – крок прикладання силових навантажень до вузлових точок сітки,

$\Delta\alpha$  – кутовий крок прикладання силових навантажень,  $v$  – швидкість різання,

$\theta$  – температура різання

Розмір елементів, сітки при підготовці скінчено-елементної моделі заготовки й різального клина можна призначити, орієнтуючись на розміри елемента перерізу зрізу, також ці розміри важливі при завданні умов їх контактної взаємодії. Розглянемо схему формування елементів перерізу зрізу (рисунок 2.6).

Площа перерізу зрізу розраховуємо наступним чином:

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$a_1 = \frac{t}{AB} \cdot \left( S - \frac{f_z}{t} \right), \quad (2.7)$$

де  $a_1$  – площа перерізу зрізу;

$t$  – глибина різання;

$S$  – поздовжня подача різця;

$f_z$  – площа перерізу гребінців нерівностей на обробленій поверхні:

$$f_z = \frac{1}{2} \cdot \frac{S^2}{\text{ctg}\varphi + \text{ctg}\varphi_1}, \quad (2.8)$$

де  $\varphi$ ,  $\varphi_1$  – головний і допоміжний кути в плані відповідно.

Рисунок 2.6 – Схема до розрахунку перерізу елемента зрізу

Коефіцієнт тертя між заготовкою і поверхнями різця можна знайти із співвідношення [12]:

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\mu = \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B \cos(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma - \sin \gamma + B \cos(\cos \gamma + \sin \gamma)}. \quad (2.9)$$

Враховуючи, що товщина зрізу  $a_1 = S \cdot \sin \varphi$ , ширина зрізу визначаємо розмір кінцевого елемента сітки наступним чином:

$$e = \frac{1}{2}(S \cdot \sin^2 \varphi + t). \quad (2.10)$$

## 2.5 Теплова розрахункова схема моделювання процесу різання

Для розробки розрахункової схеми теплового аналізу необхідно детально розглянути механізм появи та розподілу тепла в заготовці в процесі різання. Відомо, що в зоні різання через те, що механічна робота різання переходить у теплову енергію, виникають і діють три основних джерела теплоти [13]: теплота деформації в зоні стружкоутворення, теплота тертя на ділянці контакту між стружкою і передньою поверхнею інструменту і теплота тертя між задніми поверхнями інструменту та деталі (рисунок 2.7).

Тому, теплота, що утворюється у процесі різання (точіння), може бути представлена наступним чином

$$Q = Q_{оэф} + Q_{н.тр} + Q_{з.тр}, \quad (2.11)$$

де  $Q$  – теплота, що утворюється в процесі різання (ккал/хв);

$Q_{оэф}$  – теплота, що утворюється через наявність внутрішнього тертя між частинками металу, що деформується при обробці;

$Q_{н.тр}$  – теплота, що утворюється при зовнішньому терті стружки, що зрізається, об передню поверхню різця;

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$Q_{з.тр}$  – теплота, що утворюється при зовнішньому терті поверхні різання і обробленої поверхні об задні поверхні різця.

Рисунок 2.7 – Схема руху теплових потоків [13]:

1 – частка теплоти деформації, що йде в деталь; 2 – частка теплоти деформації, що йде в стружку; 3 – кількість теплоти, що виникає в результаті тертя між стружкою і передньою поверхнею інструменту; 4 – підсумковий потік теплоти, що виникає в результаті теплообміну на ділянці контакту надрізцевої сторони стружки з передньою поверхнею інструменту; 5 – підсумковий потік теплоти, що виникає в результаті теплообміну на ділянці контакту поверхні різання із задньою поверхнею інструмента; 6 – кількість теплоти, що виникає в результаті тертя між деталлю і задньою поверхнею інструмента

Теплота кожного зі згаданих джерел у тій чи іншій мірі передається всім твердим тілам, які беруть участь у процесі – деталі, різцю, стружці. У ряді робіт додатково враховується ще і теплота  $Q_{вор}$  – теплота, що утворюється при відриві стружки з утворенням нових поверхонь. Однак її кількість значно менше, ніж від інших джерел, тому в розрахунках нею можна знехтувати, тим більше велика її частина йде в стружку.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, з рисунку 2.7 видно, що в зоні різання має місце переплетення шляхів руху потоків теплоти, і тому математичний опис процесу виявляється достатньо складним, т.я необхідно математичний опис джерел тепла і закон його поширення по заготовці із можливістю визначення температури в будь-якій точці  $(X, Y, Z)$ .

Одним із способів розрахунку температури різання є використання теоретико-експериментальних залежностей. Прикладом такої залежності є формула з роботи [14], отримана з використанням методу подібності:

$$\theta = \frac{0,95 \cdot \tau_p \cdot Pe^{0,375} \cdot E^{0,055} \cdot erf^{0,4} \cdot \sqrt{\frac{Pe \cdot B}{4}}}{c\rho \cdot B^{0,625} \cdot F^{0,15} \cdot D^{0,045} \cdot (1 - \sin \gamma)^{0,65} \cdot \sin^{0,03} \alpha} \quad (2.12)$$

Однак такі залежності не дозволяють повністю отримати поле розподілу температури в зоні різання, так вони не враховують фізику процесу виникнення і розповсюдження тепла, процес теплообміну властивостей матеріалу заготовки, інструменту із навколишнім середовищем і не володіють універсальністю застосування.

Інші способи розрахунку поля температур зводяться до використання рішень класичних задач теорії теплообміну в твердих тілах. Температура різання  $\theta$  визначається рішенням загального рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\alpha \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (2.13)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності матеріалу заготовки, який визначається

$$\text{як } \alpha = \frac{\lambda}{c\rho}, ;$$

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$c$  – питома теплоємність;

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\rho$  – питома щільність матеріалу заготовки.

Також всі тіла, що входять в технологічну систему, обмінюються теплотою із навколишнім середовищем – відбувається конвекція. Процес конвективного теплообміну описує закон Ньютона-Ріхмана. Відповідно до цього закону кількість теплоти, що передана в тверде тіло або йде з нього при торканні з рідиною або газоподібним середовищем пропорційно різниці температур тіла і середовища:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \omega(\theta_c - \theta), \quad (2.14)$$

де  $\omega$  – коефіцієнт тепловіддачі, визначається зі співвідношення  $\omega = \alpha S / c$  ( $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $S$  – площа тіла на межі розділу з середовищем);

$\theta_c$  – температура навколишнього середовища.

Коефіцієнт тепловіддачі, що входить в рівняння, дозволяє враховувати конвективні особливості процесу механічної обробки (присутність в технологічній системі МОТЗ), що допомагає отримувати більш коректні розподіли температурних полів, а, отже і полів напружень і деформацій.

Для вирішення цих рівнянь необхідно задатися певними граничними умовами, пов'язаними з характеристиками реального процесу різання. Математичний опис умов теплообміну на граничних поверхнях зони деформації представляє значні труднощі. Тому багато дослідників вводили ряд припущень і спрощень, значно знижуючи цінність рішення задачі. Кінцеві формули відрізнялися громіздкістю, містили велику кількість важко визначаємих коефіцієнтів і були незручні для практичного використання.

Також широко використовуються методи джерел тепла, які спрощують інтегрування рівняння теплопровідності, оскільки дозволяють шляхом нескладних перетворень представити температуру поля у вигляді визначеного інтеграла або ряду, що збігається, і таким чином кількісно описати процеси поширення тепла при різанні в лінійних, плоских і просторових задачах. Однак при цьому не

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

враховуються теплові ефекти фазових і структурних перетворень. Джерела тепла розглядаються як місцеві, зосереджені або розподілені, нерухомі і рухомі, миттєві і тривалої дії. Поширення тепла від рухомого зосередженого джерела розглядається, як сукупність накладених один на одного процесів вирівнювання теплоти миттєвих елементарних джерел. При цьому координати точок температурного поля  $x, y, z$  переміщуються разом з рухомих джерелом (рисунок 2.8).

Рисунок 2.8 – Схема рухомого джерела тепла

Головним рішенням методу джерел є рівняння виду

$$\theta(R,t) = \frac{Q}{c\rho(4\pi\alpha t)^{3/2}} e^{-\frac{R^2}{4\alpha t}} \quad (2.15)$$

де  $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$  – радіус-вектор, тобто відстань елемента поля (точка  $A$ ) від джерела (точка  $B$ ).

У відповідності з рівнянням (2.15), тепло  $Q$ , внесене в точковий елемент ( $R=0$ ) необмежено теплопровідного тепла в момент часу  $t = 0$ , вирівнюється за експоненціальним законом.

З розвитком засобів скінчено-елементного комп'ютерного аналізу з'явилася можливість ефективно розв'язувати рівняння виду (2.13) і (2.14), отримуючи поле розподілу температури в моделі, близьке до реального, враховуючи при цьому

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різні теплові явища процесу різання та фізичні властивості матеріалу. При цьому як і раніше важливим залишається завдання граничних умов у вигляді джерел тепла і ділянок тепла і ділянок конвекційного теплообміну.

Таким чином, з урахуванням розглянутого раніше, можна використати таку схему розташування джерел тепла (рисунок 2.9).

Рисунок 2.9 – Схема розташування джерел тепла у зоні різання:

$Q_{def}, Q_{n.mp}, Q_{z.mp}$  – джерела тепла у зоні різання;

$q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$  – напрямки відведення теплоти

Ці джерела тепла є швидкорухомими, зі швидкістю, що відповідає швидкості різання. У скінчено-елементній моделі ці джерела пов'язані з моделлю ріжучого клина і переміщаються разом з ним. Відведення тепла відбувається в наступних напрямках:  $q_1$  – відведення тепла разом з відокремленою стружкою,  $q_2$  – відведення тепла в заготовку,  $q_3$  – відведення тепла в різець,  $q_4, q_5, q_6$  – відведення тепла в навколишнє середовище.

Для завдання температури, що генерується джерелами тепла скористаємося наступними рівняннями, отримані на підставі [15] та [16]:

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\theta_{mp.n} = \frac{F_{II} \sqrt{v \frac{1}{\zeta} \pi}}{2Eb \sqrt{\lambda_p c_p \rho_p l}}, \quad (2.16)$$

$$\theta_{mp.3} = \frac{F_3 \sqrt{v \pi}}{2Eb \sqrt{\lambda_p c_p \rho_p l}}, \quad (2.17)$$

$$\theta_{оэф} = \frac{\alpha_0 p [(1 - \beta_0) - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma)] \frac{1}{\zeta}}{E c_p \rho_p}, \quad (2.18)$$

де  $p = \frac{P_z}{b_1 a_1}$  – питома сила різання, кгс/мм<sup>2</sup>;

$\alpha_0$  – коефіцієнт, що враховує втрату теплоти на приховану енергію деформації (приймаємо  $\alpha_0 = 0,95$ );

$\beta_0$  – коефіцієнт, що враховує перехід частини тепла у виріб (за Вейнером:  $\beta_0 = 0,1$  при  $v = 100$  м/хв,  $\beta_0 = 0,05$  при  $v = 300$  м/хв);

$\mu_0$  – коефіцієнт тертя стружки;

$\zeta$  – коефіцієнт усадки стружки;

$c$  – теплоємність нагрітої стружки в ккал/кгс·град;

$\rho_{стр}$  – щільність стружки, кгс/мм<sup>3</sup>;

$b_1$  – ширина елемента перетину зрізу, мм;

$a$  – товщина елемента зрізу, мм;

$E$  – модуль пружності матеріалу стружки, кгс/мм<sup>2</sup>;

$F_n$  – площа передньої поверхні різця;

$\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності різця;

$c_p$  – теплоємність різця;

$\rho_p$  – щільність матеріалу різця.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для комп'ютерного аналізу придатне співвідношення для визначення температури при деформації в зоні різання [17]:

$$\theta_{\text{деф}} = \frac{\tau \varepsilon}{c}, \quad (2.19)$$

де  $\tau$  – тангенціальне напруження, що діє в площині зсуву,

$\varepsilon$  – деформація в площині зсуву;

$c$  – теплоємність матеріалу заготовки.

На рисунку 2.10 наведена отримана розрахункова схема. Основними особливостями якої є наступне:

- температура для розрахунку задається у вигляді константи рівної максимальній температурі, яка виникає в зоні різання в процесі обробки

$\theta_{\text{деф}}, \theta_{\text{н.тр}}, \theta_{\text{з.тр}}$ ;

Рисунок 2.10 – Розрахункова схема для теплового аналізу:

1 – ділянка прикладання температурного навантаження від контакту стружки із різцем; 2 – ділянка прикладання температурного навантаження від деформації металу; 3 – ділянка прикладання температурного навантаження від тертя заготовки і задньої поверхні; 4 – ділянка втрати тепла за рахунок видалення стружки; 5, 6 – ділянка втрати тепла за рахунок теплообміну із навколишнім середовищем

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- втрати тепла розташовуються відповідно з рисунком 2.9 і розрахунковими формулами [15];

- початковою температурою є кімнатна температура;

- різання здійснюється без використання МОТЗ, тобто відведення тепла відбувається тільки за рахунок видалення стружки і взаємодії з навколишнім середовищем  $\theta_c$ .

На розрахунковій схемі можна виділити кілька ділянок (рисунок 2.10), для кожної з яких встановлений свій закон розподілу.

На ділянках 1, 2, 3 здійснюється нагрівання заготовки. На ділянках 5, 6 заданий відтік тепла за рахунок конвективного теплообміну із навколишнім середовищем. Ділянка 4 моделює процес втрати тепла за рахунок видалення стружки.

Визначаємо довжини ділянок  $X_1, X_2, X_3$ , показаних на рисунку 2.10. Для ділянки, розташованої на задній контактній поверхні, де відбуваються пластичні деформації металу поверхневого шару і явища тертя, довжину  $X_1$  можна визначити наступним чином [15]:

$$X_1 = 1,25 \cdot \frac{R}{\cos \alpha} \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\sin \alpha}} \quad (2.20)$$

Величина  $X_2$  визначається наступним чином:

$$X_2 = t - R \quad (2.21)$$

В якості  $X_3$  приймемо довжину ділянки зсуву [18]:

$$X_3 = \frac{a_1}{\sin \beta_1}, \quad (2.22)$$

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $a_1$  – товщина перерізу зрізу.

Реалізувавши запропоновану розрахункову схему можна визначити сукупність значень температури в різних точках зони різання, тобто так зване температурне поле. Температурне поле дає найбільш яскраву і повну картину температурної обстановки у зоні різання.

## 2.6 Силова розрахункова схема моделювання процесу різання

Силовий динамічний аналіз процесу різання виконується для визначення полів напружень у заготовці та її деформацій. Для цієї мети до заготовки необхідно докласти навантаження у вигляді впливу різця (силовий фактор) і температури, причому температура, що є навантаженням для даного виду аналізу, отримана при тепловому аналізі.

Як було розглянуто вище залишкові напруження – напруження, що залишаються в заготовці після зняття зовнішніх навантажень. Таким чином, при розробці розглянутого методу одним з основних завдань є визначення моменту кінця навантаження, тобто моменту зняття навантаження.

Руйнування пластичних матеріалів пов'язане з появою значних деформацій зсуву. Для них в якості критерію можуть бути застосовані інтенсивність або максимальні дотичні напруження [19]:

$$\sigma_{екв} \geq \sigma_{кр} \quad (2.23)$$

де  $\sigma_{екв}$  – критерій міцності (еквівалентні напруження);

$\sigma_{кр}$  – критичні напруження, що відповідають потрібному моменту часу, наприклад руйнуванню.

Еквівалентні напруження при силових розрахунках найбільш часто визначаються наступним чином:

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_{екв} = \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.24)$$

де  $\sigma_i$  – інтенсивність напружень.

За умови, що  $x, y, z$  – головні осі, формулу (2.24) можна записати в наступному вигляді:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} . \quad (2.25)$$

Даний критерій інтенсивності напружень був запропонований Губером і незалежно Мізесом.

Таким чином, за початок утворення стружки можна прийняти той момент часу, при якому інтенсивність напружень, обчислена за формулою (2.25) в площині зсуву досягає межі міцності матеріалу  $\sigma_B$ .

$$\sigma_i = \sigma_B \quad (2.26)$$

При інтенсивності напружень, що відповідають межі текучості, починається пластична течія матеріалу.

$$\sigma_i = \sigma_T . \quad (2.27)$$

На підставі розглянутого раніше, розробимо розрахункову схему для скінчено-елементного силового аналізу (рисунок 2.11). Граничні умови для моделі силового аналізу (рисунок 2.11), наступні:

- 1) вздовж лінії  $AB$  відсутні переміщення вздовж осі  $Y$ ;
- 2) вздовж лінії  $AC$  і  $BD$  відсутні переміщення вздовж осі  $X$ ;

- 3) у площині  $ABCD$  обмежені переміщення вздовж осі  $Z$ ;
- 4) до моделі ріжучого клина прикладаються обмеження всіх переміщень, крім переміщення уздовж осі  $X$  (в напрямку різання);
- 5) вузлам сітки клина задається швидкість переміщення  $v$  уздовж моделі заготовки у напрямку руху різання;

Рисунок 2.11 – Розрахункова схема для силового аналізу

6) до вузлів сітки заготовки прикладається температура, отримана з теплового аналізу;

7) контакт ріжучого клина із заготовкою здійснюється з урахуванням тертя і задається у вигляді контактної пари елементів сітки клина і заготовки.

Для реалізації цієї схеми використовуються моделі заготовки й різального клина, розглянуті вище.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки до розділу 2

1 Наведені основні математичні залежності можуть бути застосовані для розв'язання задач механіки з використанням МСЕ. Проведена оцінка їх придатності для виконання скінчено-елементного аналізу процесу різання та визначення його температурно-силових характеристик.

2 Отримано математичні залежності для визначення залишкових напружень і деформацій за результатами скінчено-елементного аналізу.

3 Аналіз типів скінчених елементів для рішення різних завдань і розгляд їх обмежень і особливостей використання в процесі аналізу дозволили визначити межі вживаності кожного елемента і область дослідження.

4 Підготовлені теоретичні положення для побудови скінчено-елементних моделей заготовки і інструменту з урахуванням їх геометрії дозволили отримати математичні залежності.

5 Обрані типи скінчених елементів і запропонована формула для розрахунку їх розмірів на основі врахування геометрії елемента зрізу.

6 Розроблена розрахункова схема теплового аналізу і визначення набору граничних умов дозволили запропонувати спосіб опису джерел тепла, діючих в зоні різання.

7 Розроблена розрахункова схема силового аналізу і визначення набору граничних умов дозволили запропонувати спосіб опису взаємодії ріжучого клина і заготовки.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Традиційна методика проведення експерименту

Експерименти передбачається проводити на типовому представнику групи тонкостінних деталей – деталі типу „Кільце”.

На рисунку 3.1 наведено ескіз зразка. Для статистики передбачається виготовлення та обробка декількох зразків.

Для зниження твердості, підвищення оброблюваності, досягнення однорідності структури і зняття внутрішніх напружень зразки попередньо піддавалися термічній обробці – ступінчастому відпалюванню. Воно здійснювалося за наступною схемою: нагрівання зразка в печі до температури 750°C, витримка при заданій температурі протягом однієї години, потім нагрівання до температури 830°C з витримкою дві години, після чого зразки охолоджувалися разом з піччю протягом 12 годин. Твердість зразків у відпаленому стані складала HB 160.

Рисунок 3.1 – Конструкція зразка (сталь 45), що досліджується

Для багатьох деталей фінішним видом обробки є точіння, при якому за рахунок зняття припуску вдається уникнути дефектів поверхневого шару, закладених на попередніх операціях механічної обробки, і стан поверхневого шару формується саме при фінішному точінні. Тому для дослідження була обрана токарна обробка зовнішньої поверхні зразків (рисунок 3.2).

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Режими різання призначалися виходячи з необхідності отримання залишкових напружень, найбільш виражених в поверхневому шарі. Так, на основі аналізу робіт [1], [20], [21], [22] було встановлено, що найбільший вплив на формування залишкових напружень у поверхневому шарі деталей надають швидкість різання, подача, глибина різання, а також геометрія різальної кромки різця. Вихідні дані експерименту по кожному зразку представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики зразків та технологічні умови їх обробки

Експеримент здійснювався на прецизійному високоточному токарному верстаті моделі NH-22, що обладнано реєструючими приладами (рисунок 3.2).

Кільцевий зразок 2 (рисунок 3.3) базувався на жорсткій циліндричній оправці 1, встановленій в кулачковому патроні 7, і через упорну шайбу 3 підтискався

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оправки заднім обертовим центром 4. Обробка зовнішньої поверхні зразка здійснювалася прохідним відігнутим різцем 5, закріпленим у різцетримачі на динамометрі 6.

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд стенда на базі верстата моделі NH-22 для вимірювання сил та моментів різання: 1 – тензометрична апаратура на несучій частоті 4АНЧ-22 (тензопідсилювач); 2 – комп’ютер; 3 – аналого-цифровий перетворювач Ф4223

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.3 – Установка оброблюваного зразка на токарному верстаті NH-22:

1 – оправка, 2 – зразок, 3 – упорна шайба, 4 – обертовий задній центр,  
5 – різець, 6 – динамометр УДМ600, 7 – кулачковий патрон

Зразки спочатку піддавалися чорновій обробці, а потім – чистовій із реєстрацією силових характеристик процесу різання ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ).

### **3.2 Методика проведення віртуального чисельного експерименту у середовищі ANSYS на основі MCE**

*Моделювання геометрії та фізико-механічних властивостей матеріалу, що досліджувався*

Аналіз за методом скінчених елементів в ANSYS починається з побудови твердотільної комп'ютерної моделі деталі. Моделі створюються відповідно до

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

геометрії і розмірів реальних зразків. На основі твердотільної моделі (рисунок 3.4, а), шляхом нанесення на неї сітки елементів створюється скінчено-елементна модель (рисунок 3.4, б).

Модель ріжучого клина передбачається поставити абсолютно жорсткою, але з можливістю відведення і підведення теплових і силових навантажень. Після отримання скінчено-елементної сітки та моделі до неї прикладаються граничні умови у вигляді обмежень на переміщення, силових і температурних навантажень, взаємних переміщень і швидкостей у відповідності з розрахунковими схемами .

Рисунок 3.4 – Вихідна 3D-модель досліджуваного зразка:

а – твердотільна; б – скінчено-елементна в ANSYS

Для виконання розрахунків необхідно, відповідно до запропонованої методикою, мати в наявності математичну модель, що описує криву пластичної течії досліджуваного матеріалу, дані з якої задаються в програмою розрахунку. Отримати таку криву можна двома способами. Перший спосіб – найпростіший, що передбачає використання для її побудови даних, наявних в довідковій літературі [23], однак у довідниках не завжди вдається знайти дані щодо потрібного матеріалу, причому для конкретних необхідних умов (температура, твердість, швидкість деформації тощо), також у довідниках слабо відображені дані за новим

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прогресивним матеріалам. Другий спосіб передбачає отримання кривої пластичної течії шляхом проведення експериментів на розтяг-стиск, з використанням розривної машини.

У роботі виконувалися дослідження зразків способом розтягу на розрив. Цей спосіб більш трудомісткий, але він дозволяє отримати дані практично для будь-якого досліджуваного матеріалу і для будь-яких необхідних умов, наприклад температур. Були проведені дослідження на зразках зі сталі 45 за допомогою розривної машини (рисунок 3.5, а). Дослідження проводилися при різних швидкостях деформації (від 0,1 до 500 мм/хв) і температурах (від 20 до 800<sup>0</sup>С). У якості зразків використовувалися стандартні стрижні Ø5 тип III №7, виготовлені за ГОСТ 1497 (рисунок 3.5, б).

Рисунок 3.5 – Розривна машина (а) та досліджувані зразки (б)

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліком даного способу випробувань є складність обліку великих швидкостей деформації.

### **Висновки до розділу 3**

Запропоновано методики проведення серії експериментальних досліджень класичним методом та за допомогою програмного комплексу ANSYS.

1 Розрахункова методика відрізняється універсальністю з точки зору досліджуваного матеріалу, так як застосовувані для її опису математичні моделі можуть бути отримані для будь-якого, в тому числі нового недостатньо вивченого матеріалу. Отримати ці моделі можна шляхом проведення серій експериментів, наприклад на розтяг зразків.

2 Методика за допомогою програмного комплексу ANSYS може бути застосовна для дослідження практично будь-яких параметрів процесу різання і формування напружено-деформованого стану заготовки при різних технологічних умовах обробки. Наприклад, можна розрахувати сили і температури різання, напруження, деформації, причому як пружну так і пластичну з температурною.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 4.1 Фізико-механічні властивості матеріалу, що досліджувався

За результатами досліджень були отримані наступні залежності: деформація – напруження; модуль пружності – температура; модуль пружності – швидкість деформації; межа текучості – температура; межа текучості – швидкість деформації; межа міцності – температура; межа міцності – швидкість деформації.

На рисунку 4.1 показані криві пластичної течії сталі 45 при розтягуванні, в залежності від температури нагрівання зразка.

На рисунку 4.2 показані криві пластичної течії сталі 45 при розтягуванні, залежно від швидкості деформації. Аналогічним чином будуються та інші графіки за отриманими результатами.

Рисунок 4.1 – Дослідження пластичної течії матеріалу залежно від температури зразка при розриванні (сталь 45)  
„Видовження – Сила”

Рисунок 4.2 – Дослідження пластичної течії матеріалу залежно від швидкості деформації при розриванні (сталь 45)  
„Видовження – Сила”

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі отриманих графіків, а також положень, викладених раніше отримуємо коефіцієнти, необхідні для запису математичної моделі пластичного течії (крива „деформація-напруження”) – моделі Зерілі-Армстронга у середовищі ANSYS. Перелік знайдених констант представлений у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Задавання параметрів математичної моделі матеріалу

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Продовження таблиці 4.1

#### **4.2 Моделювання процесу різання для заданих технологічних умов обробки**

У результаті виконаних дій генерується скінчено-елементна модель досліджуваної заготовки із заданими властивостями матеріалу, до якої прикладаються навантаження і граничні умови у відповідності до розрахункових схем.

На початку виконується тепловий аналіз, а потім силовий. У результаті яких визначаються сили, температури і напруження у зоні різання за умовах, вказаних у таблиці 3.1. Отримуємо наступні результати (рисунок 4.3).

Значення сил різання, отримані розрахунком в ANSYS представлені у вигляді графіків на рисунку 4.4, а, б, в, г для кожного зразка з 1 по 4.

Узагальнені результати експериментів представлені у таблиці 4.2. Як з бачимо, результати розрахунків добре узгоджуються з результатами реальних експериментів. Похибка не перевищує 10 %.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.3 – Результат моделювання процесу різання в ANSYS:

а – розподіл температури у зоні різання;

б – напружено-деформований стан у зоні різання

Рисунок 4.4 – Результати розрахунку сил різання при чистовому точінні, аркуш 1:

а – зразок №1; б – зразок №2

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.4 – Результати розрахунку сил різання при чистовому точінні:

а – зразок №1; б – зразок №2; в – зразок №3; г – зразок №4

Аналогічна схожість має місце і при порівнянні розподілу залишкових напружень.

Таблиця 4.2 – Порівняння результатів реальних та чисельних експериментів

Позначення	Максимальні значення сил різання при чорновому точінні							
	Зразок 1		Зразок 2		Зразок 3		Зразок 4	
	Реальні	Експериментальні	Реальні	Експериментальні	Реальні	Експериментальні	Реальні	Експериментальні
$P_x, Н$	283,4	272,5	76,9	72,2	106,6	112,1	141,3	131,2
$P_y, Н$	22,2	28,8	95,7	84,0	143,4	141,3	218,5	213,8
$P_z, Н$	373,3	362,1	210,4	218,2	243,1	239,6	356,6	347,3

Продовження таблиці 4.2

Позначення	Максимальні значення сил різання при чистовому точінні							
	Зразок 1		Зразок 2		Зразок 3		Зразок 4	
	Реальні	Експериментальні	Реальні	Експериментальні	Реальні	Експериментальні	Реальні	Експериментальні
$P_x, Н$	134,7	147,0	76,9	87,4	148,0	155,1	291,7	246,4
$P_y, Н$	149,6	158,1	95,7	114,3	196,3	201,3	302,0	314,5
$P_z, Н$	255,3	236,4	210,4	210,0	321,7	328,1	939,3	920,9

**4.3 Співставлення результатів, отриманих реальним експериментом, із методом чисельного моделювання**

Проведемо порівняння результатів, отриманих різними способами, згідно з планом експерименту (рисунок 4.5). Для прикладу розглянемо зразок №1, виготовлений при наступних технологічних умовах:  $\varphi = 45^0$ ,  $\varphi_1 = 20^0$ ,  $\alpha = 10^0$ ;  $\gamma = 18^0$ ;  $r = 0,2...0,4$  мм,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм,  $n = 1575$  об/хв.

Рисунок 4.5 – Зіставлення сил різання під час чистового точіння зразка №1, отримані експериментально –  $P_x, P_y, P_z$ ,

і методом скінчено-елементного аналізу –  $P_x^{мсе}, P_y^{мсе}, P_z^{мсе}$

На рисунку 4.6 побудовані графіки залишкових напружень.

Рисунок 4.6 – Зіставлення епюр розподілу залишкових напружень після чистового точіння зразків отриманих експериментально,  $\sigma_{зал}$ , і методом скінчено-елементного аналізу,  $\sigma_{зал}^{МСЕ}$ , а також із урахуванням структурно-фазових змін,  $\sigma_{зал}^{ст.фаз}$ , (за даними робіт Виноградової Н.В.):

а – зразок №1; б – зразок 2; в – зразок №3; г – зразок №4

З графіків видно, що результати досить близькі один до одного. Незначні відхилення епюр пояснюються тим, що не враховується вплив структурно-фазових перетворень в матеріалі поверхневого шару.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 4.4 Проведення чисельних експериментів для перевірки адекватності відгуків моделей різання, що розроблені

За допомогою розробленого скінчено-елементного аналізу можна дослідити вплив різних технологічних умов обробки на температуру, сили, напруження і деформації, що виникають в процесі різання.

На рисунку 4.7 показаний приклад обчислення пластичної деформації в зоні різання у вигляді трьох головних компонентів  $\epsilon_{11}$ ,  $\epsilon_{22}$ ,  $\epsilon_{33}$ , для режимів з таблиці 3.1.

Рисунок 4.7 – Результати розрахунку деформацій при моделюванні процесу механічної обробки різанням: а – пластична деформація за компонентом  $\epsilon_{11}$ ; б – пластична деформація за компонентом  $\epsilon_{22}$ ; в – пластична деформація за компонентом  $\epsilon_{33}$

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 4.8 наведено приклад обчислення поля розподілу температури  $\Theta(x, y, z)$  у зоні різання при зазначених технологічних умовах.

Рисунок 4.8 – Приклад результатів розрахунку поля розподілу температури при моделюванні процесу механічної обробки різанням:

- а) глибина різання 0,1 мм, швидкість різання 20 м/хв;
- б) глибина різання 0,5 мм і швидкість 20 м/хв

На основі розробленої математичної моделі і методики розрахунку були проведені дослідження, що підтверджують їх адекватність та здатність відображати зміну температурно-силових характеристик процесу різання при зміні технологічних умов обробки і параметрів ріжучого інструменту для різних оброблюваних матеріалів.

Так на рисунку 4.9 показано вплив величини переднього кута  $\lambda$  ріжучого клину на розподіл температури в зоні різання при обробці сталі 18ХНВА, а на рисунку 4.10 вплив глибини різання на цей розподіл при швидкості різання 60 м/хв і робочій подачі 0,3 мм/об. З рисунків видно, правильний вплив геометрії різця на параметри процесу різання.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.9 – Температура у зоні різання залежно від переднього кута  $\gamma$

Рисунок 4.10 – Температура у зоні різання залежно від глибини різання  $t$

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після того, як були визначені температура, сили, деформації та напруження в зоні різання виконується наступний етап розрахунку – до заданої скінчено-елементної моделі досліджуваної деталі прикладаються ці розраховані навантаження у вигляді граничних умов відповідно до операції, що виконується. Проводиться розрахунок, визначаються залишкові напруження і їх розподіл в поверхневому шарі деталі.

На рисунку 4.11 наведено розрахунок напружень, що виникають при різанні у процесі обробки диска.

Рисунок 4.11 – Вплив глибини різання  $t$  і радіусу ріжучого клина  $r$  на величину і розподіл напружень в зоні різання (для сталого стану, за фон Мізесом), досліджуваний матеріал – сталь 18ХНВА: а – радіус при вершині ріжучого клину 0,05 мм, глибина різання 0,03 мм, швидкість різання 200 м/хв, враховується зміцнення матеріалу; б – радіус при вершині ріжучого клина 0,05 мм, глибина різання 0,05 мм, швидкість різання 200 м/хв, зміцнення матеріалу не враховується; в – радіус при вершині ріжучого клина 0,05 мм, глибина різання 0,075 мм, швидкість різання 200 м/хв, враховується зміцнення матеріалу; г – радіус при вершині ріжучого клина 0,05 мм, глибина різання 0,1 мм, швидкість різання 200 м/хв

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати, представлені на рисунку 4.11, дозволяють зробити висновок про правильність опису моделі поведінки матеріалу. Так, при зміні геометрії різця і глибини різання, змінюються не тільки величини напружень, їх розподіл у зоні різання, а також і форма стружки, що відповідає теорії і практиці різання металів [11].

Таким чином пропонована методика скінчено-елементного аналізу показала свою придатність для використання при моделюванні процесу різання з метою визначення напружено-деформованого стану заготовки та встановлення характеру розподілу залишкових напружень.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки до розділу 4

1 Проведено вивчення фізико-механічних властивостей матеріалу, що досліджувався, а саме сталі 45.

2 Здійснено моделювання процесу різання для заданих технологічних умов обробки.

3 Порівняно результати реального та віртуального експериментів. Вони є близькими один до одного.

4 Здійснено перевірку адекватності відгуків моделей різання. Моделі є адекватними.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

### 5.1 Інженерні рішення і пропозиції щодо забезпечення безпеки при роботі на технологічному обладнанні

Обробка різних матеріалів на верстатах токарної групи є найбільш поширеним способом отримання точних розмірів і форм деталей машин і приладів типу тіл обертання. Верстати токарної групи становлять близько 30% всього парку металообробних верстатів. Вивчення виробничого травматизму показує, що серед великого числа верстатів токарної групи різного конструктивного оформлення і призначення найбільшої уваги з точки зору безпеки праці вимагають токарно-гвинторізні, токарно-револьверні та інші головним чином універсальні верстати.

При роботі на токарних верстатах найбільш часто відзначаються випадки поранення різних частин тіла верстатника стрічковою (зливною) стружкою, що утворюється при обробці в'язких металів (сталей) при високих режимах різання. Відомі також випадки травмування очей відлітаючою стружкою, що утворюється при точінні крихких металів (чавуну, бронз, латуні та ін). При точінні крихких металів і неметалічних матеріалів робоча зона верстатника забруднюється пилом оброблюваного матеріалу. Якщо не застосовуються відповідні засоби захисту та знепилювання, то може статися травма, а запиленість в зоні дихання верстатника перевищить допустимі санітарні норми.

Приклади найбільш простих рішень засобів безпеки наведено нижче.

Найбільш ефективним засобом попередження порізів стрічковою стружкою є зміна її форми в процесі різання шляхом завивання в гвинтову спіраль або дроблення на окремі елементи. Це здійснюється доданням передній грані різця криволінійної форми (рисунок 5.1, а, б), а також пристроєм на передній грані різця постійних або регульованих порогів (рисунок 5.1, в, г). Принцип дроблення або завивання стрічкової стружки в першому випадку полягає в наступному: стружка, змінна по передній поверхні різця, потрапляючи в канавку, як би повторює її

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

форму (обтікає профіль канавки) і, відхилена канавкою, завивається в кільце. Якщо кільце не зустрічає будь-які перешкоди вільному руху, то стружка завивається в безперервну спіраль. При упорі завитка стружки в перешкоду (деталь, різець та ін) вона дробиться на окремі елементи.

Рисунок 5.1 – Пристрої для подрібнення і завивання стружки в процесі точіння в'язких матеріалів (сталей): а - профіль прохідного різця зі стружкозавиваючою канавкою; б - дрібнорозмірна стружкоподрібнююча канавка (лунка) на чотиригранній непереточуваній пластинці; в - різець з уступом для дроблення стружки; г - накладний стружколом

Принцип дроблення і завивання стрічкової стружки порогами аналогічний дроблення і завиванню канавками. У цьому випадку стружка, змінна по передній грані різця, зустрічає перешкоду (поріг) і відхиляється їм на оброблювану деталь, задню грань різця та ін. Впираючись в нову перешкоду, виток стружки відламується. Якщо поріг розташований на передній грані різця таким чином, що утворився виток стружки не зустрічає другого перешкоди, то стружка сходить з різця у вигляді гвинтової спіралі. Відповідними параметрами ріжучого інструменту, особливо величиною кута нахилу головної різальної кромки і головного переднього кута, а також розташуванням порогу по відношенню до

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

головної ріжучої кромки і його розмірами досягається стійке дроблення або завивання стрічкової стружки в певному інтервалі режимів різання.

Найбільш раціонально для роботи на універсальних верстатах і автоматичному обладнанні використовувати збірні різці, оснащені багатограними непереточуваними пластинками із дрібнорозмірними лунками (канавками), що формуються при пресуванні пластинок. Слід мати на увазі, що при використанні засобів дроблення стружки в процесі різання елементи, розлітаються на значну відстань, представляють певну небезпеку для травмування очей. Тому використання засобів захисту (захисних екранів або очок) є обов'язковим.

Безпека при точінні крихких матеріалів. Для захисту працюючих від травм відлітаючою стружкою верстати забезпечують огорожами зони різання з оглядовими вікнами.

Огородження зони різання попереджає травмування очей відлітаючою стружкою і трохи знижує запиленість в зоні дихання токаря. Однак такий пристрій не вирішує повною мірою завдання знепилювання.

При точінні сильно крихких матеріалів звичайно застосовують різні пиловідсмоктуючі пристрою у вигляді парасольок, розташованих над зоною різання і приєднаних до індивідуальних або групових вентиляційних установок, що працюють на всмоктування. На рисунку 5.2 зображено один із таких пристроїв, призначений для знепилювання при зовнішньому точінні і розточення отворів. В останньому випадку пил видаляється через пустотілий шпindel верстата.

ГОСТ 12.2.009-80 рекомендує для великосерійного і масового виробництва виробів з крихких матеріалів більш перспективні пристрої, що забезпечують комплексне вирішення проблеми знепилювання і видалення дрібної стружки безпосередньо із зони різання. Такі пристрої створюються на основі закономірностей формоутворення і напрямку руху потоку стружки і пилових частинок, що утворюються в процесі обробки крихких матеріалів при різних режимах різання. При цьому використовуються групові або індивідуальні відсмоктуючі системи.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 5.2 – Схема знепилювання при точінні крихких матеріалів: 1 – приймач пилю (парасолька); 2, 3, 4 – трубопровід

На рисунках 5.3, 5.4 у якості прикладу наведено індивідуальний відсмоктувальний пристрій, призначений для видалення дрібної стружки і пилю із зони різання при поздовжньому точінні і підрізанні торця на верстатах середнього розміру. Пристрій складається з різця-пилостружкоприймача (рисунок 5.3) і індивідуального відсмоктувального агрегату (рисунок 5.4), змонтованого на поздовжньому супорті. Відсмоктувальний агрегат складається із наступних елементів: електродвигуна 1, вентиляторів середнього тиску 2, циклону 3 і рукавного тканинного фільтра, розміщеного в металевому футлярі 4. З різцем-пилостружкоприймачем індивідуальний відсмоктувальний агрегат з'єднується за допомогою телескопічного патрубку 5, передня частина якого (близько різця) прикріплена до поперечного супорта. Включення агрегату заблоковано із включенням шпинделя верстата, тобто він працює тільки під час обертання шпинделя.

Безпека пристосувань для закріплення оброблюваної деталі. Проблема забезпечення безпеки при закріпленні деталей вимагає великої уваги токаря. Він повинен знати, що застосовувати повідкові пристосування із виступаючими елементами на їх зовнішніх поверхнях небезпечно, а використовувати відкриті

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повідкові хомутики заборонено у зв'язку з небезпекою травмування рук виступаючими їх частинами та захоплення одягу, іноді з важкими травматичними наслідками. Повідкові пристосування повинні мати гладкі зовнішні поверхні. На рисунку 5.5 наведено приклади безпечних повідкових пристосувань.

Рисунок 5.3 – Схема різців-пилостружкоприймачів:

- а - зі змінним різцем: 1 - корпус пилостружкоприймача; 2 - повітропровід;  
3 - гвинт для закріплення різця; 4 - опорна пластина; 5 - різець;  
б - з твердосплавною непереточуваною пластиною: 1 - корпус пилостружкоприймача; 2 - криволінійна напрямна; 3 - клин; 4 - палець;  
5 - чотиригранна непереточувана пластина; 6 - гвинт для закріплення різальної пластини; 7 – повітропровід

Найбільш широке застосування для закріплення деталі на токарних верстатах знаходять кулачкові патрони. При їх використанні часто обмежуються вимогою, щоб кулачки патрона не виходили з пазів за його циліндричну поверхню. Однак ця вимога іноді неможливо виконати у зв'язку зі специфічною формою закріплюється деталі або її великим діаметром.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 5.4 – Індивідуальний пилостружковідсмоктувальний агрегат

Рисунок 5.5 – Приклади безпечних повідкових пристосувань:

а – безпечний патрон-хомутик;

б – безпечний патрон з «плаваючим» затискним кільцем

Кулачки, виступаючі з торця патрона, іноді можуть з'явитися причиною травмування, наприклад, при знятті задирок з оброблюваної деталі напилком поблизу патрона. Тому кулачкові патрони необхідно забезпечувати відкриваються огорожами, заблокованими із пуском верстата.

Засоби попередження вильоту оброблюваної деталі. Надійність кріплення деталі, що обробляється в центрах, значною мірою залежить від стану центрів і

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

центрових отворів, а також від відповідності застосовуваних центрів умов роботи. При закріпленні деталі в зношених центрах і при неправильно виконаних центрових отворах оброблювана деталь під дією зусиль різання може вирватися з центрів. Для попередження цього при виготовленні центрових отворів необхідно стежити за тим, щоб їх осі лежали на одній прямій, а деталь спиралася на центр стінками конусної частини отвори. Нерухомі центри для попередження зношування слід густо змащувати маслом в місці зіткнення з деталлю. При швидкісному різанні металів нерухомий центр, незважаючи на ряд переваг (висока точність, жорсткість), застосовувати не слід зважаючи швидкого його зношування під час роботи. Тому при роботі на високих швидкостях з метою безпеки необхідно користуватися обертовими центрами.

Важливою умовою безпечної обробки деталей в центрах є раціональний пристрій задньої бабки і надійне її кріплення до станини верстата.

При обробці на токарних верстатах довгих і тонких деталей (валів, осей і т. п.) закріплення їх тільки в центрах часто недостатньо, так як внаслідок прогину і сильних вібрацій такі деталі можуть вирватися із пристроїв. Крім того, прогин і вібрації ускладнюють досягнення необхідної точності при обробці. Для створення безпечних умов праці і точності обробки таких деталей слід застосовувати додаткові опори-люнети.

Заходи попередження травмування ходовими гвинтами і валиками. Ходові гвинти та валики становлять небезпеку захоплення робочого одягу, так як вони знаходяться в робочій зоні токаря. Для попередження цього необхідно звертати увагу на стан спецодягу та дотримуватися правила її носіння, що виключають захоплення ходовими гвинтами і валиками. Іншим важливим профілактичним заходом є огорожа ходових гвинтів і валиків. Деякі моделі вітчизняних токарно-гвинторізних верстатів, наприклад верстат 16К20, оснащують такими пристроями вже в процесі їх проектування та виготовлення.

Попередження травм ріжучим інструментом. Порізи рук гострими крайками різця можуть мати місце при поспіху і неправильних прийомах повороту різцевого

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

головки. Крім того, ріжуча твердосплавна пластина може зруйнуватися і нанести травму при недотриманні встановлених режимів різання і правил вимикання верстата. Таким чином, основним заходом щодо безпеки в цьому випадку є застосування правильних прийомів роботи і, зокрема, порядку виключення шпинделя верстата (спочатку відключається подача, а потім обертання шпинделя). Попередження травм передавальними механізмами верстата (пасовими, ланцюговими, зубчастими та ін). В сучасних верстатах зазначені механізми розташовують усередині корпусу верстата або огорожують знімними пристроями, що виключають можливість травмування. Завдання полягає в тому, щоб передбачені пристрої були завжди справні, а будучи зняті на час змащування, огляду або ремонту механізмів, були своєчасно, перед початком роботи на верстаті, встановлені на призначене для них місце.

Безпека органів управління. Пускові і перемикаючі пристрої токарних верстатів повинні відповідати загальним вимогам, що пред'являються до таких пристроїв. З цих вимог особливо важливе значення має усунення можливості їх мимовільного (випадкового) виключення. Стосовно до токарних верстатів це відноситься насамперед до блокованих рукоятка включення шпинделя. Ці рукоятки повинні завжди мати надійну фіксацію в заданих положеннях. Якщо фіксатор ослаб, необхідно негайно припинити роботу і повідомити про це майстра.

Справність заземлення. Перевірка заземлювальної мережі фахівцями проводиться періодично у відповідності з правилами будови електроустановок. Верстатник повинен стежити за тим, щоб шина, що заземлює, завжди була приєднана до верстата у передбаченому для цього місці. При виявленні випадкового відриву заземлювальної шини верстатник повинен виключити верстат і негайно повідомити про це майстрові.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 5.2 Економічна ефективність впровадження методики розрахунку

Головними факторами з точки зору економічної ефективності від впровадження запропонованої методики у виробництво є: скорочення термінів і витрат на освоєння нової техніки, зменшення витрат, пов'язаних з відпрацюванням технологічних процесів виготовлення деталей і складання виробів, підвищення надійності, довговічності та експлуатаційної придатності виробів (таблиця 5.1).

Скорочення термінів створення нової техніки має важливе економічне значення. Тривалі терміни розробки та освоєння нової продукції знижують ефективність суспільного виробництва.

По-перше, подовження термінів впровадження нових розробок у виробництво знижує ефективність вкладених коштів, заморожує їх, зменшує можливий приріст національного доходу.

По-друге, уповільнення періоду освоєння нової техніки призводить до того, що ця техніка застаріває ще до того, як починається її експлуатація, вона не дає очікуваного економічного ефекту.

По-третє, подовження строків освоєння наукових досягнень веде до того, що народне господарство не має того потенційного економічного ефекту, який міг би бути отриманий при своєчасному впровадженні нової техніки.

Зосереджуючи значні трудові, матеріальні та грошові ресурси, сфера підготовки виробництва впливає на ефективність роботи підприємств за рахунок кращого використання цих ресурсів, забезпечення високих темпів створення нових видів техніки при мінімальних витратах живої та уречевленої праці.

Підготовка виробництва впливає на рівень ефективності суспільного виробництва тим, що створює нову високоефективну продукцію та методи її виготовлення.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.1 – Порівняння методів роботи технологів із точки зору їх ефективності

Основні фактори, що впливають на економічну ефективність	Традиційний метод роботи технологу	Застосування комп'ютерного аналізу
	1 варіант	2 варіант
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Продуктивність праці технологу	нижче	вище
Якість розробки технологічних процесів (зменшення технологічних помилок)	нижче	вище
Оптимізація технологічних процесів (режими різання та інші технологічні умови обробки)	звичайно не виконуються	можлива
Зниження термінів технологічної підготовки виробництва нових деталей та виробів	ні	так
Терміни проектування та виготовлення зразків нової продукції	більше	менше
Витрати на гарантійний ремонт виробів, що уведені в експлуатацію	більше	менше
Гнучке керування ходом технологічного процесу	не передбачено	передбачено
Витрати часу на відпрацювання та перевірку режимів різання для нових деталей	значні, часто потрібна пробна партія	менше, пробна партія може не виготовлятися

Продовження таблиці 5.1

1	2	3
Кількість баракової продукції та продукції, що потребує операції доведення	більше	менше
Особливості процесу складання виробів	тривалість процесу, необхідність підбору деталей, пригонка, проблеми стабільності деталей при експлуатації	висока продуктивність, без необхідності, пригонка, виключення проблем стабільності деталей під час експлуатації
Зниження трудомісткості робіт при впровадженні методик автоматизованих розрахунків у виробництво [31]	до 40%	

Розглянемо в чому виражається ефект від впровадження розрахункової методики в існуючі САПР системи і її використання в процесі технологічної підготовки виробництва. Припустимо, що на підприємстві вже є автоматизоване робоче місце технолога, оснащене необхідним обладнанням і програмним забезпеченням. Економічну ефективність від вдосконалення організації підготовки виробництва за рахунок окремих факторів, слід визначити розрахунками.

Економічний ефект від зниження витрат на підготовку виробництва  $E$  може бути визначений за наступною формулою:

$$E = \frac{P \cdot L \cdot t}{100} - \left( K_e + \frac{H}{100} \right) \cdot K, \quad (5.1)$$

де  $P$  – кількість працівників, зайнятих підготовкою виробництва, осіб;

$L$  – середньорічна заробітна плата працівника з нарахуваннями, грн.;

$t$  – зниження трудомісткості підготовки виробництва, %;

$K_e$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності;

$H$  – амортизація обладнання, %;

$K$  – додаткові капітальні вкладення на здійснення заходів щодо удосконалення підготовки виробництва.

Розрахуємо передбачувану економічну ефективність від впровадження розробленої методики в процес технологічної підготовки виробництва для однієї деталі-представника. У відповідності з формулою (5.1) приймаємо наступні значення параметрів:  $P = 1$  – так як розрахунок проводимо для одного робочого місця технолога;  $L = 120000$  грн.;  $t = 40$  % – у відповідності до таблиці 5.1,  $K_e = 0,1$ ;  $H = 13$  % – амортизація обчислювальної техніки;  $K = 30000$  грн. – витрати на оснащення автоматизованого робочого місця технолога. В результаті розрахунку отримуємо

$$E = \frac{1 \cdot 120000 \cdot 40}{100} - \left( 0,1 + \frac{13}{100} \right) \cdot 30000 = 26700 \text{ (грн.)}$$

Як було зазначено раніше, економічний ефект досягається шляхом механізації та автоматизації інженерної праці з використанням систем автоматизованого проектування. Основну роль при цьому відіграє зниження собівартості продукції за рахунок умовно-постійних витрат, що припадають на один виріб, внаслідок збільшення випуску нових виробів за рахунок умовно-змінних витрат, внаслідок зниження трудомісткості в період підготовки та освоєння виробництва, а також скорочення кількості браку, обсягу доводочних і ремонтних робіт. Враховуючи,

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що кількість типорозмірів деталей на виробництві може досягати декількох десятків, загальний економічний ефект буде досягати декількох сотень тисяч гривень.

Упровадження розробленої методики в процес технологічної підготовки виробництва дозволить скоротити терміни і витрати на освоєння нової техніки, зменшити витрати, пов'язані із обробкою технологічних процесів виготовлення деталей та складання виробів, підвищити надійність, довговічність та експлуатаційну придатність виробів.

### 5.3 Світ відходів

Можна із упевненістю говорити, що ми живемо у світі відходів. Щорічно до океану потрапляє близько 10 мільйонів тон нафтопродуктів, до водойм – понад 500 мільярдів тон промислових відходів. Підприємства і транспорт викидають до атмосфери близько 1 мільярд тон аерозолів та стільки ж сажі. Спалюється 10 мільярдів тон умовного палива. Із загальної кількості відходів, які щорічно утворюються на земній кулі Україна посідає 9 місце.

Окрім того, існують також сховища, де відходи накопичуються роками. Ці відходи містять канцерогенні речовини. За останній рік у нашій країні утворилося понад 55 мільйонів кубічних метрів побутових відходів або понад 10 мільйонів тон, що захороняються на 6000 сміттєзвалищ і полігонів, загальною площею майже 9000 гектарів.

На одного українця щороку припадає 250...300 кг побутових відходів. Це число продовжує зростати.

Відходи збираються як на спеціалізованих, так і стихійних звалищах. На частку заборонених місць розміщення відходів припадає понад 70%. Біохімічні процеси розкладання відходів спричиняють негативний вплив на довкілля. Звалища побутових відходів забруднюють ґрунт, рослини, повітря, підземні та поверхневі водойми. Окрім того, призводять до збільшення популяцій пацюків,

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мишей, комах, що сприяють поширенню інфекційних захворювань. Поточна ситуація являє собою реальну загрозу здоров'ю людей – теперішньому та майбутнім поколінням. Ось чому в усьому світі так гостро постає питання захисту довкілля. Ми чітко повинні уявляти про загрозу для екології промислових, побутових та сільськогосподарських відходів, розумітися на питаннях їх зберігання, утилізації та переробки.

### **Висновки до розділу 5**

Запропоновано інженерні рішення, покликані забезпечити безпечну роботу на технологічному обладнанні. Розглянуто економічну ефективність упровадження запропонованої розрахункової методики, приділено увагу питанням захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1 Проаналізовано літературні джерела, присвячені питанню розрахунку та оцінки напружено-деформованого стану деталей високої точності після механічної обробки з урахуванням засобів моделювання на комп'ютері.

2 За допомогою методу скінчених елементів розроблена модель процесу різання. Вона враховує температурно-залежні фізико-механічні властивості матеріалу деталі та ріжучого інструменту.

3 Розроблено метод комп'ютерного моделювання процесу формування у поверхневому шарі деталей залишкових напружень з урахуванням особливостей геометрії деталей, їх матеріалу та заданих технологічних умов обробки.

4 Надані інженерні рішення та пропозиції стосовно забезпечення безпеки при роботі на технологічному обладнанні, приділено увагу питанням економічної ефективності та захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_21.22.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		