

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Кваліфікаційна наукова
праця на правах
рукопису

Гузенко Денис Євгенович

УДК 621.91.01

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ
ЧОРНОВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ СТУПІНЧАСТИМИ РІЗЦЯМИ
НА ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ

05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Д.Є. Гузенко

Науковий керівник
Мироненко Євгеній Васильович,
доктор технічних наук,
професор

Краматорськ – 2019

АНОТАЦІЯ

Гузенко Д.Є. Підвищення ефективності процесу чорнової обробки деталей ступінчастими різцями на важких токарних верстатах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2019.

Дисертацію присвячено підвищенню продуктивності, надійності та експлуатаційних характеристик ступінчастих збірних різців для чорнової обробки з великим перерізом зрізуваного шару деталей на важких верстатах.

Враховуючи важкі умови різання, підвищення ефективності чорнового точіння сталейних деталей відноситься до найбільш актуальних задач металообробки та машинобудування.

На сучасному етапі розвитку економіки України важливе місце приділяється машинобудуванню. Машинобудування розвивається шляхом підвищення гнучкості виробництва та якості продукції. Результати діяльності багатьох підприємств у значній мірі залежать від ефективності використання важких токарних верстатів. Вартість цих верстатів у 20...50 разів, а вартість верстатогодини їхньої роботи в 3...7 разів більше в порівнянні із середніми верстатами.

Одним із напрямків вирішення цієї задачі є вдосконалення конструкцій збірних різців зі ступінчастою схемою різання та оптимізація режимів різання.

В наступний час використовуються інструменти з механічним кріпленням різальних пластин спеціальної форми з уступом під прихоплювач та різальні пластини з тангенціальним розміщенням. Для підвищення ефективності токарної обробки сталейних заготовок розроблена система раціональної експлуатації різальних інструментів, видані

загальномашинобудівні нормативи режимів різання. Аналогічні рекомендації присутні у каталогах різальних інструментів закордонних фірм. Однак, незважаючи на постійну увагу до проблеми підвищення ефективності чорнової токарної обробки, залишаються ще значні резерви для подальшого удосконалення конструктивних рішень.

Ефективність інструменту не може бути істотно підвищена за рахунок тільки традиційних методів. Складність прийняття рішень в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва унікальних деталей на важких токарних верстатах та необхідність комплексного розгляду багатьох елементів технологічної системи вимагає створення методів багатокритеріальної оптимізації режимів експлуатації на основі узагальнених моделей.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності чорнової обробки деталей на важких токарних верстатах шляхом вдосконалення конструкцій ступінчастих збірних різців. Під підвищенням ефективності розуміється підвищення продуктивності, надійності конструкцій та експлуатаційних характеристик ступінчастих збірних різців для чорнової обробки на важких верстатах.

З використанням аналітичних й експериментальних методів досліджень в роботі вирішена важлива науково-технічна задача підвищення надійності ступінчастих збірних різців для чорнової обробки з великим перерізом зрізуваного шару деталей на важких верстатах шляхом вдосконалення схеми ступінчастого різання, вибору раціональної конструкції вузла кріплення різальної пластини на основі аналізу структури відмов інструменту та визначення методів зниження рівня руйнації інструментів за рахунок дослідження взаємозв'язків міцнісних і динамічних параметрів елементів технологічної системи.

Проаналізовано характер та структура відмов збірних різців для чорнової обробки деталей на важких верстатах в умовах складних динамічних навантажень, проведено детальний аналіз досліджень умов експлуатації важконавантажених інструментів для важких токарних верстатів, розглянута

система показників надійності різального інструменту, в яку складовою частиною входять показники динамічної якості різального інструменту, що відображають вплив динаміки процесів, які мають місце в системі «верстат-інструмент-деталь», на стійкість і продуктивність різального інструменту.

Для визначення нормальних і еквівалентних напружень у різальних пластинах ступінчастих різців та аналізу епюр розподілу напружень запропонована методика досліджень напружено-деформованого стану збірних конструкцій інструментів, яка враховує контактні взаємодії між контактуючими елементами та різні схеми навантаження.

Розроблена нова схема ступінчастого розташування різальних пластини з різними кутами в плані, які розміщуються в двох перетинах – в горизонтальній та тангенціальній площинах таким чином, що напрямки крайок різальних лез є мимобіжними в просторі, що дає змогу здійснювати процес чорнкової обробки деталей з великими перерізами зрізуваного шару здійснювати за ступінчастою ступінчастій схемою з використанням в процесі різання тільки однієї різальної вершини пластини різця.

На підставі проведених досліджень напружено деформованого стану збірних конструкцій ступінчастих різців запропоновані математичні моделі для визначення величини нормальних і еквівалентних напружень, які враховують конструктивні варіанти вузлів механічного кріплення різальних пластин та особливості навантаження та контактної взаємодії пластин з елементами зовнішнього і внутрішнього зрізу припуску. Встановлено, що нормальні напруження у пластині, яка оброблює зовнішній шар припуску в напрямку подачі, зменшуються до 20 % у порівнянні з традиційною ступінчастою схемою різання з двома вершинами. Зазначено, що таке конструктивне рішення розміщення пластин дозволяє зменшити кількість відмов у вигляді їх руйнації.

В результаті аналітичних досліджень і порівняльних виробничих випробувань встановлено, що запропонована конструкція збірного різця з верхнім упором відрізняється більш високими показниками міцності та

безвідмовності. Ця конструкція прийнята як базова для чорнової обробки конструкційних сталей на важких токарних верстатах

Розроблена удосконалена структурна, математична й імітаційна моделі технологічної системи для дослідження, розрахунку та аналізу динамічних явищ при різанні збірними ступінчастими різцями, що включає в себе процеси різання двома різальними пластинами. Результати досліджень динамічних характеристик показали, що при обробці ступінчастими різцями за одновершинною схемою процес різання характеризується більш стабільними значеннями амплітуд коливань. Цей факт пояснюється тим, що кожна різальна пластина працює окремо і складові сили різання розподіляються між ними, крім того зменшується рівень автоколивань за рахунок усунення впливу точіння по сліду попереднього проходу.

Адаптовано метод багатокритеріальної стохастичної оптимізації на базі об'єднання генетичного алгоритму та нейронної мережі для вирішення задачі оптимізації режимів різання при чорновій обробці на важких токарних верстатах при великих перерізах зрізуваного шару.

Розроблено алгоритм прийняття рішень, програмне забезпечення та систему функцій багатокритеріальної оптимізації при визначенні ефективних параметрів режимів різання ступінчастими збірними різцями.

На основі аналізу і узагальнення досвіду підвищення надійності важконавантажених інструментів вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності процесу чорнової обробки деталей з великими перерізами зрізуваного шару ступінчастими збірними різцями на важких токарних верстатах за рахунок вперше створеної нової схеми розподілу припуску між різальними пластинами інструменту з однією робочою вершиною різального ступінчастого леза.

Наукова новизна отриманих результатів.

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень для підвищення ефективності процесу чорнового точіння деталей розроблена нова конструктивна схема розподілу припуску між різальними пластинами

ступінчастого збірної різця з однією робочою вершиною різального ступінчастого леза, яка забезпечує високу продуктивність та експлуатаційні характеристики інструменту при обробці з великими перетинами зрізу на важких токарних верстатах.

1. Розроблені моделі напружено-деформованого стану різальних пластин збірних ступінчастих різців з новою схемою розподілу припуску, які вперше враховують особливості контактної взаємодії різальних пластин з елементами зрізуваного шару, механічного закріплення та корпусом інструменту.

2. Уточнено розподіл реакцій з боку упорних поверхонь пластини з елементами базування збірних різців при різних способах закріплення та навантаження силами різання, що дозволяє виявити найбільш ефективну схему базування різальної пластини.

3. Вперше розроблена розрахункова схема та математична модель динамічної системи верстат-інструмент-деталь, яка враховує конструкцію та характер навантаження ступінчастого різця з однією робочою вершиною різальних лез як підсистему, що складається з окремих елементів. Отримані динамічні характеристики процесу чорнової обробки збірними ступінчастими різцями для уточнення конструктивних та геометричних параметрів ступінчастих збірних різців.

4. Вдосконалено систему функцій для багатокритеріальної оптимізації процесу вибору ефективних параметрів експлуатації ступінчастих збірних різців.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення одержаних результатів для важкого машинобудування полягає в наступному:

– розроблено математичне та програмне забезпечення для розрахунку динамічних характеристик при оцінюванні конструкції збірних різців з метою збільшення періоду стійкості інструменту на операціях токарної обробки деталей важкого машинобудування та верстатобудування;

– на базі проведених досліджень та розрахунків міцнісних та жорсткісних параметрів вузлів кріплення різальних пластин була розроблена конструкція ступінчастого збірний різця з механічним кріпленням пластин із однією робочою вершиною різального ступінчастого леза для чорнового точіння при знятті великих перерізів зрізуваного шару;

– розроблені конструкції вузлів кріплення різальних пластин збірних різців для чорнового точіння дозволяють підвищити продуктивність обробки в середньому на 35 %, а також знизити витрати інструменту на 21...26 %, а також можуть бути використані для проектування конструкцій збірних інструментів для механічної обробки в інших областях машинобудування;

– на основі створеної на базі нейромережевої моделі багатокритеріальної оптимізації процесу чорнкової обробки деталей розроблені рекомендації для призначення раціональних режимів різання при експлуатації ступінчастих збірних різців, які дозволяють суттєво підвищити продуктивність чорнкової обробки деталей з великими перерізами зрізуваного шару і забезпечити оптимальну стійкість інструменту.

Результати роботи впроваджені:

– ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» з річним економічним ефектом 42500 грн.;

– ПрАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування» з очікуваним економічним ефектом 32700 грн.;

– у навчальному процесі Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ)

Ключові слова: середовище функціонування, ступінчастий збірний різець, математична модель, напружено-деформований стан, динамічних характеристик, багатокритеріальна оптимізація.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Bohdanova, L. M., Vasilyeva, L. V., Guzenko, D. E., Kolodyazhny, V. M. (2018). A Software System to Solve the Multi-Criteria Optimization Problem with Stochastic Constraints. *Cybernetics and Systems Analysis*, 54(6), 1013–1018.
2. Myronenko Y. Heavy vertical lathe equivalent elastic system modeling / Y. Myronenko, S. Mirantsov, D. Huzenko // *Scientific journal of the Ternopil National technical university*. – Ternopil.: TNTU. – 2017. – №3(87) – С.90 – 102. – ISSN 2522–4433.
3. Мироненко Е.В. Аналіз можливостей використання різців з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями при напівчистовій обробці валків прокатних станів / Е.В. Мироненко, В.В. Калініченко, Д.Є. Гузенко // *Сучасні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць*. – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2017. – Вип 12. – С.116–125. – ISSN 2079–7499. (видання включено у довідник періодичних видань *Ulrich's Periodicals Directory* (New Jersey, USA))
4. Мироненко, Є. Специфіка використання твердосплавних різальних пластин з покриттям при чорновій та напівчистовій токарній обробці деталей важкого машинобудування / Є. Мироненко, В. Калініченко, В. Хорошайло, Д. Гузенко // *Різання та інструмент в технологічних системах : Міжнар. наук.–техн. зб.* – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – Вип. 91. – С. 169–181.
5. Мироненко Е.В., Богданова Л.М., Гузенко Д.Е. Изучение функционирования нейронных сетей для определения оптимальных режимов резания Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип. 35, 2014. 108–111.
6. Збірний різальний інструмент: пат. на корисну модель 114219 Україна, МКП В23В 27/16. – № а201606663; заявл. 17.06.2016; опубл. 10.03.2017, бюл. №5/2017.

7. Збірний різальний інструмент: пат. на корисну модель 114465 Україна, МКП В23В 27/16. – № u201609272; заявл. 05.09.2016; опубл. 10.03.2017, бюл. №5/2017.

8. Збірний різець: пат. на корисну модель 116974 Україна, МКП В23В 27/16. – № u201613463; заявл. 27.12.2016; опубл. 12.06.2017, бюл. №11/2017.

9. Різальний інструмент: пат. на корисну модель 134413 Україна, МКП В23В 27/16.– № u201813096; заявл. 29.12.2018; опубл. 10.05.2019, бюл. № 9/2019.

10. Мироненко Є.В., Міранцов С.Л., Гузенко Д.Є., Ситнік М.Ю., Штогрін Д. Г. Вплив динамічних характеристик збірних різців на енергоефективність процесу різання // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип. № 39, 2016. С. 153 – 158.

11. Мироненко Е.В., Гузенко Д.Е. Снижение энергозатрат процессов механической обработки деталей с применением многокритериальной оптимизации на базе нейросетевой модели // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково–технічної конференції 30 – 1 червня 2017 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2017. – С. 59.

12. Мироненко Є.В., Богданова Л.М., Гузенко Д.Є. Використання гібридної моделі оптимізації для визначення ефективних режимів різання Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково–технічної конференції 29 – 31 травня 2018 року // Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 62.

13. Мироненко Є.В., Васильєва Л.В., Гузенко Д.Є. Оптимізація режимів різання з урахуванням стохастичних параметрів–ознак // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково–технічної конференції 29 – 31 травня 2018 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 63.

14. Мироненко Є.В., Гузенко Д.Є. Підвищення енергоефективності механічної обробки на базі багатокритеріальної оптимізації нейромережевої

моделі // *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво. Матеріали міжнародної науково–практичної конференції 31 жовтня – 02 листопада 2018 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 138.*

15. Мироненко Є. В., Міранцов С. Л., Гузенко Д.Є. Аналіз механізму виникнення оптимального рівня автоколивань // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково–технічної конференції 04 – 07 травня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 87.*

16. Мироненко Є. В., Васильченко Я. В., Гузенко Д. Є., Калініченко В. В., Луговий А. А. Аналіз конструкції збірного токарного різця з кріпленням різальної пластини за допомогою клинового елемента та притискного гвинта // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково–технічної конференції 04 – 07 травня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С.88.*

17. Мироненко Є. В., Васильченко Я. В., Гузенко Д. Є., Калініченко В. В., Луговий А. А. Аналіз конструкції збірного токарного різця з кріпленням різальної пластини за допомогою клинового елемента та притискного гвинта // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково–технічної конференції 04 – 07 травня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С.90.*

18. Мироненко Є.В., Міранцов С.Л., Гузенко Д.Є. Програмно–математичний комплекс для багатокритеріальної оптимізації параметрів токарної обробки на важких верстатах // *Сучасні технології промислового комплексу. Матеріали V–ої Міжнародної науково–практичної конференції 10 ... 15 вересня 2019 року – Херсон: ХНТУ, 2019. – С. 24.*

19. Мироненко Є.В., Міранцов С.Л., Гузенко Д.Є. Багатокритеріальна оптимізація параметрів токарної обробки на важких верстатах // *Комплексне*

забезпечення якості технологічних процесів та систем. Матеріали тез доповідей IX Міжнародної науково–практичної конференції – Чернігів: ЧНТУ, 2019. – С. 67–68.

20. Мироненко Є.В., Калініченко В.В., Гузенко Д.Є. Перспективи використання різців з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями при чорновій обробці валків прокатних станів з великими діаметрами бочки валка. Матеріали доповідей VIII Міжнародної науково–практичної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні РТМЕ–2019» 4–8 лютого 2019р. – Івано–Франківськ – Яремче, 2019. С. 71–173.

ANNOTATION

Guzenko D.E. Improvement of the efficiency of rough machining with stepped cutters on heavy lathes. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The dissertation for a candidate degree of technical sciences for specialty 05.03.01 "Processes of machining, machines and tools" – Donbass State Engineering academy, Kramatorsk, 2019.

The dissertation is dedicated to the improvement of the productivity, reliability and operational characteristics of stepped sectional cutters for rough machining process with large cutting profile on heavy lathes.

Taking into account difficult cutting conditions, the improvement of the efficiency of rough machining process of steel appertain(belong) to the most relevant tasks of machining and machinebuilding.

Machinebuilding takes important place at current Ukrainian economy state. Machinebuilding is developing by improving production flexibility and product quality. The outcome of the majority of plants and factories relies on using heavy lathes. Cost of this lathes 20...50 times more and cost of production hour 3...7 times more compared to medium lathes.

One of the directions for solving this problem is construction improvement of sectional cutters with stepped cutting scheme and optimization of cutting conditions.

Tools with mechanical mounting of special cutting plates with a ledge for the grip and cutting plates with tangential placement are used nowadays. A system of rational using of cutting tools was developed and general machinebuilding standards of cutting conditions was created for the improvement of the efficiency of cutting tools. The same recommendations are presented in the catalogues of the foreign companies. Despite constant attention on a problem of the improvement of the efficiency of rough machining process there are significant reserves for more effective solutions.

The efficiency of the tools cannot be significantly improved by the traditional methods. The complexity of decision acceptance in conditions of single and small-scale production of unique items on heavy lathes and the need for comprehensive consideration of many elements of the technological system requires creation of multicriteria optimization methods for cutting conditions based on generalized models.

The dissertation's purpose is to improve the efficiency of rough machining on heavy lathes by improving the designs of stepped sectional cutters. Improving efficiency means the increase of productivity, reliability of structures and operational characteristics of stepped sectional cutters for rough machining on heavy machines.

In the dissertation the important scientific and technical problem of increasing the reliability of the stepped sectional cutters for rough machining with a large cutting profile on heavy lathes and the problem of choosing tools with rational mounting design of cutting plates has been solved by the improvement of the scheme of stepped cutting and by the analysis of the tool failure structure and identifying methods of reducing the level of tool destruction by researching connections of strength and dynamic parameters of the elements of technological system with the usage of the analytical and experimental methods of research.

The analysis of the nature and structure of sectional cutters failures for rough machining on heavy lathes under conditions of complex dynamic loads, the detailed analysis of studies of operating conditions of heavy-duty tools for heavy lathes have been made, the reliability indicators system of the cutting tool, which includes states of dynamic quality of cutting tool that reflects the influence of the dynamic processes in "lathe-tool-item" system on reliability and productivity of the cutting tool have been considered.

For the determination the normal and equivalent stresses in the cutting plates of stepped cutters and for the analysis of stress distribution diagrams a research methodology of the stress-strain states of sectional tools, which takes into account

the contact interactions between the contacting elements and various load schemes has been proposed.

A new scheme of stepped placement of the cutting plates with different angles in plane, which are placed in two sections – in horizontal and tangential planes is developed in such a way that the directions of the edges of the cutting blades are transient in space, which causes the process of rough machining with large cutting profile to take place in a stepped pattern cutting using only one vertex of the cutting plate.

Mathematical models for determining the value of normal and equivalent stresses which takes into account the design variants of mechanical mounting of the cutting plates and loading specifics and contact interaction of the cutting plates with the elements of the outer and inner cutting allowance based on conducted researches of the stress-deformed state of the stepped sectional cutters has been proposed. It was found that the normal stresses of the cutting plate that processes the outer layer of the allowance in the feed direction are reduced by up to 20% compared to the traditional two-vertex stepped cutting scheme. It was noted that this constructive solution of cutting plates placement allows to reduce the number of destructive failures.

As a result of analytical researches and comparative production tests it was found that the proposed design of the sectional cutter with upper detent has higher strength and reliability. This design is taken as a base for rough machining of structural steels on heavy lathes.

An advanced structural, mathematical and imitation model of the technological system for the research, calculations and analysis of dynamic events during cutting with stepped sectional cutters, which included the processes of cutting with two cutting plates, was developed. Machining by the stepped cutters is characterized with stable values of the oscillation's amplitude which is explained by the fact that each cutting plate works separately and the components of cutting forces are distributed between them, as well as reducing the level of self-oscillations by eliminating the influence of turning on the trace of the previous pass.

The method of multicriteria stochastic optimization based on the combination of genetic algorithm and neural network was adapted to solve the problem of optimization of cutting conditions during rough machining on heavy lathes with large cutting profile.

The decision-making algorithm, software and system of multicriteria optimization functions for determination of effective parameters of cutting conditions with stepped sectional cutters were developed.

Based on the analysis and generalization of the experience of improving the reliability of heavy-duty tools, the relevant scientific and technical problem of increasing the efficiency of the process of rough machining of large cutting profile with stepped sectional cutters was solved by creating a new allowance distribution scheme between cutting plates of one-vertex stepped tool.

Scientific originality of the obtained results.

As a result of theoretical and experimental researches to the improvement of the efficiency of the rough machining process a new structural allowance distribution scheme between the cutting plates of the stepped sectional cutter with one working vertex of the stepped cutting blade, which provides high productivity and operational characteristics of the tool during machining of large cutting profiles on heavy lathes, was developed.

5. Models of stress-strain state of cutting plates of stepped sectional cutters with a new scheme of allowance distribution have been developed. This models for the first time take into account specifics of contact interaction of cutting plates with elements of the cutting layer, mechanical mounting elements and tool's body.

6. The distribution of reactions from the detent surfaces of the plate with the elements of the sectional cutters mounting under different methods of mounting and loading with cutting forces was specified. It allows to find the most effective scheme of the mounting of the cutting plate.

7. For the first time, a calculation scheme and a mathematical model of a dynamic machine-tool-part system, which takes into account the design and loading nature of a stepped cutter with one working vertex of the cutting blades as a

subsystem consisting of separate elements, are developed. The dynamic characteristics of the rough machining process with the stepped sectional cutters were obtained to clarify the structural and geometrical parameters of the stepped sectional cutters.

8. The system of multicriteria optimization functions for the process of selection of effective operation parameters for stepped sectional cutters has been improved.

The practical value of the obtained results. The practical value of the obtained results for heavy machinebuilding is as follows:

- mathematical and program software for the calculation of dynamic characteristics for the design of sectional cutters with the purpose of increasing the period of tool stability during the turning operations of heavy machining was developed;

- based on the researches and calculations of the strength and rigidity of the cutting plates mounting nodes, the design of a stepped sectional cutter with a mechanical mounting of plates with one working vertex of a cutting stepped blade for rough machining with large cutting profile was developed;

- the designed mounting nodes of sectional cutting plates for rough machining allow to increase machining productivity by 35% on average, as well as to reduce spending tool by 21...26%, and can also be used for structural design of sectional tools for machining in other fields of engineering;

- based on the neural network multicriteria optimization model for rough machining, a rational cutting recommendations for stepped sectional cutters operations were developed. They allow to significantly improve the performance of rough machining with large cutting profiles and provide optimal tool strength.

The results are implemented at:

- private corporation "NOVOKRAMATORSKY MASHINOSTROITELNY ZAVOD" with year economy effect 42500 UAH;

- public joint-stock company "KZTS" with year economy effect 32700 UAH;

- studying programs of the Donbass state engineering academy (Kramatorsk)

Keywords: operating environment, sectional stepped cutter, mathematical model, stress–strain state, dynamic characteristics, multicriteria optimization.

REFERENCES

1. Bohdanova, L. M., Vasilyeva, L. V., Guzenko, D. E., Kolodyazhny, V. M. (2018). A Software System to Solve the Multi–Criteria Optimization Problem with Stochastic Constraints. *Cybernetics and Systems Analysis*, 54(6), 1013–1018.
2. Myronenko Y. Heavy vertical lathe equivalent elastic system modeling / Y. Myronenko, S. Mirantsov, D. Huzenko // *Scientific journal of the Ternopil National technical university*. – Ternopil.: TNTU. – 2017. – №3(87) – C.90 – 102. – ISSN 2522–4433.
3. Myronenko E.V. Analiz mozhlyvostey vykorystannya riztsiv z tverdosplavnymy rizar'nymy plastynamy zi znosostiykymy pokryttyamy pry napivchystoviy obrobsi valkiv prokatnykh staniv / E.V. Myronenko, V.V. Kalinichenko, D.YE. Guzenko // *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. Zbirnyk naukovykh prats'*. – Kharkiv.: NTU «KHPI». – 2017. – Vyp 12. – S.116–125. – ISSN 2079–7499. (vydannya vklyucheno u dovidnyk periodychnykh vydan' *Ulrich's Periodicals Directory* (New Jersey, USA))
4. Myronenko YE. Spetsyfika vykorystannya tverdosplavnnykh rizar'nykh plastyn z pokryttyam pry chornoviy ta napivchystoviy tokarniy obrobsi detaley vazhkoho mashynobuduvannya / YE. Myronenko, V. Kalinichenko, V. Khoroshaylo, D. Guzenko // *Rizannya ta instrument v tekhnolohichnykh systemakh : Mizhnar. nauk.–tekhn. zb.* – Kharkiv : NTU «KHPI», 2019. – Vyp. 91. – S. 169–181.
5. Mironenko Ye.V., Bogdanova L.M., Guzenko D.Ye. Izucheniye funktsionirovaniya neyronnykh setey dlya opredeleniya optimal'nykh rezhimov rezaniya Nadiynist' instrumentu ta optymizatsiya tekhnolohichnykh system. Vyp. 35, 2014. 108–111.

6. Zbirnyy rizal'nyy instrument: pat. na korysnu model' 114219 Ukrayina, MKP B23B 27/16. – № a201606663; zayavl. 17.06.2016; opubl. 10.03.2017, byul. №5/2017.

7. Zbirnyy rizal'nyy instrument: pat. na korysnu model' 114465 Ukrayina, MKP B23B 27/16. – № u201609272; zayavl. 05.09.2016; opubl. 10.03.2017, byul. №5/2017.

8. Zbirnyy rizets': pat. na korysnu model' 116974 Ukrayina, MKP B23B 27/16. – № u201613463; zayavl. 27.12.2016; opubl. 12.06.2017, byul. №11/2017.

9. Rizal'nyy instrument: pat. na korysnu model' 134413 Ukrayina, MKP B23B 27/16.– № u201813096; zayavl. 29.12.2018; opubl. 10.05.2019, byul. № 9/2019.

10. Myronenko YE.V., Mirantsov S.L., Guzenko D.YE., Sytnik M.YU., Shtohrin D.H. Vplyv dynamichnykh kharakterystyk zbirnykh riztsiv na enerhoefektyvnist' protsesu rizannya // Nadiynist' instrumentu ta optymizatsiya tekhnolohichnykh system. Vyp. № 39, 2016. S. 153 – 158.

11. Mironenko Ye.V., Guzenko D.Ye. Snizheniye energozatrat protsessov mekhanicheskoy obrabotki detaley s primeneniyyem mnogokriterial'noy optimizatsii na baze neyrosetevoy modeli // Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoyi naukovo–tekhnichnoyi konferentsiyi 30 – 1 chervnya 2017 roku / Pid zah. red. V.D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2017. – S. 59.

12. Myronenko YE.V., Bohdanova L.M., Guzenko D.YE. Vykorystannya hibrydnoyi modeli optymizatsiyi dlya vyznachennya efektyvnykh rezhymiv rizannya Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoyi naukovo–tekhnichnoyi konferentsiyi 29 – 31 travnya 2018 roku // Pid zah. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2018. – S. 62.

13. Myronenko YE.V., Vasylyeva L.V., Guzenko D.YE. Optymizatsiya rezhymiv rizannya z urakhuvannyam stokhastychnykh parametriv–oznak // Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoyi

naukovo–tekhnichnoyi konferentsiyi 29 – 31 travnya 2018 roku / Pid zah. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2018. – S. 63.

14. Myronenko YE.V., Guzenko D.YE. Pidvyshchennya enerhoefektyvnosti mekhanichnoyi obrobky na bazi bahatokryterial'noyi optymizatsiyi neyromerezhevoyi modeli // Mashynobuduvannya Ukrainy ochyma molodykh: prohresyvni ideyi – nauka – vyrobnytstvo. Materialy mizhnarodnoyi naukovo–praktychnoyi konferentsiyi 31 zhovtnya – 02 lystopada 2018 roku / Pid zah. red. V.D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2018. – S. 138.

15. Myronenko YE. V., Mirantsov S. L., Guzenko D.YE. Analiz mekhanizmu vynyknennya optimal'noho rivnya avtokolyvan' // Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoyi naukovo–tekhnichnoyi konferentsiyi 04 – 07 travnya 2019 roku / Pid zah. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S. 87.

16. Myronenko YE.V., Vasyl'chenko YA.V., Guzenko D. YE., Kalinichenko V.V., Luhovyy A.A. Analiz konstruktsiyi zbirnoho tokarnoho riztsya z kriplennyam rizal'noyi plastyny za dopomohoyu klynovoho elementa ta prytysknoho hvynta // Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoyi naukovo–tekhnichnoyi konferentsiyi 04 – 07 travnya 2019 roku / Pid zah. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S.88.

17. Myronenko YE.V., Vasyl'chenko YA.V., Guzenko D.YE., Kalinichenko V.V., Luhovyy A.A. Analiz konstruktsiyi zbirnoho tokarnoho riztsya z kriplennyam rizal'noyi plastyny za dopomohoyu klynovoho elementa ta prytysknoho hvynta // Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy Mizhnarodnoyi naukovo–tekhnichnoyi konferentsiyi 04 – 07 travnya 2019 roku / Pid zah. red. V.D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S.90.

18. Myronenko YE.V., Mirantsov S.L., Guzenko D.YE. Prohramno–matematychnyy kompleks dlya bahatokryterial'noyi optymizatsiyi parametriv tokarnoyi obrobky na vazhkykh verstakh // Suchasni tekhnolohiyi promyslovoho

kompleksu. Materialy V-oyi Mizhnarodnoyi naukovo–praktychnoyi konferentsiyi 10...15 veresnya 2019 roku – Kherson: KHNTU, 2019. – S. 24.

19. Myronenko YE.V., Mirantsov S.L., Guzenko D.YE. Bahatokryterial'na optymizatsiya parametriv tokarnoyi obrobky na vazhkykh verstakh // Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system. Materialy tez dopovidey IX Mizhnarodnoyi naukovo–praktychnoyi konferentsiyi – Chernihiv: CHNTU, 2019. – S. 67–68.

20. Myronenko YE.V., Kalinichenko V.V., Guzenko D.YE. Perspektyvy vykorystannya riztsiv z tverdospлавnymy rizal'nymy plastynamy zi znosostiykymy pokryttyamy pry chornoviy obrobtsi valkiv prokatnykh staniv z velykymy diametramy bochky valka. Materialy dopovidey VIII Mizhnarodnoyi naukovo–praktychnoyi konferentsiyi «Prohresyvni tekhnolohiyi u mashynobuduvanni RTME–2019» 4–8 lyutoho 2019r. – Ivano–Frankivs'k – Yaremche, 2019. S. 71–173.

ЗМІСТ

ВСТУП	24
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ.....	31
1.1 Виробничі умови чорнової обробки деталей на важких верстатах...	31
1.2 Конструкції збірних різців для чорнової обробки на важких токарних верстатах	35
1.3 Питання міцності інструменту при чорновій обробці деталей.....	38
1.4 Вплив коливань на міцність і стійкість інструменту	40
1.5 Методи багатокритеріальної оптимізації та програмне забезпечення	44
1.6 Висновки щодо огляду робіт і постановка задач дослідження.....	50
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	52
2.1 Структурно-логічна схема роботи	52
2.2 Методика дослідження надійності збірних різців.....	53
2.3 Методика дослідження напружено-деформованого стану ступінчастих збірних різців	57
2.4 Математичний апарат багатокритеріальної стохастичної оптимізації	65
2.4.1 Генетичний алгоритм для вирішення виробничих задач	65
2.4.2 Математична модель генетичного алгоритму	66
2.4.3 Нейронні мережі у задачі оптимізації параметрів технологічного процесу	69
2.4.4 Математична модель нейронної мережі	72
2.5 Висновки до розділу	75
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ СТУПІНЧАСТОГО ЗБІРНОГО РІЗЦЯ.....	76
3.1 Аналіз умов експлуатації збірних різців при чорновій обробці деталей	76
3.2 Розробка збірного різця з новою схемою ступінчастого різання	79

	22
3.3 Дослідження впливу конструктивних схем вузлів кріплення на напружено-деформований стан різальних пластин	80
3.4 Виробничі випробування конструкцій збірних різців	85
3.5 Вдосконалення вузла кріплення різальних пластин ступінчастих збірних різців	88
3.6 Аналітичні дослідження ступінчастого збірного різця	89
3.7 Дослідження надійності збірних різців нової конструкції	93
3.8 Висновки до розділу	96
РОЗДІЛ 4. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ РІЗАННІ СТУПІНЧАСТИМИ РІЗЦЯМИ	98
4.1 Структурна модель динамічної системи важкого токарного верстата при різанні ступінчастими різцями	98
4.2 Розрахункова схема еквівалентної пружної системи важкого токарного верстата для випадку різання ступінчастими різцями	101
4.3 Рівняння, що описують зв'язок елементів режиму різання ступінчастими різцями зі значеннями складових сили різання	106
4.4 Система диференціальних рівнянь, що описує динамічні процеси в технологічній системі	109
4.5 Програмна реалізація моделі технологічної системи важких токарних верстатів	110
4.6 Перевірка адекватності моделі технологічної системи токарного верстата	118
4.7 Аналітичні дослідження динамічних характеристик збірних різців при обробці деталей на важких верстатах	122
4.8 Висновки до розділу	129
РОЗДІЛ 5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТУПІНЧАСТИХ ЗБІРНИХ РІЗЦІВ	131
5.1 Процес оптимізації з застосуванням гібридного алгоритму	131
5.2 Вибір критеріїв оптимальності	136

5.3 Рекомендації по визначенню оптимальних параметрів різання при експлуатації ступінчастих збірних різців.....	139
5.4 Висновки до розділу	145
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	148
ДОДАТКИ	162

ВСТУП

Актуальність проблеми. На сучасному етапі розвитку економіки України важливе місце приділяється машинобудуванню. Машинобудування розвивається шляхом підвищення гнучкості виробництва та якості продукції. Результати діяльності багатьох підприємств у значній мірі залежать від ефективності використання важких токарних верстатів. Вартість цих верстатів у 20...50 разів, а вартість верстатогодини їхньої роботи в 3...7 разів більше в порівнянні із середніми верстатами.

Проблема теоретичного аналізу процесу різання для більшості видів обробки вивчена досить досконально. Однак існують види обробки, особливо при знятті великих перерізів зрізаного шару, для яких існуючі методи аналізу вимагають удосконалення.

Враховуючи важкі умови різання, підвищення ефективності чорнового точіння сталених деталей протягом багатьох років відноситься до найбільш актуальних задач металообробки та машинобудування.

Одним із напрямків рішення цієї задачі є вдосконалення конструкцій збірних різців зі ступінчастою схемою різання та оптимізація режимів різання. В вирішенні першої частини цієї проблеми одержані суттєві позитивні результати. Добре зарекомендували себе інструменти з механічним кріпленням різальних пластин спеціальної форми з уступом під прихоплювач та різальні пластини з тангенціальним розміщенням. Для підвищення ефективності токарної обробки сталених заготовок розроблена система раціональної експлуатації різальних інструментів, видані загальномашинобудівні нормативи режимів різання. Аналогічні рекомендації присутні у каталогах різальних інструментів закордонних фірм. Однак, незважаючи на постійну увагу до проблеми підвищення ефективності чорнкової токарної обробки, залишаються ще значні резерви для більш успішного її рішення.

Ефективність інструменту не може бути істотно підвищена за рахунок тільки традиційних методів. Складність прийняття рішень в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва унікальних деталей на важких токарних верстатах та необхідність комплексного розгляду багатьох елементів технологічної системи вимагає створення методів багатокритеріальної оптимізації режимів експлуатації на основі узагальнених моделей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до перспективного плану науково–дослідних робіт Донбаської державної машинобудівної академії: Дк–01–2014 «Підвищення надійності та продуктивності комп'ютеризованих мехатронних верстатоінструментальних систем важкого машинобудування» (0114U002757), Д–01–2015 «Підвищення енергоефективності процесів механообробки на основі багатокритеріальної оптимізації параметрів технологічних систем важкого машинобудування» (№0115U003122), Дк–01–2018 «Підвищення енергоефективності мехатронних верстатоінструментальних систем механічної обробки в умовах важкого машинобудування».

Тема дисертаційної роботи відповідає науковій тематиці кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструменти та технології» ДДМА в області проектування збірних різального інструменту.

Мета і задачі досліджень. Підвищення ефективності чорнової обробки деталей на важких токарних верстатах шляхом вдосконалення конструкцій збірних ступінчастих різців. Під підвищенням ефективності розуміється підвищення продуктивності, надійності конструкцій та експлуатаційних характеристик збірних ступінчастих різців для чорнової обробки з великими перерізом зрізуваного шару деталей на важких верстатах.

Для здійснення поставленої мети треба вирішити такі завдання:

– проаналізувати характер та структуру відмов збірних різців для чорнової обробки деталей з великим перерізом зрізуваного шару на важких верстатах в умовах складних динамічних навантажень;

- розробити ефективну конструктивну схему розподілу припуску між різальними пластинами ступінчастих збірних різців;
- виявити вплив елементів режиму різання з великими перерізами зрізуваного шару при чорновій обробці деталей на напружено–деформований стан ступінчастих збірних різців;
- розробити математичні моделі для опису динамічної системи верстат–інструмент–деталь для дослідження коливань збірних ступінчастих різців, перевірити адекватність математичної моделі шляхом проведення експерименту;
- розробити систему цільових функцій багатокритеріальної оптимізації для розробки рекомендацій з експлуатації ступінчастих збірних різців для важких токарних верстатів, які дозволяють здійснити оптимальний вибір режимів різання з урахуванням міцності та динамічних навантажень ступінчастих збірних різців.

Об'єкт дослідження – процес чорнової обробки деталей на важких токарних верстатах при знятті великих перерізів зрізуваного шару.

Предмет дослідження – параметри процесу чорнової обробки збірними ступінчастими різцями при знятті великих перетинів зрізу, вплив конструктивних і геометричних параметрів на ефективність експлуатації інструмента.

Методи досліджень. Методологічною основою роботи є комплексний підхід до вивчення процесу чорнової обробки деталей з великими перерізами зрізуваного шару на важких верстатах ступінчастими збірними різцями з урахуванням умов, особливостей та закономірностей їх експлуатації.

Статистичні та теоретичні дослідження проводилися на базі основних положень і методів теорії різання металів, теорії міцності і динаміки збірних конструкцій різців, теорії математичного і фізичного моделювання з використанням методів прикладної математики за допомогою обчислювальної техніки.

Дослідження об'єктів проводилось експериментальними методами на основі теорій визначення міцності та жорсткості елементів збірних конструкцій різців з використанням методик натурних випробувань у лабораторних та виробничих умовах.

Для розрахунку напружено-деформованого стану збірного інструменту використовувався метод скінченних елементів. Експериментальні дослідження проведені з використанням методик, розроблених на основі теорії експерименту та математичної статистики, сучасної вимірювальної апаратури, розроблених апаратних засобів. В розрахунках і для обробки результатів досліджень використовувалась сучасна комп'ютерна техніка та програмне забезпечення.

Наукова новизна одержаних результатів. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень для підвищення ефективності процесу чорнового точіння деталей розроблена нова конструктивна схема розподілу припуску між різальними пластинами ступінчастого збірного різця з однією робочою вершиною різального ступінчастого леза, яка забезпечує високу продуктивність та експлуатаційні характеристики інструменту при обробці з великими перетинами зрізу на важких токарних верстатах.

1. Розроблені моделі напружено–деформованого стану різальних пластин збірних ступінчастих різців з новою схемою розподілу припуску, які вперше враховують особливості контактної взаємодії різальних пластин з елементами зрізуваного шару, механічного закріплення та корпусом інструменту.

2. Уточнено розподіл реакцій з боку упорних поверхонь пластини з елементами базування збірних різців при різних способах закріплення та навантаження силами різання, що дозволяє виявити найбільш ефективну схему базування різальної пластини.

3. Вперше розроблена розрахункова схема та математична модель динамічної системи верстат–інструмент–деталь, яка враховує конструкцію та характер навантаження ступінчастого різця з однією робочою вершиною

різальних лез як підсистему, що складається з окремих елементів. Отримані динамічні характеристики процесу чорнової обробки збірними ступінчастими різцями для уточнення конструктивних та геометричних параметрів ступінчастих збірних різців.

4. Вдосконалено систему функцій для багатокритеріальній оптимізації процесу вибору ефективних параметрів експлуатації ступінчастих збірних різців.

Практичне значення одержаних результатів для важкого машинобудування:

- розроблено математичне та програмне забезпечення для розрахунку динамічних характеристик при оцінюванні конструкції збірних різців з метою збільшення періоду стійкості інструменту на операціях токарної обробки деталей важкого машинобудування та верстатобудування;

- на базі проведених досліджень та розрахунків міцнісних та жорсткісних параметрів вузлів кріплення різальних пластин була розроблена конструкція ступінчастого збірного різця з механічним кріпленням пластин із однією робочою вершиною різального ступінчастого леза для чорнового точіння при знятті великих перерізів зрізуваного шару;

- розроблені конструкції вузлів кріплення різальних пластин збірних різців для чорнового точіння дозволяють підвищити продуктивність обробки в середньому на 35 %, а також знизити витрати інструменту на 21...26 %, а також можуть бути використані для проектування конструкцій збірних інструментів для механічної обробки в інших областях машинобудування;

- на основі створеної на базі нейромережевої моделі багатокритеріальної оптимізації процесу чорнової обробки деталей розроблені рекомендації для призначення раціональних режимів різання при експлуатації ступінчастих збірних різців, які дозволяють суттєво підвищити продуктивність чорнової обробки деталей з великими перерізами зрізуваного шару і забезпечити оптимальну стійкість інструменту.

Результати роботи впроваджені:

- ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» з річним економічним ефектом 42500 грн.;
- ПрАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування» з очікуваним економічним ефектом 32700 грн.;
- у навчальному процесі Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ)

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати отримані здобувачем самостійно. Здобувач здійснив наукове обґрунтування розробок в сфері створення збірних ступінчастих різців для чорнового точіння при знятті великих перерізів зрізуваного шару, що забезпечує вирішення важливої прикладної задачі – підвищення ефективності обробки на важких токарних верстатах. Постановка задач і аналіз наукових результатів виконані разом з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися на 11 наукових міжнародних конференціях, у тому числі на міжнародних: XV Міжнародній науково–технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку». (м. Краматорськ, 2017 р.), XVI Міжнародній науково–технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2018 р.), XVII Міжнародній науково–технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2019 р.), XVIII Всеукраїнській молодіжній науково–технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Краматорськ, 2018 р.).

Публікації. Основні положення і результати дисертації опубліковані у 20 наукових роботах, з них: 1 стаття у виданнях, включених у міжнародні науково–метричні бази; 4 статті у наукових фахових виданнях, 4 патентах, 11 – у збірниках тез доповідей.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 184 сторінках друкованого тексту, складається з анотації двома мовами, вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Робота ілюстрована 22 таблицями та 67 рисунками. Список використаних джерел містить 134 найменування.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ

1.1 Виробничі умови чорнової обробки деталей на важких верстатах

Виробництво важкого металургійного, транспортного та енергетичного обладнання є основою машинобудування України, яке відрізняється широкою номенклатурою та розмірами деталей, дрібносерійністю виробництва, та специфічними технологічними процесами обробки великогабаритних деталей.

Видалення ливарної або кувальної кірки є однією з основних цілей чорнової обробки. Як правило, кірки мають абразивні включення, характеризуються значними коливаннями припуску та обробка таких поверхонь викликає певні труднощі. При чорновій обробці виникають значні сили різання від 2 до 150 кН. Потужності, що витрачаються при чорновій обробці, зазвичай знаходяться в межах від 10 до 100 кВт. На чорнову обробку витрачається велика кількість твердого сплаву, причому до 90% різальних інструментів виходить з ладу через руйнування або нерівномірний знос. На важких токарних верстатах виконується обробка деталей широкої номенклатури, таких як опорні валки прокатних станів, ротори турбін і багато інших (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Чорнова обробка деталі на важкому токарному верстаті

Враховуючи важкі умови різання, підвищення ефективності чорнового точіння сталевих деталей протягом багатьох років належить до найбільш актуальних завдань металообробки та машинобудування.

Спостереження за експлуатацією твердосплавних різців на важких токарних верстатах показали, що наряду зі зносом суттєве місце займає руйнування різальної частини інструменту. Присутність таких відказів в значній мірі знижує ефективність обробки деталей.

Вихідним етапом вдосконалення конструкцій збірних різців є аналіз середовища функціонування інструменту за допомогою банку статистичних даних. При зборі даних про функціонування інструменту використовуються різні методи. В роботі застосовувався метод моментних спостережень, який полягає в тому, що в випадкові моменти часу обходяться верстати, що цікавлять дослідника, і фіксується стан і умови обробки. Час перебування інструменту в стані методу спостереження (процес різання, процес заміни інструменту, та інші) або роботи в відповідних умовах (матеріал і типорозмір деталі, стан її поверхні, глибина різання та інші) прямо пропорційні числу зафіксованих випадків знаходження в цьому стані або при цих умовах.

Приблизно 75% загальної трудомісткості обробки деталей на важких верстатах становить чорнова обробка і тільки 25% – чистова, причому 50% часу займає обробка по кінці, 20% - обробка з переривами процесу різання [86, 111]. Це вимагає підвищеної уваги до питань міцності інструменту.

Для найбільш повного уявлення про величини параметрів умов експлуатації інструменту дають їх розподіли. На рисунку 1.2. наведені розподіл діаметрів заготовок D_z , які обробляються на важких токарних верстатах типорозміру D_c

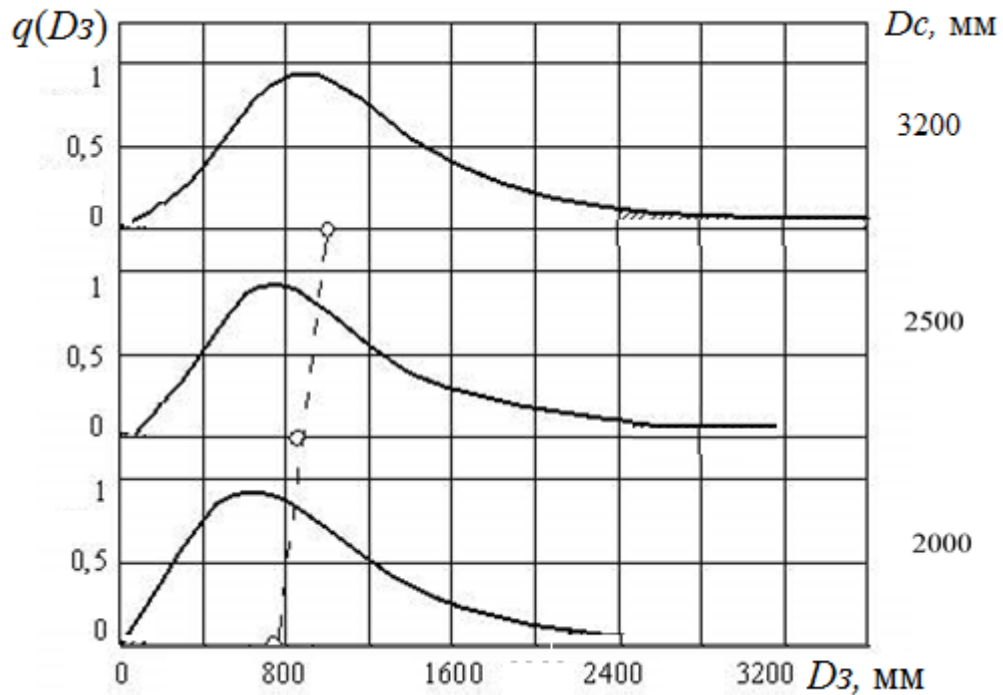


Рисунок 1.2 – Розподіл діаметрів заготовок D_3 (суцільна лінія і середнє значення діаметрів штрихова), які обробляються на важких токарних верстатах (D_C)

Діапазон діаметрів і довжин деталей, які обробляються на важких верстатах, дуже великий, що обумовлює значне розсіювання величини припуску. Крім того, розподіл припуску при чорновій обробці по кінці, зазвичай, є нерівномірним. Розподіл основного часу t_o роботи до закінчення проходу представлено на рисунку 1.3.

Період стійкості різців T на важких верстатах в середньому дорівнює 40...90 хв. Величина періоду стійкості, крім економічних і організаційних факторів, залежить від міцності і зносостійкості інструменту. Тому створення більш міцних конструкцій впливає не тільки на рівень режимів різання і основний час, але і на загальний час заміни інструменту, тобто допоміжний час.

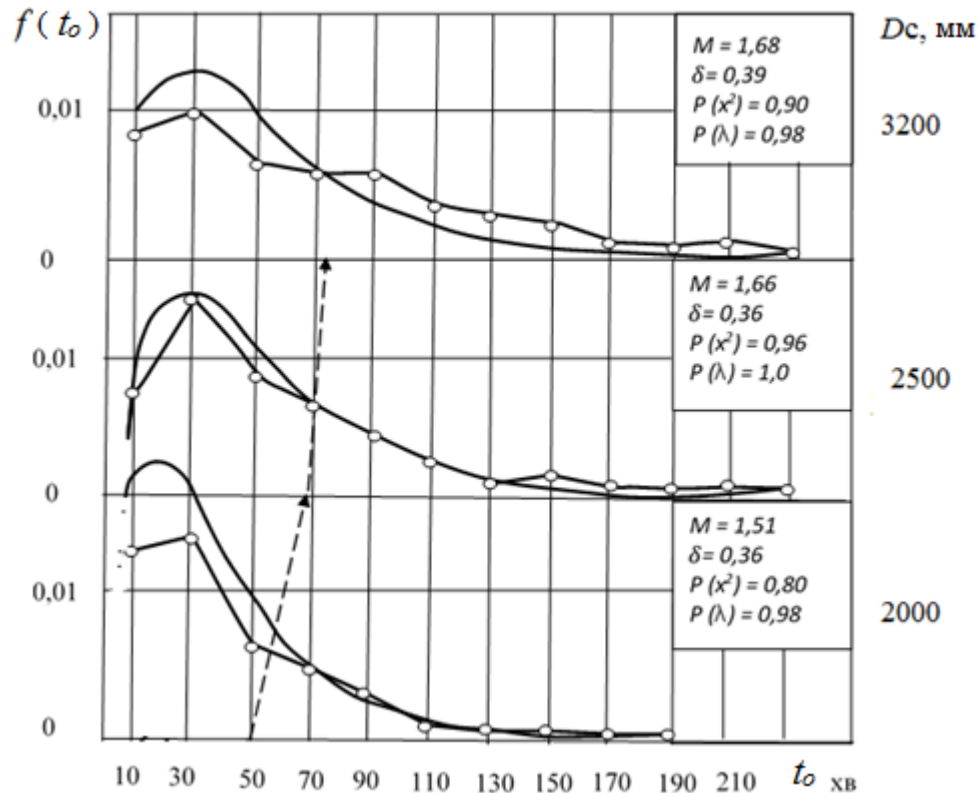


Рисунок 1.3 – Розподіл часу роботи різців до закінчення проходу $f(t_o)$ (суцільна лінія) і середнє значення часу роботи різця до закінчення проходу (штрихова)

Для подальших розрахунків важливо також знати, як у взаємозв'язку розподіляються глибина різання і період заміни інструменту. Для цієї мети були проаналізовані двовимірні розподілу, мають вигляд купола. На рисунку 1.4 показані лінії, отримані при перетині цієї поверхні з площинками постійних частот $0,1 \dots 1,3$.

Щільність розподілу виражається рівнянням:

$$f(t, t_o) = \frac{0.4343}{\delta_t \cdot \delta_{t_o} \cdot 2\pi} \ell^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(\lg t - M_t)^2}{\delta_t^2} + \frac{(\lg t_o - M_{t_o})^2}{\delta_{t_o}^2} \right]} \quad (1.1)$$

де $\delta_t = 0,29$; $\delta_{t_o} = 0,39$; $M_t = 1,12$; $M_{t_o} = 1,6$.

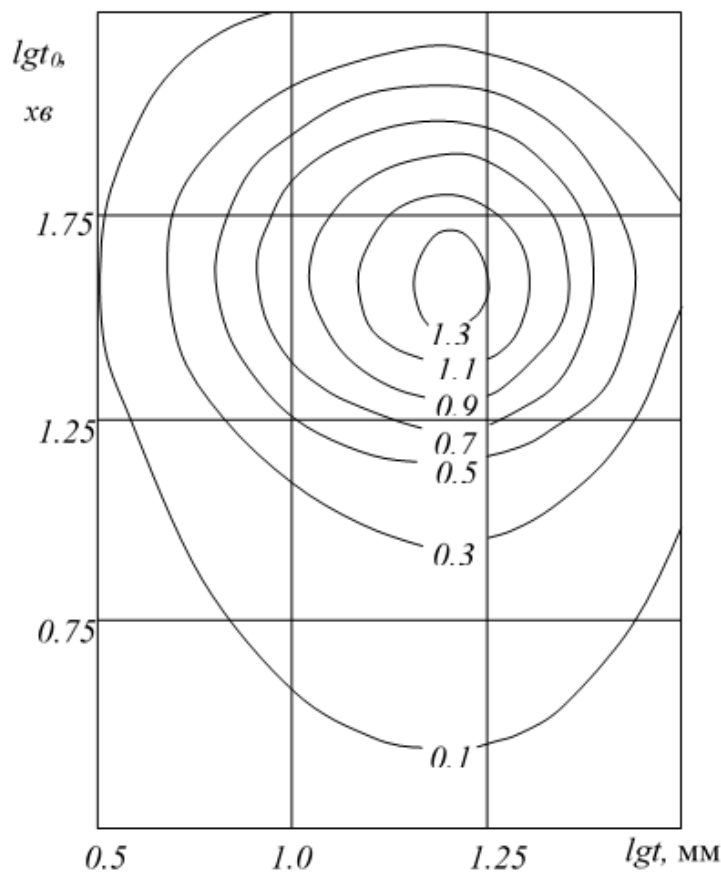


Рисунок 1.4 Поверхня глибини різання і періоду заміни інструменту

1.2 Конструкції збірних різців для чорнової обробки на важких токарних верстатах

В роботі розглядається інструмент, призначений для обробки деталей, які мають припуски більше 50мм, на важких і унікальних токарних верстатах з найбільшим діаметром встановлюваного виробу 2000...4000мм (відповідно висота перетину державки різця $H > 63\text{мм}$).

Для чорнової обробки з великими перерізами зрізуваного шару в теперішній час застосовують збірні конструкції різців з механічним кріпленням різальних пластин, в тому числі зі ступінчастою схемою різання. Добре зарекомендували себе інструменти з механічним кріпленням різальних пластин фірми «Sandvik Coromant» для важких верстатів з ручним управлінням (рис. 1.5) [106].



Рисунок 1.5 – Ступінчастий збірний різець з механічним кріпленням тангенціально розміщених змінних різальних пластин

Така конструкція кріплення пластин найбільш ефективно може застосовуватися при чорновій обробці чавуну. Недоліком такого конструктивного рішення є те, що при зміні різального леза (поворот пластини) базування різальної пластини по опорній поверхні відбувається по зношеній частині передньої поверхні, яка була в роботі.

Для менш навантажених ступінчастих різців застосовуються багатогранні різальні пластини, які розширюють область механічної обробки різних матеріалів але суттєво знижують продуктивність чорнової обробки з великими перерізами зрізуваного шару через низьку міцність різальних пластин (рис. 1.6, 1.7).

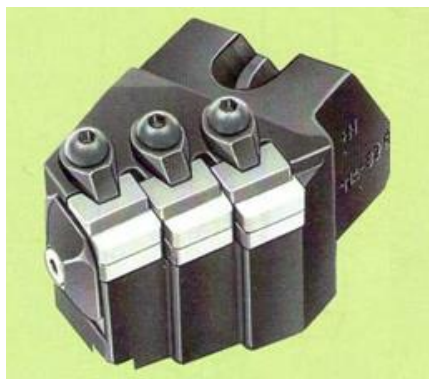


Рисунок 1.6 – Ступінчастий збірний різцевий блок з кріпленням багатогранних пластин без отвору прихоплювачем.

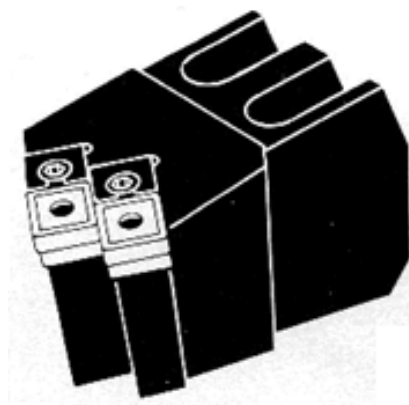


Рисунок 1.7 – Ступінчастий збірний різцевий блок з кріпленням змінних багатогранних пластин з центральним отвором.

При обробці сталей потрібно мати можливість змінювати геометричні параметри різального леза для забезпечення надійного стружкодробління при чорновому точінні різних марок конструкційних сталей та ефективних режимів різання. В цих випадках найбільш ефективно застосовують переточувальні різальні пластини з уступом, закріплювання яких відбувається прихоплювачем зі стружколомаючою поверхнею, яка забезпечує найбільш ефективне стружкодробління (рис. 1.8).

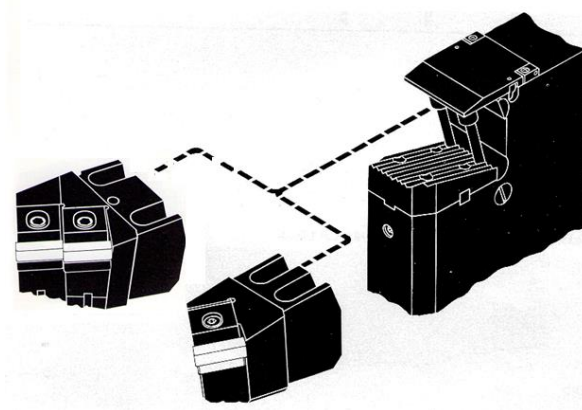
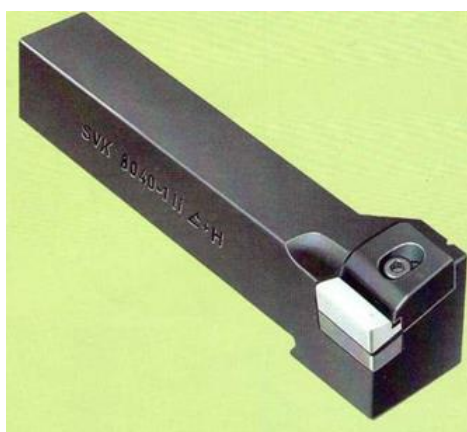


Рисунок 1.8 – Збірні конструкції різців з механічним кріплення змінних різальних пластин прихоплювачем для верстатів токарної групи, в тому числі верстатів з ЧПК

Конструкційними особливостями вузла кріплення пластин з уступом є те, що базування останніх по упорній поверхні відбувається з прихоплювачем по нижній поверхні уступу, що суттєво віддаляє базову поверхню від зони різання.

Важливу роль при проектуванні інструменту мають параметри оброблюваних деталей і технічні вимоги до них. Властивості оброблюваних матеріалів навіть в межах однієї групи зазнають суттєвих змін, тому повинна бути передбачена можливість зміни геометричних параметрів різального леза. Це може бути здійснено тільки шляхом використання різальних пластин, які переточуються [3, 105].

1.3 Питання міцності інструменту при чорновій обробці деталей

Одним з напрямків підвищення ефективності чорнового точіння є вдосконалення конструктивних параметрів різців, різальних пластин та вибору оптимальних режимів різання.

Окремими проблемами процесів механічної обробки, конструкціями різальних інструментів займалися дослідники, що внесли великий внесок у розвиток теорії різання матеріалів, проектування різальних інструментів, формоутворення технологічних систем. До них відносяться: Адам Я.І., Антонюк В.С., Бобров В.Ф., Васильченко Я.В., Грабченко А.І., Грановський Г.І., Залога В.О., Зорев М.М., Кабалдін Ю.Г., Карпусь В.Е., Карюк Г.М., Клименко Г.П., Ковальов В.Д., Ковалевський С.В., Кузнецов Ю.М., Лебідь В.Т., Лоладзе Т.М., Мазур М.П., Макаров В.Д., Мироненко Е.В., Остаф'єв В.О., Пермяков О.А., Петраков Ю.В., Подураев В.М., Равська Н.С., Рижов Э.В., Родін П.Р., Розенберг О.О., Струтинський В.Б., Темчин Г.І., Тимофєєв Ю.В., Шелковой А.Н. Хаєт Г.Л., Якимов О.В. та ін.

Дослідження умов експлуатації [37, 42; 43, 44, 46, 49, 66, 70] різальних інструментів при обробленні деталей на важких верстатах показує, що поряд

зі зношуванням значне місце займають викришування та руйнування різальної частини. В роботах Т.Н. Лоладзе [57], Н.В. Талантова [104], Г.Л. Хаєта [110] та ін. [55, 115,] зазначався також вплив пластичних деформацій в зоні різання на міцності ріжучого леза, які призводять до руйнування інструменту і знижують надійність його роботи.

Перші роботи з дослідження надійності інструменту були виконані Бетанеллі А.О. [9], Кацевим П.Г. [8, 41], Хаєтом Г.Л. [107, 108], Лоладзе Т.Н. [57]. Н.Н. Зоревим [37], А.Д. Макаровим [58], Равскою Н.С. [82, 83], Клименко Г.П. [45] та ін. зазначався істотний вплив на характеристики обробленої поверхні фізичних явищ: зносу інструменту і його нерівномірності, наросту і застійної зони, сил різання. Зміна міцності інструменту в процесі експлуатації, стохастичний характер процесів [19, 20, 81], що призводять до руйнування інструменту, необхідність врахування багатьох факторів, що мають місце на виробництві, обумовлюють використання методів теорії надійності. В роботах [1, 4, 5, 7, 21, 26, 27, 29,] вивченню приділяється велика увага надійності інструменту, яка дозволяє отримати моделі для подальшої оптимізації параметрів інструментів і режимів експлуатації.

Однак взаємозв'язок характеристик обробленої поверхні, зношування інструменту і стружкоутворення у всіх цих роботах практично не розглядалася, оскільки це вимагало моделювання системи різання. Крім того, точність, з якою розраховувалися характеристики процесів стружкоутворення і зношування, була все ще недостатньою для цих цілей. Нові можливості вирішення цього завдання з'явилися з розвитком засобів обчислювальної техніки і програмування. Саме вони дозволяють використовувати для опису складного взаємозв'язку фізичних характеристик системи різання не тільки найпростіші функції, а й чисельні методи інтегрування та складні обчислювальні алгоритми.

1.4 Вплив коливань на міцність і стійкість інструменту.

Процес різання металів обробки супроводжується наявністю коливань. Вивченню коливань елементів технологічної системи, їх впливу на характеристики процесу обробки присвячена велика кількість теоретичних і експериментальних робіт В.А. Кудинова, Д.Т. Васильєва, А.Я. Малкіна, В.Н. Подураєва, А.О. Етін, В.В. Каминської та ін.

Про механізм впливу коливань на стійкість і міцність інструменту є різні думки: одні дослідники вважають основною причиною зниження стійкості інструменту при коливаннях – зміну дійсної швидкості різання, інші – зміну сил, що діють на ріжучу кромку. При використанні інструментів з механічно закріпленими різальними пластинами постає питання про розгляд частот коливань елементів вузла кріплення різальної пластини.

В.А. Остаф'єв [76] розглядає міцність інструментального матеріалу в умовах складного напруженого стану, що виникає при навантаженні інструменту силами різання, застосовуючи метод скінченних елементів. Ним встановлено, що збільшення амплітуди і частоти коливань при інших рівних умовах скорочує час до руйнування ріжучої частини, якщо виникаюча при цьому амплітуда коливань напруження і середнє значення напруження циклу перевищує межу втоми, яка досягається за час, менший заданого періоду стійкості інструменту.

В роботах [60, 61, 77] вплив коливань на стійкість інструменту оцінюється розрахунковим шляхом через зміну дійсної швидкості різання. Справжня швидкість різання при цьому визначається формулою:

$$V=V_o+0,377\cdot A_z\cdot f\cdot\cos\omega t \quad (1.2)$$

де V – дійсна швидкість різання, м / хв;

V_o – розрахункова швидкість різання, м / хв;

A_z – амплітуда коливань, мм;

$$\omega = 2\pi f;$$

f – частота коливань, Гц.

В роботах [61, 98, 103] встановлено, що стійкість інструменту приблизно зворотно пропорційна частоті і амплітуді коливань в напрямку, перпендикулярному напрямку швидкості різання.

При аналізі впливу коливань на експлуатаційні властивості інструменту використовується наступна формула:

$$T_{\phi} = \frac{2T_o}{(1+A \cdot \omega/V)^n + (1-A \cdot \omega/V_o)^n} \quad (1.3)$$

де T_{ϕ} – фактична стійкість, хв;

T_o – стійкість інструменту при відсутності коливань;

A – амплітуда коливань в площині дії сили P_z , мкм;

ω – кругова частота, рад/с;

V_o – розрахункова швидкість різання;

n – постійна для даного інструментального матеріалу.

Цілий ряд досліджень в цьому напрямку виконано в Донбаській державній машинобудівній академії [71, 72,]. Наводяться рівняння, що зв'язують стійкість інструменту до руйнування з механічними властивостями інструментального матеріалу і характеристикою циклу навантаження ріжучого леза при коливаннях, експериментальна перевірка якого була виконана при роботі відрізними різцями. Встановлено, що коливання низької частоти сприяють руйнуванню ріжучої частини різців, а високочастотні коливання підсилюють їх знос. Відзначається, що амплітуда коливань має на стійкість більший вплив, ніж частота.

А.Я. Малкіним запропонована [60] система показників якості різального інструменту, в яку складовою частиною входять показники динамічної якості різального інструменту, що відображають вплив динаміки процесів, що мають місце в системі «верстат-інструмент-деталь», на стійкість і продуктивність

різального інструменту. Динамічна якість інструменту характеризується наступними параметрами: частотами власних коливань, жорсткістю пружної системи інструменту, коефіцієнтами демпфірування, зміною цих коефіцієнтів в процесі різання, здатністю інструментального матеріалу витримувати циклічні напруження, ту чи іншу величину розмаху коливань змінної складової сили різання. Одним з найважливіших параметрів динамічної якості інструменту є його амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), яка представляє собою залежність відношення зсуву різального леза інструменту до сили різання від частоти коливань. В рамках дослідження показників динамічної якості інструменту виконаний ряд робіт, які показали, зокрема, що без створення спеціальних стендів і методик неможливо оцінити вплив коливань на стійкість і міцність інструменту [25].

Для кожної форми тангенціальних і осьових коливань існує критична амплітуда, підвищення якої призводить до різкого зниження стійкості інструменту, причому коливання в тангенціальному напрямку кількісно більшою мірою впливають на знос інструменту, ніж коливання в осьовому напрямку[28, 61, 71, 72, 76, 77,]..

Роздільний вплив на стійкість інструменту двох частотних складових не еквівалентний їх сумарному ефекту при одночасній дії цих же частотних складових при тих же самих амплітудах і інших рівних умовах обробки, тобто для умов випробувань не спостерігалось лінійного накопичення втомних пошкоджень при накладенні полігармонічних коливань. При спільному накладанні двох частотних складових величина питомого зносу, виходить або меншою або проміжною між значеннями питомого зносу, отриманих при роздільній дії цих же частотних складових.

Результати, отримані А.Д. Шустиковим при вільному різанні [113], дозволили йому з урахуванням основних положень динаміки верстатів, запропонувати модель на базі представлення еквівалентної пружної системи по зв'язку зі стійкістю інструменту.

Автор роботи [53] показує, що стійкість інструменту при коливаннях залежить не тільки від відносини швидкості коливального руху до швидкості різання, як це отримано в роботах ряду дослідників, а й від діючих при цьому навантажень, коефіцієнта тертя і від закону зміни цих параметрів у часі. Зміни зносостійкості і коефіцієнта тертя при варіюванні швидкості носять екстремальний характер. Тому, залежність стійкості інструменту при чорновій обробці деталей на важких верстатах від динамічного стану технологічної системи є більш складною, ніж це прийнято в наявних теоретичних розробках. В.А. Кудинов [53] вперше ввів поняття динамічної характеристики різання, яка описує залежність сили різання від зміни товщини зрізаного шару. Відповідно до теорії координатного зв'язку, розробленої В.А. Кудиновим, виникнення автоколивань в металорізальних верстатах обумовлено специфічними властивостями пружної системи верстата і, перш за все, наявністю статичної зв'язку між її узагальненими координатами. Наявність багатьох ступенів свободи пружної системи призводить до того, що відносні коливання заготовки та інструменту є сумою декількох, пов'язаних між собою, простих коливань. При двох координатах траєкторія відносного руху різця і заготовки являє собою еліпс і при русі різця по такій траєкторії товщина зрізу і сила різання змінюються таким чином, що при русі в сторону сили різання товщина шару, що зрізається більше, ніж при русі інструмента назустріч силі різання. В результаті виникає змінна складова ΔP сили різання, яка підтримує автоколивання. Введене вперше в роботах В.А. Кудинова загальновизнане поняття про замкнутість динамічної системи верстата для оцінки стійкості інструменту, при цьому можуть використовуватися амплітудно-частотні методи.

1.5 Методи багатокритеріальної оптимізації та програмне забезпечення

В даний час основним напрямком вирішення задачі підвищення ефективності є багатокритеріальна оптимізація [21, 26, 50, 65, 67, 72, 93, 96, 99]. Це пов'язано з тим, що при дослідженні досить складних систем і об'єктів, зокрема, технологічної системи на сучасному етапі постановка скалярної задачі оптимізації недостатня, побудова узагальнених функцій корисності та ефективності є проблемою великої складності, іноді нерозв'язної, але нагальні потреби практики проектування, створення і експлуатації вимагають обліку і узгодження різних вимог найкращим способом.

Розглянемо основні підходи до вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації:

- згортання критеріїв – будується супер-критерій, який є функцією від окремих критеріїв. При цьому багатокритеріальна задача зводиться до однокритеріальної;
- головний критерій – один критерій виділяється як головний, інші перетворюються в його обмеження – отримуємо задачу однокритеріальної оптимізації;
- послідовне рішення – вирішення низки задач однокритеріальної оптимізації, рішення, отримані на етапах, використовуються для побудови нових обмежень;
- звуження безлічі альтернатив;
- пошук альтернативи, яка володіє заданими властивостями.

Для оцінки ефективності вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації доцільно використовувати оптимальність по Парето – такий стан системи, при якому значення кожного окремого показника, що характеризує систему, не може бути покращено без погіршення інших [21].

В контексті предметної області «Підвищення ефективності чорнової обробки деталей ступінчастими різцями на важких токарних верстатах»

неможливо однозначно визначити важливість окремих параметрів оптимізації – необхідно виконувати оптимізацію відразу по всьому масиву параметрів.

Існуючі в наступний час методи пошуку оптимальних рішень можна розбити на 3 великі групи:

- детерміновані;
- випадкові (стохастичні);
- комбіновані.

Загальна постановка задачі багатокритеріальної оптимізації полягає в наступному. Відшукується мінімум кожної з сукупності функцій $f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x), \dots, f_p(x)$ [117]:

$$f_i(x) \rightarrow \min_x, i = 1, 2, \dots, p, \quad (1.4)$$

при заданих наборах умов:

$$\begin{cases} d'_1 \leq g_1(x) \leq d''_1; \\ \dots \\ d'_l \leq g_l(x) \leq d''_l; \end{cases} \begin{cases} h_1(x) = c_1; \\ \dots \\ h_s(x) = c_s; \end{cases} \begin{cases} a_1 \leq x_1 \leq b_1; \\ \dots \\ a_n \leq x_n \leq b_n. \end{cases} \quad (1.5)$$

де $f_i(x)$, $h_i(x)$, $g_i(x)$ – безперервні функції;

d'_i , d''_i , c_i , a_i , b_i – константи.

Формули, що задають постановку задачі, можуть бути поділені на такі групи:

1) формули, що відображають однозначні, детерміністичні зв'язки між параметрами; `

2) формули, що відображають наближені евристичні залежності, введені експертами для побудови адекватної моделі взаємодії досліджуваних факторів;

3) формули для статистичних параметрів, що мають стохастичну природу. Формули третьої групи для стохастичних параметрів-ознак

встановлюються в результаті вивчення та статистичної обробки експериментальних даних.

Позначивши статистично залежні фактори через $z = (z_1, \dots, z_q)$, вихідну задачу можна записати наступним чином:

$$f_i(x) \rightarrow \min_x, i = 1, 2, \dots, p, \quad (1.6)$$

за умов:

$$\begin{cases} h_i(x, z) = c_i, i = 1, \dots, s; \\ d'_i \leq g_i(x) \leq d''_i, i = 1, \dots, l; \\ a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, n; \\ P(\tilde{d}'_i \leq \tilde{g}_i(x, z) \leq \tilde{d}''_i), i = 1, \dots, r; \\ P(\tilde{a}_i \leq z_i \leq \tilde{b}_i), i = 1, \dots, q, \end{cases} \quad (1.7)$$

де $f_i(x)$, $h_i(x, z)$, $g_i(x)$, $\tilde{g}_i(x, z)$ – безперервні функції;

$c_i, d'_i, d''_i, a_i, b_i, \tilde{d}'_i, \tilde{d}''_i, \tilde{a}_i, \tilde{b}_i$ – константи;

$P(\dots)$ – ймовірність.

Передбачається, що задана спільна щільність розподілу ймовірності $\rho(x, z)$ – інтегрована, зазвичай кусочно-безперервна, функція, $\rho: R^{n+q} \rightarrow R^1$. Щільність розподілу $\rho(x, z)$ визначається шляхом завдання набору експериментальних точок – точок простору R^n : $X_0 := \{x_1, \dots, x_m\} \subset R^n$. Експериментальні дані, точки $x_k \in X_0$, беруть з банку статистичних даних по металообробці.

Так як випадкові обмеження $\tilde{d}'_i \leq \tilde{g}_i(x, z) \leq \tilde{d}''_i, i = 1, \dots, r,$ і $\tilde{a}_i \leq z_i \leq \tilde{b}_i, i = 1, \dots, q$, не визначають область допустимих рішень, то слід задати деякі довірчі ймовірності α_i, β_i , що служать для визначення ймовірності того, що обмеження не будуть порушені. Це призводить до імовірнісних обмежень, заданих у вигляді набору, в якому кожне з обмежень використовує своє значення довірчого рівня $\alpha_i, i = 1, \dots, r, \beta_i, i = 1, \dots, q$. У

разі використання одного значення довірчої ймовірності α , отримують об'єднане ймовірнісне обмеження виду [21]:

$$P\{\tilde{d}'_i \leq \tilde{g}_i(x, z) \leq \tilde{d}''_i, i = 1, \dots, r\} \geq \alpha. \quad (1.8)$$

Нейронні мережі (Neural network) і генетичні алгоритми (Genetic Algorithms) застосовуються для оптимізації, використовують навчання, мають свої сильні і слабкі сторони [22, 23,]. Розглянемо допоміжне об'єднання методів штучного інтелекту більш детально, коротку класифікацію наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Опис допоміжного об'єднання генетичного алгоритму та нейронної мережі

Вид об'єднання	Характеристика об'єднання	Приклади застосування
Допоміжні	Нейронні мережі для підтримки генетичних алгоритмів	Формування вихідної популяції для генетичного алгоритму
	Генетичні алгоритми для підтримки нейронних мереж	Аналіз нейронних мереж
		Підбір параметрів
		Підбір параметрів або правила навчання

1. Нейронні мережі для підтримки генетичних алгоритмів.

Більшість дослідників вивчали можливості застосування генетичних алгоритмів для забезпечення роботи нейронних мереж. До нечисленних зворотних випадків належить гібридна система, призначена для вирішення завдання трасування, яка класифікується як приклад допоміжного об'єднання нейронних мереж і генетичних алгоритмів. У цій системі генетичний алгоритм використовується в якості оптимізаційної процедури, призначеної для знаходження найкоротшого шляху. Нейронна мережа застосовується при формуванні вихідної популяції для генетичного алгоритму.

2. Генетичні алгоритми для підтримки нейронних мереж.

Відомо безліч робіт, присвячених об'єднанню генетичного алгоритму з нейронною мережею для підтримки останньої. Можна виділити три області проблем:

- застосування генетичного алгоритму для підбору параметрів або перетворення простору параметрів, використовуваних нейронною мережею для класифікації;
- застосування генетичного алгоритму для підбору правила навчання або параметрів, які керують навчанням нейронної мережі;
- застосування генетичного алгоритму для аналізу нейронної мережі.

Дві перші галузі застосування генетичних алгоритмів в нейронних мережах, дозволяють покращувати функціонування мереж (тобто вирішують проблему синтезу), тоді як третя служить для аналізу їх функціонування [10*].

В теорії прийняття рішень існує термін «принцип Парето», що полягає в тому, що в якості рішення багатокритеріальної задачі слід вибрати тільки той вектор x , який належить множині Парето. Принцип Парето не виділяє однозначної відповіді, а лише звужує безліч альтернатив. Остаточний вибір залишається за особою, яка приймає рішення. Але побудова безлічі Парето полегшує процедуру вибору. Це дозволяє ефективно використовувати методи аналітичного та статистичного моделювання при наявності великого числа обмежень в задачах пошуку оптимальних рішень.

Знаходження рішення задачі багатокритеріальної оптимізації, такій як оптимізація системи «верстат - інструмент - деталь», – складна і трудомістка справа. Використання ЕОМ позбавляє від необхідності виробляти велику кількість розрахунків «вручну», хоча і не усуває всіх проблем, пов'язаних з самою постановкою задачі. Для подолання проблем при прийнятті оптимальних рішень можливо, по-перше, створювати спеціалізовані пакети програм моделювання та аналізу технічних систем і пристроїв з урахуванням специфіки їх застосування для вирішення завдань структурної та параметричної оптимізації і, по-друге, вирішувати клас екстремальних задач в

інтерактивному режимі оптимізації [96, 99]. Такий підхід дозволяє поєднувати алгоритмічні процедури вирішення екстремальних задач з неформалізуємими прийомами прийняття оптимальних рішень, але для цього необхідно розробляти мовні та програмні засоби організації інтерактивного режиму оптимізації на сучасних ЕОМ.

Для вирішення задач багатокритеріальної оптимізації розроблено ряд систем діалогової оптимізації та вибору, серед яких можна відзначити наступні:

1. Прямий адаптивний метод вирішення багатокритеріальної задачі, заснований на нечіткій апроксимації функції переваг ОПР, реалізований у вигляді MatLab програми PREF-FUZZY [39]. Метод дозволяє знайти рішення задачі не більше ніж за 17 ітерацій. При цьому збільшення кількості «розгінних» точок мало впливає на точність рішення задачі і необхідну кількість ітерацій. До недоліків методу можна віднести те, що з кожною наступною ітерацією обчислювальна складність підвищується, оскільки збільшується кількість вхідних правил нечіткої системи.

2. Додаток Iscar Tool Advisor розроблено для допомоги у виборі інструменту з каталогу доступних для певної операції механічної обробки. Крім надання переліку інструменту, додаток самостійно вибирає кращі рішення для заданих параметрів, а також виконує розрахунок передбачуваних значень режимів різання, споживаної потужності і продуктивності кожного запропонованого варіанту. Інтерфейс програми представлений на рисунку 1.9.

Додаток має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і пропонує широкий спектр параметрів, які можна редагувати і змінювати для отримання більш точних запропонованих рішень. Результатом роботи є таблиці, що містять обраний інструмент і ряд розрахованих параметрів.

До недоліків цього додатка можна віднести:

- неможливість додавання власних інструментів;
- неможливість додавання власних матеріалів;

– недоступність деяких можливостей при відсутності зв'язку з інтернетом.

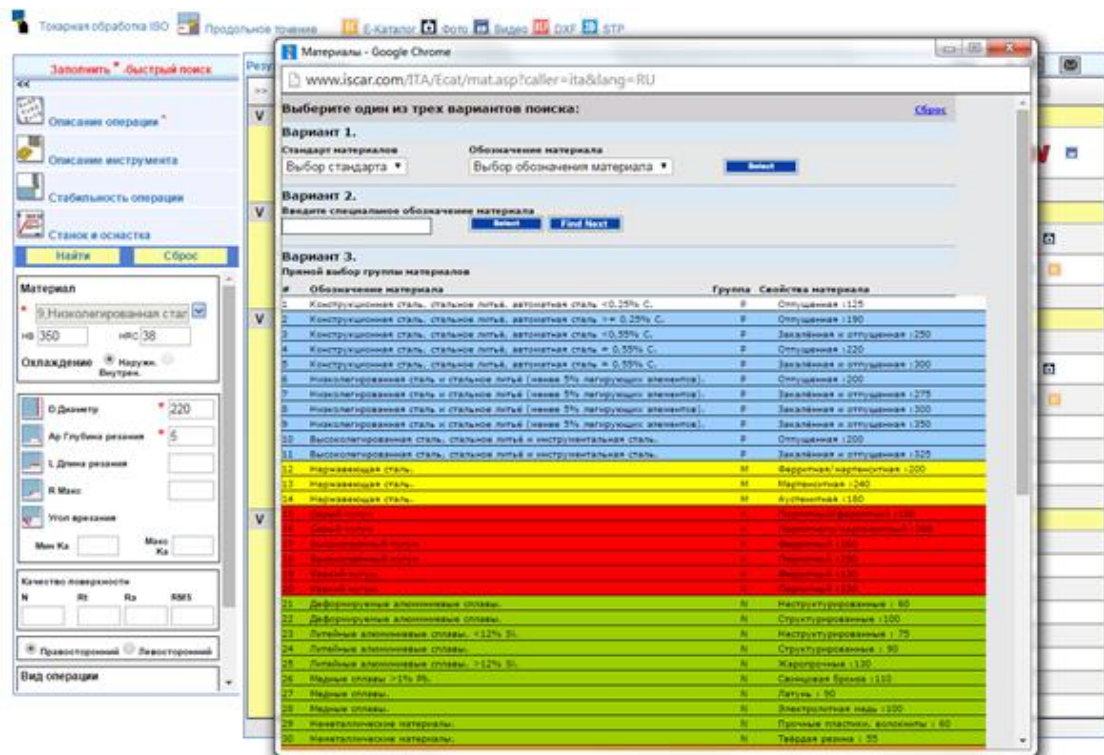


Рисунок 1.9 – Інтерфейс електронного каталогу Iscar Tool Advisor

Також слід зазначити, що додаток в першу чергу орієнтовано на завдання підбору інструменту для виконання певної операції, а не на оптимізацію.

1.6 Висновки щодо огляду робіт і постановка задач дослідження.

Підвищення ефективності чорнової токарної обробки деталей на основі теоретичних досліджень та практичного застосування нових схем різання інструментами при знятті великих перерізів зрізу, проблема дослідження взаємозв'язку динамічних явищ в процесі різання і вихідних характеристик цього процесу, таких як продуктивність, стійкість і міцність інструменту продовжує залишатися актуальною. Із аналізу літератури можна зробити

висновок, що одержані в результаті багатокритеріальної оптимізації рішення не однозначні, а чітка процедура вибору найкращого рішення не розроблена. В якості узагальненого критерія найбільш часто застосовується адитивна згортка, яка не зовсім коректно враховує вклад кожного критерія в загальний критерій при зміні виробничої ситуації. Одним із шляхів підвищення ефективності чорнової обробки деталей на важких токарних верстатах є вдосконалення конструкцій збірних ступінчастих різців.

Під підвищенням ефективності розуміється підвищення продуктивності, надійності конструкцій та експлуатаційних характеристик збірних ступінчастих різців для чорнової обробки з великими перерізом зрізуваного шару деталей на важких верстатах.

Для здійснення поставленої мети треба вирішити такі завдання:

- проаналізувати характер та структуру відмов збірних різців для чорнової обробки деталей з великим перерізом зрізуваного шару на важких верстатах в умовах складних динамічних навантажень;
- розробити ефективну конструктивну схему розподілу припуску між різальними пластинами ступінчастих збірних різців;
- виявити вплив елементів режиму різання з великими перерізами зрізуваного шару при чорновій обробці деталей на напружено-деформований стан ступінчастих збірних різців;
- розробити математичні моделі для опису динамічної системи верстат-інструмент-деталь для дослідження коливань збірних ступінчастих різців, перевірити адекватність математичної моделі шляхом проведення експерименту;
- розробити систему цільових функцій багатокритеріальної оптимізації для розробки рекомендацій з експлуатації ступінчастих збірних різців для важких токарних верстатів, які дозволяють здійснити оптимальний вибір режимів різання з урахуванням міцності та динамічних навантажень ступінчастих збірних різців.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Структурно-логічна схема роботи

У відповідності до поставлених завданнями досліджень вся робота була розбита на етапи, які представлені на рис. 2.1 у вигляді структурно-логічної схеми роботи.

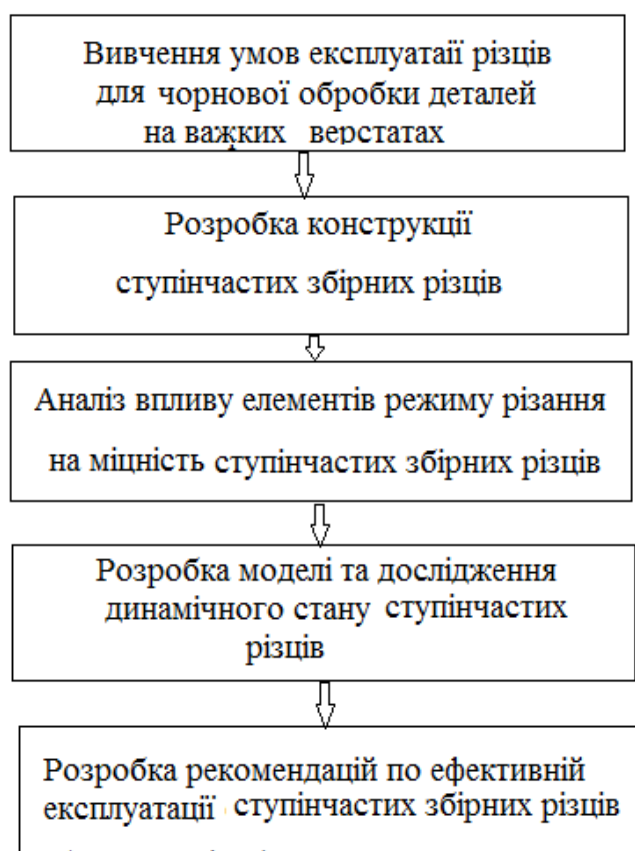


Рисунок 2.1 – Структурно-логічна схема роботи

На основі загальної теорії дослідження та проектування інструменту прийняті наступні принципи.

1. Здійснюється розгляд предметної області, об'єкта проектування. Інструмент виступає як частина технологічної системи (ТС) у взаємозв'язку з її елементами, а також із середовищем функціонування – умовами виробництва.

2. Використовуються методи отримання вихідних залежностей, оцінки окремих властивостей інструменту: статистичні, розрахункові та експериментальні.

Розглядується процес розробки інструментів як формалізована процедура в найзагальнішому вигляді.

Спочатку аналізується вектор-параметр умов експлуатації інструментів:

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_{ny}\}, \quad (2.1)$$

де $C_1, C_2, C_3, \dots, C_{ny}$ – окремі параметри (наприклад, основні розмірні параметри верстата, параметри заготовки, припуск та інші);

n_y – число параметрів умов.

Вектор-параметр використовується для формування вектор-критерію:

$$F(C, X^*) = \{f_1(C, X^*), f_2(C, X^*), \dots, f_n(C, X^*)\}, \quad (2.2)$$

де $f_1(C, X^*), f_2(C, X^*), \dots, f_n(C, X^*)$ – окремі критерії.

Під критерієм розуміються показники, що характеризують будь-яку властивість інструменту (наприклад, показники міцності інструменту при розрахунках, лабораторних та виробничих випробуваннях) або цільові функції (наприклад, продуктивність, витрати інструменту).

2.2 Методика дослідження надійності збірних різців

Для одержання статистичної інформації про деталі, технологічні операції, різальні інструменти і режими різання збір даних здійснювався методом тривалих спостережень. В методиці статистичних досліджень умов експлуатації різального інструменту на важких верстатах передбачено на основі створеної бази знань використання методів математичної статистики, здійснювати групування даних за заданою ознакою, встановлювати параметри законів розподілу параметрів, здійснювати регресійний і кореляційний аналіз даних, виявляти структуру відмов інструменту, оптимізувати режими різання

та визначати критерії ефективності процесу чорнової обробки збірними різцями.

Достовірність і обґрунтованість основних результатів і висновків досягалася шляхом зіставлення теоретичних результатів з експериментальними, в тому числі з даними інших авторів, шляхом застосування коректних математичних методів і вдосконалення схематизації досліджуваних процесів, шляхом перевірки отриманих результатів розрахунків в широкому діапазоні зміни умов різання.

Безвідмовність інструменту є головним показником його надійності. Вона характеризується набором кількісних характеристик.

Імовірність безвідмовної роботи інструменту $P(\tau)$ – це ймовірність того, що в межах заданого часу τ відмова інструменту не виникне. Важливим показником, який дозволяє розкрити причини відмов, є їх інтенсивність $\lambda(\tau)$ – умовна щільність ймовірності виникнення відмови інструменту, яка визначається для моменту часу τ за умови, що до цього моменту відмова не виникла. Щільність розподілу стійкості $f(\tau)$, характеристику стійкості як випадкової величини f , в певному сенсі, слід також вважати показником безвідмовності.

Показники безвідмовності визначаються шляхом безпосередньої обробки даних спостережень [41].

$$P(\tau) = \frac{n - m(\tau)}{n}; \quad \lambda(\tau) = \frac{2 \cdot \Delta m(\tau)}{(n_j + n_{j+1}) \cdot \Delta \tau}; \quad f(\tau) = \frac{\Delta m(\tau)}{n \cdot \Delta \tau}; \quad T = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (2.3)$$

де n – обсяг вибірки або загальне число розглянутих періодів стійкості інструменту;

$m(\tau)$ – число інструментів, які відмовили за час τ у всіх розглянутих періодах стійкості;

$\Delta m(\tau)$ – число інструментів, які відмовили в інтервалі часу від $\tau - \frac{\Delta\tau}{2}$ до $\tau + \frac{\Delta\tau}{2}$;

n_j і n_{j+1} – число інструментів, працездатних відповідно на початку і в кінці j -го інтервалу часу;

τ_i – стійкість (час безвідмовної роботи) i -го інструменту.

Доцільність використання цих показників в більшості випадків необхідне для збірного інструменту, при цьому їх необхідно відносити тільки до різальної пластини.

Середня стійкість інструменту в експлуатації – умовна величина, позбавлена певного сенсу. Вона обумовлюється багатьма процесами – зношуванням різних видів, конкретним руйнуванням, руйнуванням по різних перетинах і т. д. Міцність робочої частини інструменту впливає на його стійкість двома шляхами – через частку зруйнованих інструментів і їх стійкість. Так як стійкість інструменту τ є випадковою величиною, необхідно оцінювати її розсіювання. Показниками розсіювання є середньоквадратичне відхилення σ , коефіцієнт варіації W та інші [19].

Значення показників безвідмовності інструменту, розраховані за формулами типу (2.3) є статистичними оцінками, що відносяться до малої вибірки, тобто до певного числа спостережень.

Показники безвідмовності пов'язані між собою певними залежностями :

$$P(\tau) = \int_{\tau}^{\infty} f(\tau) d\tau, \quad Q(\tau) = 1 - P(\tau), \quad \lambda(\tau) = -\frac{f(\tau)}{P(\tau)}, \quad T = \int_0^{\infty} P(\tau) d\tau. \quad (2.4)$$

Дослідження безвідмовності дозволяють обґрунтовано підійти до вибору законів розподілу стійкості [41]. Цей вибір повинен проводитися насамперед на підставі аналізу причин відмов. Їх фізичній природі найчастіше відповідає закон Вейбулла.

Щільність розподілу стійкості для цього закону:

$$f(\tau) = \frac{b}{a} \left(\frac{\tau}{a} \right)^{b-1} e^{-\left(\frac{\tau}{a} \right)^b}, \quad (2.5)$$

де a і b – параметри закону.

Показники безвідмовності при використанні закону Вейбулла визначаються за рівняннями:

$$\lambda(\tau) = \frac{b}{a} \left(\frac{\tau}{a} \right)^{b-1}, \quad P(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau}{a} \right)^b}, \quad T_\gamma = \left(-a \ln \frac{\gamma}{100} \right)^{\frac{1}{b}}, \quad T = \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right) a^{\frac{1}{b}}, \quad (2.6)$$

де Γ – гамма-функція.

Закон Вейбулла може бути використаний з деякою погрішністю для всієї партії інструментів, якщо більшість з них відмовляє в зв'язку з накопиченням ушкоджень.

Для групи інструментів, відмова яких настає під дією випадкових пікових навантажень, застосуємо експонентний закон. У цьому випадку маємо:

$$f(\tau) = \lambda e^{-\lambda \tau}, \quad \lambda = \frac{1}{T}, \quad P(\tau) = e^{-\lambda \tau}, \quad T_\gamma = -T \ln \frac{\gamma}{100}. \quad (2.7)$$

Експонентний закон є окремим випадком закону Вейбулла. При $b = 1$. Формули (2.5) та (2.6) перетворюються в (2.7), якщо прийняти $\frac{1}{a} = \lambda$.

Закон розподілу стійкості в значній мірі визначається ймовірністю руйнування, яке в свою чергу обумовлюється співвідношенням навантаження на інструмент і міцністю останнього.

Довговічність різальної пластини оцінюється тими ж показниками, що й безвідмовність, якщо розглядати її роботу до незворотної відмови, тобто всі характеристики задати в функції сумарної стійкості $\sum \tau$ або числа періодів стійкості K . Згідно термінології теорії надійності, як $\sum \tau$, так і K – це ресурс, але виражений в різних одиницях вимірювання [99].

Показником довговічності, який застосовується для розрахунку витрат інструменту і одночасно дає сумарну оцінку його важливих фізичних властивостей, є середня сумарна стійкість $\sum T$. Цей показник через K враховує міцність інструменту, а через T – зносостійкість.

2.3 Методика дослідження напружено-деформованого стану ступінчастих збірних різців

Для визначення параметрів напружено-деформованого стану ступінчастих збірних різців для важких верстатів використовувався метод скінченних елементів (МСЕ) [3, 6, 38].

Чисельне рішення тривимірної задачі теорії пружності для визначення напружень і деформацій у збірній конструкції інструменту із застосуванням методу скінченних елементів виконується поетапно, вирішенням наступних завдань:

- побудова функціоналу повної потенційної енергії даної системи;
- вибір форми скінченних елементів (СЕ) і дискретизація досліджуваної системи, визначення виду координатних функцій;
- побудова матриць жорсткості і приведення місцевого навантаження до вузлового для кожного розглянутого скінченного елемента;
- побудова матриці жорсткості всієї конструкції, складання і рішення системи канонічних рівнянь;
- визначення компонентів напружено-деформованого стану по області кожного скінченного елемента, на які була проведена дискретизація даної системи.

Метод скінченних елементів є варіаційним методом, завершальним етапом якого є побудова системи рівнянь, яка мінімізує потенціал повної потенційної енергії досліджуваного об'єкта.

При визначенні тривимірного напружено-деформованого стану об'ємних конструкцій із застосуванням МСЕ використовуються залежності теорії пружності для тривимірного напруженого стану тіла. Ці залежності найбільш загальні, так як вільні від різних гіпотез і передумов, характерних для деяких конкретних задач (гіпотеза плоских перетинів для стрижнів; гіпотеза прямих нормалей для згинаються пластин; гіпотеза нульових напружень, ортогональних до площини системи для плоского напруженого стану).

Потенціал повної енергії для тривимірного напруженого стану являє собою вираз:

$$\begin{aligned} V = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{xz} \gamma_{xz} + \tau_{yz} \gamma_{yz}) d\Omega - \\ - \int_{\Omega} (p_x u + p_y v + p_z w) d\Omega \quad , \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – нормальні і дотичні напруження, що виникають при дії зовнішніх сил;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ – відповідні напруженням деформації;

p_x, p_y, p_z – зовнішнє навантаження у напрямку відповідних осей координат X, Y, Z.

Якщо всі залежності і вирази уявити в матричній формі запису, прийнявши позначення:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = \{u, v, w\}^T; \quad \mathbf{p} = \{p_x, p_y, p_z\}^T; \\ \boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}\}^T; \quad \boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}\}^T, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де $\mathbf{u}$ – вектор переміщень;

$\mathbf{p}$ – вектор зовнішніх зусиль;

$\boldsymbol{\sigma}$ – вектор нормальних і дотичних напружень;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор деформацій.

У цьому випадку основні співвідношення теорії пружності для визначення напружень і деформацій, що виникають при тривимірному напружено-деформований стан, приймають вид:

$$\boldsymbol{\sigma} = D\boldsymbol{\varepsilon}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = L\mathbf{u}, \quad (2.10)$$

де D – матриця пружності ізотропного тіла;

L – матриця диференціювання, що зв'язує деформації даного об'єкту з переміщеннями.

Матриця пружності ізотропного тіла має порядок 6×6 елементів і має такий вигляд:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\nu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\nu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}; \quad \nu = \frac{E}{2(1 + \mu)} - \text{коефіцієнти Ламе.}$$

Елементами матриці диференціювання L є диференціальні оператори. Вона має порядок 6×3 елементів:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Функціонал повної енергії для тривимірного тіла з урахуванням прийнятих позначень та виразів (2.8), (2.9) запишеться у вигляді компактного вираження:

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{p}^T \mathbf{u} d\Omega. \quad (2.13)$$

Перший доданок являє собою роботу внутрішніх сил U , рівну потенційної енергії деформації, друге – це робота зовнішніх сил W .

Рішення задачі визначення напружено-деформованого стану об'ємного тіла за допомогою МСЕ засноване на варіаційному принципі Лагранжа, згідно з яким з усіх переміщень, що допускаються накладеними на тіло зв'язками, в дійсності мають місце такі, при яких повна енергія системи V мінімальна.

У разі тривимірного напруженого стану область Ω , яку займає тіло, дискретизується на скінченні елементи, які мають певну форму і кількість вузлових точок. Для визначення напружень переміщення вузлових точок апроксимуємо поліноміальними функціями, а потенціал повної енергії (2.13) піддаємо мінімізації.

Для апроксимації вузлових переміщень скінченного елемента використовуються поліноми виду:

$$\begin{aligned}
u_x(x, y, z) &= u_{x_0}(x, y, z) + \sum_{k=1}^m a_{x_k} u_{x_h}(x, y, z), \\
u_y(x, y, z) &= u_{y_0}(x, y, z) + \sum_{k=1}^m a_{y_k} u_{y_h}(x, y, z), \\
u_z(x, y, z) &= u_{z_0}(x, y, z) + \sum_{k=1}^m a_{z_k} u_{z_h}(x, y, z).
\end{aligned} \tag{2.14}$$

тут a_{x_k} , a_{y_k} і a_{z_k} деякі постійні, що підлягають визначенню, інші ж величини являють собою вибрані заздалегідь відповідні функції координат. При цьому функції u_{x_0} , u_{y_0} , u_{z_0} повинні приймати задані значення на частини Ω поверхні тіла Ω ; всі інші функції повинні на Ω звертатися в нуль. Тоді при будь-яких значеннях будуть задовольнятися геометричні граничні умови. Постійні α підбирають таким чином, щоб при обраних функціях (2.14) повна енергія системи V була мінімальна.

Умова екстремальності потенціалу повною енергії $\frac{\partial V}{\partial a_k} = 0, \forall k$ призводить до отримання системи алгебраїчних рівнянь виду:

$$Ku = P, \tag{2.15}$$

де K – матриця жорсткості системи, яка визначається в залежності від виду скінченних елементів і їх матриць жорсткості;

u – шуканий вектор переміщень;

P – вектор діючого навантаження.

Таким чином, для визначення поля переміщень необхідно вибрати вид скінченних елементів, провести дискретизацію досліджуваної області, обчислити матриці жорсткості скінченних елементів, скласти і вирішити систему рівнянь щодо переміщень, а також обчислити компоненти напружено-деформованого стану, відповідно до виразів (2.10).

Для дослідження напружено-деформованого стану збірних ступінчастих

різців в роботі використовувалася тривимірна модель інструменту, виконана в системі для тривимірного моделювання SolidWorks і прикладний CAE-модуль – Simulation [4].

Виконання дослідження моделі інструменту за допомогою модуля Simulation виконується в наступній послідовності:

- Створюється дослідження, визначається тип аналізу і його параметри.

Що стосується дослідження збірної конструкції інструменту, застосовується тип дослідження «Статичний». Для цього на головній інструментальній панелі інструментів SolidWorks вибирається вкладка «Simulation» і вибирається пункт «Нове дослідження». В результаті у вікні дерева дослідження, що містить параметри дослідження: «Найменування дослідження», «Деталі», «З'єднання», «Кріплення», «Зовнішні навантаження», «Сітка», «Параметри результатів» і «Результати» (рис. 2.2).

- Визначаються параметри дослідження.
- Виконується статичний аналіз конструкції. Результатами аналізу є епюри розподілу нормальних і еквівалентних напружень і деформацій.

Матеріали елементів досліджуваної моделі конструкції задаються в параметрі дослідження «Деталі». При дослідженні ступінчастих різців використовувалися два типи матеріалу: твердий сплав T5K10 для різальної пластини і конструкційна легована сталь 40ХН для корпусу інструменту і елементів механічного кріплення пластини. Фізико-механічні характеристики матеріалів у форматі Simulation, наведені в таблицях 2.1 та 2.2.

Параметр «З'єднання» визначався як контакт двох тіл, між якими діють сили тертя і який допускає взаємне відносне переміщення елементів збірної конструкції. Для цього зіткнення двох тіл визначалося параметром «Пов'язані» із зазначенням відповідного коефіцієнта тертя.

Зовнішні навантаження задавалися у вигляді значень складової сили різання, які визначалися за методикою [75].

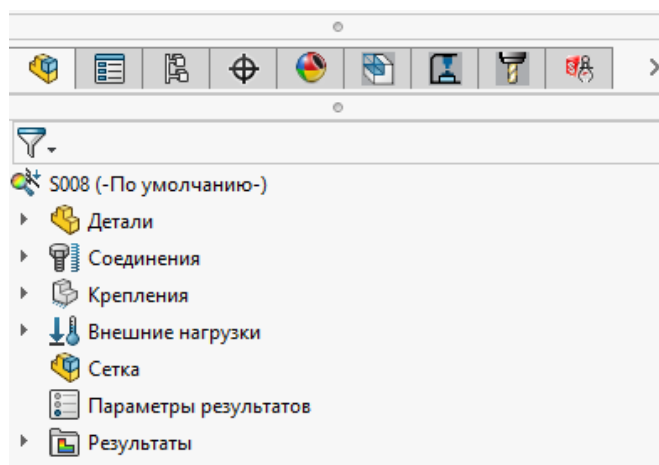


Рисунок 2.2 – Дерево дослідження Simulation

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні характеристики твердого сплаву Т5К10 в форматі Simulation

№	Властивість матеріалу Simulation	Найменування властивості	Розмірність	Значення
1	Density	щільність	кг / м ³	12700
2	Poisson's Ratio	коефіцієнт Пуассона		0.23
3	Young's Modulus	модуль Юнга	Н / м ²	549000000000
4	Thermal Expansion	термічне розширення	1 К	5.5e-006
5	Specific Heat	питома теплоємність	J / (кг·К)	160
6	Thermal Conductivity	теплопровідність	W / (м·К)	16
7	Relative Permeability	відносна проникність		10000
8	Resistivity	питомий опір		2.1e-004
9	Tensile Yield Strength	міцність на розтяг	Н / м ²	1274000000
10	Compressive Yield Strength	міцність на стискання	Н / м ²	1274000000
11	Tensile Ultimate Strength	межа міцності при розтягуванні	Н / м ²	4600000000
12	Compressive Ultimate Strength	максимальна міцність на стиск	Н / м ²	4600000000.

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні характеристики матеріалу Сталь 40ХН в форматі Simulation

№	Властивість матеріалу Simulation	Найменування властивості	Розмірність	Значення
1	Density	щільність	кг / м ³	7820
2	Poisson's Ratio	коефіцієнт Пуассона		0.3
3	Young's Modulus	модуль Юнга	Н / м ²	200000000000
4	Thermal Expansion	термічне розширення	1 К	1.2e-005
5	Specific Heat	питома теплоємність	J / (кг·К)	466
6	Thermal Conductivity	теплопровідність	W / (м·К)	44
7	Relative Permeability	відносна проникність		10000
8	Resistivity	питомий опір		2.1e-004
9	Tensile Yield Strength	міцність на розтяг	Н / м ²	320000000
10	Compressive Yield Strength	міцність на стискання	Н / м ²	320000000
12	Tensile Ultimate Strength	межа міцності при розтягуванні	Н / м ²	590000000

Сітка елементів. Для створення сітки елементів використовувалися тетраїдальні ізопараметричні 10-ти вузлові скінченні елементи з криволінійними ребрами (рисунок 2.3), які дозволяють в високою точністю апроксимувати тривимірні тіла. Щільність сітки використовувалася нерівномірною: щільніший розподіл для різальної пластини і контактних поверхонь.

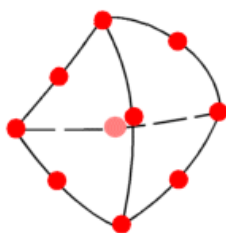


Рисунок 2.3 – Тетраїдальний ізопараметричний 10-ти вузловий скінченний елемент

Як результат досліджень аналізувалися епюри напружень, що виникають при дії складових сили різання. Для аналізу використовувався

інструмент «Інструменти епюри». Даний інструмент аналізу дозволяє досліджувати розподіл нормальних і еквівалентних напружень в необхідному перетині досліджуваної конструкції і визначати числові значення напружень в заданих точках.

2.4 Математичний апарат багатокритеріальної стохастичної оптимізації

2.4.1 Генетичний алгоритм для вирішення виробничих задач

Вперше методологія моделювання еволюції, заснована на аналогії процесів натуральної селекції у біології, була застосована Холландом у 1975р. до штучних систем. Використання генетичного програмування обумовлено хорошими результатами, отриманими при вирішенні різноманітних задач з САПР і АСТПП, і простотою ідеї цього методу, що дозволяє зосередитися на його ефективній реалізації.[117, 121].

При вирішенні задачі багатокритеріальній оптимізації режимів різання при чорновій обробці на важких верстатах виникає ряд різних технологічних обмежень, пов'язаних зі специфікою різального інструменту. Зокрема, у якості таких обмежень можуть виступати наступні: витрата твердого сплаву, потужність верстата, витрата інструменту та інші.

Основна особливість генетичного алгоритму полягає у тому, що аналізується не одне рішення, а деяка підмножина квазіоптимальних рішень, що називаються хромосомами і складаються з генів. Ця підмножина носить назву "популяція". В обраній реалізації початкова популяція формується випадковим образом. Для задачі що розглядається, хромосома описує параметри режимів різання. Для хромосоми розраховуються цільові функції. Такі функції розраховують відносну вагу кожної хромосоми.

Процес продовжується до того часу, поки не буде оброблено завдане число поколінь. При цьому кожна наступна популяція повинна бути краще,

ніж попередня. Рішенню задачі відповідає хромосома з оптимальним значенням "функції пристосованості".

2.4.2 Математична модель генетичного алгоритму

Задача формалізується таким чином, щоб її рішення могло бути закодовано у вигляді вектора ("генотипу") генів, де кожний ген може бути бітом, числом або якимось іншим об'єктом. У класичних реалізаціях генетичного алгоритму передбачається, що генотип має фіксовану довжину. Однак існують варіації генетичного алгоритму, вільні від цього обмеження.

Деяким, зазвичай випадковим, чином створюється безліч генотипів початкової популяції. Вони оцінюються з використанням "функції пристосування", у результаті чого з кожним генотипом асоціюється певне значення ("пристосування"), яке визначає, наскільки добре фенотип, що їм описується, вирішує поставлену задачу.

З отриманої безлічі рішень ("покоління") з урахуванням значення "пристосування" вибираються рішення (зазвичай кращі особини мають більшу ймовірність бути вибраними), до яких застосовуються "генетичні оператори" (у більшості випадків "схрещування" – crossover і "мутація" – mutation), результатом чого є отримання нових рішень. Для них також обчислюється значення пристосованості, і потім відбувається відбір ("селекція") кращих рішень у наступне покоління.

Цей набір дій повторюється ітеративно, так моделюється "еволюційний процес", що триває декілька життєвих циклів (поколінь), доки не буде виконаний критерій зупинення алгоритму. Таким критерієм може бути [119]:

- знаходження глобального, або субоптимального рішення;
- вичерпання числа поколінь, відпущених на еволюцію;
- вичерпання часу, відпущеного на еволюцію.

Таким чином, можна виділити наступні етапи генетичного алгоритму:

- задати цільову функцію (пристосованості) для осіб популяції;

- створити початкову популяцію (початок циклу);
- розмноження (схрещування);
- мутації;
- обчислити значення цільової функції для всіх осіб;
- формування нового покоління (селекція);
- якщо виконується умова зупинення, то (кінець циклу), інакше (початок циклу).

Розглянемо більш детально опис операцій на кожному кроці.

Створення початкової популяції – перед першим кроком потрібно випадковим чином створити початкову популяцію; навіть якщо вона виявиться цілковито неконкурентоспроможною, ймовірно, що генетичний алгоритм все одно достатньо швидко переведе її у життєздатну популяцію. Таким чином, на першому кроці можна особливо не намагатися зробити занадто пристосованих осіб, достатньо, щоб вони відповідали формату осіб популяції, і на них можна було підрахувати функцію пристосованості. Підсумком першого кроку є популяція H , що складається з N осіб.

Розмноження (схрещування) – розмноження у різних алгоритмах визначається по-різному – воно залежить від представлення даних. Головна вимога до розмноження – щоб потомок або потомки мали можливість успадкувати риси обох батьків, "змішавши" їх у деякий спосіб.

Достатньо швидко виділяється один єдиний генотип, який представляє собою локальний максимум, а потім всі елементи популяції програють йому відбір, і вся популяція "забивається" копіями цієї особи. Є різні способи боротьби з таким небажаним ефектом; один з них – вибір для розмноження не самих пристосованих, але взагалі всіх осіб.

Мутації – до мутацій відноситься все те ж саме, що і до розмноження: є деяка доля мутантів m , що є параметром генетичного алгоритму, і на кроці мутацій потрібно вибрати $m(N)$ осіб, а потім змінити їх у відповідності з раніше визначеними операціями мутацій.

Відбір – на етапі відбору потрібно з всієї популяції вибрати певну її долю, яка залишиться "в живих" на цьому етапі еволюції. Є різні способи проводити відбір. Ймовірність виживання особи h повинна залежати від значення функції пристосованості. Доля тих, що "вижила", s є параметром генетичного алгоритму і задається заздалегідь. За підсумками відбору з N осіб популяції H повинні залишитися $S(N)$ осіб, які ввійдуть у підсумкову популяцію H' . Інші особи гинуть.

Графічне представлення математичної моделі генетичного алгоритму показано на рисунку 2.4.

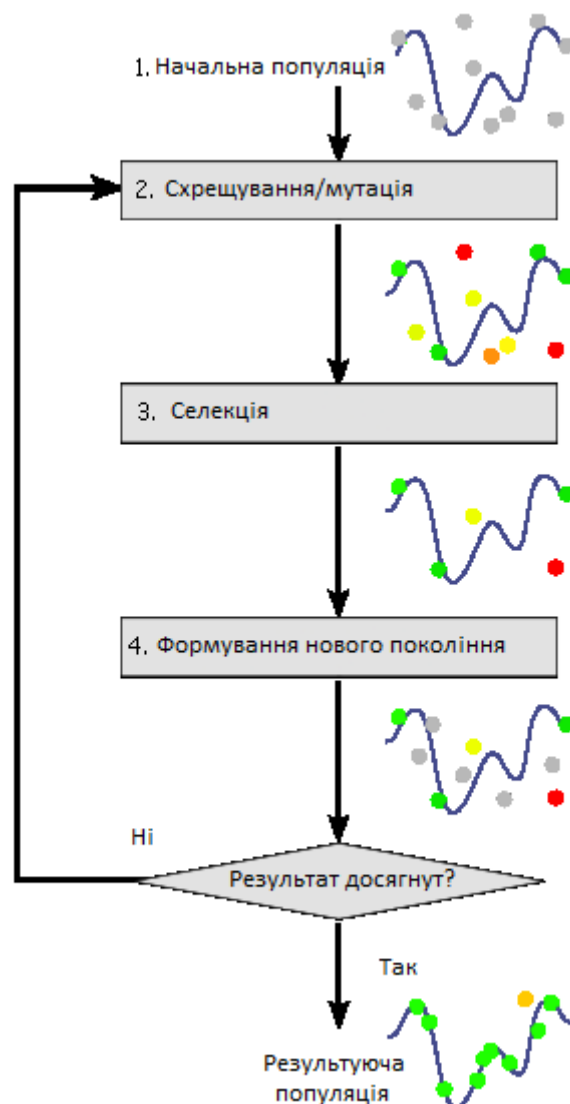


Рисунок 2.4 – Графічне представлення математичної моделі генетичного алгоритму

2.4.3 Нейронні мережі у задачі оптимізації параметрів технологічного процесу

З практичної точки зору нейронні мережі є нелінійними статичними системами моделювання даних або системами прийняття рішень. Вони можуть бути використані для моделювання складних відносин між вхідними і вихідними даними або для знаходження закономірностей у даних. Відчутний ефект від застосування штучних нейронних мереж виникає тільки при вирішенні дуже складних задач високої і надвисокої розмірності.

У якості нейронної мережі для рішення задачі фільтрації вхідних параметрів був обраний перцептрон. Основна математична задача, з якою він справляється, – це лінійне розділення будь – яких нелінійних множин, так зване забезпечення лінійної сепарабельності [23].

Одношаровий перцептрон. Вирішальна поверхня одношарового перцептрону представлена на рисунку 2.6. Розглянемо одношарову мережу з одного нейрону, представлену на рисунку 2.5.

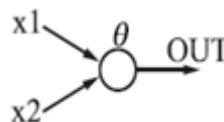


Рисунок 2.5 – Мережа з одного нейрону

Вихід мережі визначається формулою (2.16):

$$y = F(w_1x_1 + w_2x_2 - \theta). \quad (2.16)$$

Якщо F має вид жорсткої ступені з двома можливими значеннями 0 і 1, то вихід мережі буде мати вид напівплощини, представленої на рисунку 2.6. Гіперплощина (у випадку багатьох входів), що розділяє різні значення виходу,

називається поверхнею що вирішує. Для жорсткої ступені поверхня що вирішує задається рівнянням (2.17):

$$w_1 x_1 + w_2 x_2 = \theta. \quad (2.17)$$

Для двох вхідних нейрону вона має вид прямої, довільно повернутої і зміщеної з початку координат. Кут повороту визначається коефіцієнтами w_1, w_2 , а зміщення з початку координат – порогом θ .

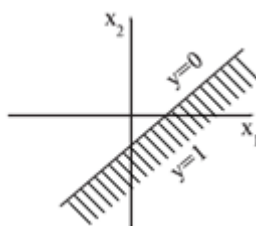


Рисунок 2.6 – Вирішальна поверхня одношарового перцептрону

Якщо вибрана гладка функція активації, то вихід мережі буде плавно змінюватися від нуля до одиниці у напрямку, перпендикулярному прямій. Залежність вихідного сигналу від входів зручно представляти напівтіньовою картою: чорному кольору відповідає значення виходу, рівне 0, білому – рівне 1 (рисунок 2.7).

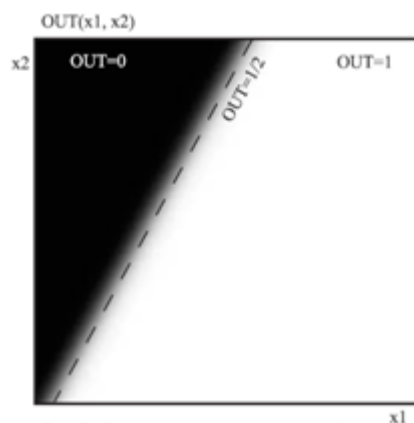


Рисунок 2.7 – Вихід одношарового перцептрону у вигляді напівтіньової карти

На виході мережі ми отримаємо значення, яке може інтерпретуватися як ТАК або НІ. Для одношарового персептрону з гладкою функцією активації вихід мережі буде плавно змінюватися від нуля до одиниці. Такий вихід мережі задовольняє задачі фільтрації вхідних даних і може бути коректно проаналізований. Таким чином, необхідності ускладнювати структуру нейронної мережі, підключаючи додаткові шари, немає.

Для отримання необхідного відгуку, нейронну мережу необхідно навчити. Існує декілька основних моделей вивчення: на основі корекції помилок, з використанням пам'яті, Хеббовське вивчення, конкурентне вивчення, метод Больцмана. Також існує дві фундаментальні парадигми вивчення: з вчителем і без нього.

Для того щоб проілюструвати навчання, засноване на корекції помилок, розглянемо найпростіший випадок нейрону k – єдиного обчислювального вузла вихідного шару нейронної мережі прямого розповсюдження. Вихідний сигнал нейрону k позначається $y_k(n)$, де n – номер кроку ітеративного процесу [18]. Цей сигнал є єдиним виходом нейронної мережі. Він буде порівнюватися з бажаним виходом, позначеним $d_k(n)$. У результаті отримаємо сигнал помилки $e_k(n)$ за формулою (2.18):

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) = \theta. \quad (2.18)$$

Сигнал помилки підключає механізм керування, мета якого полягає у застосуванні коректування по синапатичним вагам нейрона k . Ці зміни направлені на покрокове приближення вихідного сигналу нейрону до бажаного. Мета досягається за рахунок мінімізації функції вартості нейрону. Покрокове корегування виконується до тих пір, поки система не досягне стану стійкості (синапатичні ваги практично стабілізується).

Ілюстрація принципу роботи алгоритму для єдиного вихідного нейрону k представлена на рисунку 2.8 [94].

Варто відмітити, що корегування, застосоване до синоптичної ваги нейрона, пропорційне добутку сигналу помилки на вхідний сигнал, що його викликав.

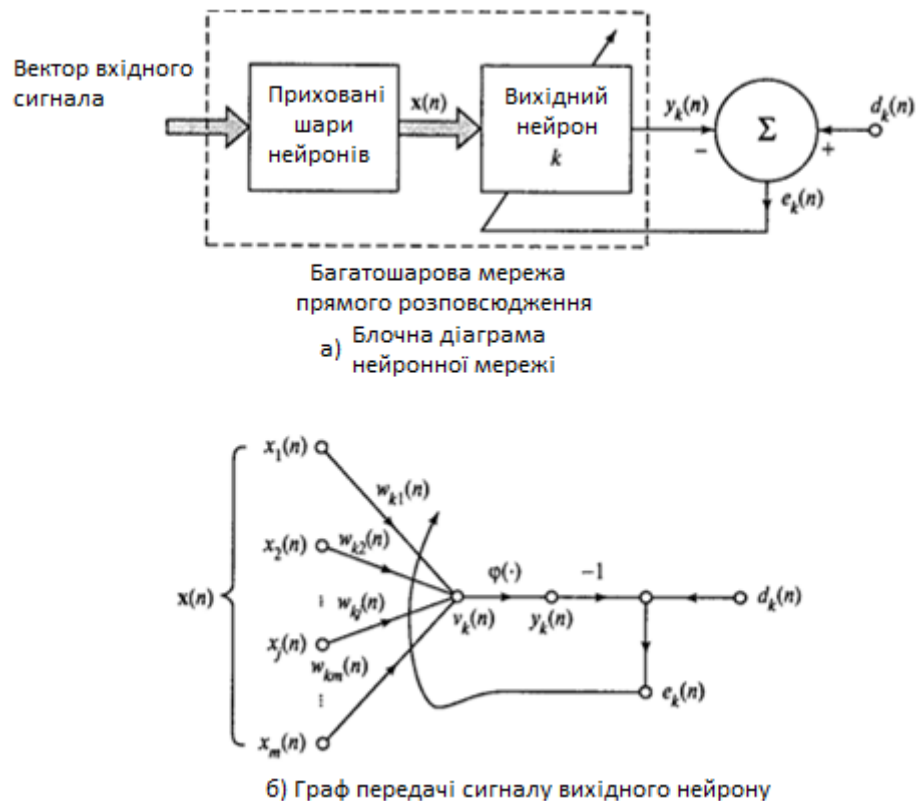


Рисунок 2.8 – Принцип роботи алгоритму зворотного розповсюдження помилки

2.4.4. Математична модель нейронної мережі

У рамках нейронної мережі як математичну модель має сенс розглядати окремий нейрон – вузол нейронної мережі. Сама ж нейронна мережа є комбінацією таких вузлів – нейронів.

Математично нейрон представляє собою зважений суматор, єдиний вихід якого визначається через його входи і матрицю ваг наступним чином (2.19):

$$y = f(u), \quad (2.19)$$

де $u = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0 x_0 - x_i$ та ω_i – відповідно сигнали на входах нейрону і вага входів, функція u називається індуктованим локальним полем, а $f(u)$ – передаточною функцією. Можливі значення сигналів на входах нейрону вважають заданими у інтервалі $[0,1]$. Вони можуть бути або дискретними (0 або 1), або аналоговими. Додатковий вхід x_0 і відповідна йому вага ω_0 використовуються для ініціалізації нейрону. Під ініціалізацією розуміють зміщення активаційної функції нейрону по горизонталі осі, тобто формування порога чутливості нейрону. Крім того, іноді до виходу нейрону спеціально додають деяку випадкову величину, що називається зрушенням. Зрушення можна розглядати як сигнал на додатковому, завжди навантаженому синапсі [94].

Графічна схема роботи штучного нейрону представлена на рисунку 2.9. На схемі:

1. Нейрони, вихідні сигнали яких поступають на вхід даному.
2. Суматор вхідних сигналів.
3. Обчислювач передаточної функції.
4. Нейрони, на вході яких подається вихідний сигнал даного.
5. ω_i – ваги вхідних сигналів.

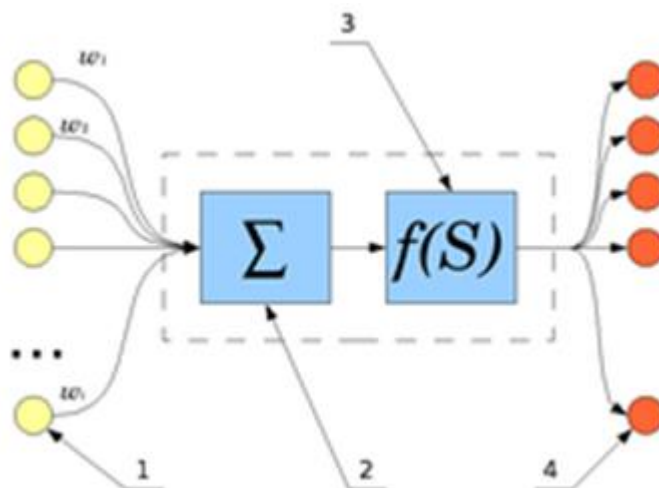


Рисунок 2.9 – Графічна схема роботи штучного нейрону

Для використання нейронної мережі з максимальною ефективністю необхідно виконати ряд налаштувань параметрів нейронної мережі. Визначившись з методом навчання необхідно вибрати кількість циклів навчання для оптимізації часових витрат на формування мережі і отримання необхідного відгуку мережі.

Вибір кількості циклів навчання нейронної мережі виконується динамічно і регулюється необхідною точністю роботи нейронної мережі на основі завдання похибки. У якості похибки відгуку нейронної мережі від канонічного задається відсоткове відхилення від даного значення. Похибка відгуку необхідна для можливості закінчити процес навчання і скорочення ресурсів, що потребуються на цей процес.

У якості функції активації нейронної мережі була обрана логістична функція. Даний вибір обумовлюється тим, що у якості відгуку нейронної мережі нам необхідно отримати ступінь відхилення поданого вхідного вектору параметрів від канонічного значення навчаючої вибірки. Обчислення функції активації нейронів відбувається за формулою:

$$OUT = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha Y)}, \quad (2.20)$$

де α – параметр нахилу сигмоїдальної функції активації.

Змінюючи параметр α , можна побудувати функції з різноманітною крутизною. Змінення крутизни сигмоїдальної функції дозволяє добитися необхідної чуттєвості нейронної мережі. У якості значення α було прийнято 8,4. Значення було отримано експериментально. Графік логістичної функції (2.20) при даному значенні α показаний на рисунку 2.10.

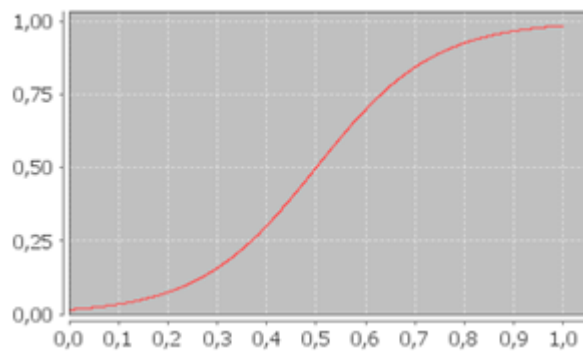


Рисунок 2.10 – Графік логістичної функції

Вектором вхідних сигналів обрані нормалізовані параметри t , S , V . Нормалізація параметрів виконується у зв'язку з особливостями навчання нейронної мережі: логістична функція потребує уніфікованого значення крутизни для всіх нейронів у мережі. Якщо на вхід мережі подавати значення різного порядку – навчання мережі не буде виконуватися.

2.5 Висновки до розділу

1. Запропонована методологія досліджень. Складена структурно-логічна схема роботи.

2. З метою визначення показників надійності ступінчастих збірних різців запропонована методика статистичного аналізу виду відмовлень інструменту.

3. Для визначення нормальних і еквівалентних напружень у різальних пластинах ступінчастих різців та аналізу епюр розподілу напружень запропонована методика досліджень напружено-деформованого стану збірних конструкцій інструментів, яка враховує контактні взаємодії між контактуючими елементами та різні схеми навантаження

4. Адаптовано метод багатокритеріальної стохастичної оптимізації на базі об'єднання генетичного алгоритму та нейронної мережі для вирішення задачі оптимізації режимів різання при чорновій обробці на важких токарних верстатах.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ

СТУПІНЧАСТОГО ЗБІРНОГО РІЗЦЯ

3.1 Аналіз умов експлуатації збірних різців при чорновій обробці деталей

У результаті аналізу стану механічної обробки на важких токарних верстатах було виявлено, що однієї з найважливіших особливостей обробки заготовок є широкий діапазон припуску з кіркою, який досягає 40...70 мм зі значним його коливанням. На першому проході ширина шару, що зрізається, досягає 30...40 мм.

Подача, що застосовується при чорновій обробці твердим сплавом, знаходиться у межах 0,8...1,2 мм/об. Частіше всього подачі не перевищують 1,5 мм/об. Середня подача на верстатах $D_0 = 1250...1600$ мм складає 1,1 мм/об, на верстатах $D_0 = 2000...3200$ мм – 1,2 мм/об, на верстатах з $D_0 = 4000...5000$ мм – 1,0 мм/об. Така різниця подачі пояснюється тим, що на верстатах $D_0 = 2000...3200$ мм обробляються більш масивні і жорсткі деталі.

Велике значення має розподіл подач, які мають значне розсіювання ($W_s=0,2...0,35$), що пояснюється великими відмінностями у виробничих вимогах до міцності використовуваного інструменту. У більшості випадків розподіл подач підпорядковується нормальному закону (рис. 3.1). Розподіл глибин різання і подач визначають розподіл складових сил різання – P_z , P_y , P_x – навантажень на інструмент. У ряді випадків необхідно вивчати 2 – 3 параметра середовища функціонування інструменту у взаємозв'язку. Сімейства розподілів частково дають таку можливість. (рис. 3.1)

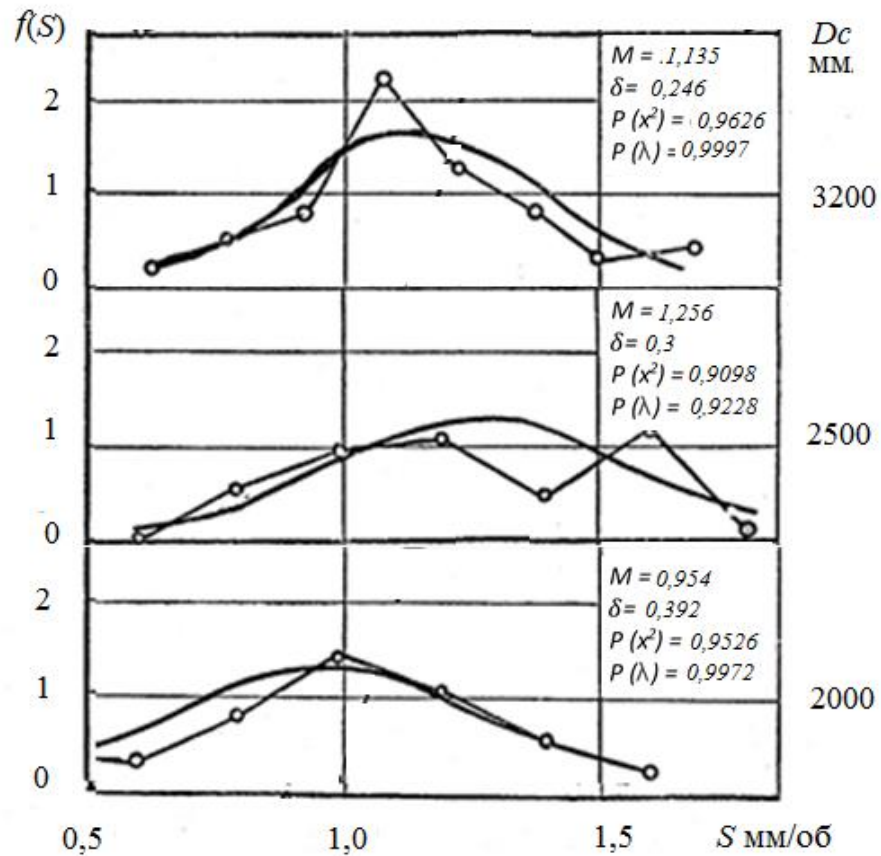
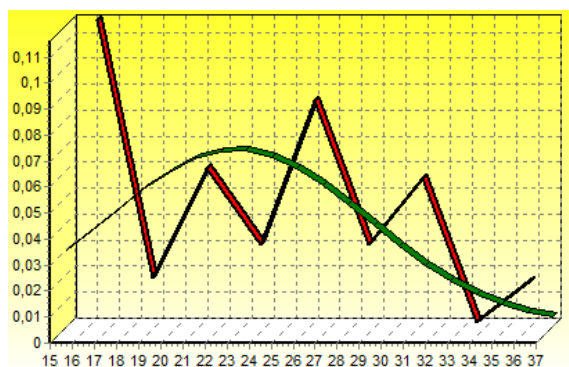


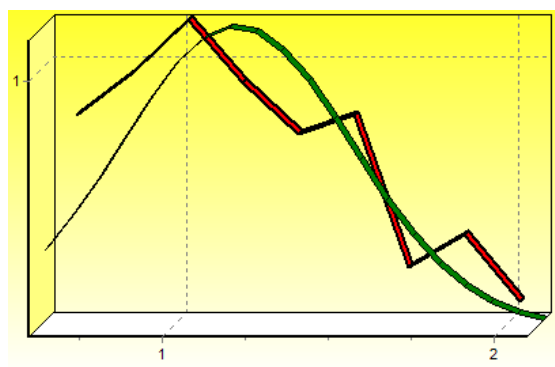
Рисунок 3.1 – Розподіл подач $f(S)$ при точінні на важких верстатах.

На базі даних статистичного банку умов експлуатації важконавантажених різців (в більшості випадків з припаяними різальними пластинами) при чорновій обробці деталей на важких токарних верстатах ПрАТ «НКМЗ» ($n = 916$) виконаний більш детальний аналіз розподілів при чорновій обробці (глибини $f(t)$, подачі $f(S)$, швидкості різання $f(V)$ та стійкості інструменту $f(\tau)$), який підтверджує застосування зміни режимів різання при обробці припуску в декілька проходів, що здійснюються як по кірці з переривами процесу різання та і без переривів процесу різання (рис. 3.2 а-г).

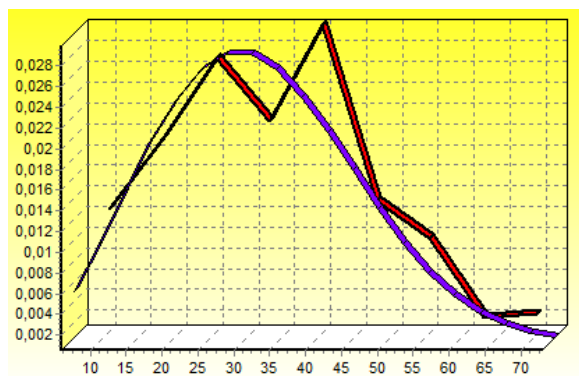
Аналіз імовірнісних характеристик режимів різання підтверджує, що теоретичні розподіли підпорядковуються нормальному закону (табл. 3.1.– 3,4). Розподіл глибини різання показує, що при чорновій обробці деталей з великими перерізами зрізуваного шару призначають глибину різання в залежності від виробничих обставин.



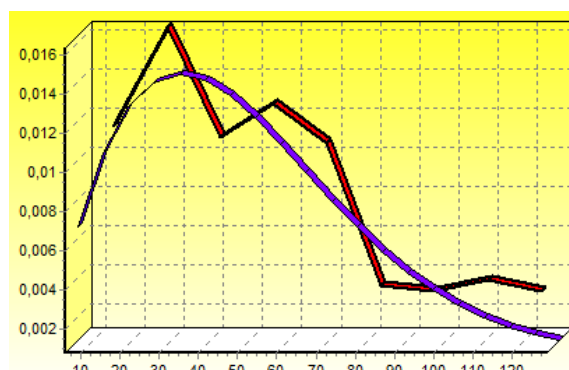
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2 – Імовірнісні розподіли: а) – глибини різання $f(t)$, б) – подачі $f(S)$, в) – швидкості різання $f(V)$, г) – стійкості інструменту $f(\tau)$

Таблиця 3.1 – Імовірнісна характеристика розподілу глибини різання

Теоретичний розподіл Нормальний	Ексцес = -0,97	Асиметрія = 0,21
Середнє значення глибини різання 22,6 мм	Середнє квадратичне $G = 5,9$	Коефіцієнт варіації статистич. $W = 0,26$

Таблиця 3.2 – Імовірнісна характеристика розподілу подачі

Теоретичний розподіл Нормальний	Ексцес = -0,58	Асиметрія = 0,46
Середнє значення подачі 1,19 мм/об	Середнє квадратичне $G = 0,35$	Коефіцієнт варіації статистич. $W = 0,29$

Таблиця 3.3 – Імовірнісна характеристика розподілу швидкості різання

Теоретичний розподіл Нормальний	Ексцес = -0,28	Асиметрія = 0,38
Середнє значення швидкості різання 32,3 м/хв	Середнє квадратичне G = 13,9	Коефіцієнт варіації статистич. W = 0,43

Таблиця 3.4 – Імовірнісна характеристика розподілу стійкості різання

Теоретичний розподіл Вейбулла-Гнеденка	Ексцес = -0,046	Асиметрія = 0,77
	Параметри a – 54,45 b – 1,69	
Середнє значення стійкості 49,3 хв	Середнє квадратичне G = 29,9	Коефіцієнт варіації статистич. W = 0,61

3.2 Розробка збірного різця з новою схемою ступінчастого різання

З метою підвищення міцності ступінчастих збірних різців розроблена нова схема ступінчастого різання при точіння з великими перерізами зрізуваного шару деталей на важких токарних верстатах та вдосконалені вузли кріплення спеціальних різальних пластин із уступом за допомогою прихоплювача.

Особливість нової конструктивної схеми полягає в тому, що різальні пластини з різними кутами в плані розміщуються ступінчасто в двох перетинах: в горизонтальній (рис. 3.3 а) та тангенціальній (рис.3.3 б) площинах таким чином, що напрямки крайок різальних лез є мимобіжними в просторі. Кут в плані ϕ_1 різальної пластини для обробки зовнішнього шару припуску виконаний меншим кута в плані ϕ_2 різальної пластини для обробки внутрішнього шару припуску. Конструктивними особливостями розміщення в тангенціальній площині передніх поверхонь різальних пластин ступінчастої схеми різання є те, що різальне лезо пластини 1, яка оброблює зовнішню поверхню припуску, знаходиться над різальним лезом пластини 2, яка оброблює внутрішній шар припуску (рис.3.3 б). При цьому вершина 3

різального леза пластини, яка оброблює зовнішній шар припуску в напрямку подачі, розміщена за крайкою 4 різального леза пластини, яка оброблює внутрішню поверхню припуску (рис. 3.3 *а*).

Нове конструктивне розміщення різальних лез дозволяє оброблювати припуск по ступінчастій схемі з застосуванням в процесі різання тільки однієї різальної вершини пластини різця, яка оброблює внутрішню поверхню припуску заготовки без переривів процесу обробки. Процес різання пластини, яка оброблює зовнішній шар припуску, виконується за схемою вільного різання, що значно підвищує її стійкість за рахунок відсутності роботи вершини пластини при різанні з переривчатою обробкою заготовки з кіркою.

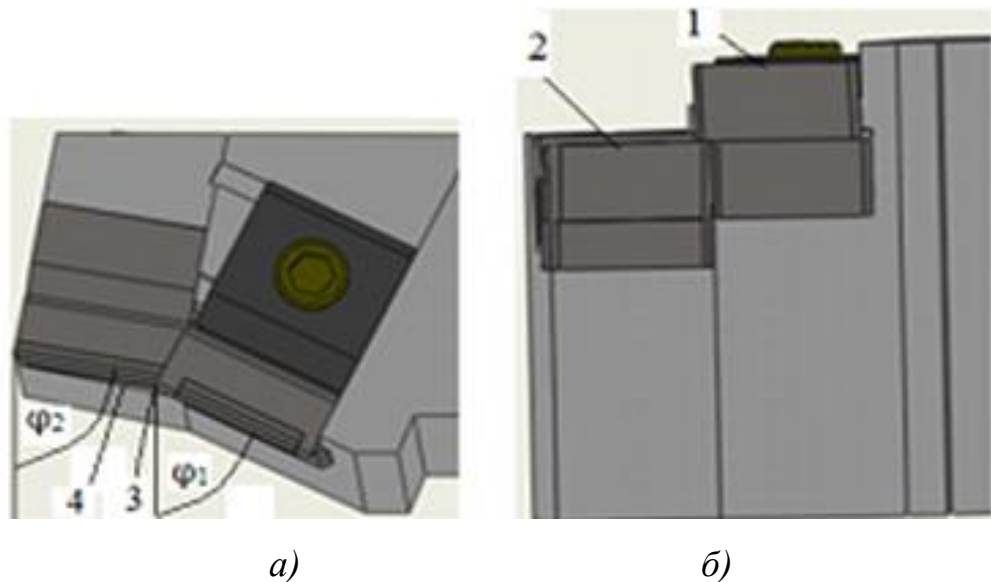


Рисунок 3.3 – Конструкція ступінчастого збірного різця

а) – вид різця в плані, *б)* – вид з задньої поверхні

3.3 Дослідження впливу конструктивних схем вузлів кріплення на напружено-деформований стан різальних пластин

При дослідженні були розглянуті дві схеми вузлів кріплення та базування різальної пластини з уступом для закріплення прихоплювачем в корпусі збірного різця:

– варіант (тип 1) з базуванням різальної пластини по нижній частині прижимного уступу («нижній упор»), представлений на рисунку 3.4 а, який відповідає схемі базування конструкції фірми «Sandvik Coromant»;

– варіант (тип 2) з базуванням по верхній частині прижимного уступу («верхній упор»), представлений на рисунку 3.4 б [32].

При дослідженні міцнісних характеристик розглянутих конструктивних варіантів проводився розрахунок напружень (нормальних і еквівалентних) в конструкціях збірних різців. Для визначення сил різання використовувався банк даних, що містить режими різання при обробці на верстатах в умовах ПрАТ «НКМЗ». Розрахунок проводився для найбільш характерних режимів для різців з висотою $H = 50$ мм – глибина різання $t = 15$ мм, подача $S = 1,10$ мм/об, швидкість різання $V = 53$ м/хв. Незважаючи на наявність областей концентрації напружень в елементах конструкції, максимальні значення нормальних та еквівалентних напружень розташовуються на передній поверхні різальної пластини. Результати розрахунку напружень наведені в таблиці 3.5 (області дії максимальних напружень зображені на рисунках чорним кольором).

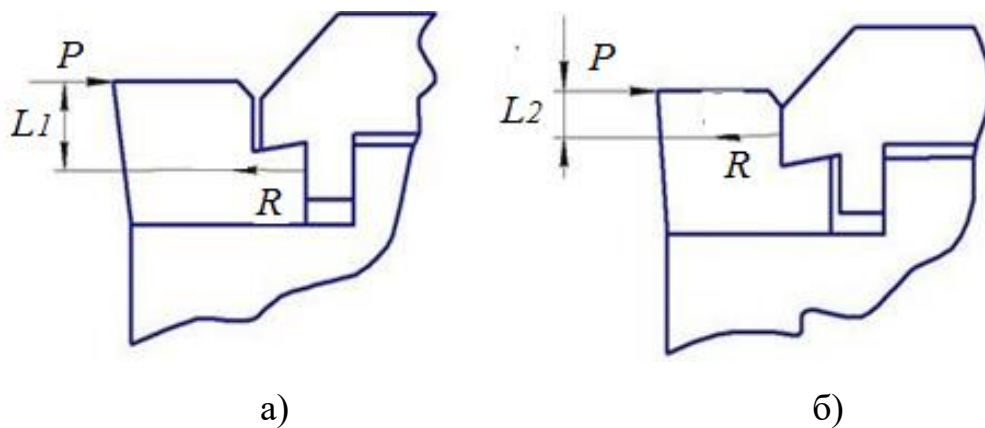
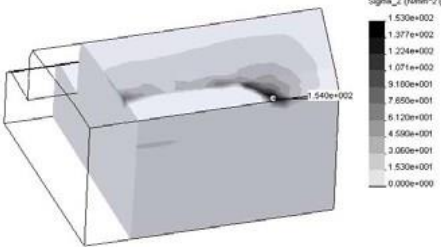
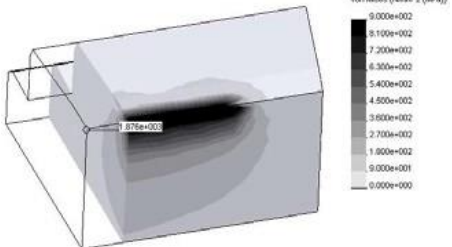
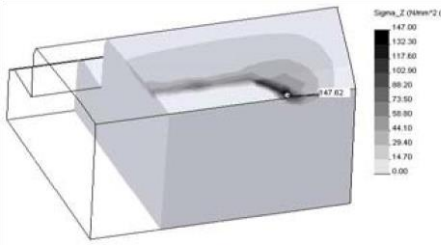
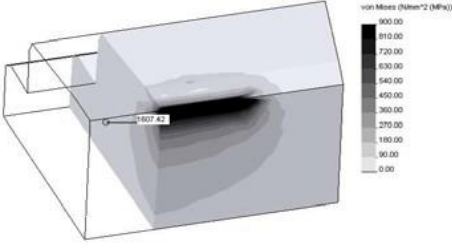


Рисунок 3.4 – Схеми базування різальної пластини збірних різців:

а – відстань в конструкції по вертикалі L_1 між напрямками радіальної сили різання P та її реакцією R (тип 1);

б – відстань в конструкції по вертикалі L_2 між напрямками радіальної сили різання P та її реакцією R (тип 2).

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку напружень в розглянутих конструкціях різців

Варіант	Розподіл нормальних розтягуючих напружень σ_z МПа	Розподіл еквівалентних напружень $\sigma_{\text{е}} \text{ Мізеса, МПа}$
Тип 1, $\sigma_{z \text{ max}} = 154 \text{ МПа}$ $\sigma_{\text{е max}} = 1876 \text{ МПа}$		
Тип 2, $\sigma_{z \text{ max}} = 147 \text{ МПа}$ $\sigma_{\text{е max}} = 1607 \text{ МПа}$		

Як видно з представлених розподілів при зміні схеми базування різальної пластини відбувається зміна максимальних значень нормальних і еквівалентних напружень.

Таким чином, в конструкції збірного різця з розташуванням упорної поверхні прихвата (тип 2) максимально близько до лінії дії P (складових сил різання P_x P_y), є більш доцільним і веде до зниження виникаючих напружень в різальній пластині.

Істотним фактором, який має вплив на міцність збіркої конструкції, є умови навантаження ріжучої частини різця, які можуть значно змінюватися при врізанні і виході інструменту при переривчастому різанні. На відміну від встановленого процесу різання, де співвідношення між складовими сили різання прийнято вважати постійним, при врізанні ці співвідношення змінюються, що призводить до зміни напрямку в просторі сили різання. Важливим є також питання впливу співвідношення складових сили різання і, відповідно, напрямків дії самої сили різання на виникаючі в збірній конструкції різця деформації та напруження. Розрахунки проводилися для конструкцій представлених на рисунку 3.7. Параметри режиму різання для розрахунку значень складових сил різання вибиралися такі самі, як і в

першому випадку. В якості параметру, що змінює напрямок дії сили різання в просторі (кута Θ) використовувалося відношення складових сили різання $P_x P_y P_z$. При моделюванні ці співвідношення приймалися таким чином, щоб кут Θ приймав наступні значення $\Theta = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 40^\circ; 60^\circ$.

Результати розрахунків нормальних і еквівалентних напружень різальної пластини збірного різця представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати розрахунку напружень різальної пластини збірного прохідного різця при різних умовах навантаження.

№	Умови навантаження	Розподіл нормальних розтягуючих напружень σ_z МПа	
		Тип 1	Тип 2
1	$\Theta = 0^\circ$ $P_z = 12810\text{H}$ $P_x P_y = 0\text{H}$		
2	$\Theta = 10^\circ$ $P_z = 12620\text{H}$ $P_x P_y = 2225\text{H}$		
3	$\Theta = 20^\circ$ $P_z = 11980\text{H}$ $P_x P_y = 4544\text{H}$		
4	$\Theta = 40^\circ$ $P_z = 9815\text{H}$ $P_x P_y = 6236\text{H}$		
5	$\Theta = 60^\circ$ $P_z = 6406\text{H}$ $P_x P_y = 8124\text{H}$		

Зміна співвідношень між значеннями складових сили різання P_x , P_y і P_z призводить до зміни характеру розподілу нормальних напружень на передній поверхні різальної пластини. Максимальні значення нормальних напружень на передній поверхні різальної пластини спостерігаються при значенні $\Theta = 0^\circ$. Так само при даному значенні Θ спостерігається максимальна область дії на передній поверхні пластини еквівалентних напружень, подібна картина спостерігається також по головній задній поверхні. Зі збільшенням кута Θ , а відповідно і складових сил різання P_x , P_y , відбувається зниження величини нормальних напружень на передній і головній задній поверхнях пластини, а також звуження сфери їхньої дії. Це пояснюється перерозподілом розтягуючих та стискаючих напружень по мірі збільшення P_x , P_y .

Графік залежності максимальних значень нормальних напружень в залежності від параметра Θ представлений на рисунку 3.5.

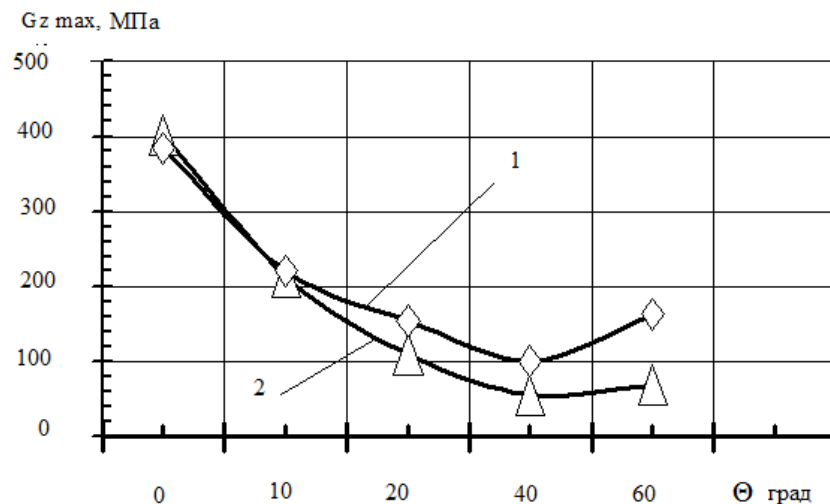


Рисунок 3.5 – Зміна значень максимальних нормальних розтягуючих напружень на передній поверхні різальної пластини в залежності від кута Θ :

- 1 – базування пластини по «нижній» упорній поверхні (тип 1);
- 2 – базування пластини по «верхній» упорній поверхні (тип 2)

3.4 Виробничі випробування конструкцій збірних різців

З метою вибору базової конструкції вузла кріплення різальної пластини проведений комплекс порівняльних виробничих випробувань збірних різців, описаних вище.

Всі конструкції різців були обладнані різальними пластинами з твердого сплаву Т5К10 і мали такі основні конструктивні та геометричні параметри: робоча висота різця $H = 50$ мм; довжина ріжучої крайки $l = 25$ мм; головний кут в плані $\varphi = 60^\circ$; передній кут $\gamma = 10^\circ$; головний задній кут $\alpha = 5^\circ$; кут нахилу головної різальної крайки $\lambda = 5^\circ$; радіус при вершині $r = 1,6$ мм.

Випробування проводилися в умовах ПрАТ «НКМЗ» на токарних верстатах моделі 165 при чорновому зовнішньому точінні заготовок із сталей 45, 9ХФ, 38Х2Н2МА (кірка, окалина, нерівномірний припуск). В процесі випробувань фіксувалися умови випробувань, час роботи до відмови і вид відмови. В якості критеріїв відмови були прийняті: знос по головній задній поверхні $h_z = 1,5$ мм; викришування головної різальної крайки $\geq 1,0$ мм; руйнація різальної пластини або інших елементів різця, що вимагає припинення процесу різання. Результати випробувань наведені в таблиці 3.7.

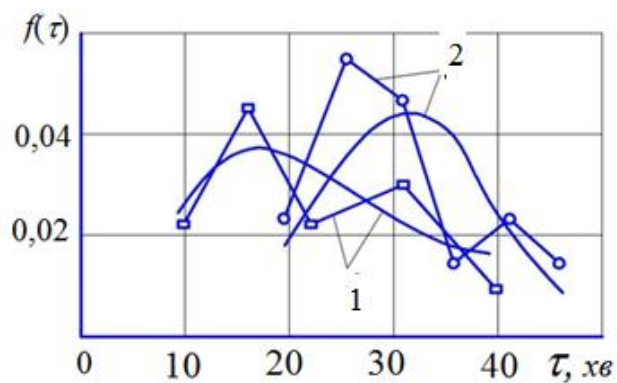
В конструкціях різців застосовується пластина з уступом під прихват з однієї марки твердого сплаву, аналогічні геометричні та конструктивні параметри. Кращою виявилася конструкція, в якій базування різальної пластини виконано по «верхній» упорній поверхні (тип 2). Вона відрізняється вищими показниками міцності (відсутність руйнації пластини), безвідмовності (найбільший середній періоди стійкості), стабільності роботи (найменший коефіцієнт варіації стійкості).

Таблиця 3.7 – Умови і результати виробничих випробувань різців

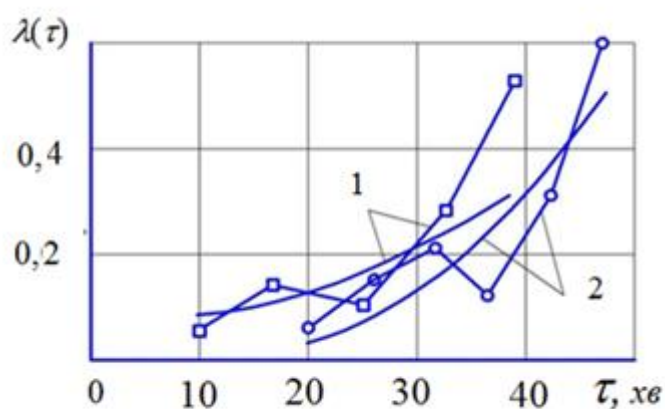
Назва параметра		Базування пластин	
		1	2
Середня глибина різання, мм		15,0	
Середня величина подачі, мм/об		1,36	
Середня швидкість різання, м / хв		59,0	
Обсяг вибірки		19	23
Питомі. витрата тв. сплаву, кг/мм ³		0,46	0,32
Співвідношення видів відмов, %	знос	53	83
	викришування	21	17
	руйнація	26	0
Середній період стійкості, хв		23,1	31,4
Довірчий інтервал, хв		±2,9	±3,1
Коефіцієнт варіації стійкості		0,47	0,27
Закон розподілу		Вейбулла-Гнеденко	Норм.

На рисунку 3.6 приведені характеристики надійності ступінчастих збірних різців отримані експериментально, а саме $f(\tau)$ – щільність імовірності розподілу періоду стійкості (рис. 3.6 а), $\lambda(\tau)$ – інтенсивність відмов (рис. 3.6 б) та $P(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи (рис. 3.6 в). Перевірка відповідності статистичного розподілу стійкості теоретичному, проведена за критерієм Пірсона та Колмогорова, показала високий ступінь відповідності цих розподілів – розрахункові значення критерію Пірсона менше табличних ($1,42 \dots 3,29 < 9,21 \dots 11,34$); за критерієм Колмогорова статистичні та теоретичні розподіли знаходяться в зоні вірогідності $0,97 \dots 1,0$.

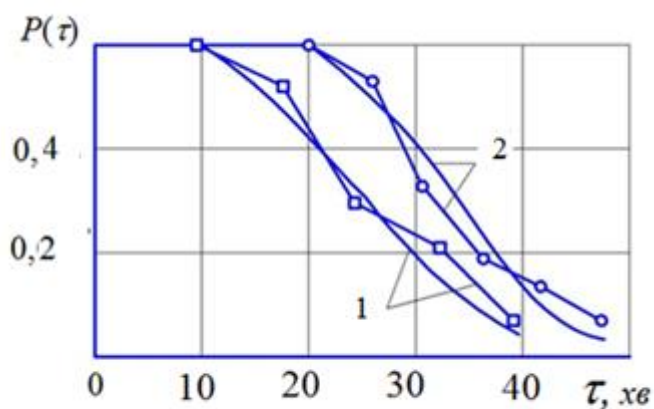
Вплив методу базування різальної пластини на надійність інструменту визначається в першу чергу зміною структури відмов: якщо для різців з нижнім упором (тип 1) мало місце 26% руйнацій, то для різця з верхнім упором (тип 2) руйнації були відсутні.



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Характеристики безвідмовності збірних різців (ломана лінія – статистична оцінка, суцільна – теоретичне значення):

- а) щільність імовірності розподілу періоду стійкості; б) інтенсивність відмов;
в) імовірність безвідмовної роботи; 1 – базування різальної пластини по «нижній» упорній поверхні (тип 1); 2 – базування різальної пластини по «верхній» упорній поверхні (тип 2)

3.5 Вдосконалення вузла кріплення різальних пластин ступінчастих збірних різців

Розроблена вдосконалена конструкція вузла кріплення різальної пластини для чорнової обробки деталей на важких верстатах з великими перерізами зрізаного шару [88].

Схема вузла кріплення різальної пластини приведена рисунку 3.7.

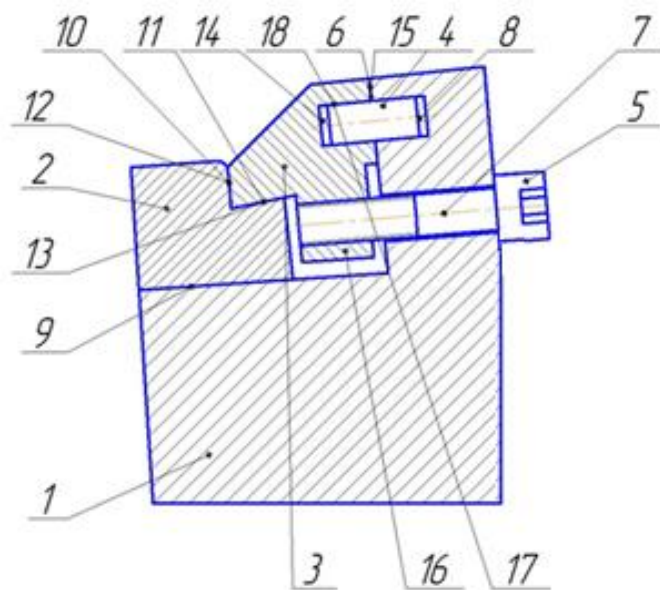


Рисунок 3.7 – Схема вдосконаленого вузла кріплення різальної пластини

Різальний інструмент складається з корпусу 1, різальної пластини 2 з кутовим пазом, Г-образного прихвата 3, циліндричного елемента 4 та кріпильного гвинта 5. На корпусі 1 виконано гніздо під різальну пластину 2 та прихват 3 з упорною поверхнею 6. Отвір під кріпильний гвинт 5 з віссю 7, глухий циліндричний отвір під запресовування циліндричного елемента 4 з віссю 8, паралельною до осі 7. Різальна пластина 2 містить опорну поверхню 9, вертикальну упорну 10 і притискну 11 поверхні кутового паза. Г-образний прихват 3 містить притискувальний виступ з упорною 12 та притискувальною 13 поверхнями, додатковий циліндричний отвір 14 зі

сторони упорної поверхні 15 тильної частини і нижній виступ 16 з різьбовим отвором.

Закріплення різальної пластини виконується таким чином.

При загвинчуванні гвинта 5 притискувальний виступ прихвата 3 своїми упорною 12 та притискувальною 13 поверхнями взаємодіє відповідно з упорною 10 та притискною 11 поверхнями кутового паза різальної пластини 2, опорною циліндричною поверхнею 17 циліндричного отвору 14 – з опорною поверхнею 18 циліндричного елемента 4, а упорною поверхнею 15 – з упорною поверхнею 6 гнізда корпусу 1. При цьому різальна пластина 2 своєю опорною поверхнею 9 притискується до опорної поверхні гнізда корпусу 1, упорною поверхнею 10 – до упорної поверхні 12 притискувального виступа прихвата 3. Опорна поверхня 17 циліндричного отвору 14 в свою чергу притискується до опорної циліндричної поверхні 18 циліндричного елемента 4, а упорна поверхня 15 тильної частини прихвата – до упорної поверхні 6 гнізда корпусу 1.

Завдяки тому, що опорна поверхня 17 циліндричного отвору 14 прихвата 3 та опорна поверхня циліндричного елемента 4 мають циліндричну форму, забезпечується щільне взаєморозміщення притискувальної поверхні 13 притискного виступа прихвата 3 та притискної поверхні 11 кутового паза різальної пластини 2.

3.6 Аналітичні дослідження ступінчастого збірного різця

Аналітичні дослідження ступінчастого збірного різця для двох схем кріплення різальних пластин з уступом (рис. 3.8)

На рисунку 3.9 представлена модель базової схеми кріплення різальної пластини, на рисунку 3.10 – модель вдосконаленої схеми кріплення різальної пластини.

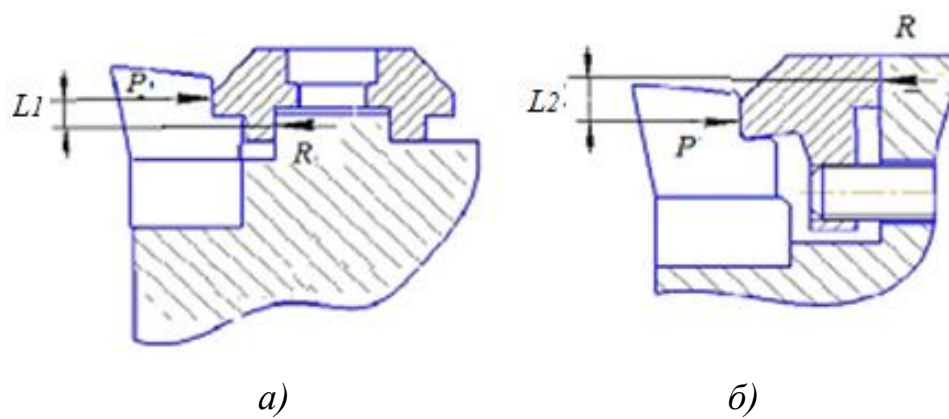


Рисунок 3.8 – Схема кріплення різальної пластини:

a) – базового вузла, *б)* – вдосконаленого вузла.

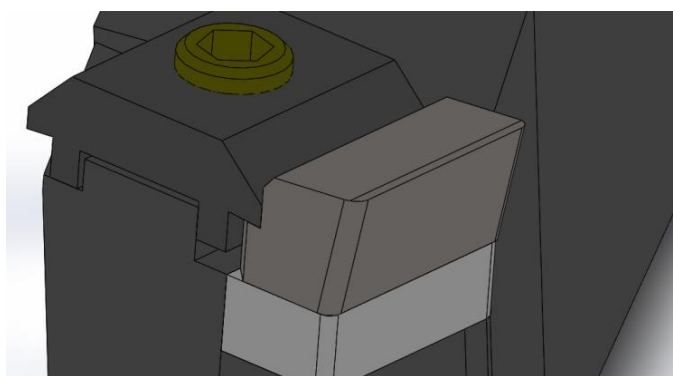


Рисунок 3.9 – Модель базової схеми кріплення різальної пластини

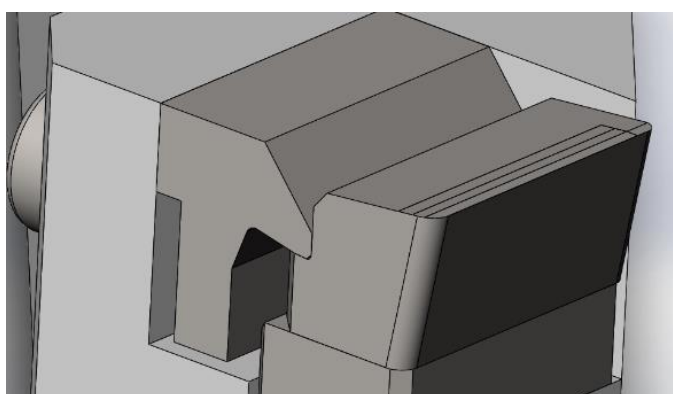
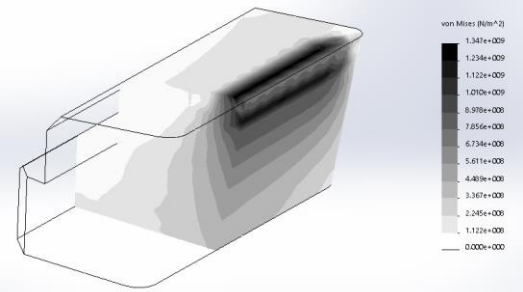
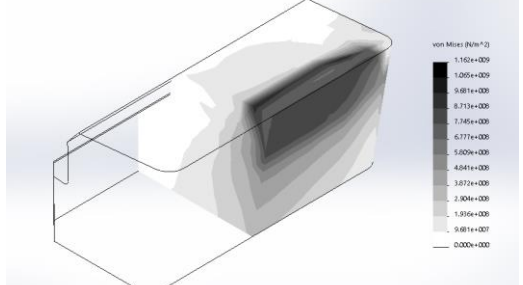


Рисунок 3.10 – Модель вдосконаленої схеми кріплення різальної пластини

При дослідженні міцнісних характеристик розглянутих конструктивних варіантів вузлів кріплення різальних пластин з уступом проводився розрахунок напружень в збірних конструкціях інструменту. Для визначення сил різання використовувався банк даних, що містить режими різання при чорновій обробці збірними різцями на важких токарних верстатах в умовах ПрАТ «НКМЗ». Розрахунок проводився для середніх режимів різання для даного інструменту: $t = 30$ мм, $s = 1,40$ мм/об, $v = 60$ м/хв. Незважаючи на наявність областей концентрації напружень в елементах конструкції, максимальні значення еквівалентних напружень розташовуються на передній поверхні різальної пластини. Наведені результати розрахунку напружень в таблиці 3.8 показують, що вдосконалена конструкція вузла кріплення різальної пластини має нижчі максимальні еквівалентні напруження в різальній пластині ніж у базовій конструкції вузла кріплення різальної пластини (області дії максимальних напружень зображені на рисунках чорним кольором).

При конструюванні ступінчастого збірного різця з точки зору ефективності регулювання положення різальної крайки пластини, що оброблює зовнішній зрізуваний шар припуску та знаходиться в вільній схемі різання, була прийнята базова конструкція вузла кріплення, яка має можливість регулювання положення пластини шляхом повороту прихоплювача (рис 3.11). Для різальної пластини, яка оброблює внутрішній зрізуваний шар припуску прийнята вдосконалена конструкція вузла кріплення різальної пластини.

Таблиця 3.8 – Результати розрахунку напружень в розглянутих конструкцій різців

Варіанти кріплення, максимальні еквівалентні напруження	Розподіл еквівалентних напружень σ_3 Мізеса, МПа (переріз)
Базовий вузол кріплення різальної пластини $\sigma_3 \text{ max} = 1347 \text{ МПа}$	
Вдосконалений вузол кріплення різальної пластини $\sigma_3 \text{ max} = 1162 \text{ МПа}$	

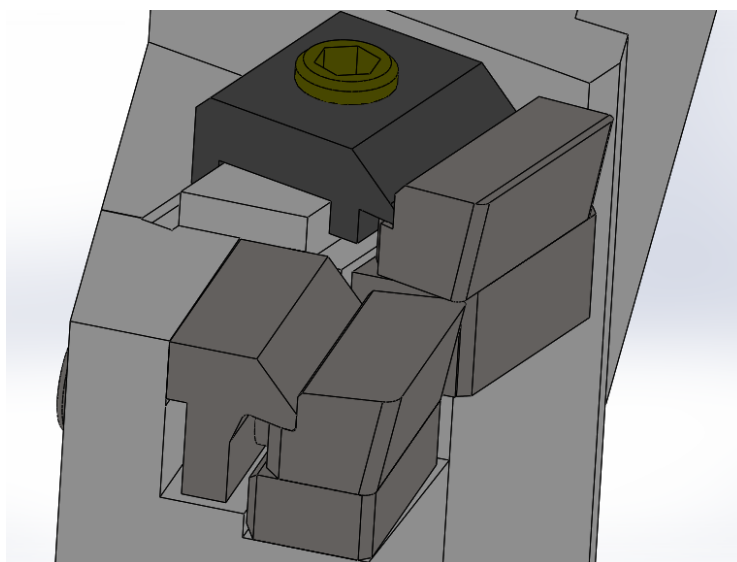


Рисунок 3.11 – Модель схем вузлів кріплення різальних пластин ступінчастого збірного різця.

На рисунку 3.12 показані розподіли еквівалентних напружень в різальних пластинах ступінчастого збірного різця.

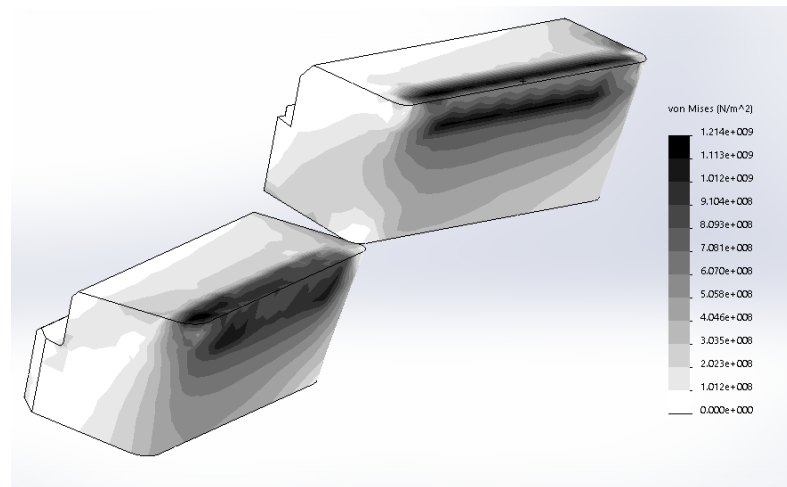


Рисунок 3.12 – Розподіл еквівалентних напружень в різальних пластинах ступінчастого збірного різця (σ , Мізеса, МПа)

Дослідженнями встановлено, що міцнісні характеристики конструкцій вузлів кріплення різальних пластин в ступінчастому збірному різці мають близькі по значенню показники еквівалентних напружень, що має суттєве значення для забезпечення необхідної загальної міцності інструменту та підтверджують ефективність прийнятих конструктивних рішень при проектуванні інструменту.

3.7 Дослідження надійності збірних різців нової конструкції

Вихідним етапом вдосконалення конструкцій збірних різців є аналіз відмов інструментів за допомогою результатів експлуатаційних випробувань при чорновій обробці деталей з великими перерізами зрізаного шару збірними різцями з механічним кріпленням спеціальної різальної пластини з уступом (рис.3.13).

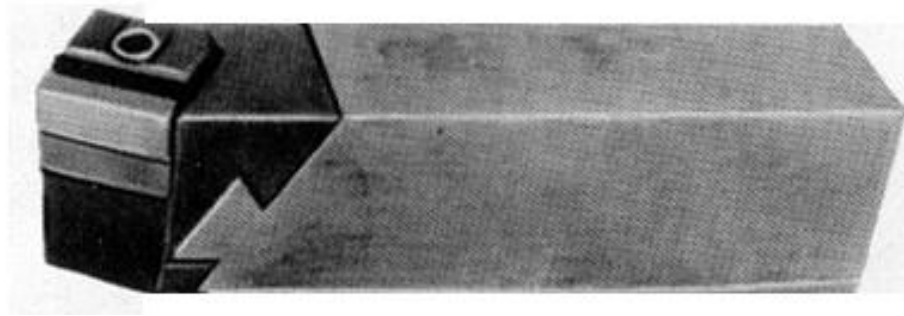


Рисунок 3.13 – Збірний різець для чорнової обробки на важких верстатах токарної групи

Проведені випробування збірних твердосплавних різців на важких токарних верстатах в умовах ПрАТ «НКМЗ» показали, що наряду зі зносом суттєве місце займає руйнування різальної частини інструменту. Протокол виробничих випробувань збірних різців з механічним кріпленням різальних пластин з уступом в умовах ПАТ «НКМЗ» приведений в додатку А. В таблиці 3.9 наводяться дані по видам відмов збірних різців.

Таблиця 3.9 – Види відмов по результатам експлуатаційних випробування збірних різців

Види відмов	Розподіл відмов збірних різців при точіння поверхні з кіркою	
	з переривами в процесі різання, %	без переривів в процесі різання, %
Викришування	22,3%	13,7%
Руйнація	23,4%	11,1%
Знос	54,3%	75,2%

На рисунку 3.14 приведена щільність імовірності розподілів періодів стійкості $f(\tau)$ збірних різців за результатами виробничих випробувань. В таблиці 3.10 приведені результати виробничих випробувань збірних різців. Імовірнісні експлуатаційні характеристики збірних різців наведені в додатку А.

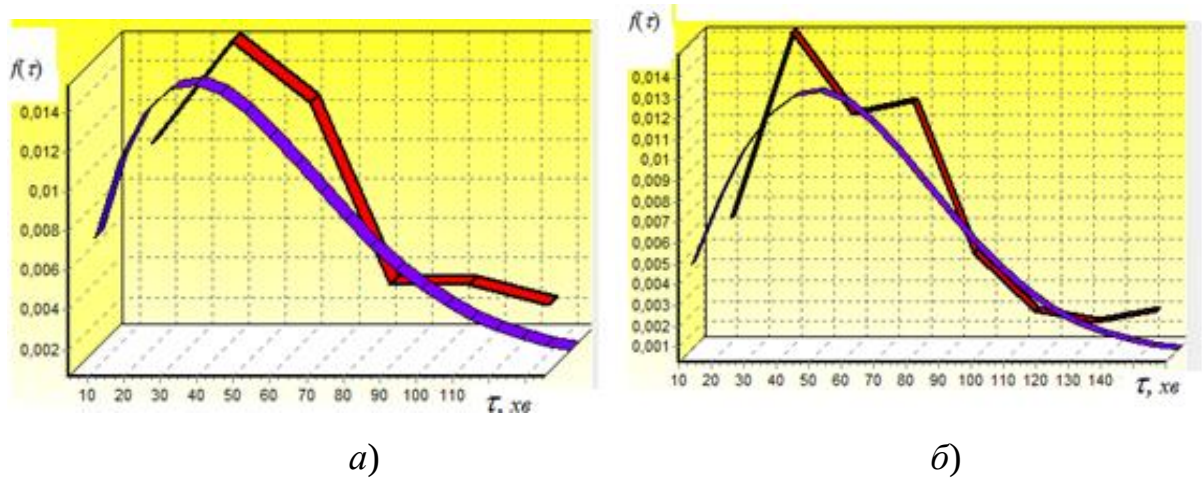


Рисунок 3.14 – Розподіл стійкості інструменту $f(\tau)$ при точінні збірними різцями: *а* – по схемі різання з двома робочими вершинами; *б* – по схемі різання з однією робочою вершиною.

Таблиця 3.10 – Результати виробничих випробувань збірних різців

Назва параметра	Схеми різання ступінчастих збірних різців	
	З двома робочими вершинами	З однією робочою вершиною
Середня глибина різання, мм	26,7	
Середня величина подачі, мм/об	1,37	
Середня швидкість різання, м / хв	59,6	
Обсяг вибірки	45	26
Середній період стійкості, хв	49,5	61,5
Коефіцієнт варіації стійкості	0,62	0,35

В результаті виробничих випробувань встановлено, що середня стійкість зростає в 1,2 рази а коефіцієнт варіації стійкості знижується в 1,7 рази в різців, працюючих по схемі різання з однією робочою вершиною, відносно різців, працюючих по схемі різання з двома робочими вершинами, що суттєво підвищує продуктивність процесу різання та надійність інструменту нової конструкції ступінчастого збірного різця.

На рисунку 3.15 – Показний вид різальної частини ступінчастого збірного різця.



Рисунок 3.15 – Різальна частина ступінчастого збірного різця

3.8 Висновки до розділу

1. В результаті досліджень напружено-деформованого стану конструкцій різців та порівняльних виробничих випробувань встановлено, що схема базування пластини по верхній упорній поверхні уступу суттєво відрізняється більш високими показниками міцності, безвідмовності. Ця конструкція прийнята як базова для чорнової обробки конструкційних сталей на важких токарних верстатах.

2. На підставі проведених досліджень напружено деформованого стану збірних конструкцій ступінчастих різців запропоновані математичні моделі для визначення величини нормальних і еквівалентних напружень, які враховують конструктивні варіанти вузлів механічного кріплення різальних пластин, особливості навантаження та контактної взаємодії пластин з елементами зовнішнього і внутрішнього зрізу припуску.

3. Уточнено розподіл схеми реакцій з боку базових поверхонь пластини з елементами базування вузлів кріплення на напружено-деформований стан різця, що дозволяє суттєво підвищувати міцнісні характеристики збірного інструменту на стадії його проектування.

4. На підставі результатів досліджень напружено-деформованого стану ступінчастих збірних різців розроблена конструкція вузлу кріплення різальною пластини, який дозволяє зменшити величину нормальних напружень на 15% за рахунок раціонального розташування упорних поверхонь прихоплювача відносно векторів складових сили різання P_x і P_y .

5. За результатами досліджень напружено-деформованого стану різців встановлено, що нормальні напруження у пластині, яка оброблює зовнішній шар припуску в напрямку подачі, зменшуються на 20 % у порівнянні з традиційною ступінчастою схемою різання з двома вершинами. Таке конструктивне рішення розміщення пластин дозволяє зменшити кількість відмов у вигляді їх руйнації.

6. За результатами виробничих випробувань збірних різців при знятті великих перерізів зрізуваного шару встановлено, що стійкість збірних різців, які працюють по ступінчастій схемі різання з одною вершиною зростає до 30% у порівнянні з різцями, які працюють за ступінчастою схемою з двома вершинами.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ РІЗАННІ СТУПІНЧАСТИМИ РІЗЦЯМИ

4.1 Структурна модель динамічної системи важкого токарного верстата при різанні ступінчастими різцями

Для аналітичних досліджень динамічних явищ, що виникають в процесі різання на важких токарних верстатах ступінчастими різцями, запропонована структурна та математична модель технологічної системи верстата.

Дана модель заснована на результатах аналізу конструкцій і конструктивних особливостей ряду важких токарних верстатів з діаметрами обробки над станиною до 2500 мм. Зокрема для побудови моделі були розглянуті верстати моделей 1K665, 1A665Ф3, 1K670Ф3, 1K675 що використовуються в умовах ПАО «ЕМСС» та ПрАТ «НКМЗ» для обробки великогабаритних корпусних деталей масою до $m = 20$ т (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Приклад, що оброблюються на важких токарних верстатах в умовах ПАТ «НКМЗ», $D_{\max} = 2100$ мм, $L = 3200$ мм.

Багатьма авторами [22, 23, 24, 25, 26, 27] при побудові моделей технологічних систем і аналізі динамічних явищ, що виникають в процесі

різання (зміна сил різання, коливання елементів еквівалентної пружної системи верстата, деталі, аналізи точності системи і її стійкості), застосовувалися різні підходи. Найбільшого поширення при дослідженнях отримала замкнена динамічна система [22, 23, 24], в яку входить процес різання, еквівалентна пружна система (ЕПС) верстата, а також враховується фазова характеристика зміни сили різання (рис 4.2).

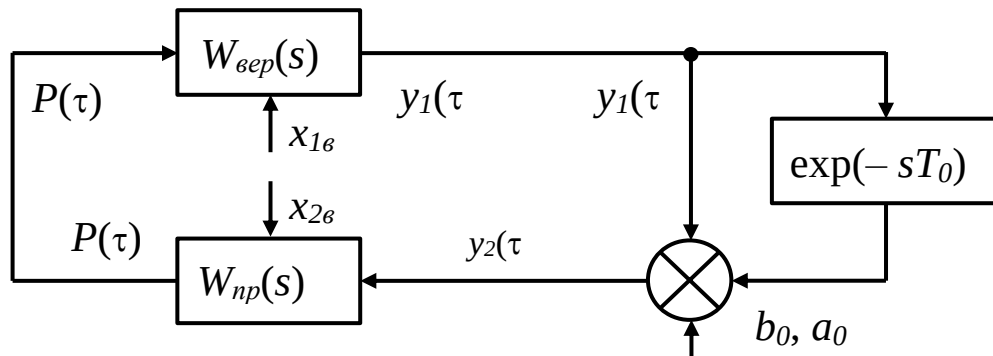


Рисунок 4.2 – Структурна модель динамічної системи верстата

У даній роботі для дослідження, розрахунку та аналізу динамічних явищ при різанні збірними ступінчастими різцями запропонована вдосконалена структурна модель динамічної системи верстата, що включає в себе два процеси різання двома різальними пластинами. Структурна модель динамічної системи представлена на рисунку 4.3.

У представлений на рисунку 4.3 структурі прийняті наступні позначення:

- a_0, b_0 – початкові товщина та ширина шару, що зрізується;
- K_{ab} – коефіцієнт, що визначає зменшення товщини та ширини шару, що зрізується другою пластиною інструмента;
- $W1_{np}(s), W2_{np}(s)$ – процеси різання;
- $W_{вep}(s)$ – передавальна функція еквівалентної пружної системи (ЕПС) верстата;
- $\exp(-s\tau)$ – фазова характеристика процесу різання;

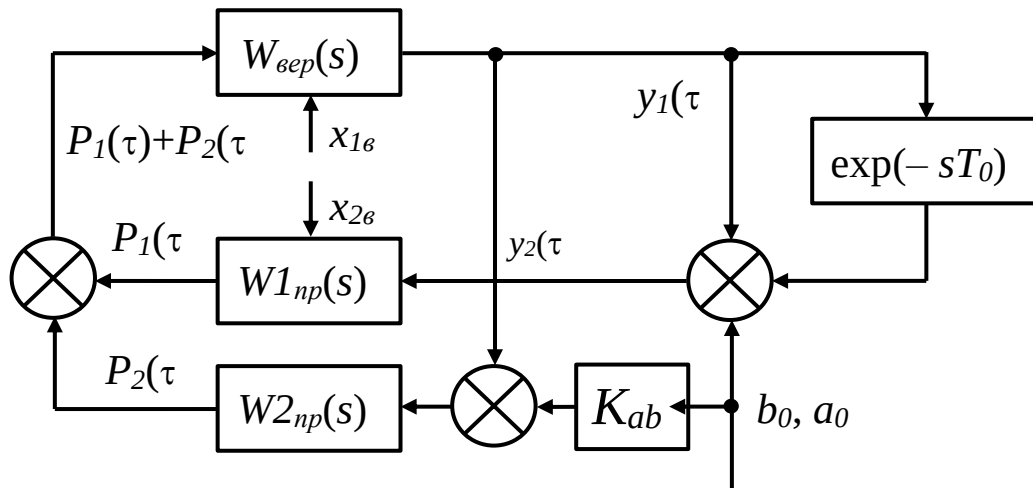


Рисунок 4.3 – Структурна модель динамічної системи зі збірним інструментом для важких верстатів

– $y_1(\tau), y_2(\tau)$ – пружні переміщення, що виникають в ЕПС верстата, та пружні переміщення, що виникають в наслідок руху інструменту по сліду від попереднього проходу;

– $x_{1вн}, x_{2вн}$ – зовнішні впливи на технологічну систему, пов'язані з наявністю випадкових і систематичних похибок.

Особливістю запропонованої структурної моделі, у порівнянні з раніше розробленими моделями [28, 29], є наявність двох процесів різання. Така структура дозволяє розглядати коливання елементів технологічної системи при різанні ступінчастими різцями.

Для практичної реалізації структурної моделі, представленої на рисунку 4.3 необхідно розробити систему диференціальних рівнянь, що потребує:

– скласти розрахункову схему технологічної системи важкого токарного верстата, яка виконує обробку деталей ступінчастими різцями;

– визначити модель процесу різання у вигляді рівнянь, що описують зв'язок елементів режиму різання ступінчастими різцями зі значеннями складових сили різання

– визначити залежності, що враховують зовнішні впливи на

технологічну систему, пов'язані з наявністю випадкових і систематичних похибок;

– скласти систему диференціальних рівнянь, що описує динамічні процеси в технологічній системі;

4.2 Розрахункова схема еквівалентної пружної системи важкого токарного верстата для випадку різання ступінчастими різцями

Для розробки розрахункової схеми технологічної системи важких токарних верстатів, в якості бази був прийнятий важкий токарний верстат мод. 1K665Ф3 (рис 4.4).



Рисунок 4.4 – Загальний вигляд токарно-карусельного верстата мод. 1K665Ф3

Верстат 1K665Ф3 призначений для продуктивної чорнової і чистової обробки різних заготовок з чорних і кольорових металів. На верстаті можна виконувати наступні технологічні операції: точіння та розточування циліндричних і конічних поверхонь; підрізування торцевих поверхонь, в тому

числі і з постійною швидкістю різання; прорізом канавок і відрізу; свердління, зенкування і розгортання центральних отворів. Клас точності Н.

Стисла технічна характеристика верстата наведена у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Стисла технічна характеристика верстата мод. 1K665Ф3

№	Параметр	Значення
1	Найбільший діаметр виробу, що обробляється над: станиною, мм супортом, мм	1 650 1 250
2	Максимальна довжина виробу, що обробляється, мм	8 000
3	Максимальна вага виробу, що обробляється, кг	40 000
4	Частота обертання шпинделя, об/хв	1,25...250
5	Максимальний крутний момент на шпинделі, кНм	70
6	Діапазон подач супорта, мм/хв	0,1...4 000
7	Потужність двигуна головного приводу, кВт	110
8	Габарити верстата, мм: довжина ширина висота	15,885 6,270 2,300
9	Маса верстата, кг	58 130

Безпосередньо для розробки розрахункової схеми використовувалися методики [23, 25, 27], результати експериментальних досліджень верстата, а також допущення запропоновані авторами робіт [22, 25, 27], зокрема:

- технологічна система розглядається як замкнута процесом різання сукупність елементів із зосередженими масами, з'єднаними між собою лінійними пружними і дисипативними зв'язками;
- всі пружні деформації і переміщення елементів технологічної системи, що виникають при дії складових сили різання P_x , P_y , P_z відбуваються в пружних елементах системи;
- з урахуванням маси і габаритів оброблюваної деталі, остання розглядається як абсолютно жорсткий елемент технологічної системи;
- різальний інструмент розглядається як система, що складається з корпусу, який містить дві різальні пластини, кожна з яких виконує процес різання зі своєю глибиною різання.

З урахуванням прийнятих припущень, а також конструктивних особливостей обладнання, що розглядається, технологічна система важкого токарного верстата, має вигляд, представлений на рисунку 4.5 та описує випадок обробки ступінчастим різцем з одновершинною схемою різання.

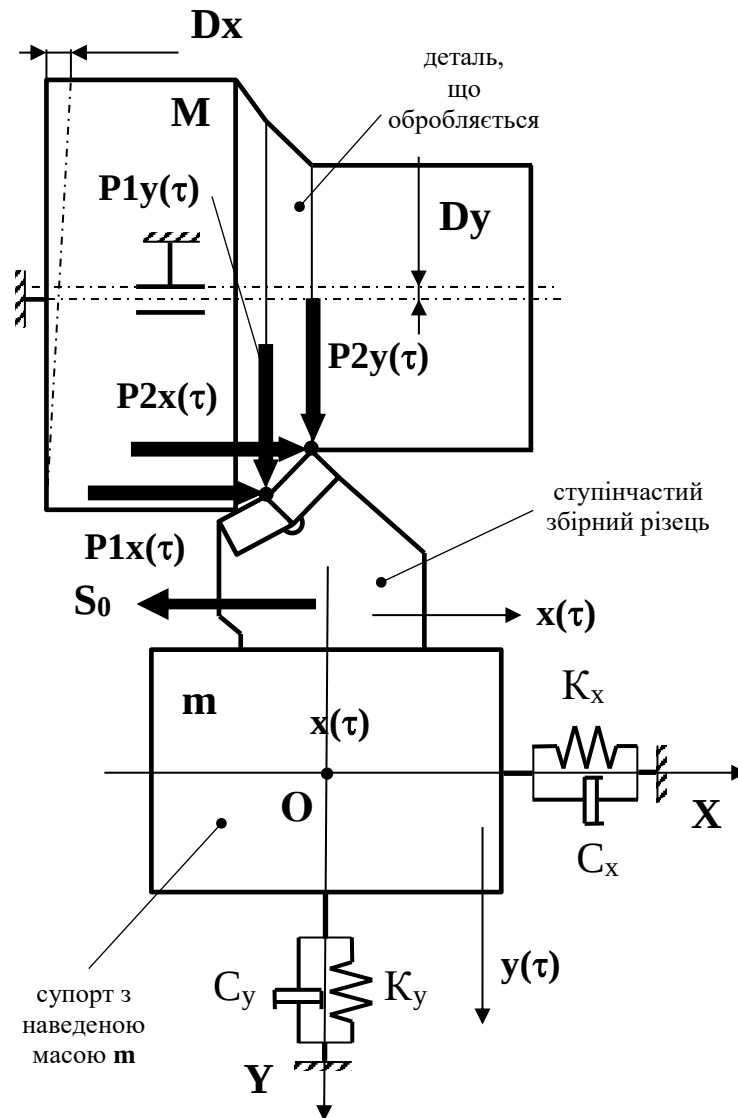


Рисунок 4.5 – Розрахункова схема технологічної системи важкого токарного верстата при обробці ступінчастим різцем за одновершинною схемою

У наведений на рисунку 4.5 розрахунковій схемі технологічної системи верстата прийняті наступні позначення:

- M, m – наведені маси відповідно деталі, що обробляється та супорта верстата;
- D_x, D_y – погрішність встановлення деталі на верстаті у напрямках координатних вісей X і Y ;
- $P1_x, P2_x, P1_y, P2_y$ – складові сили різання, що виникають при різанні двома різальними пластинами ступінчастого різця;
- K_x, K_y, C_x, C_y - коефіцієнти жорсткості та демпфірування елементів технологічної системи верстата, що розглядається, в напрямках координатних вісей;
- $x(\tau), y(\tau)$ – пружні переміщення елементів технологічної системи верстата.

Для складання рівнянь руху елементів даної технологічної системи скористаємося рівнянням Лагранжа другого роду [30]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = \sum Q_k, \quad (4.1)$$

де: T – кінетична енергія системи, яка є функцією узагальнених координат;

$\sum Q_k$ – сума узагальнених сил, що діють на елементи системи;

q_k – узагальнені координати.

В коливальній системі розрізняють узагальнені сили трьох видів: потенційні – $Q_U = -\partial U / \partial q$, – є функціями потенційної енергії системи і узагальнених координат, дисипативні – $Q_R = -\frac{\partial R}{\partial \dot{q}_k}$, – що є функцією сил тертя і зовнішні сили, за якими збережемо позначення $\sum Q_k$. З урахуванням прийнятих позначень рівняння Лагранжа представимо у вигляді:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = -\frac{\partial U}{\partial q_k} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_k} + \sum Q_k \quad (4.2)$$

У якості узагальнених координат q_k приймаємо пружні переміщення інструменту $x(\tau)$, $y(\tau)$ по напрямках координатних вісей.

Оскільки функція кінетичної енергії системи T в даному випадку не залежить від координат, то похідні кінетичної енергії по узагальнених координатах q_k будуть дорівнювати нулю, тобто $\partial T / \partial q_k = 0$.

Стосовно до розрахункової схеми, наведеної на рисунку 4.5, вирази для частинних похідних кінетичної і потенційної енергії системи по локальних узагальнених координатах матимуть вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_x}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial (m\dot{x}^2 + m\dot{y}^2)}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} 2m\dot{x} + 0 \right) = \frac{d}{dt} (m\dot{x}) = m \frac{d^2 x}{dt^2} = m\ddot{x};$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_y}{\partial \dot{y}} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial (m\dot{x}^2 + m\dot{y}^2)}{\partial \dot{y}} \right) = \frac{d}{dt} \left(0 + \frac{1}{2} 2m\dot{y} \right) = \frac{d}{dt} (m\dot{y}) = m \frac{d^2 y}{dt^2} = m\ddot{y};$$

$$Q_{Ux} = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial (K_x x^2 + K_y y^2)}{\partial x} = \frac{1}{2} 2K_x x + 0 = K_x x;$$

$$Q_{Uy} = \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{\partial (K_x x^2 + K_y y^2)}{\partial y} = 0 + \frac{1}{2} 2K_y y = K_y y;$$

$$Q_{Rx} = \frac{\partial R}{\partial \dot{x}} = \frac{1}{2} \frac{\partial (C_x \dot{x}^2 + C_y \dot{y}^2)}{\partial \dot{x}} = \frac{1}{2} 2C_x \dot{x} + 0 = C_x \dot{x};$$

$$Q_{Ry} = \frac{\partial R}{\partial \dot{y}} = \frac{1}{2} \frac{\partial (C_x \dot{x}^2 + C_y \dot{y}^2)}{\partial \dot{y}} = 0 + \frac{1}{2} 2C_y \dot{y} = C_y \dot{y};$$

$$Q_x = P_x(\tau), Q_y = P_y(\tau);$$

$$Q_x = P1x(\tau) + P2x(\tau), Q_y = P1y(\tau) + P2y(\tau),$$

де: m – приведена маса технологічної системи, кг;

C_x , C_y – наведені коефіцієнти демпфірування відповідно за напрямками осей X і Y , Н·с/м;

K_x , K_y – наведені коефіцієнти жорсткості відповідно за напрямками осей X і Y , Н/м;

$P1x(\tau)$, $P2x(\tau)$, $P1y(\tau)$, $P2y(\tau)$ – складові сили різання, Н.

Виконавши підстановку виразів, що визначають кінетичну енергію системи і вирази для узагальнених сил в рівняння (4.2), отримаємо рівняння руху елементів даної динамічної системи в координатах X – Y .

Таким чином, математичною моделлю даної системи буде система диференціальних рівнянь другого порядку, щодо змінних x – пружне переміщення інструменту в напрямку осі X і y – пружне переміщення інструменту в напрямку осі Y :

$$\begin{cases} m\ddot{x}(\tau) + C_x\dot{x}(\tau) + K_x x(\tau) = P1x(\tau) + P2x(\tau); \\ m\ddot{y}(\tau) + C_y\dot{y}(\tau) + K_y y(\tau) = P1y(\tau) + P2y(\tau); \end{cases} \quad (4.3)$$

де $x(\tau)$, $y(\tau)$ – пружні переміщення елементів технологічної системи;

K_x , K_y , C_x , C_y – коефіцієнти жорсткості та коефіцієнти демпфірування системи у напрямках вісей координат;

$P1x(\tau)$, $P2x(\tau)$, $P1y(\tau)$, $P2y(\tau)$ – складові сили різання, які відносяться до першої та другої різальної пластини.

4.3 Рівняння, що описують зв'язок елементів режиму різання ступінчастими різцями зі значеннями складових сили різання

Силу різання і її складові будемо розглядати як величину, що залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, геометричних параметрів інструменту, а також товщини $a(\tau)$ і ширини шару, що зрізається $b(\tau)$ [22, 24].

$$P(\tau) = K \cdot a(\tau) \cdot b(\tau). \quad (4.4)$$

де: K – коефіцієнт, що залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, геометричних параметрів інструменту, Н/м²;

$a(\tau)$, $b(\tau)$ – відповідно товщина шару, що зрізається і ширина зрізаного шару, які залежать від часу τ і визначаються заданою глибиною різання і подачею інструменту, мм.

При коливаннях в технологічній системі, які виникають при точінні, пружні переміщення інструменту і елементів технологічної системи щодо оброблюваної деталі призводить до зміни товщини $a(\tau)$ і ширини $b(\tau)$ зрізу.

Розглянемо зміну площі зрізаного шару при точінні на важкому токарному верстаті різцем з однією різальною пластиною, викликане пружними переміщеннями елементів технологічної системи щодо оброблюваної деталі (рис. 4.6). Зміна площі шару, що зрізається другою різальною пластиною відбувається аналогічно першій пластині.

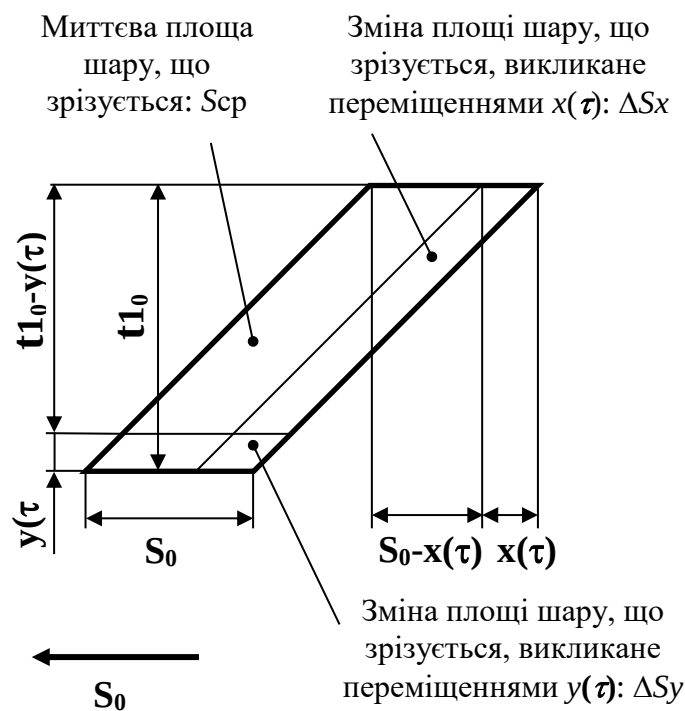


Рисунок 4.6 – Схема зміни площі шару, яка зрізується при точінні і розточуванні на токарному верстаті

З урахуванням виразів (4.4) отримуємо залежності, що визначають зміну складових сили різання $P1x(\tau)$, $P2x(\tau)$, $P1y(\tau)$ і $P2y(\tau)$ при коливаннях у технологічній системі у залежності від елементів режиму різання:

$$\begin{aligned} P1x(\tau) + P2x(\tau) &= \\ &= K_{px}[S_0 - x(\tau)][t1_0 - y(\tau)] + K_{px}[S_0 - x(\tau)][t2_0 - y(\tau)]; \\ P1y(\tau) + P2y(\tau) &= \\ &= K_{py}[t1_0 - y(\tau)][S_0 - x(\tau)] + K_{py}[t2_0 - y(\tau)][S_0 - x(\tau)]; \end{aligned} \quad (4.5)$$

де: K_{px} , K_{py} – відповідно питомі значення складових сили різання, Н/мм²

Для випадку сталого режиму коливань крім пружних взаємних переміщень елементів технологічної системи, що впливають на зміну площі зрізаного шару додатково необхідно також враховувати [23, 25, 28, 29]:

- неточність встановлення деталі у напрямку обраних осей координат, що викликає радіальне биття при обертанні деталі;
- рух інструменту по сліду на обробленій поверхні;
- зміна сил різання через випадкові похибки, що виникають при обробці;

З урахуванням зазначених факторів, вирази для складових сили різання, стосовно до розглянутого випадку, приймуть вид:

$$\begin{aligned} P1x(\tau) + P2x(\tau) &= \\ &= K_{px}[S_0 + 0,5[\Delta Dx \cdot \sin(\omega\tau + q_0) + \Delta Dx] - x(\tau) - x(\tau - T)] \\ &[t1_0 - y(\tau) - y(\tau - T)] + K_{px}[S_0 - x(\tau)][t2_0 - y(\tau)]; \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} P1y(\tau) + P2y(\tau) &= \\ &= K_{py}[t1_0 + 0,5[\Delta Dy \cdot \sin(\omega\tau + q_0) + \Delta Dy] - y(\tau) - y(\tau - T)] \\ &[S_0 - x(\tau) - x(\tau - T)] + K_{py}[t2_0 - y(\tau)][S_0 - x(\tau)], \end{aligned}$$

де: ΔDx , ΔDy – відповідно, неточність установки деталі по осях координат, мм;

ω – частота обертання оброблюваної деталі, рад/с;

q_0 – початкова фаза обертання деталі, рад;

T – час одного обороту деталі, с;

4.4 Система диференціальних рівнянь, що описує динамічні процеси в технологічній системі

З використанням отриманих виразів (4.5), (4.6), що описують процес різання, рух елементів ЕПС верстата в процесі коливань, система диференціальних рівнянь, що описує рух елементів технологічної системи важкого токарного верстата при різанні ступінчастим різцем, набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x}(\tau) + C_x\dot{x}(\tau) + K_x x(\tau) = P1x(\tau) + P2x(\tau); \\ m\ddot{y}(\tau) + C_y\dot{y}(\tau) + K_y y(\tau) = Py1(\tau) + P2y(\tau); \\ \begin{aligned} &P1x(\tau) + P2x(\tau) = \\ &= K_{px} \left[S_0 + 0,5 [\Delta D_x \cdot \sin(\omega t + q_0) + \Delta D_x] \right] [t1_0 - y(\tau) - y(\tau - T)] + \\ &\quad - x(\tau) - x(\tau - T) \\ &\quad + K_{px} [S_0 - x(\tau)] [t2_0 - y(\tau)]; \\ &P1y(\tau) + P2y(\tau) = \\ &= K_{py} [S_0 + 0,5 [\Delta D_y \cdot \sin(\omega t + q_0) + \Delta D_y] - y(\tau) - y(\tau - T)] [S_0 - x(\tau) - x(\tau - T)] + \\ &\quad + K_{py} [t2_0 - y(\tau)] [S_0 - x(\tau)]; \end{aligned} \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Для вирішення системи рівнянь (4.7) і виконання моделювання зручно скористатися одним з чисельних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь першого або другого порядку з програмною реалізацією на ПЕОМ. [34, 35, 36].

Запропонована математична модель може бути використана як елемент системи функцій для багатокритеріальної оптимізації параметрів технологічного процесу з метою підвищення ефективності процесів різання на важких верстатах.

4.5 Програмна реалізація моделі технологічної системи важких токарних верстатів

Програмна реалізація моделі технологічної системи важкого токарного верстата (4.7) виконана в пакеті Simulink MATLAB [14, 15] у вигляді структурних моделей, які описують процес точіння на важкому токарному верстаті звичайним різцем з однією різальною пластиною (рис. 4.7) та процес точіння ступінчастим різцем за одновершинною схемою різання (рис. 4.8).

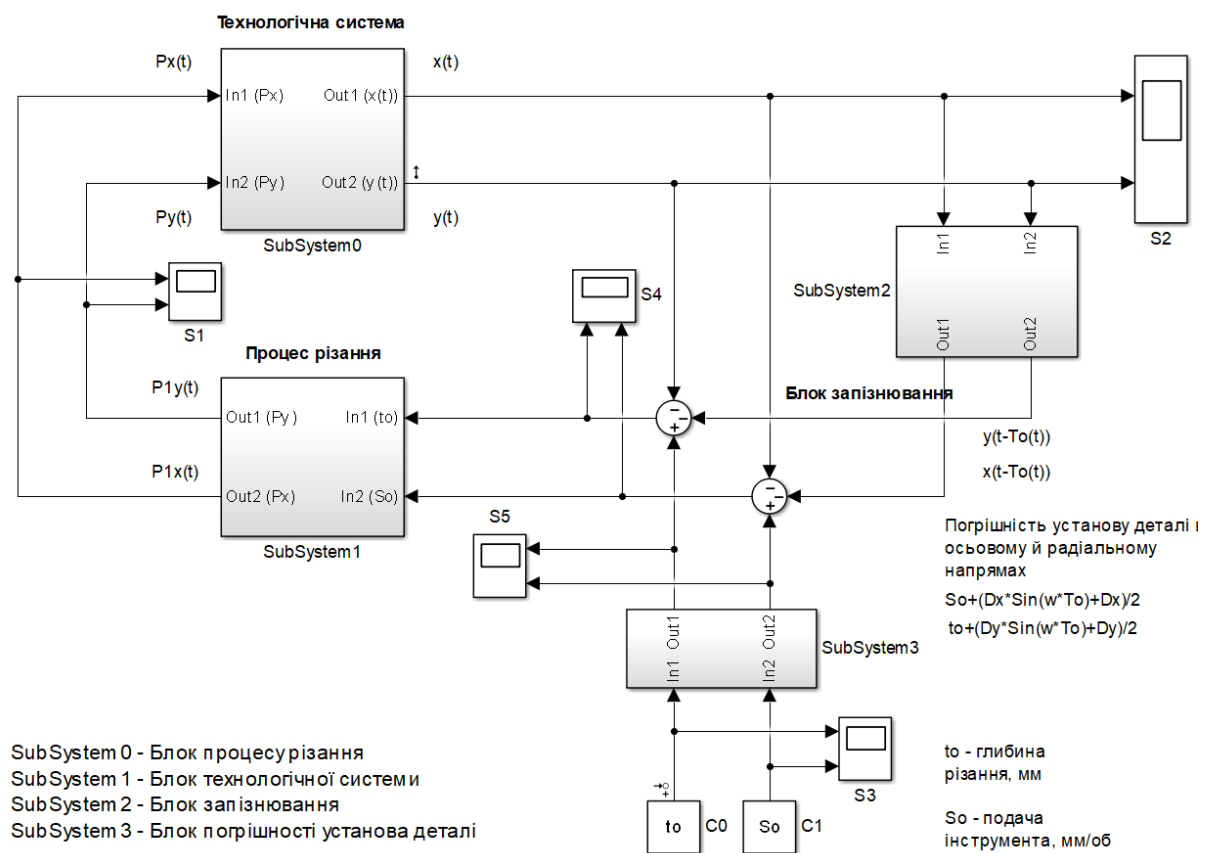


Рисунок 4.7 – Структурна модель процесу точіння на важкому токарному верстаті різцем з однією різальною пластиною

На рисунках 4.7 й 4.8 прийняті наступні позначення структурних складових елементів:

SubSystem0 – Блок еквівалентної пружної системи верстата;

SubSystem1 – Блок процесу різання;

SubSystem2 – Блок процесу різання;

SubSystem3 – Блок, що враховує неточність установки деталі;

SubSystem4 – Блок запізнювання.

Розглянемо перераховані блоки і розкриємо принцип їх функціонування з точки зору реалізації процесів обробки.

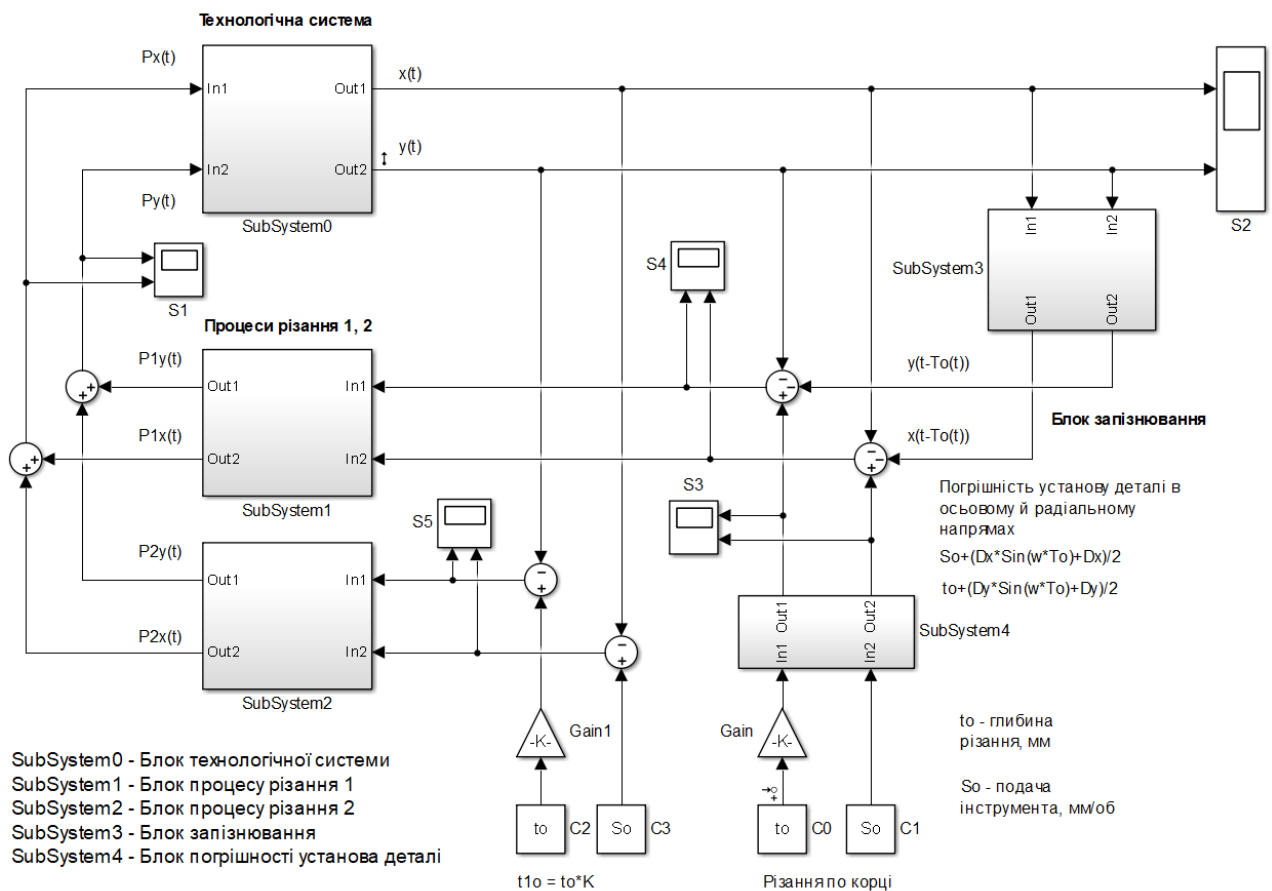


Рисунок 4.8 – Структурна модель процесу точіння на важкому токарному верстаті ступінчастим різцем

Блок, що реалізує неточність установки деталі (SubSystem3).

Блок, який реалізує технологічні похибки (рис. 4.9), призначений для врахування неточності установки деталі щодо осей координат X і Y .

Неточність установки деталі щодо осей координат X і Y призводить при обертанні деталі до виникнення коливань фактичної глибини різання t_0 (вхід In1) згідно закону синуса на величину $t_0 + 0,5(D_y \sin(\omega\tau + q) + D_y)$ та робочої подачі інструменту S_0 (вхід In2) на величину $S_0 + 0,5(D_x \sin(\omega\tau + q) + D_x)$ і, в кінцевому підсумку, – площі зрізаного шару S_{cp} (рис. 4.5).

Амплітудні значення похибок D_x , D_y і початкової фази q задаються в локальних блоках Sine Wave1, Sine Wave2. Ручні перемикачі Manual Switch, Manual Switch1 призначені для виключення впливу похибки установки заготовки на процес формування зрізаного шару шляхом включення константи «нуль» (локальний блок Constant).

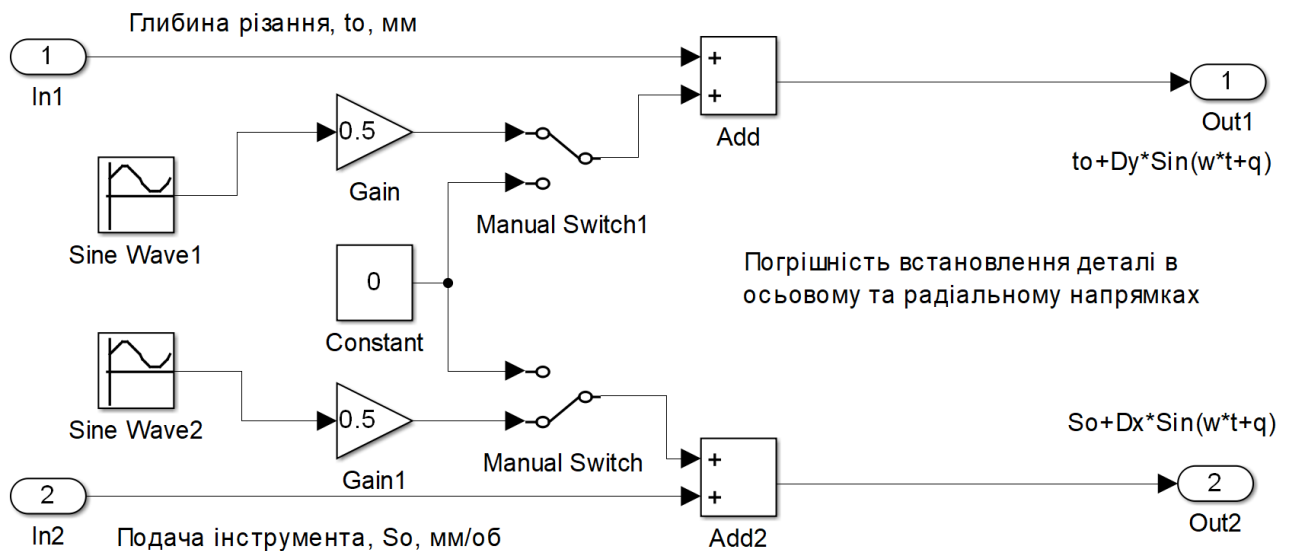


Рисунок 4.9 – Структура блоку обліку неточності установки деталі

Блок процесу різання (SubSystem1, SubSystem2).

Структура блоку процесу різання представлена на рисунку 4.10. Блок реалізує обчислення складових сили різання $P1x(\tau)$, $P2x(\tau)$ і $P1y(\tau)$, $P2y(\tau)$ відповідно до виразів (4.5):

$$P1x(\tau) = K_{px}[S_0 + 0,5[\Delta Dx \cdot \sin(\omega\tau + q_0) + \Delta Dx] - x(\tau) - x(\tau - T)][t1_0 - y(\tau) - y(\tau - T)];$$

$$P2x(\tau) = K_{px}[S_0 - x(\tau)][t2_0 - y(\tau)];$$

$$P1y(\tau) = K_{py}[t1_0 + 0,5[\Delta Dy \cdot \sin(\omega\tau + q_0) + \Delta Dy] - y(\tau) - y(\tau - T)][S_0 - x(\tau) - x(\tau - T)];$$

$$P2y(\tau) = K_{py}[t2_0 - y(\tau)][S_0 - x(\tau)].$$

На входи блоку (In1, In2) подаються величини

$$t_0 + 0,5(D_y \sin(\omega\tau + q) + D_y), S_0 + 0,5(D_x \sin(\omega\tau + q) + D_x),$$

за допомогою яких, на виходах (Out1, Out2) формуються складові сили різання $Px(\tau)$ і $Py(\tau)$. Локальні блоки Uniform Random Number і Uniform Random Number1 призначені для обліку випадкових погрешностей, що виникають в процесі різання (наприклад, випадок обробки поверхні заготовок з нерівномірним припуском або кіркою при чорновому точінні).

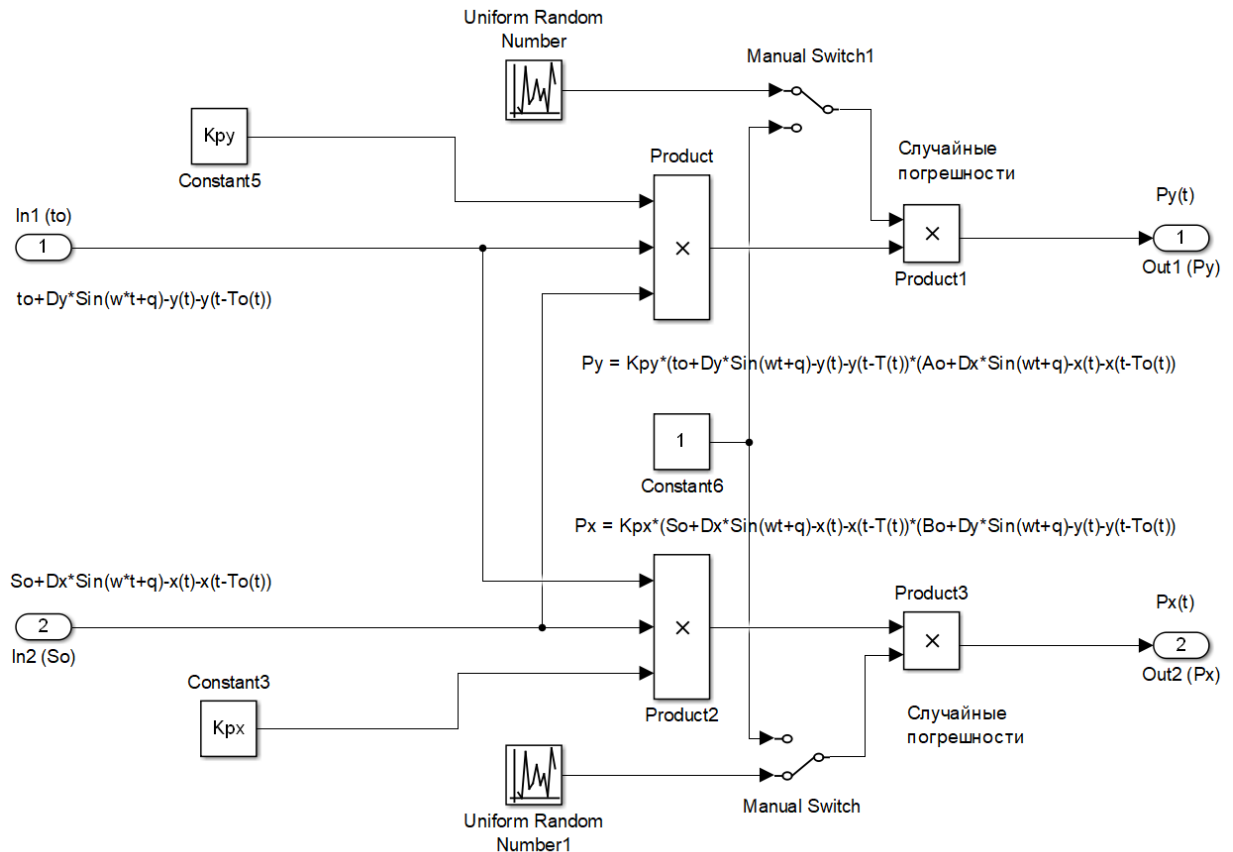


Рисунок 4.10 – Структура блоку процесу різання

Блок еквівалентної пружної системи верстата (SubSystem0).

Структура блоку еквівалентної пружної системи верстата (SubSystem0) представлена на рисунку 4.11.

На входи блоку в якості вхідних впливів, подаються поточні значення складових сили різання: на вхід $In1 - P_x(\tau)$, на вхід $In2 - P_y(\tau)$. Далі сили подаються на передавальні функції еквівалентної пружної системи верстата, за допомогою яких обчислюються пружні переміщення елементів системи. Передавальні функції, згідно (4.7), визначаються виразами:

$$W_{зyc}^x(s) = \frac{X(s)}{P_x(s)} = \frac{1}{ms^2 + C_x s + K_x} = \frac{K_{11}}{T_{11}^2 s^2 + T_{12} s + 1},$$

$$W_{зyc}^y(s) = \frac{Y(s)}{P_y(s)} = \frac{1}{ms^2 + C_y s + K_y} = \frac{K_{21}}{T_{21}^2 s^2 + T_{22} s + 1},$$

де: K_{11}, K_{21} – коефіцієнти посилення, які дорівнюють відповідно $1/K_x, 1/K_y$;

T_{11}, T_{12} – постійні часу рівні відповідно, $m/K_x, C_x/K_x$;

T_{21}, T_{22} – постійні часу рівні відповідно, $m/K_y, C_y/K_y$.

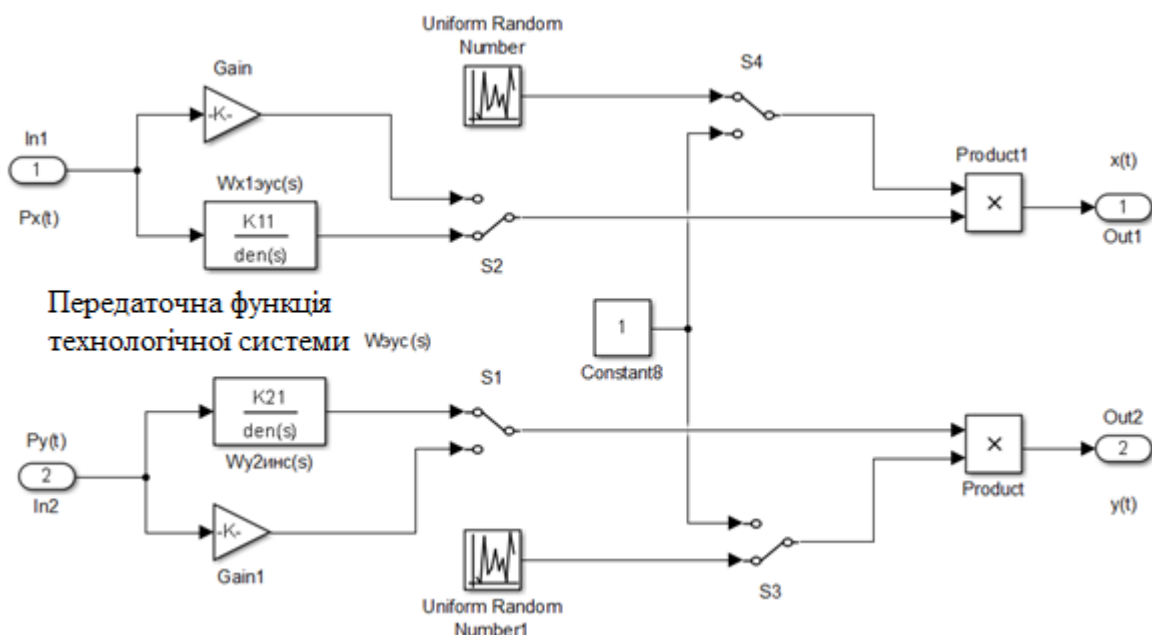


Рисунок 4.11 – Блок еквівалентної пружної системи верстата

Також до складу блоку включена можливість проводити моделювання еквівалентної пружної системи верстата в статичному стані, для цього передбачені локальні блоки *Gain*, *Gain1* і перемикачі *S1*, *S2*.

Блок запізнювання (SubSystem4).

Блок запізнювання призначений для обліку руху інструменту по сліду від попереднього проходу, що викликає додаткову складову нерівномірності зрізаемого шару. Структура блоку запізнювання представлена на рисунку 4.12.

Параметр T_0 є час одного обороту оброблюваної деталі, яке обчислюється на підставі параметрів режиму різання.

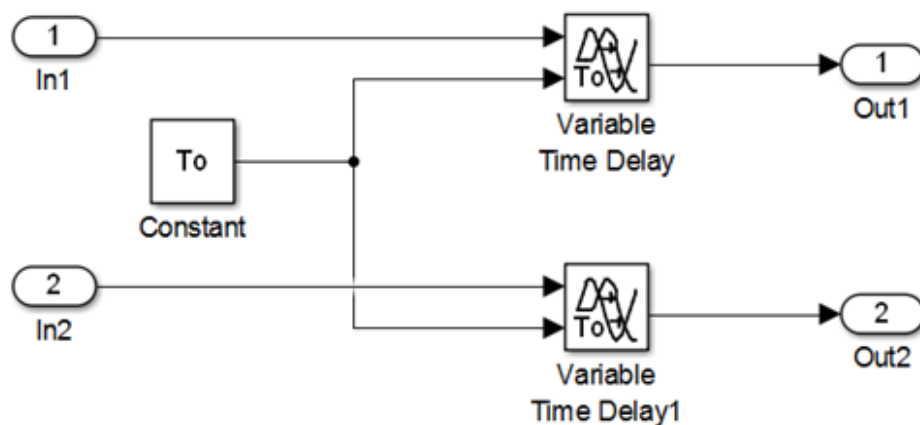


Рисунок 4.12 – Блок запізнювання

Моделювання та обчислень динамічних характеристик технологічної системи важкого токарного верстату при різанні ступінчастим різцем.

Процес моделювання та обчислень динамічних характеристик технологічної системи виконується в наступному порядку:

- за допомогою програмного середовища Simulink MATLAB завантажити файл моделі технологічної системи;
- завантажити файл вихідних даних (таблиця 4.2), за допомогою якого задаються початкові значення даних і розраховуються обчислювані параметри моделі згідно з таблицями 4.2-4.3.

- за допомогою команди «Model Explorer» викликати вікно параметрів моделі і виконати ініціалізацію параметра «Model Workspace», закрити вікно параметрів (рисунок 4.13);
- в програмному середовищі задати час, протягом якого проводиться моделювання динамічних процесів, що виникають в технологічній системі (за замовчуванням задається час, що дорівнює 20 с);
- виконати запуск моделі за допомогою команди «Run»;
- виконати обробку отриманих в результаті моделювання даних (пружних переміщень елементів системи і зміни сил різання).

Таблиця 4.2 – Вхідні дані моделі технологічної системи токарного верстата

Параметри моделі, що задаються користувачем		
1	S_o	Подача інструменту, мм/об
2	t_o	Глибина різання, мм
3	V_o	Швидкість різання, м/хв
4	M_o	Маса деталі, кг
5	D_o	Діаметр деталі, мм
6	D_x	Неточність установки деталі по «X», мм
7	D_y	Неточність установки деталі по «Y», мм
8	F_i	Кут в плані інструменту, град.
9	K_{px}	Питома сила різання P_x , Н / мм ²
10	K_{py}	Питома сила різання P_y , Н / мм ²
11	K_x	Жорсткість ЕПС верстата по осі X, Н / мм
12	K_y	Жорсткість ЕПС верстата по осі Y, Н / мм
13	C_x	Коефіцієнт демпфування, Н·с / мм
14	C_y	Коефіцієнт демпфування, Н·с / мм

Для обробки розрахункових даних використовуються інструменти програмного пакета MatLab. Для візуалізації розрахункових віброграм використовувався елемент моделі S2 (блок «Score»). Амплітудно-фазові частотні характеристики (Nyquist Diagram), амплітудно-частотні й фазо-частотні (Bode Diagram) будувалися за допомогою інструмента лінійного аналізу сигналів Linear Analysis Tool (рисунок 4.14).

Таблиця 4.3 – Обчислювані параметри моделі технологічної системи токарного верстата

Обчислювані параметри моделі		
1	$N_o = (1000V_o) / (\pi \cdot D_o \cdot 60)$	Частота обертання деталі, об/с
2	$N_p = (2000V_o) / (D_o \cdot 60)$	Частота обертання деталі, рад/с
3	$T_o = 1 / N_o$	Час 1 обороту деталі, с
4	$K_{11} = 1 / K_x$	Коефіцієнт посилення, мм/Н
5	$K_{21} = 1 / K_y$	Коефіцієнт посилення, мм/Н
6	$T_{11} = M_o / K_x$	Постійна часу, с
7	$T_{12} = C_x / K_x$	Постійна часу, с
8	$T_{21} = M_o / K_y$	Постійна часу, с
9	$T_{22} = C_y / K_y$	Постійна часу, с

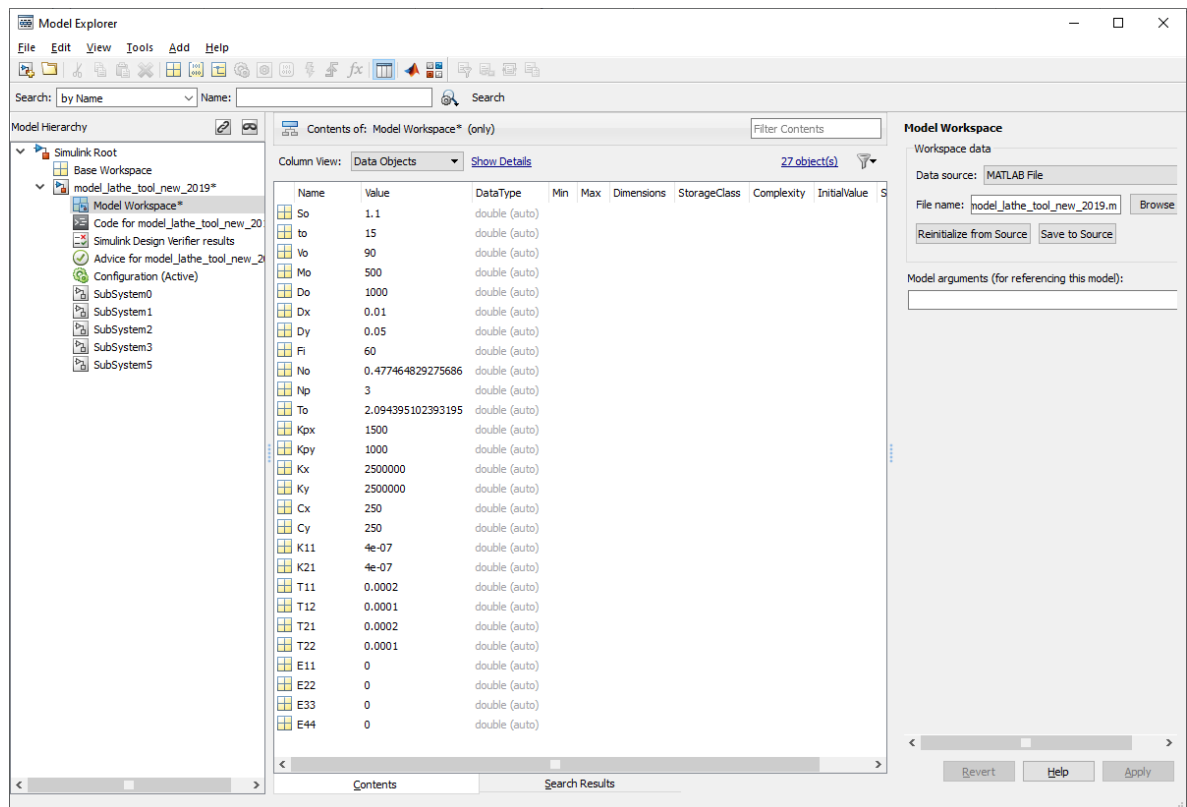


Рисунок 4.13 – Вікно «Model Explorer» з параметрами моделі «Model Workspace»

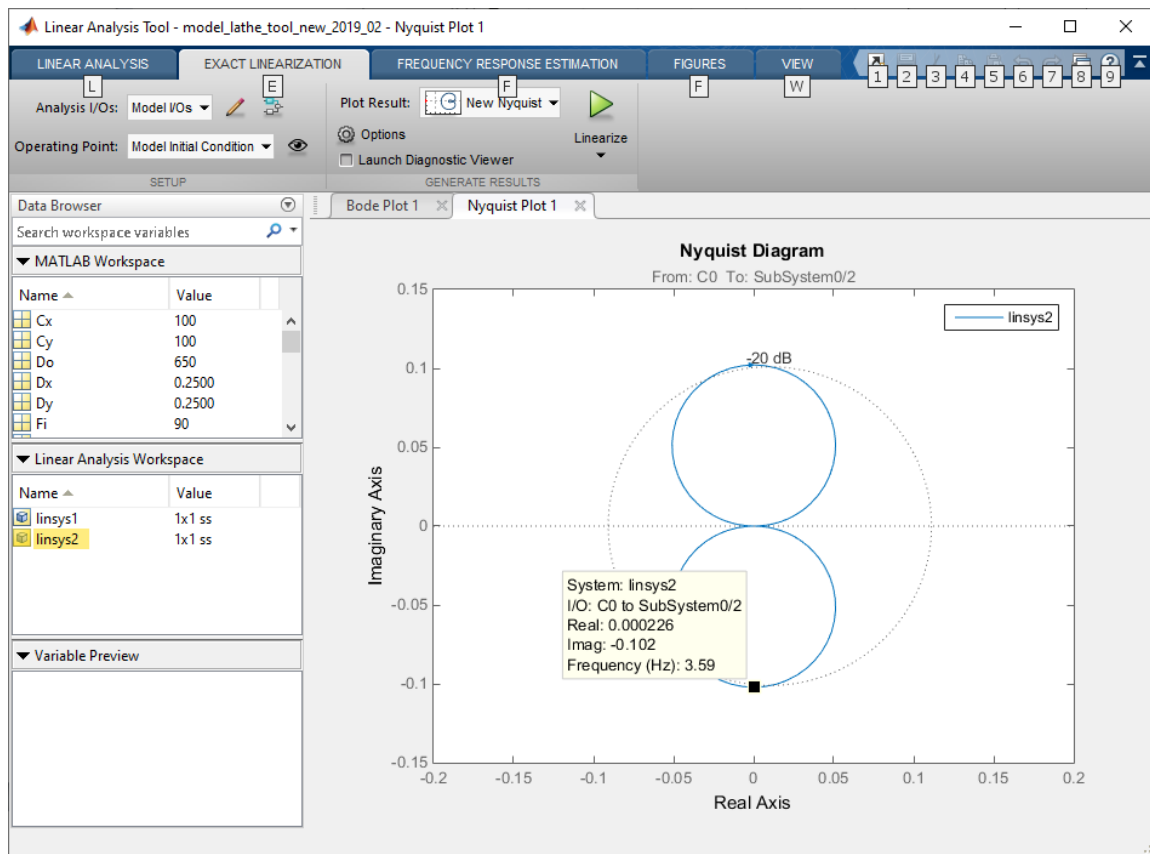


Рисунок 4.14 – Вікно інструменту лінійного аналізу моделі
«Linear Analysis Tool»

4.6 Перевірка адекватності моделі технологічної системи токарного верстата

Перевірка адекватності запропонованої моделі технологічної системи важкого токарно верстата при різанні ступінчастими різцями проводилася шляхом порівняння розрахункових значень амплітуд коливання інструменту, отриманих за допомогою моделі та результатів експериментальних досліджень коливаний збірних різців.

Експериментальні дослідження динамічних характеристик збірних відрізних різців проводили на верстаті мод. 164 при поперечному точінні, зокрема, при прорізанні канавок відрізним різцем $b = 12$ мм. Предметом досліджень були частота і амплітуда коливаний різців в залежності від елементів

режиму різання. Вимірювання параметрів коливань збірної різця 2 при обробці заготовки 1 виконували в тангенціальному та радіальному напрямках за допомогою датчиків прискорення 4 типу ДП-5С-100, 5 ДПЗ, установлених на різці 2 і з'єднаних з вібровимірювачем ВІ6-6ЕН 3 (рис. 4.15) [62].

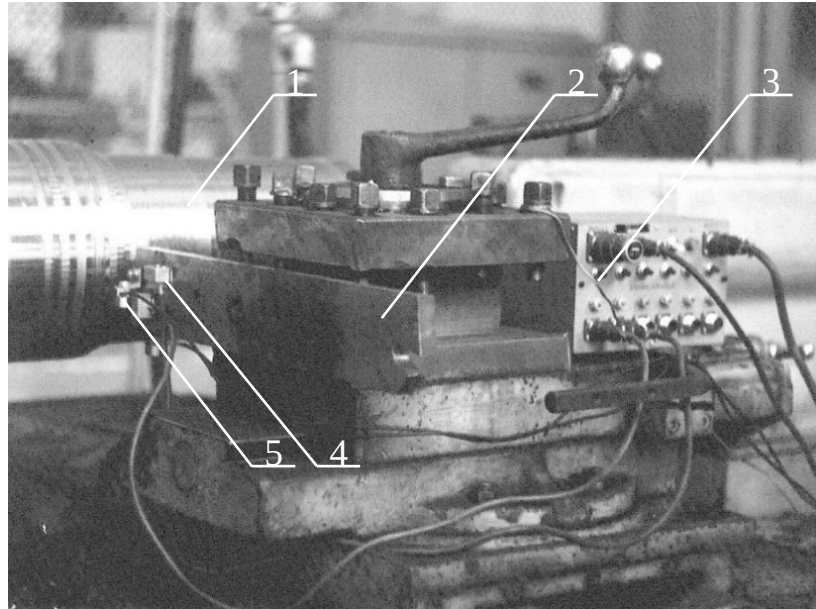


Рисунок 4.15 – Комплекс для експериментальних досліджень

Для визначення залежності динамічних характеристик збірних різців від елементів режиму різання проводилось дев'ять серій експериментів з різними значеннями подачі інструменту S і швидкості різання V . Глибина різання залишалася незмінною. Умови проведення експериментів наведені у таблиці 4.4.

Достовірність результатів експериментальних досліджень перевірялась статистичними методами, зокрема перевірялась гіпотеза нормального розподілення амплітуд коливань, однорідність дисперсії, визначались довірчі інтервали.

Таблиця 4.4 – Умови проведення експериментів при дослідженні динамічних характеристик інструменту при прорізанні канавок відрізним різцем.

№	Заготовка	Обладнання	t , мм	S , мм/об	V , м/хв
1	Сталь 40ХНМА,	Верстат токарно-гвинторізний, мод. 164	12	0,10	14
2	круг $\varnothing 250$ мм,		12	0,14	22
3	$\sigma = 980$ МПа, HB285		12	0,19	34

З використанням даних, наведених у роботі [62] виконувалось моделювання процесу прорізання канавок збірним відрізним різцем за допомогою запропонованої моделі технологічної системи важкого токарного верстата. Параметри для моделювання відповідали параметрам верстата мод. 164 (таблиця 4.5).

Таблиця 4.5 – Параметри моделювання прорізання канавок відрізним різцем на токарно-гвинторізному верстаті мод. 164

№	Перемінна	Призначення	
1	S_0	Подача інструменту, мм / об	0,10; 0,14; 0,19
2	t_0	Глибина різання, мм	12
3	V_0	Швидкість різання, м / хв	14; 22; 34
4	M_0	Маса деталі, кг	765
5	D_0	Діаметр деталі, мм	250
6	D_x	Неточність установки деталі по «X», мм	-
7	D_y	Неточність установки деталі по «Y», мм	0,01
8	F_i	Кут в плані інструменту, град.	-
9	K_{px}	Питома сила різання P_x , Н/мм ²	-
10	K_{py}	Питома сила різання P_y , Н/мм ²	445
11	K_x	Жорсткість ЕПС верстата по осі X, Н/мм	-
12	K_y	Жорсткість ЕПС верстата по осі Y, Н/мм	$56 \cdot 10^3$
13	C_x	Коефіцієнт демпфування, Нс/мм	-
14	C_y	Коефіцієнт демпфування, Нс/мм	25

На рисунках 4.16, 4.17 наведені результати розрахунку амплітуди коливань інструменту при прорізанні канавок збірним відрізним різцем у залежності від подачі інструменту, які отримані за допомогою запропонованої моделі технологічної системи важкого токарного верстата.

Зниження величини амплітуди коливань відрізних різців при збільшенні подачі пояснюється зростанням сил різання, з іншого боку збільшення подачі, а, отже, і товщини зрізу, призводить до збільшення демпфуючої здатності самої зони різання.

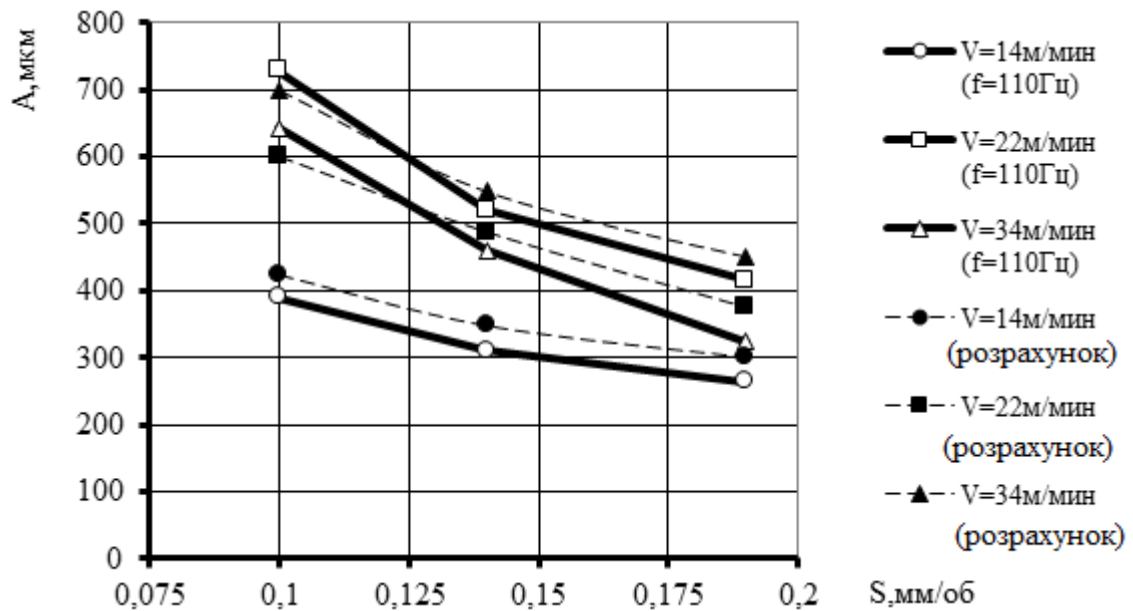


Рисунок 4.16. – Залежність амплітуди коливань від подачі інструменту в області низьких частот при відрізці напаяними відрізним різцем.

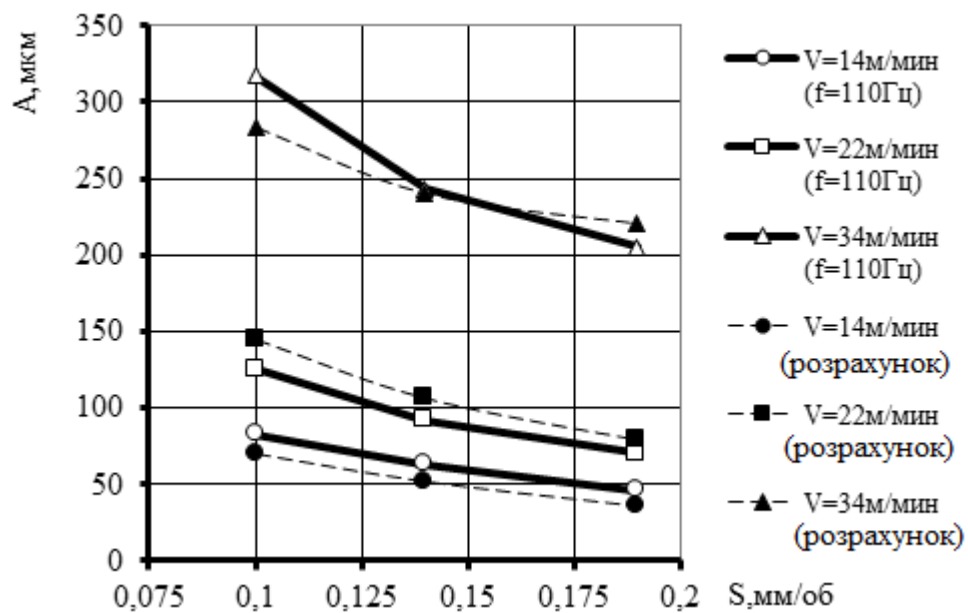


Рисунок 4.17. – Залежність амплітуди коливань від подачі інструменту в області низьких частот при відрізці збірним відрізним різцем.

Аналіз представлених на рисунках 4.16, 4.17 залежностей з їх порівнянням з результатами експериментів свідчить, що розрахункові значення амплітуд коливань інструменту знаходяться у межах довірчих інтервалів значень одержаних в результаті експериментів, що дозволяє зробити висновок про адекватність запропонованої моделі. Максимальна розбіжність розрахункових значень та значень отриманих в результаті експериментів не перевищує 12%.

4.7 Аналітичні дослідження динамічних характеристик збірних різців при обробці деталей на важких верстатах

Умови проведення аналітичних досліджень: верстат мод. 1А665; діаметр деталі, що обробляється, $D = 650$ мм; довжина обробки $L = 650$ мм; матеріал деталі 90ХФ, $\sigma_b = 850$ МПа, $HB = 240$; заготовка – поковка.

Режими різання визначалися згідно нормативів режимів різання для важких верстатів [75]. Режими обробки наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Режими різання обробки деталі

№	t , мм	S , мм/об	V , м/хв	N_e , кВт	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
1	10	1,9	61	18	24157	8454	10870
2	25	1,2	58	42	40263	14092	18118
3	30	0,9	54	55	56358	19725	25361

Для визначення величини складових сили різання в математичній моделі (4.7) використовуються лінеаризовані вирази (4.4), які розраховують складові у залежності від величини глибини різання та подачі інструмента. Для врахування впливу на величину складових сили різання фізико-механічних властивостей матеріалу, геометричні параметри інструменту та швидкості

різання, розраховані питомі сили різання K_{pz} , K_{py} , K_{px} для умов обробки, які наведені у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Питома сила різання, яка враховує вплив на величину складових сили різання фізико-механічних властивостей матеріалу, геометричні параметри інструменту та швидкості різання

№	Швидкість різання, потужність	K_{pz} , Н/мм ²	K_{py} , Н/мм ²	K_{px} , Н/мм ²
1	$V = 61$ м/хв, $Ne = 18$ кВт	1271	445	572
2	$V = 58$ м/хв, $Ne = 42$ кВт	1342	512	659
3	$V = 54$ м/хв, $Ne = 54$ кВт	2087	730	939

Дослідження динамічних характеристик технологічної системи важкого токарного верстата проводилися з метою визначення амплітуд та частот коливання інструменту при різанні різцем з однією різальною пластиною та ступінчастим різцем, що працює за одновершинною схемою різання. Для цього проводилось три серії розрахункового експерименту при різанні різцем з однією пластиною і один експеримент для ступінчастого різця, що працює за одновершинною схемою різання, згідно таблиці 4.5.

Результати моделювання процесу обробки різцями з однією різальною пластиною і ступінчастим різцем, що працює за одновершинною схемою, у вигляді розрахункових віброграм та амплітудно-частотних характеристик технологічної системи важкого токарного верстата, отриманих за допомогою «Linear Analysis Tool», представлені на рисунках 4.18 – 4.25.

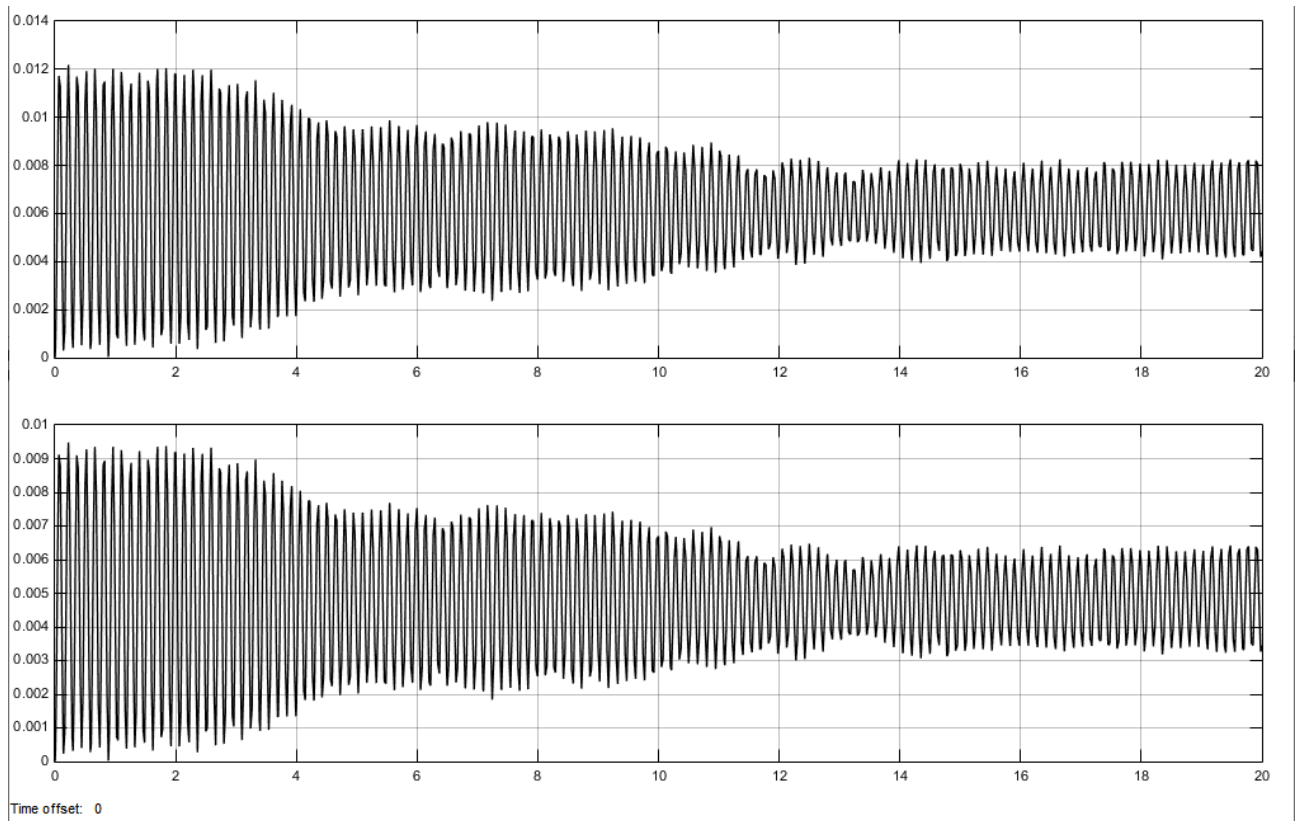


Рисунок 4.18 – Розрахункова віброграма переміщення інструмента $y(\tau)$, $x(\tau)$ при точінні різцем з однією різальною пластиною (Сталь 90ХФ, HB = 240, обробка поверхні з кіркою, $t = 10$ мм, $S = 1,9$ мм/об, $V = 61$ м/хв)

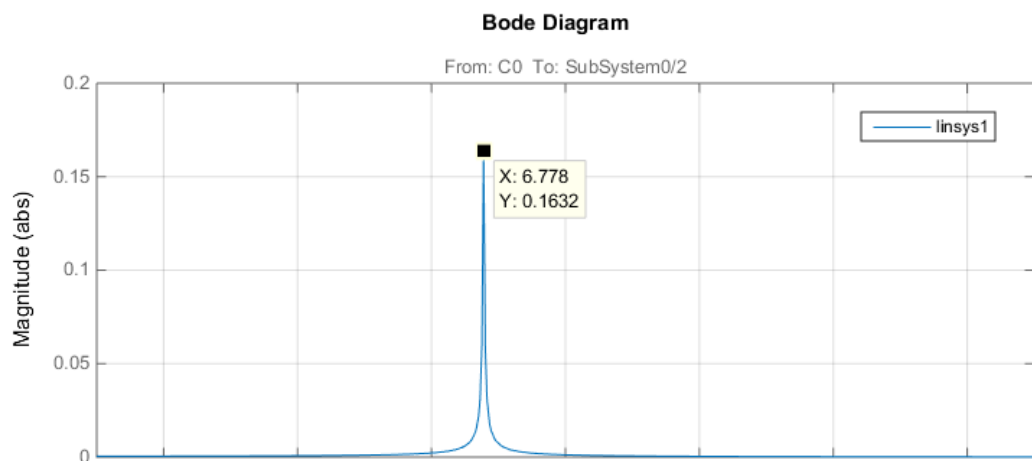


Рисунок 4.19 – Амплітудно-частотна характеристика пружної системи верстата при точінні різцем з однією різальною пластиною (Сталь 90ХФ, HB = 240, обробка поверхні з кіркою, $t = 10$ мм, $S = 1,9$ мм/об, $V = 61$ м/хв)

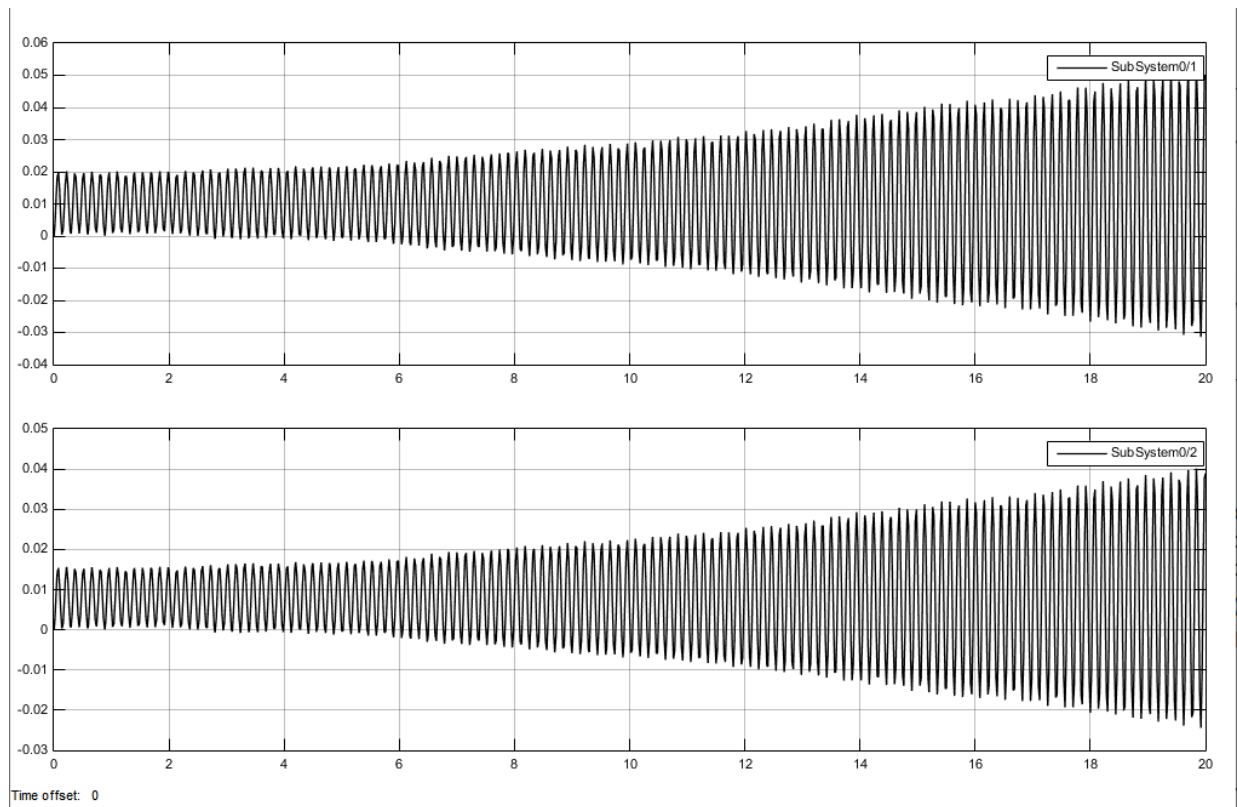


Рисунок 4.20 – Розрахункова віброграма переміщення інструмента $y(\tau)$, $x(\tau)$ при точінні різцем з однією різальною пластиною (Сталь 90ХФ, НВ = 240, обробка поверхні з кіркою, $t = 25$ мм, $S = 1,2$ мм/об, $V = 58$ м/хв)

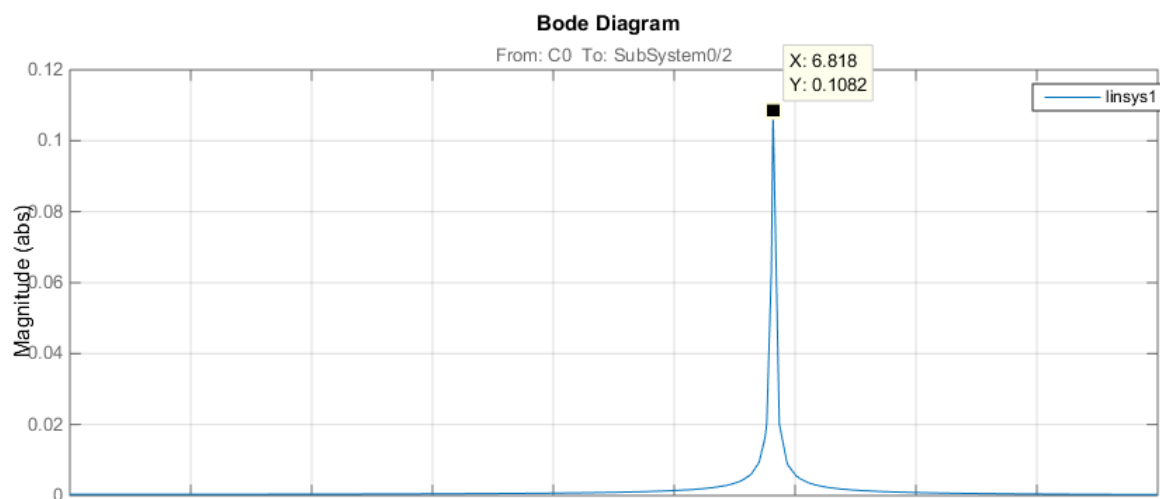


Рисунок 4.21 – Амплітудно-частотна характеристика пружної системи верстата при точінні різцем з однією різальною пластиною (Сталь 90ХФ, НВ = 240, обробка поверхні з кіркою, $t = 25$ мм, $S = 1,2$ мм/об, $V = 58$ м/хв)

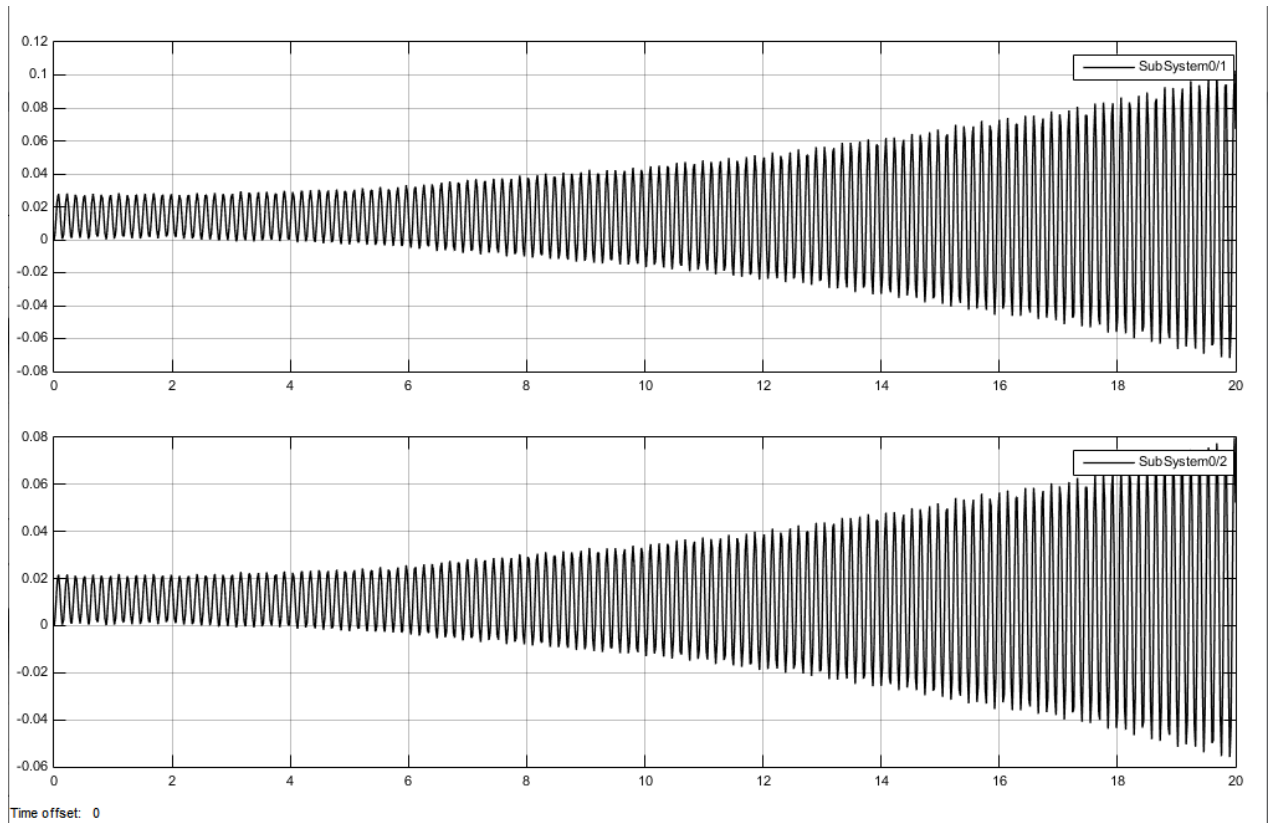


Рисунок 4.22 – Розрахункова віброграма переміщення інструмента $y(\tau)$, $x(\tau)$ при точінні різцем з однією різальною пластиною (Сталь 90ХФ, НВ = 240, обробка поверхні з кіркою, $t = 30$ мм, $S = 0,9$ мм/об, $V = 54$ м/хв)

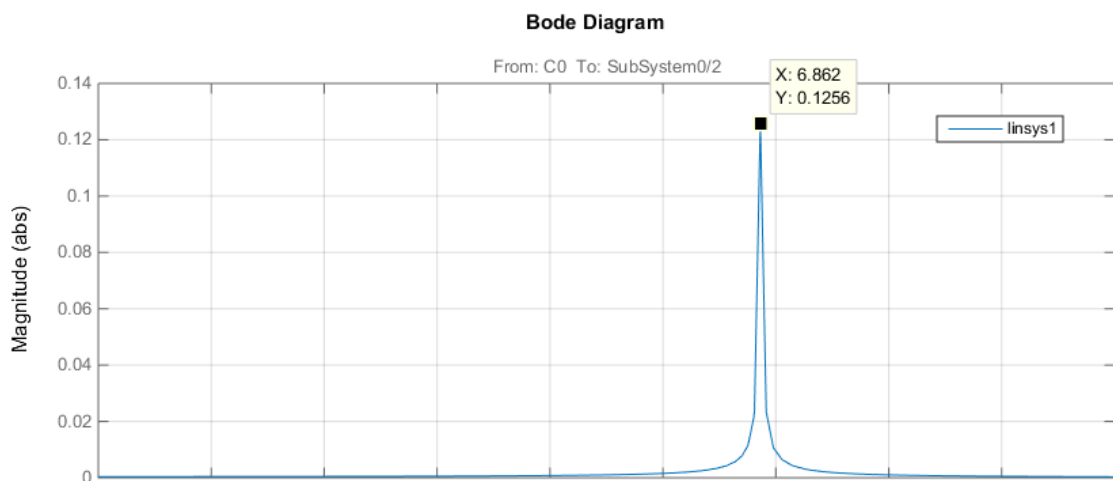


Рисунок 4.23 – Амплітудно-частотна характеристика пружної системи верстата при точінні різцем з однією різальною пластиною (Сталь 90ХФ, НВ = 240, обробка поверхні з кіркою, $t = 30$ мм, $S = 0,9$ мм/об, $V = 54$ м/хв)

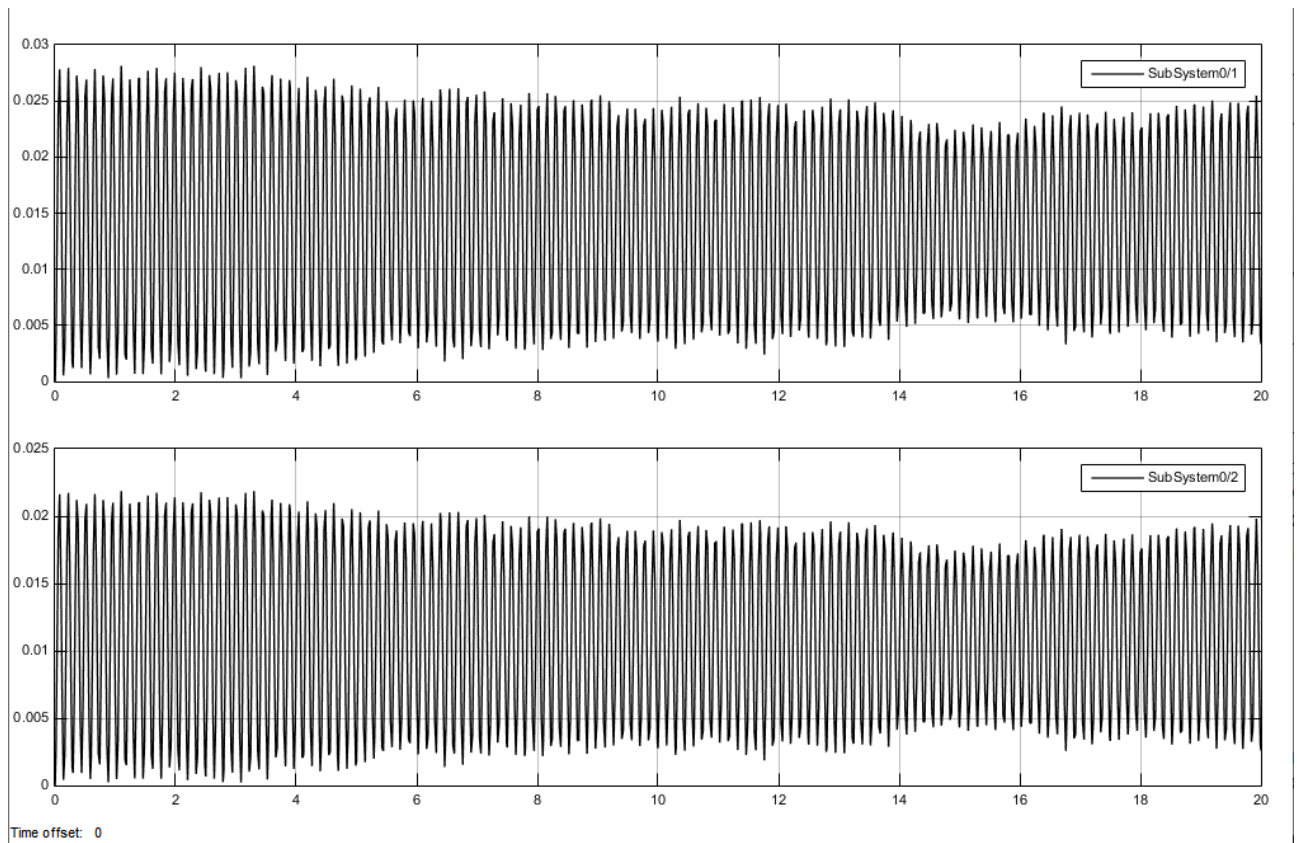


Рисунок 4.24 – Розрахункова віброграма переміщення інструмента $y(\tau)$, $x(\tau)$ при точінні ступінчастим різцем (Сталь 90ХФ, HB = 240, обробка поверхні з кіркою, $t_1 = 7,5$ мм, $t_2 = 22,5$ мм, $S = 0,9$ мм/об, $V = 54$ м/хв)

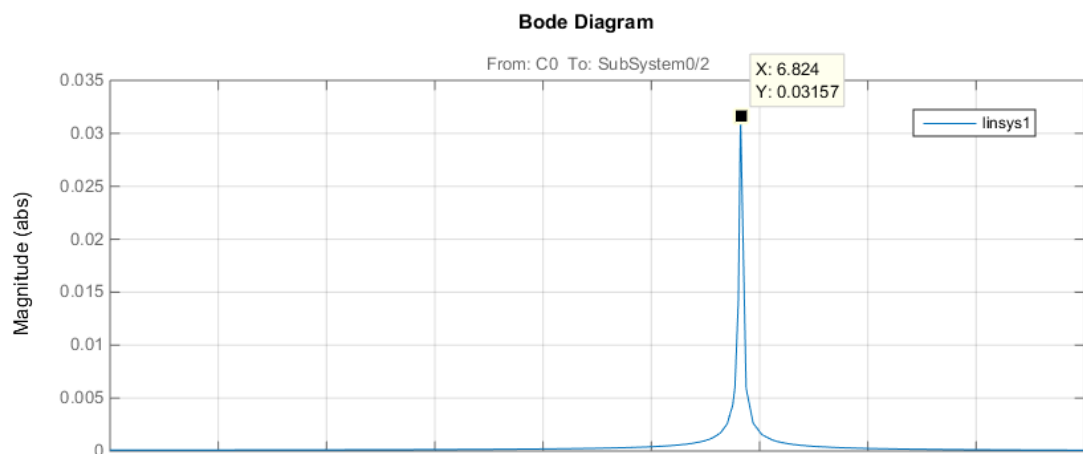


Рисунок 4.25 – Амплітудно-частотна характеристика пружної системи верстата при точінні ступінчастим різцем (Сталь 90ХФ, HB = 240, обробка поверхні з кіркою, $t_1 = 7,5$ мм, $t_2 = 22,5$ мм, $S = 0,9$ мм/об, $V = 54$ м/хв)

Аналіз представлених результатів показує, що схема різання при обробці деталі на верстаті та елементи режимів різання, зокрема глибина різання й подача інструменту впливають на динамічні характеристики технологічної системи.

Так при обробці деталі різцем з однією різальною пластиною при збільшенні глибини різання та подачі інструменту змінюється амплітуда коливань та характер коливань. Аналіз амплітудно-частотних характеристик технологічної системи, представлених на рисунках 4.19, 4.21 та 4.23 показує зменшення амплітуди коливань та незначну зміну частоти коливань. Подібне зменшення амплітуди коливань корелює з результатами експериментальних досліджень динамічних явищ при різанні з великими глибинами різання, що проводилися іншими авторами раніше. Однак, при збільшенні глибини різання більш ніж 10 мм характер коливань, рисунки 4.21 та 4.23, набуває зростаючого характеру від початку обробки (врізання інструменту в деталь при $\tau = 0$) з подальшою стабілізацією значення амплітуди коливань. Подібний характер наростання амплітуди коливань свідчить про нестабільний характер процесу різання з динамічної точки зору. Така картина при різанні різцем з однією різальною пластиною пояснюється нерівномірністю властивостей поверхні, що обробляється, перемінністю припуску (різання по кінці) та виникненню інтенсивних автоколивань за рахунок слідів від попередніх проходів різальної кромки інструменту.

Аналіз результатів моделювання процесу обробки деталі ступінчастим різцем, що працює за одновершинною схемою, який представлений на рисунку 4.25, показує, що абсолютні значення амплітуд у порівнянні з амплітудами коливань при обробці різцем з одною пластиною зменшуються (таблиця 4.8).

Таблиця 4.8 – Абсолютні значення амплітуд коливань при обробці деталі звичайним та ступінчастим різцем

№	t , мм	S , мм/об	V , м/хв	Амплітуда коливань (Амп), мм	
				Різець з однією пластиною	Ступінчастий різець
1	10	1,9	61	0,163	
2	25	1,2	58	0,126	
3	30	0,9	54	0,108	0,027

Крім того, процес різання ступінчастим різцем від початку обробки і далі у часі (рисунок 4.24), характеризується стабільними значеннями амплітуди коливань, що свідчить про стабільність процесу з динамічної точки зору. Подібна картина при різанні ступінчастим різцем за одновершинною схемою різання пояснюється тим, що при подібній схемі обробки кожна різальна пластина працює окремо та складові сили різання розподіляються між ними. Крім того перша різальна пластина зрізає шар, що характеризується нерівномірністю властивостей і припуску, а друга пластина зрізає більш рівномірний припуск та не «йде» по сліду попереднього проходу, що зменшує рівень автоколивань.

4.8 Висновки до розділу

1. Для опису й досліджень динамічних явищ, що виникають при обробці на важких токарних верстатах ступінчастими різцями запропонована удосконалена структурна, математична й імітаційна модель технологічної системи верстата, яка реалізована за допомогою програмного пакета MatLab.

2. Запропонована математична й імітаційна модель адекватно відображає коливання, що виникають при обробці деталей з великими глибинами різання, що підтверджено порівнянням результатів моделювання з даними експериментів. Максимальна погрішність моделі не перевищує 12%.

3. За результатами аналітичних досліджень встановлено, що схема різання при обробці деталей з глибинами різання t у діапазоні від 10 до 30 мм

та подачами S від 0,9 до 1,9 мм/об впливає на амплітуду і характер коливань. При обробці деталей з глибиною різання $t = 30$ мм ступінчастим різцем з одновершинною схемою різання у порівнянні з інструментом з однією пластиною амплітуда коливань в технологічній системі верстата зменшується в 2,5...3 рази.

4. При обробці деталей різцем з однією різальною пластиною процес різання при збільшенні глибини різання понад 10 мм набуває від початку обробки зростаючого характеру з подальшою стабілізацією значення амплітуди коливань. Подібний характер коливань свідчить про нестабільний характер процесу різання з динамічної точки зору та пояснюється виникненням інтенсивних автоколивань за рахунок слідів від попередніх проходів різальної кромки інструменту.

5. Обробка ступінчастим різцем характеризується стабільними значеннями амплітуди коливань, що свідчить про стабільність процесу з динамічної точки зору та пояснюється тим, що кожна різальна пластина працює окремо та складові сили різання розподіляються між ними, а також усуненням впливу по сліду попереднього проходу, що зменшує рівень автоколивань.

РОЗДІЛ 5

РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТУПІНЧАСТИХ ЗБІРНИХ РІЗЦІВ

5.1 Процес оптимізації з застосуванням гібридного алгоритму

Для підвищення ефективності процесу чорнової обробки деталей ступінчастими різцями на важких токарних верстатах необхідно комплексно розглянути предметну область, в рамках якої буде виконуватися задача багатокритеріальної оптимізації. Задля цього розробимо схему предметної області, яка буде агрегувати необхідні елементи технологічної системи для виконання багатокритеріальної стохастичної оптимізації.

В рамках задачі багатокритеріальної оптимізації режимів різання для чорнової обробки деталей технологічний процес містить в собі відомості про деталь, яку будуть обробляти, обладнання, на якому буде проводитись обробка деталі, інструменти, за допомогою яких буде проводиться обробка та операції, які характеризують етап технологічного процесу.

Оптимізації можуть піддаватися як маршрути виготовлення деталі, так і конкретні параметри обробки деталі, такі як режими різання. Підвищення ефективності процесу чорнової обробки тісно пов'язано з продуктивністю чорнової обробки конструкційних сталей з великими перерізами зрізуваного шару.

У якості складових елементів гібридного алгоритму оптимізації бере участь нейронна мережа та генетичний алгоритм. Нейронні мережі можуть бути розділені за топологіями і виконуваною функціональністю. Генетичний алгоритм для своєї діяльності використовується популяцію, що складається з хромосом параметрів, що оптимізуються.

Схема предметної області для виконання стохастичної багатокритеріальної оптимізації режимів різання для чорнової обробки деталей представлена на рисунку 5.1.

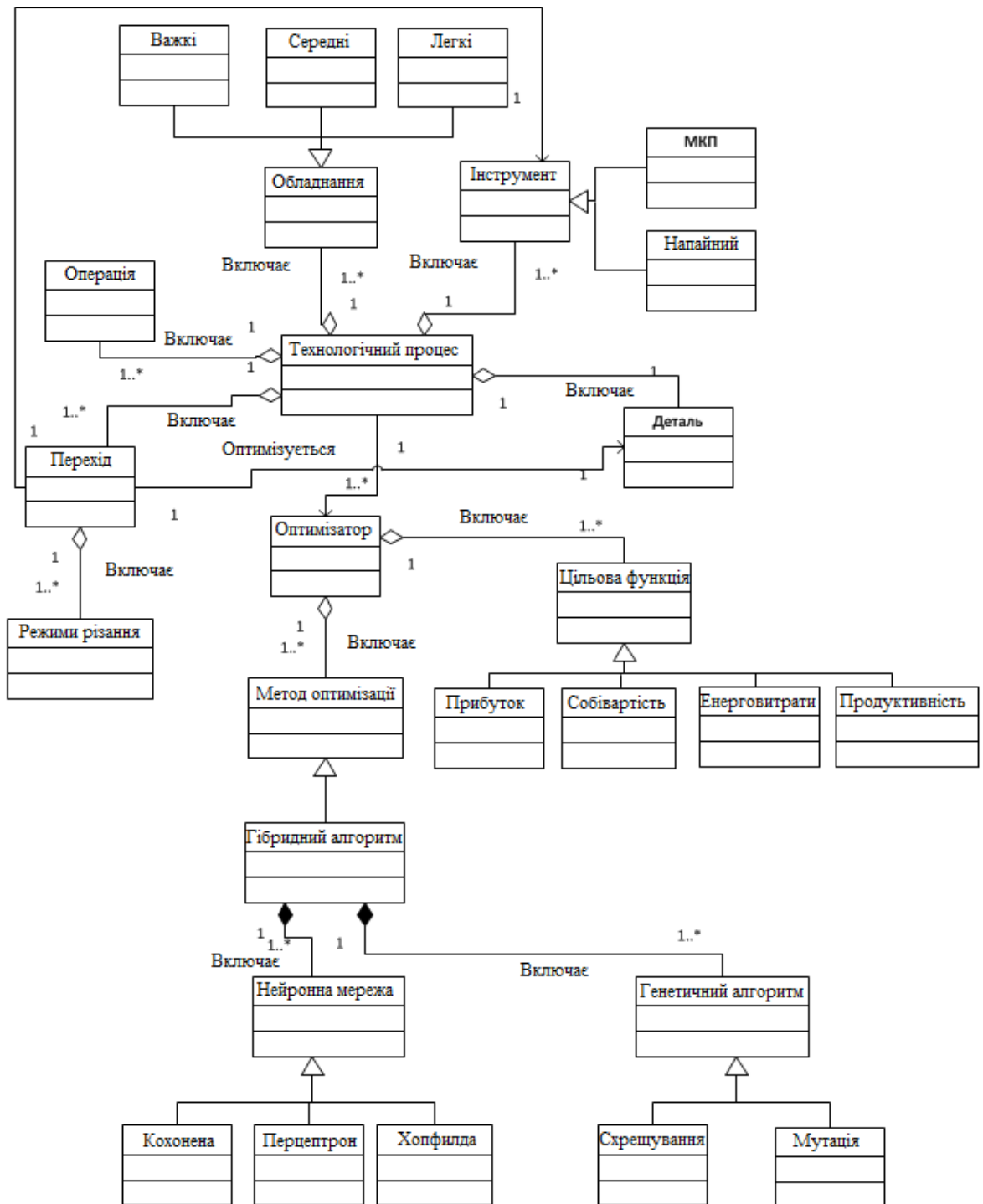


Рисунок 5.1 – Схема предметної області для стохастичної виконання багатокритеріальної оптимізації режимів різання для чорнкової обробки деталей

Для більш глибокого розуміння логіки програмно-методичного комплексу (ПМК) для багатокритеріальної оптимізації розглянемо діаграму станів гібридного методу оптимізації.

На основі заданих границь оптимізації і встановлених початкових значень параметрів гібридного алгоритму виконується створення початкової популяції генетичним алгоритмом. Коли популяція сформована, вона проходить перевірку на адекватність за допомогою нейронної мережі. У випадку якщо у сформованій популяції відсутні адекватні хромосоми – виконується повторне формування початкової популяції.

При отриманні адекватних хромосом виконується обчислення цільової функції. Після обчислення цільової функції для всіх елементів популяції виконується відбір кращих хромосом у відповідності з отриманими значеннями цільової функції.

Коли відбір кращих хромосом був виконаний, виконується перевірка значення цільової функції всіх хромосом на досягнення оптимуму. Якщо оптимальні хромосоми отримані – виконується формування Парето оптимальної більшості хромосом зі значеннями цільової функції.

Якщо оптимум цільової функції не досягнутий виконуються операції генетичного алгоритму для відібраних кращих хромосом. Після виконання даних операцій відбувається формування нової популяції.

Сформована популяція, базою для якої послужили відібрані кращі хромосоми, відправляється на перевірку нейронною мережею. Для отриманих адекватних хромосом виконується обчислення цільової функції.

Дії, які починаються з обчислення цільової функції для адекватних хромосом, формують цикл, який виконується до досягнення оптимуму цільової функції.

Діаграма станів процесу оптимізації з використанням гібридного алгоритму взаємодії нейронної мережі і генетичного алгоритму представлена на рисунку 5.2.

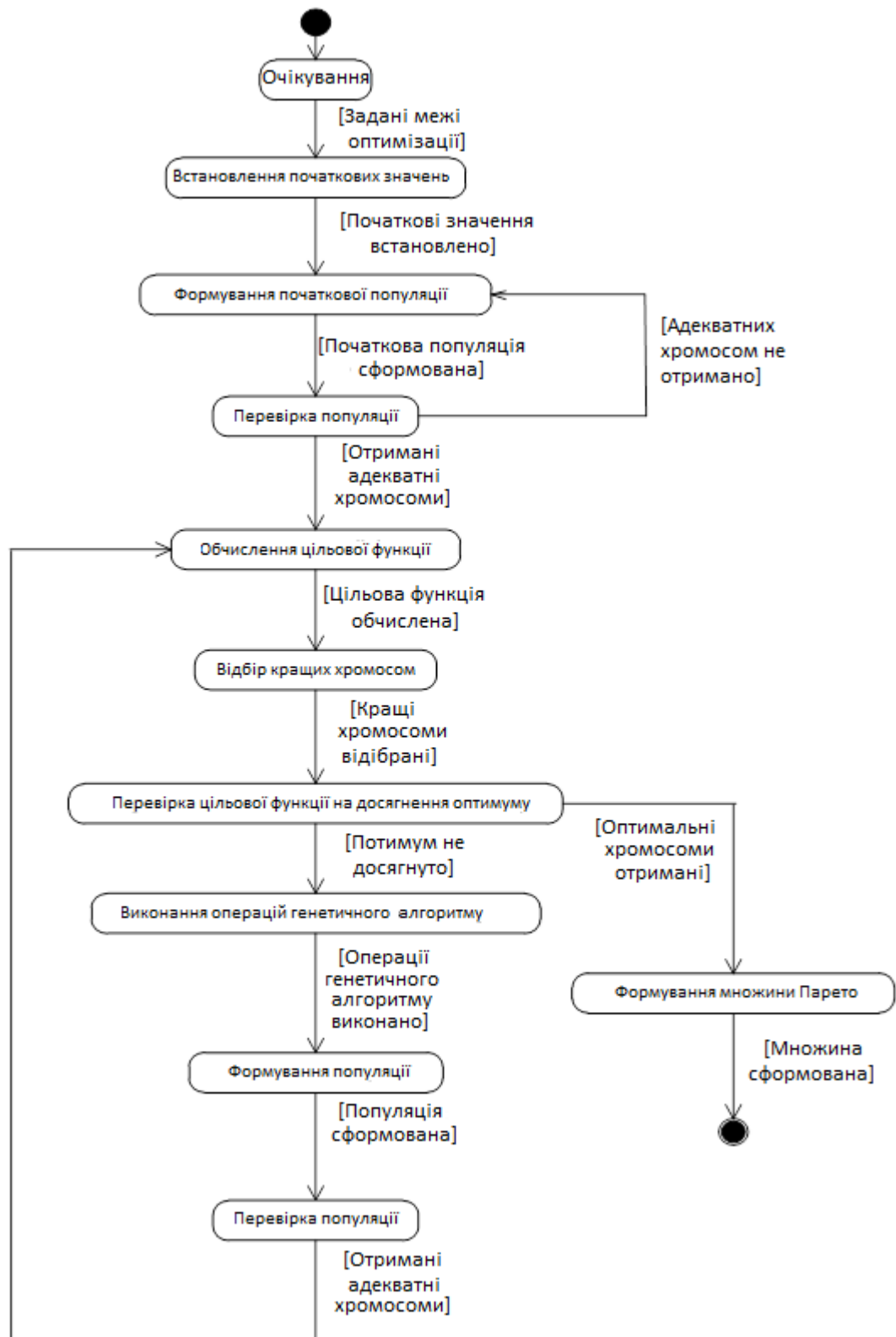


Рисунок 5.2 – Діаграма станів процесу багатокритеріальної оптимізації з використанням гібридного алгоритму взаємодії нейронної мережі і генетичного алгоритму

Використовуються принцип багатокритеріального вибору на базі сканування по множині Парето. У цьому випадку користувач, маючи деяку оптимальну оцінку, знайдену по цільовій точці, задає бажану змінну критеріїв у вигляді прирощувань. У результаті виходить ряд оцінок, що змінюються в вказаному напрямку.

Для виконання завдання багатокритеріальної оптимізації режимів різання в ПМК закладена можливість вводу параметрів інструменту (різальних пластин), з подальшим формуванням і накопиченням бази інструменту, вводу параметрів оброблюваної деталі: матеріалу та сил різання. Також передбачена можливість додати нормативну базу параметрів, за якою буде виконано навчання нейронної мережі. Графічний інтерфейс вводу параметрів матеріалу та нормативної бази показаний на рисунку 5.3.

Параметри матеріалу та нормативні таблиці

Матеріали
 Конструкційна сталь | Жорсткість: 180 | Змінити

0.05	0.06	0.1	0.16	0.3	0.4	0.5	0.8	1.6	2.5
4 336	4 136	3 621	3 205	2 854	2 525	2 383	2 109	1 761	1 568

Створити новий | Жорсткість

0.05	0.06	0.1	0.16	0.3	0.4	0.5	0.8	1.6	2.5

Нормативні таблиці
 Матеріал: Конструкційна сталь | Вид обробки: Чорнова
 Габарити верстата: 1000 | Нормативи: Загальномашинобудівні | Додати

	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,5	2	2,5	3
4	133	121	113	101	92	82	72	60	53	47
6	118	108	100	89	81	73	64	54	47	42
8	113	103	96	86	78	70	61	51	45	40
10	109	100	93	83	75	68	59	50	43	39
12	106	97	90	81	75	68	59	50	43	39
15	103	94	88	78	71	64	56	47	41	37
20	90	84	78	70	62	56	49	41	36	32
25	88	80	75	67	61	54	48	40	35	31
30	86	79	73	65	60	53	47	39	34	
40	84	77	71	64	58	52	45	38		

Рисунок 5.3 – Графічний інтерфейс вводу параметрів матеріалу та нормативної бази

5.2 Вибір критеріїв оптимальності

Визначення раціональних режимів різання для поздовжнього чорнового точіння на тяжких токарних верстатах твердосплавним інструментом і встановлення обґрунтованих норм його витрати є важливою задачею. Однак, у більшості випадків вони відносяться до дрібних і середніх токарних верстатах. Крім того, більшість досліджень обмежилися розгляданням лише факторів процесу різання: елементів різання, властивостей оброблювального і інструментального матеріалів. При цьому недостатньо враховувалися імовірнісні показники процесів зношування і руйнування інструменту.

Оптимізація режимів різання за двома перемінними одночасно з урахуванням руйнування інструменту дає можливість визначити їх раціональне поєднання у реальній області V і S , так як у математичній моделі враховано основне обмеження, що діє при чорновій обробці – міцність різального інструменту. Такий підхід до визначення раціональних режимів різання застосовується лише в умовах роботи важконавантаженого інструменту при чорновій обробці з великими перерізами зрізу при роботі на важких токарних верстатах.

Роботи по статистичному аналізу показників процесу різання можна поділити на 2 напрямки:

- визначення статистичних характеристик показників процесу різання (в основному стійкості інструменту) по спостереженням за діючим процесом;
- експериментальне дослідження закономірностей процесу різання з оцінкою точності останніх.

Для більшості робіт, присвячених визначенню раціональних режимів різання, характерна наступна послідовність розрахунку режимів:

- вибір критерію оптимальності;
- встановлення зв'язку стійкості інструменту з елементами режимів різання;
- формування цільового функціоналу;

- визначення обмежувальних умов;
- визначення елементів режиму різання.

Вихідною для отримання математичної моделі процесу обробки при визначенні раціональних режимів різання є залежність стійкості T від елементів режимів різання: швидкості різання V , подачі S і глибини різання t .

Існує велика кількість формул, отриманих на основі експериментальних даних, і пов'язаних стійкістю з елементами режимів різання. Найбільше розповсюдження отримали емпіричні залежності стійкості від елементів режиму різання, що застосовуються практично для усіх видів різальних інструментів і більшості інструментальних оброблювальних матеріалів.

Не дивлячись на велике різноманіття формул, що описують зв'язок стійкості інструменту з елементами режиму різання, не завжди забезпечується достовірність і точність вихідної інформації для розрахунку режимів різання. В роботах вказано на необхідність врахування ймовірності руйнування при визначенні подачі. Однак, з огляду на відсутність зв'язків, що відображають імовірнісний характер процесу різання з урахуванням як зношування, так і руйнування інструменту, ця задача повністю не була вирішена. Формули теорії різання дають можливість розрахувати режими різання лише з визначеною точністю, що обумовлено статистичним характером самих закономірностей. Для достовірного визначення раціональних режимів різання необхідно враховувати імовірнісний характер процесу різання при формуванні математичної моделі для розрахунку режимів різання.

Середня стійкість інструменту величина випадкова, яка істотно залежить від імовірності появи відказу відповідного виду і стійкості інструменту до визначеного виду відказу, яка у даному випадку є величиною умовною, що характеризує властивості даного інструменту. Середня фактична стійкість різального інструменту, що залежить від його зносостійкості і міцності, визначається як

$$T = q_3 * T_3 + q_p * T_p \quad (5.1)$$

де: T_3 і T_p – середні стійкості обумовлені відповідно зношуванням і руйнуванням інструменту;

q_3 і q_p – імовірності з'яви відказу відповідно зносу і руйнування.

Визначення стійкості, обумовленій зношуванням на основі стійкісних залежностей не викликає труднощів, фактична точність визначається:

$$T = T_3 * \varepsilon \quad (5.2)$$

де: ε – коефіцієнт, що враховує зміну стійкості у зв'язку з руйнуванням інструменту.

$$\varepsilon = \frac{T}{T_3} = q_3 + q_p \frac{T_p}{T_3} = (1 + q_p) + q_p \frac{T_p}{T_3} \quad (5.3)$$

Таким чином, визначення ε пов'язано з визначенням залежності $\frac{T_p}{T_3} - q_p$.

Залежність $\frac{T_p}{T_3}$ від імовірності руйнування інструменту, отримана методом кореляційного аналізу на основі результатів статистичного спостереження за роботою твердосплавних різців ($t = 15...40$ мм, $S = 0,9...1,6$ мм/об; $V = 40...62$ м/хв), що проводилися на ПрАТ «НКМЗ». Теоретична і статистична залежності узгоджується з достатньою ступеню достовірності (критерій узгодження Пірсона).

Кореляційна залежність $\frac{T_p}{T_u} - q_p$ для вказаних умов експлуатації має наступний вигляд:

$$\frac{T_p}{T_3} = \frac{0,21}{q_p^{0,56}} \quad (5.4)$$

5.3 Рекомендації по визначенню оптимальних параметрів різання при експлуатації ступінчастих збірних різців

Завдання визначення раціональних регламентів процесу різання, яке вирішується з урахуванням всіх технологічних та техніко-економічних чинників є багатокритеріальним. Критеріями ефективності при визначенні регламентів процесу різання можуть бути всі вихідні параметри процесу, кожен з них і будь-яке їх поєднання [14,143,144].

Частина вихідних параметрів, які не є критеріями ефективності, служать обмеженнями і визначають область допустимих рішень при визначенні поєднання елементів режиму різання.

Зі збільшенням числа обмежуючих умов підвищується трудомісткість розрахунків і знижується їх точність, тому що в цьому випадку область раціональних режимів різання не завжди збігається з екстремальними точками цільової функції, а знаходиться на лінії перетину найбільш сильного обмеження з поверхнею, що відображає область існування цільової функції.

Основним критерієм ефективності процесу обробки на важких токарних верстатах зазвичай є продуктивність чорнової обробки конструкційних сталей з великими перерізами зрізаного шару (рис. 5.4). Формування цільової функції продуктивності чорнової обробки виконували з урахуванням витрат твердого сплаву, що залежать від режимів різання.

Обмеженнями задачі оптимізації є: міцність і жорсткість технологічної системи; ефективна потужність різання.

Одержані при виробничих випробуваннях залежності при чорновій обробці збірними різцями Т5К10 конструкційних сталей типу 40Х, 40ХН, 60ХГС (НВ 210...240) с глибинами різання $t = 20 \dots 30$ мм, подачами $S = 1,2 \dots 1,6$ мм/об (додаток Б).

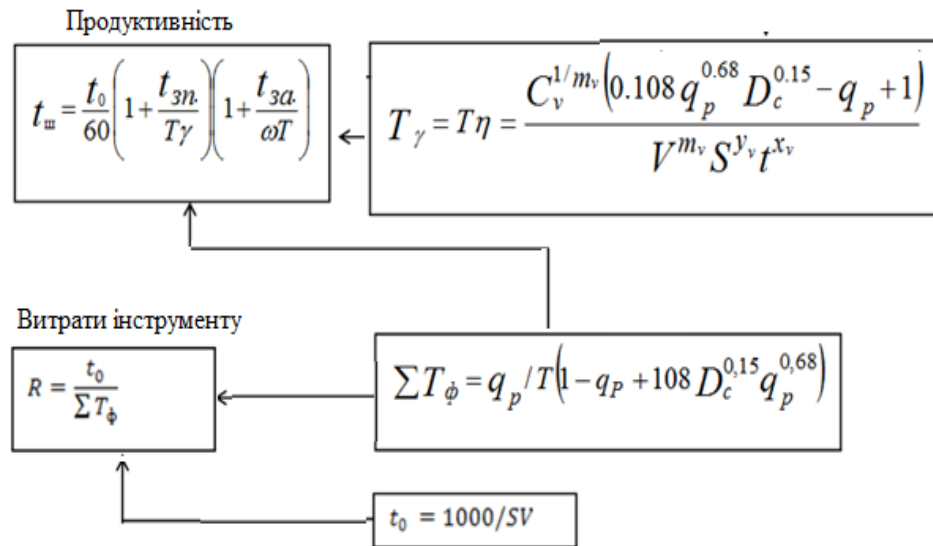


Рисунок 5.4 – Схема математичної моделі при визначенні продуктивності чорнової обробки на важких верстатах

В певній області подач і швидкостей різання (для конструкційних сталей $V = 40 \dots 70$ м/хв) залежність $T-V$ в подвійній логарифмічній сітці майже прямолінійна, але показник m_V є суттєво більшим, ніж при проведенні експериментів, та досягає значень $m_V = 0,5 \dots 0,6$, тому використовувати загальноприйняті формули, тим більше при $m_V = 0,25$ не припустимо.

Відзначимо, що в зоні малих швидкостей не тільки збільшується частка зруйнованих різців, а й зростає коефіцієнт варіації періоду стійкості (рис. 5.5).

Таким чином, встановлено, що при знятті великих перерізів зрізуваного шару на важких токарних верстатах процес різання з відносно малими швидкостями не тільки не дає переваг у збільшенні періоду стійкості, але і викликає значні втрати через руйнування інструменту і зниження стабільності роботи.

Великий вплив на залежність $T-V$ має величина подачі. З ростом подачі збільшується частка зруйнованих інструментів і знижується період стійкості різців (рис. 5.6).

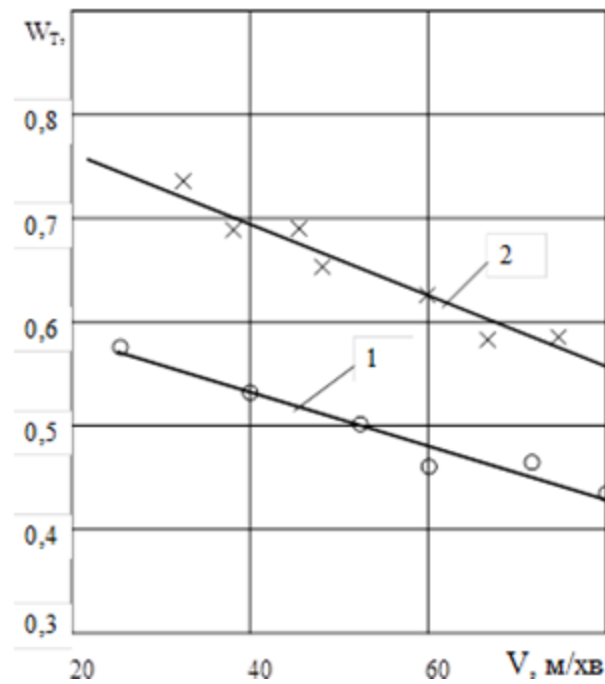


Рисунок 5.5 – Залежність коефіцієнту варіації стійкості від швидкості різання: 1 – згідно нормативів режимів різання; 2 – у виробничих умовах

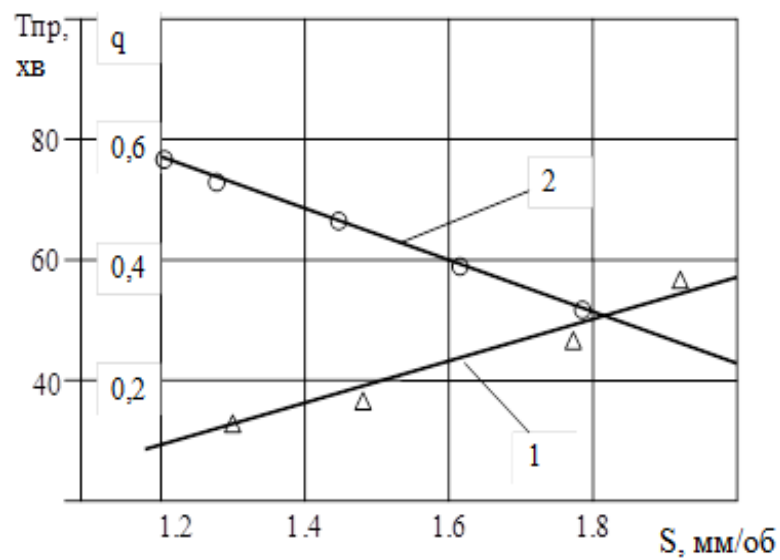


Рисунок 5.6 – Залежність частки руйнування q – (1) та граничного періоду стійкості T_{np} – (2) від подачі S

Таким чином залежність, що задовольняє цим умовам, описується як:

$$\frac{\alpha(\ln T)}{dv} = \frac{k}{v} - \alpha, \quad (5.5)$$

де: a – коефіцієнт, що відображає швидкість падіння періоду стійкості і лінійний характер цього падіння в зоні відносно великих швидкостей різання;
 k – коефіцієнт, що показує ступінь падіння періоду стійкості в області малих швидкостей різання.

Одержане рівняння періоду стійкості з урахуванням впливу подачі:

$$T = c(S)V^{k(s)}e^{-\alpha(s)v} \quad (2)$$

Шляхом вибору теоретичної кривої з урахуванням умов, в яких знайдено залежність T – V , отримаємо значення коефіцієнтів і показників ступенів, які зведені в таблиці 5.1.

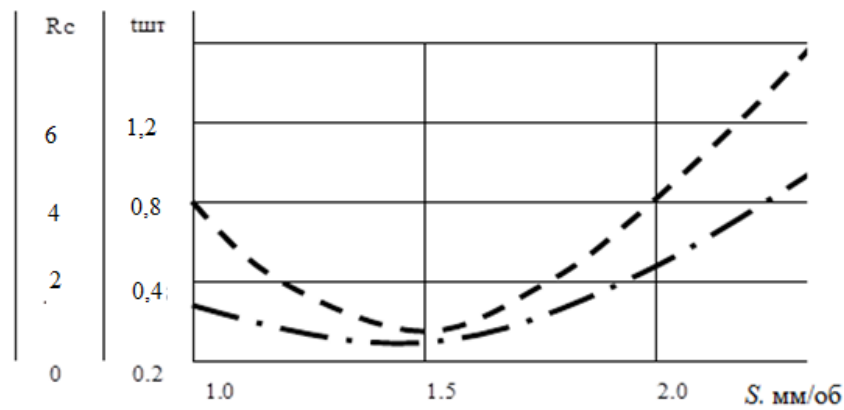
Таблиця 5.1 – Значення постійних і показників ступенів для визначення стійкості

Подача S , мм/об	C	K	α
2,0	7,85	–4,6	–0,39
1,6	7,2	1,67	–0,13
1,2	112,52	0,52	–0,072

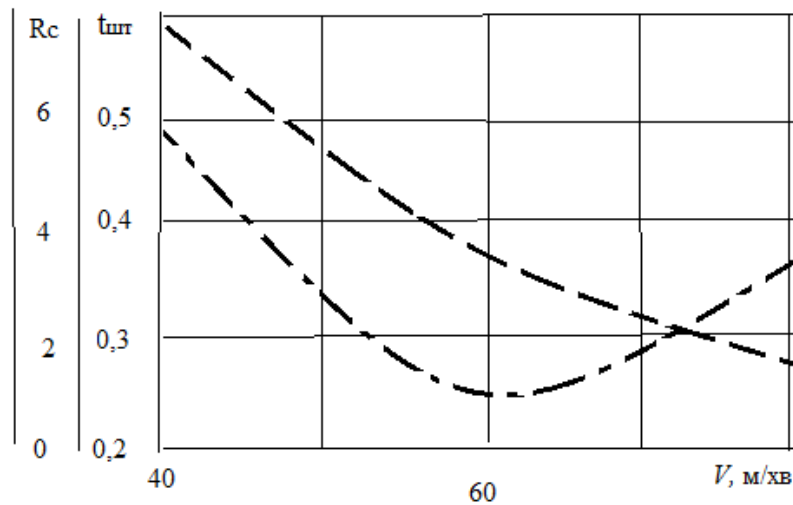
Призначення завищеної величини подачі при зниженні швидкості різання при чорновому точінні при знятті великих перерізів зрізуваного шару на практиці призводить до руйнування пластини, що перешкоджає збільшенню сумарної стійкості інструменту.

Розраховуються обов'язкові критерії оптимальності: штучний час t_{um} – продуктивності обробки, R_c – витрата твердого сплаву.

На рисунку 5.7 наведені графіки залежностей цільових функцій від оптимізованих параметрів подачі S мм/об та швидкості різання V м/хв.



а)



б)

Рисунок 5.7 – Графіки залежностей цільових функцій від оптимізованих параметрів: *а* – подачі, *б* – швидкості різання

- - - - $t_{шт}$ – функція штучного часу;
 - . - R_c – функція витрат твердого сплаву;

Визначаємо критерій оптимальності – витрати (наприклад, на чорнову обробку 1 м^2 поверхні деталі), які є комплексним критерієм – адитивної згортки продуктивності (штучного часу) и витрат твердого сплаву. На рисунку 5.8 приведений переріз множини Парето площиною критеріїв штучного час $t_{шт}$ и витрат твердого сплава R_c .

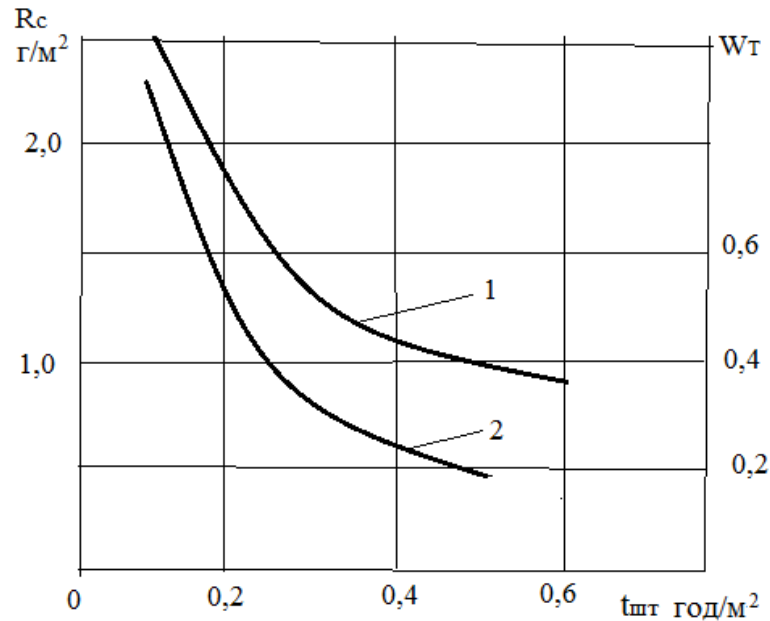


Рисунок 5.8 – Переріз множини Парето площиною критеріїв штучного часу $t_{шт}$ та витрат твердого сплаву R_c :

- 1 – для чорнової обробки збірним різцем зі ступінчастою двовершинною схемою різання;
- 2 – для чорнової обробки збірним різцем зі ступінчастою одновершинною схемою різання

С точки зору стабільності чорнової обробки необхідно переглянути питання про раціональну величину подачу при використанні в виробничих умовах експлуатації ступінчастих збірних різців. В визначених умовах чорнової обробки зниження подачі та пропорційальному підвищенні швидкості різання приводить до покращення всіх критеріїв оптимальності.

З урахуванням стабільності обробки при чорновій обробці ступінчастими збірними різцями коефіцієнт варіації стійкості W_T не повинен перевищувати 0,3 – 0,4. Так при використанні ступінчастих збірних різців з одновершинною схемою різання зменшуються витрати твердого сплаву зменшуються на 21 – 26%, а штучний час до 35% у порівнянні з ступінчастими збірними різцями з двовершинною схемою різання.

5.4 Висновки до розділу

1. Результати аналізу можливих станів інструменту показали, що відмови збірних різців різноманітні, у таких випадках доцільно визначати закон розподілу стійкості з використанням коефіцієнта варіації стійкості.

2. Призначення завищеної величини подачі при зниженні швидкості різання при чорновому точінні при знятті великих перерізів зрізуваного шару на практиці призводить до руйнування пластини, що перешкоджає збільшенню сумарної стійкості інструменту.

3. Встановлено, що при знятті великих перерізів зрізуваного шару на важких токарних верстатах процес різання з відносно малими швидкостями не тільки не дає переваг у збільшенні періоду стійкості, але і викликає значні втрати через руйнування інструменту і зниження стабільності роботи.

4. Розроблено алгоритм прийняття рішень, програмне забезпечення та систему функцій багатокритеріальної оптимізації при визначенні ефективних параметрів режимів різання з урахуванням стабільності обробки і коефіцієнта варіації стійкості W_T .

5. Встановлено, що для чорнової обробки з великими перерізами зрізуваного шару найбільш ефективним є експлуатація ступінчастих збірних різців з одновершинною схемою різання при коефіцієнті варіації стійкості $W_T = 0,35 \dots 0,45$, при цьому витрати твердого сплаву зменшуються в 1,3...1,5 рази, а штучний час – до 35% в порівнянні чорною обробкою ступінчастими збірними різцями з двовершинною схемою різання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково–технічну задачу підвищення ефективності процесу чорнової обробки деталей з великими перерізами зрізуваного шару ступінчастими збірними різцями на важких токарних верстатах за рахунок вперше створеної нової схеми розподілу припуску між різальними пластинами інструменту з однією робочою вершиною різального ступінчастого леза, яка забезпечує високу продуктивність та експлуатаційні характеристики інструменту.

1. Розроблені моделі напружено–деформованого стану конструктивних варіантів вузлів механічного кріплення різальних пластин ступінчастих збірних різців, які вперше враховують особливості навантаження та контактної взаємодії пластин з елементами зовнішнього і внутрішнього зрізу припуску, що дозволяє підвищити безвідмовність інструменту при експлуатації за рахунок зниження на 1,2 рази величини відсотка поломок і викришування.

2. Уточнено розподіл схеми реакцій з боку базових поверхонь пластини з елементами базування вузлів кріплення на напружено–деформований стан різця, що дозволяє суттєво підвищувати міцнісні характеристики збірного інструменту на стадії його проектування.

3. Для опису й досліджень динамічних явищ, що виникають при обробці на важких токарних верстатах ступінчастими різцями, запропонована удосконалена структурна, математична й імітаційна модель технологічної системи верстата, яка враховує особливості нової схеми розподілу навантаження силами різання на пластини інструмента.

4. Запропонована математична й імітаційна модель адекватно відображає коливання, які виникають при механічній обробці, що підтверджено порівнянням результатів моделювання з даними експериментів. Максимальна похибка моделі не перевищує 12%.

5. Розроблені конструкції вузлів кріплення різальних пластин збірних різців для чорнового точіння дозволяють підвищити продуктивність обробки

в середньому на 35 %, а також знизити витрати інструменту на 21...26 %, а також можуть бути використані для проектування конструкцій збірних інструментів для механічної обробки в інших областях машинобудування;

6. Обробка ступінчастим різцем з новою схемою навантаження характеризується відрізняється більш стабільними значеннями амплітуди коливань за рахунок того, що в процесі різання приймає участь тільки одна різальна вершина пластини різця, яка оброблює внутрішню поверхню припуску заготовки без переривів процесу обробки, а процес різання пластини, яка оброблює зовнішній шар припуску, здійснюється по схемі вільного різання, що суттєво знижує рівень коливань інструменту.

7. На підставі аналітичних досліджень встановлено, що при обробці деталей ступінчастим різцем з одновершинною схемою різання у порівнянні з інструментом з одною пластиною, а також з врахуванням відсутності впливу різання по сліду попереднього проходу, амплітуда коливань в технологічній системі зменшується до 2,5 рази.

8. Результати аналізу можливих станів інструменту показали, що відмови збірних різців різноманітні, у таких випадках доцільно використання такого показника надійності інструменту як інтенсивність відмов, який відображає зміни його властивостей у часі та визначати закон розподілу стійкості і його параметри.

9. Розроблено алгоритм прийняття рішень, програмне забезпечення та систему функцій багатокритеріальної оптимізації при визначенні ефективних параметрів режимів різання ступінчастими збірними різцями при чорновій обробці деталей з великими перерізами зрізуваного шару на важких токарних верстатах, що дозволяє підвищити продуктивність обробки в середньому на 35 %.

10. Результати роботи впроваджені ПрАТ Новокраматорський машинобудівний завод, ПрАТ Краматорський завод важкого верстатобудування, у навчальному процесі Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александрова Т.Е. Оптимизация многокритериальных технологических процессов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ, 2001. Вып. 59.– С. 14 – 19.
2. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
3. Андреев В.Н. Совершенствование режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1993.– 240 с.
4. Антонюк В.С., Выслоух С.П., Катрук О.В. Классификация и распознавание образов при автоматизированном проектировании технологических процессов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вып. №23 – Краматорск: ДГМА. – 2008. – С.
5. Антонюк В.С., Сорока О.Б., Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. Дискретні покриття на різальному інструменті. Проблеми прочності. 2007. №1. С. 138 – 143.
6. Бабаков И.М. Теория колебаний.- М.: Наука, 1968.-560 с.
7. Базанова Ю.Н., Валошинов В.В., Горчаков А.Ю. и др. Интеллектуальная оптимизационная система «Интелос». – М.: Вычислительный центр РАН, 1994. – 62с.
8. Башков В.М., Кацев П.Г. Испытания режущего инструмента на стойкость. М : Машиностроение, 1985. – 136 с.
9. Бетанелли А.И. Прочность и надежность режущего инструмента. - Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1973. – 304 с.
10. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М. Машиностроение, 1975.– 360с.
11. Бойко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. – К.: Вища школа. 1983. – 512 с.
12. Варвак П.М., Бузун И.М. Горецкий А.С. и др. Метод конечных элементов. – К: Вища школа, 1981. – 176с.

13. Васильева Л.В., Мироненко Е.В. Исследование критериев оптимальности процесса механообработки // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вып. №24 – Краматорск: ДГМА. 2009. – С. 102 – 105.
14. Васильченко Я.В., Ковалев В.Д. Управление процессом обработки на тяжелых станках с помощью алгоритма оптимального регулирования // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вып. №19 – Краматорск: ДГМА. 2006. – С. 24 – 32
15. Васильченко Я.В. Повышение эффективности обработки на тяжелых станках за счет эксплуатационных свойств элементов технологической системы / Я.В. Васильченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 26. – С. 108 – 111.
16. Васильченко Я.В., Сукова Т.А., Шаповалов М.В. Методы повышения эффективности процесса резания на тяжелых станках // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вып. №29 – Краматорск: ДГМА. 2011. – С. 76 – 84.
17. Василюк Г.Д., Лещенко М.И., Мельничук П.П. Рациональная эксплуатация технологического оборудования. Навч. Посібник. Житомир: ХГП, 1999. -332с.
18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М. : Наука, 1969. – 236 с.
19. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов: перев. с англ. М. : Машиностроение, 1964. 257 с.
20. Вильсон А.Л., Этан А.О. К вопросу оптимизации режимов резания с учетом стохастического характера стойкостных зависимостей // Вестник машиностроения. 1984, № 11, – С. 42 – 45.
21. Вопросы оптимизации в металлообработке и исчисление вероятностей / Коткин Г.Г, Гузенко В.С., Мироненко Е.В., Еськов А.Л., Аносов В.Л. – Краматорск: ДГМА, 1999. – 223 с.

22. Генетический алгоритм. [Электронный ресурс]

https://ru.wikipedia.org/wiki/Генетический_алгоритм

23. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. – Х.: ОСНОВА, 1997. – 112 с.

24. Грабченко А.И.; Мироненко Е.В. Системные принципы создания агрегатно-модульного инструмента и оптимизации рабочего процесса // Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2003. – Вып. 64. – С.47 – 52.

25. Гузенко В.С., Бабин О.Ф. Исследование статистической жесткости тяжелых токарных станков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вып. №18 – Краматорск: ДГМА. 2005. – С. 107 – 112

26. Душинский В.В., Пуховский Е.С., Радченко С.Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / Под ред Г.Э. Таурита . – Киев.: Техника, 1977.– 176с.

27. Залога В.А. Анализ условий оптимизации процессов обработки труднообрабатываемых материалов // Надежность режущего инструмента. Вып. 9. – Краматорск: ДГМА. 1999. – С 71 – 75.

28. Залога В.А., Криворучко Д.В. Анализ условий контактирования лезвия инструмента со срезаемым слоем при прерывистом резании // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГТУ. 1999. – Вып. 54.– С. 98 – 104.

29. Залога В.А., Криворучко Д.В. К вопросу об общности математического описания процессов резания с переменной толщиной среза // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Х., 2001. №59. – С. 86 – 92

30. Залога В.А., Криворучко Д.В. Прогнозирующая математическая модель силового взаимодействия лезвия с заготовкой // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. - Киев: ИСМ. 2002. – С. 103 – 118.

31. Залога В.О., Криворучко Д.В., Сорокін А.М. До питання підтвердження адекватності скінчено-елементної моделі процесу прямокутного різання // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вып. №19 – Краматорск: ДГМА. 2006. – С. 18 – 23.

32. Збірний різець для важкого різання: пат. на корисну модель 80045 Україна, МКП В23В 27/16.– № u201213570; заявл. 27.11.2012; 13.05.2013, бюл. № 9/2013.

33. Збірний різець: пат. на корисну модель 116974 Україна, МКП В23В 27/16. – № u201613463; заявл. 27.12.2016; опубл. 12.06.2017, бюл. №11/2017.

34. Збірний різальний інструмент: пат. на корисну модель 114219 Україна, МКП В23В 27/16. – № a201606663; заявл. 17.06.2016; опубл. 10.03.2017, бюл. №5/2017.

35. Збірний різальний інструмент: пат. на корисну модель 114465 Україна, МКП В23В 27/16. – № u201609272; заявл. 05.09.2016; опубл. 10.03.2017, бюл. №5/2017.

36. Зенкевич О. Метод конечных элементов. – М.: Мир, 1975. – 359с.

37. Зорев Н.Н. Обработка стали твердосплавным инструментом в условиях прерывистого резания с большими сечениями среза. // Вестник машиностроения. 1964. № 2, – С. 62 – 67.

38. Кабалдин Ю.Г., Бурков А.А., Семибратова М.В., Александров А.А. Динамическая модель процесса резания. // Вестник машиностроения. 2001. – №8, – С. 33– 38.

39. Карпенко А.П. Многокритериальная оптимизация на основе нечеткой аппроксимации функций предпочтений лица, принимающего решения [Электронный ресурс] / А.П. Карпенко, Д.А. Моор, Д.Т. Мухлисуллина // Наука и образование – 2010. – № 1. – Режим доступа к журн. : <http://technomag.edu.ru/doc/135375.html>

40. Карпусь В.Е., Луцкий С.В., Дукьянченко Е.В. Системные критерии механообрабатывающих технологических систем // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГТУ. 2000. – Вып. 57. – С. 105 -109.

41. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1974. – 235 с.
42. Клименко Г.П. Исследование условий обработки деталей тяжелого машиностроения // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць.– Краматорськ, 2003. Вип. 13. – С. 24 – 30.
43. Клименко Г.П. Основы рациональной эксплуатации режущего инструмента : учеб. пособие. Краматорск : ДДМА, 2006. – 200 с.
44. Клименко Г.П. Повышение эффективности эксплуатации режущего инструмента на тяжелых станках // Прогресивна техніка і технологія машинобудування і зварювального виробництва. Збірник наукових праць.- Київ: НТУУ “КПІ”, 1998.- Т.1.– С. 417 – 422.
45. Клименко Г.П., Андронов А.Ю. Вероятностных подход к определению размеров режущей пластины инструмента с учетом накопления его погрешностей // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип. №19 – Краматорск: ДГМА. 2006. – С. 227 – 234
46. Клименко Г.П., Васильченко Я.В. Квалиметрический подход к оценке уровня эксплуатации режущего инструмента // «Прогрессивные технологии машиностроения. Прогрессивные методики преподавания». – Вип. 1. – Сумы: СГПУ. 1997. – С. 114 – 118.
47. Клименко Г.П. Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. Качество и надежность эксплуатации сборных твердосплавных инструментов. Вісник Національного технічного університету ХПІ. Series: Techniques in a machine industry : зб. наук. пр. № 34 (1310) – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – С. 34 – 39.
48. Клименко Г.П. Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. Якість і надійність технологічних систем : навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Краматорськ : ДДМА, – 2018. – 204 с.
49. Клименко Г.П., Мироненко Є.В., Гузенко В.С., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. Експлуатація збірних різців : монографія для студентів спеціальностей 6.050503, 6.050502, 8.05050301, 8.05050302, 8.05050201 денної та заочної форми навчання. Краматорськ : ДДМА, 2015. – 86 с.

50. Ковалевский С.В., Мишура Е.В. Структуризация тяжелой токарной операции обработки деталей типа валов с учетом комплексного критерия // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вып. №21 – Краматорск: ДГМА. 2007. – С. 190 – 195.

51. Колесник В.Ф., Мироненко Е.В., Марчук Е.В, Повышение эффективности эксплуатации сборных резцов на тяжелых станках //Вестник Харьковского государственного университета. – Харьков: ХГПУ. 2000. – С. 128 – 134.

52. Криворучко Д.В. Исследование напряженно-деформированного состояния зоны стружкообразования при попутном тангенциальном точении // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ. 1977, вып. 51. – С. 256 – 262.

53. Кудинов В.А. Динамическая характеристика резания. //Станки и инструмент.1963.-№10.- С.1 – 7.

54. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк МЛ. Теорія технічних систем / За заг. ред. Ю.М. Кузнецова. – К.: Тернопіль. ТДГУ, 1997. – 310с.

55. Лебедь В.Т. Основы теории создания технологических систем восстановления крупногабаритных изделий в тяжелом машиностроении / В.Т. Лебедь // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 6(1). – С. 18 – 25.

56. Лищинский Л.Ю. Поисковая оптимизация режимов резания // Вестник машиностроения. - 1985. - № 1. - С.

57. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М. : Машиностроение, 1982. – 320 с.

58. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М. : Машиностроение, 1966. 96с.

59. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

60. Малкин А.Я., Белоусова Е.А., Марков А.Н., Кириллов А.И. Определение динамического качества резцов. Руководящие материалы. М.: УДН-ВНИИ, 1975. – 120 с.

61. Мельничук П.П., Степчин Я.А. Контроль та прогнозування спрацювання токарних різців за динамічними характеристиками процесу різання // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. - Краматорськ: ДДМА, вип. №13, 2003. – С. 64 – 69.

62. Миранцов С.Л. Экспериментальные исследования динамических характеристик отрезных резцов. / С.Л. Миранцов, В.С. Гузенко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць.- Краматорськ: ДДМА, 2000.- Вип. 10.-С. 65-73

63. Мироненко Е.В. Анализ возможностей использования резцов з твердосплавними різальними пластинами зі зносостійкими покриттями при напівчистовій обробці валків прокатних станів / Е.В. Мироненко, В.В. Калініченко, Д.Є. Гузенко // Сучасні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць. – Харків.: НТУ «ХПІ». 2017. – Вип 12. – С.116 – 125.

64. Мироненко Е.В. Исследование долговечности блочно-модульных резцов. Прогрессивные технологии в машиностроении : сб. трудов Международной научно-техн. конф. Донецк, 1997. – С. 163–164.

65. Мироненко Е.В. Многокритериальная оптимизация при выборе и эксплуатации блочно-модульных резцов для уникальных станков // Резание и инструмент в технологических системах. Международный научно-технический сборник. Вып. 51. – Харьков, ХГПУ, 1997, – С. 179 – 183.

66. Мироненко. Е.В. Научные основы создания систем агрегатно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков: дис. д-ра техн. наук: 05.03.01. / Е.В. Мироненко; Донбасская гос. машиностроительная академия. – Краматорск, 2003. – 417 с.

67. Мироненко. Е.В. Оптимизация режимов резания при обработке на тяжелых токарных станках с учетом энергозатрат / Е.В. Мироненко, В.С. Гузенко, Л.В. Васильева, О.Е. Мироненко // Вісник Національного технічного

університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Технології в машинобудуванні. Харків НТУ «ХПІ». 2010. – № 40. – С. 62 – 70.

68. Мироненко Е.В., Богданова Л.М., Гузенко Д.Е. Изучение функционирования нейронных сетей для определения оптимальных режимов резания // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип. №35 – Краматорск: ДГМА. 2014. – С. 109 – 113

69. Мироненко Е.В., Васильева Л.В., Гах В.М. Исследование стойкости и прочности резцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип. №21 – Краматорск: ДГМА. 2007. – С. 76 – 83.

70. Мироненко Е.В., Колесник В.Ф., Марчук Е.В. Повышение эффективности эксплуатации сборных резцов на тяжелых станках // Вестник Харьковского политехнического университета. Сборник трудов. № 110. – Харьков. 2000. – С. 128 – 133.

71. Мироненко Є.В., Міранцов С.Л., Гузенко Д.Є., Ситнік М.Ю., Штогрін Д. Г. Вплив динамічних характеристик збірних різців на енергоефективність процесу різання // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип. №39 – Краматорск: ДГМА. 2016. – С. 153 – 158

72. Мироненко Е.В., Шустиков А.Д., Соловьев В.В. Исследование жесткости сборных токарных резцов // Надежность режущего инструмента. - Краматорск: ДГМА. 1994. – № 5. – С. 85 – 95.

73. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столяров Е.М. Методы оптимизации. – М.; Наука 1978. – 260 с.

74. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304с.

75. 163 Общемашиностроительные нормативы режимов резания: В 2-х т.: Т.1 / Локтев А.Д., Гуцин И.Ф., Клименко Г.П., и др. – М.: Машиностроение 1991. – 640 с.

76. -Остафьев В.А. Динамическая прочность режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.

77. 164 Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса механообработки. – Киев.: Техника, 1991. – 152с.
78. Подураев В.Н., Закураев В.В. Разработка и реализация способа управления оптимальным режимов резания // Вестник машиностроения. - 1996.- №11.
79. Полетика М.Ф., Гольдиминт М.Г., Стефанов Ю.П. Математическое моделирование процесса резания // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. – Киев. 2002. – С. 33–42.
80. 184 Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении / Вережуб Н.В., Весткемпер Е., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. / Под ред. Грабченко А.И. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 436 с.
81. Равская Н.С., Клименко Г.П. Влияние стохастического характера обработки деталей на выбор инструмента для тяжелых станков// Резание и инструмент в технологических системах.- Межд. научн.-техн. сборник.- Харьков: НТУ “ХПИ”, 2002.– Вып. 63.– С. 126 – 129.
82. Равская Н.С., Клименко Г.П. Обеспечение заданного уровня надежности режущего инструмента при расчете их конструктивных параметров // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 2001. – Вып. 60. –С. 200 – 204.
83. Равская Н.С., Родин П.Р., Дюбнер Л.Г., Скрынник П.В. Оптимизация конструктивных параметров инструментов на основе экспериментальных исследований // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. – Киев: ИСМ. 2002. – С. 332 – 336.
84. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. К.: ЗАТ «Укрспецмонтажпроект», 1998. –274с.
85. Развитие науки о резании металлов. М.: Машиностроение, 1967. – 415с.

86. Ресурсосбережение в тяжелом машиностроении. Реинжиниринг крупногабаритных изделий: монография. В.Т. Лебедь, А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой – Краматорск: ДГМА, 2015.– 301 с.

87. Різальний інструмент: пат. на корисну модель 134413 Україна, МКП В23В 27/16.– № u201813096; заявл. 29.12.2018; опубл. 10.05.2019, бюл. № 9/2019.

88. Різальний інструмент: пат. на корисну модель 1381882 Україна, МКП В23В 27/16.– № u201904103; заявл. 18.04.2019; опубл. 25.11.2019, бюл. № 22/2019.

89. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов: Учебник. – К.: Вища шк., 1990. – 424 с.

90. Родин П.Р., Равская Н.С. Об особенности дальнейшего развития производства режущих инструментов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГТУ, 1999. – Вып. 54. – С. 206 – 210.

91. Родічев Ю.М., Сорока О.Б., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. Прискорені випробування різальних пластин при інтенсивному контактному навантаженні. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. Краматорськ, 2018. № 1 (43). – С. 181–187.

92. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев.: Научна думка, 1990. – 320с.

93. Рыжов Э.В. Оптимизация процессов механической обработки деталей // Резание и инструмент в технологических системах. – межд. научн.-техн.сб.. – Харьков: ХГПУ, 1995-1996, вып. 50. – С. 166 – 170.

94. Саймон Хайкин. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. – Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104с.

95. Сборный твердосплавный инструмент / Хае Г.Л., Гах В.М., Гузенко В.С. и др. М.: Машиностроение, 1989. – 254 с.

96. Сенькин Е.Н. Подсистема многокритериальной параметрической оптимизации режущего инструмента / Е.Н. Сенькин // Станки и инструмент. 1989. – № 4. – С. 15 – 17.
97. Системный анализ: оптимизация и принятие решений в механообработке // Коткин Г.Г., Гузенко В.С., Еськов А.Л., Мироненко Е.В. и др. -Краматорск: ДГМА, 1998. – 234 с.
98. Соболев В.С. О влиянии вибраций инструмента на качество поверхности и эксплуатационные свойства инструментального материала // Повышение точности и производительности обработки на станках: Вып.2. – Красноярск, 1970. – С. 27 – 30.
99. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.; Наука, 1981. – 110 с.
100. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах / под ред. А.Г. Косиловой. М. : Машиностроение, 1985.
101. Старков В.К., Киселев М.В. Оптимизация процесса резания по энергетическим критериям // Вестник машиностроения. – М., 1989. № 4. – С. 41 – 45.
102. Струтинський В.Б. Математичке моделювання процесів та систем механіки. Підручник. – Житомир.; ЖТТ1, 2001. – 612с.
103. Струтинський В.Б., Кравець А.М. Імітаційне навантаження динамічної системи верстата силами різання при обробці заготовок зі спеціальним профілем/ /Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт", серия машиностроение, 2000, № 39, НТУУ "КПИ" – С. 115 – 135.
104. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М. Машиностроение, 1992. – 260с.
105. Твердосплавные инструменты в процессах механической обработки : монография / Н. А. Бондаренко и др.; под. ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. К. : ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2015. – 368 с.

106. Токарные инструменты. / Sandvik Coromant Каталога. С. – 1000.2, RUS. 1996. – 56с.
107. Хае Г.Л. Качество и надежность режущего инструмента. -Киев: Наукова думка, 1968. –27с.
108. Хае ГЛ. Прочность режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1975. – 168с.
109. Хае Г.Л., Клименко Г.П. Исследование рациональной эксплуатации твердосплавного режущего инструмента. Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Краматорск : ДГМА, 2000. Вип. 10. – С. 3–9.
110. Хае Г.Л., Левин В.И. Повышение качества инструмента и эффективности обработки деталей на тяжелых станках. М.: НИИМаш, 1982. – 44 с.
111. Шаповалов М.В., Васильченко Я.В. Банк данных для выбора рациональной конструкции сборных резцов. Теория и практика в машиностроении : сборник научных трудов ЗАО ОНИКС. Ирбит, 2013. – С. 159 – 162.
112. Шустиков А.Д. Анализ качества сборных проходных резцов. М.: НИИМаш, 1981. – 39с.
113. Шустиков А.Д. Влияние вибраций на износ инструмента. // СТИН, 2000.– №1. – С.12 – 16.
114. Яковенко И.Э. Оптимизация режимов резания при обработке инструментальными блоками / И.Э. Яковенко, А.А. Пермяков // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2015. № 4 (1113). – С. 89 – 92.
115. Якубов Ф.Я. Процессы оптимизации в деформируемых объемах срезаемого слоя и стойкость инструмента // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования. – Киев; ИСМ. 2002. – С. 196– 206.

116. An approach to cost and power optimization in machining/ "CJRP Ann" 1985. 24, № 1, P. 453 – 457.
117. Bohdanova, L.M., Vasilyeva, L.V., Guzenko, D.E., Kolodyazhny, V.M. (2018). A Software System to Solve the Multi-Criteria Optimization Problem with Stochastic Constraints. *Cybernetics and Systems Analysis*, 54(6), 1013 – 1018.
118. Dawe C.C., Rubenstein C. Analysis of chip curvature // *Advances in Machine Tool Design and Research*. – Oxford. – 1979. – P. 283 – 298.
119. D. Venkatesan, K. Kannan, R. Saravanan (2009) A genetic algorithm-based artificial neural network model for the optimization of machining processes. *Neural Comput & Applic* (2009) 18: – P. 135 – 140
120. Gardiner K.M. Computer decodes conditions for minimum cost machining. *Metalworking Production*, № 49, 1985.
121. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence.— London: Bradford book edition, 1994 — 211 p.
122. Jawahirl S. The tool restricted contact effect as a major influencing factor in chip breaking: an experimental analysis // *CIRP Annals*. – 1988. – 37, №1.– P. 75 – 79.
123. Kudo H. Some new slip-line solutions for two-dimensional steady -state machining // *International Journal of mechanical science*. – 1975. – Vol. 7. -№1.– P. 43 – 57.
124. Milner D.A. An introduction to adaptive control. "Prod. Eng.", 1985, 54, №3 – P. 175 – 180.
125. Modern chip grooves / Katbe Korl // *Cut Tool End.*- 1990. -42, №3. – P. 58 – 60.
126. Nakayma K.A Study on chip breaker. – *JSME*, 1962, vol. 5, № 17, P. 142 – 150.
127. Nedes CH, Hintze W., Van Zutervelt C.A. Characteristic parameters of chip control in turning operations with indexable inserts and three-dimensionally shaped chip formers // *CIRP Annals*. – 1989. – 38. – P. 75 – 76.

128. Pisher J., Hargreaves J. The collection and classification of machining data. Proc. 15th Int Mach. Tool Des. and Res. Conf. Manchester, 1983.
129. Resch J., Weber P. Ein Beitrag zur Optimierung von Prozeßabschnitten – Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule. Karl – Marx – Stadt: 22.1980, 89 97.
130. The theoretical calculation of naturally curling radius of chip / Hong tao Zhang, Peide Liv, Rongsheng Hll // Int. J. Mach. Tools Manuf. 1989. – 29, №3. – P. 32p.
131. Vaida Gy. Problem of data optimizing systems application as consequence of the cutting development's trends // Труды VII международного научно-технического семинара «Высокие технологии в машиностроении; тенденции развития, менеджмент, маркетинг. – Харьков: ХГПУ. – 1997. – С.42 – 43.
132. Weber H., Shuster R. Aspekte zur Optimierung des Bearbeitungsprozesses beim spanenden Verfahren. "Fertigungstechnik und Betrieb", 1975, 25, № 4, P.213 – 218.
133. Wu S.M. Erwer D.S. Maximum profit the criterion in the determination of the optimum machining conditions. "Trans. ASME", 1976, № 88, P.435 -442.
134. Zhang H., Lin P., Hu R. The theoretical calculation of naturally curling radius of chip //Int. J. Mach. Tools and Manuf. – 1989- № 3. -P.323-332.

ДОДАТОК А

Протокол виробничих випробовувань збірних різців з механічним кріплення
різальних пластин з уступом в умовах ПАТ «НКМЗ»

№	Деталь (наіменування, № креслення)	Заготівка (тип, матеріал, твердість, стан поверхні)	Різець з МПК для важких токарних верстатів					
			Режими різання			Стійкість Т, хв	Вид відмови	
			t мм		S мм/об			V м/хв
			t _{min}	t _{max}				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Головка циліндра	Поковка 34ХНЗМ, НВ 240, корка	-	25	1,4	60	25	Викришування
2		Поковка 34ХНЗМ, НВ 240, корка	25	30	1,4	60	30	Знос
3		Поковка 34ХНЗМ, НВ 240, корка	30	-	1,4	60	95	Знос
4		Поковка 34ХНЗМ, НВ 240, корка	30	-	1,4	60	60	Знос
5	Опорний валок	Поковка, 9ХФ, НВ 220 корка	-	30	1,22	60	80	Знос
6		Поковка ,9ХФ, НВ 221 корка	20	30	1,4	62	80	Знос
7		Поковка ,9ХФ, НВ 222 корка	20	30	1,4	62	75	Знос
8		Поковка ,9ХФ, НВ 223	20	-	1,4	62	80	Руйнація
9		Поковка ,9ХФ, НВ 224	30	-	1,22	62	55	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	Опорний валок	Поковка, 9ХФ, НВ 225	30	-	1,22	62	75	Знос
11		Поковка, 9ХФ, НВ 226	30	-	1,22	62	55	Викришування
12		Поковка, 9ХФ, НВ 227	30	-	1,2	62	60	Знос
13	Валок	Поковка, 9ХФ НВ 220, корка	25	30	1,2	64	100	Руйнація
14		Поковка, 9ХФ НВ 220, корка	30	25	1,2	64	55	Знос
15		Поковка, 9ХФ НВ 220, корка	30	35	1,4	60	65	Викришування
16		Поковка, 9ХФ НВ 220, корка	30	35	1,4	60	60	Викришування
17		Поковка, 9ХФ НВ 220, корка	30	40	1,22	50	105	Викришування
18		Поковка, 9ХФ НВ 220, корка	15	-	1,53	60	80	Знос
19		Поковка, 9ХФ НВ 220, корка	30	35	1,22	60	55	Знос
20		Поковка, 9ХФ НВ 220, корка	30	35	1,22	60	30	Руйнація
21	Шток	Поковка, Сталь 45, корка	24	-	1,5	60	85	Знос
22		Поковка, Сталь 45, корка	25	-	1,5	65	90	Знос
23		Поковка, Сталь 45, корка	23	-	1,5	50	110	Знос
24		Поковка, Сталь 45, корка	22	-	1,5	60	100	Знос
25		Поковка, Сталь 50ХН, НВ 217, корка	20	30	1,5	60	135	Викришування

1	2	3	4	5	6	7	8	9
26	Шток	Поковка, Сталь 50ХН, НВ 217, корка	2	32	1,5	60	24	Викришування
27		Поковка, Сталь 50ХН, НВ 217, корка	2	32	1,25	60	86	Знос
28		Поковка, Сталь 50ХН, НВ 217, корка	30	-	1,25	60	240	Знос
29		Поковка, Сталь 50ХН, НВ 217, корка	20	-	1,5	60	90	Знос
30	Вал- шестерня	Поковка, Сталь 40ХНА, НВ 217, корка	10	35	1,25	60	120	Знос
31		Поковка, Сталь 40ХНА, НВ 217, корка	10	35	1,5	65	100	Руйнація
32		Поковка, Сталь 40ХНА, НВ 217, корка	10	25	1,5	65	5	Поломка
33		Поковка, Сталь 40ХНА, НВ 217, корка	16	-	1,5	65	80	Викришування
34		Поковка, Сталь 40ХНА, НВ 217, корка	10	35	1,00	65	30	Руйнація
35		Поковка, Сталь 40ХНА, НВ 217, корка	10	40	1,25	65	90	Знос
36		Поковка, Сталь 40ХНА, НВ 217, корка	30	-	1,00	65	90	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
37	Поршень	Поковка, Сталь 34ХН3М НВ 240,	13	-	2,5	60	190	Знос
38		Поковка, Сталь 34ХН3М НВ 240,	20	-	1,25	60	80	Знос
39		Поковка, Сталь 34ХН3М НВ 240, корка	-	25	1,25	60	95	Знос
40		Поковка, Сталь 34ХН3М НВ 240,	18	-	1,5	60	120	Знос
41		Поковка, Сталь 34ХН3М НВ 240, корка	-	30	1,25	60	25	Викришування
42		Поковка, Сталь 34ХН3М НВ 240, корка	-	20	1,25	60	10	Руйнація
43		Поковка, Сталь 34ХН3М НВ 240, корка	20	25	1,25	60	40	Знос
44		Поковка, Сталь 34ХН3М НВ 240, корка	5	25	1,25	60	55	Знос
45	Вал- шестерня	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	10	1,0	70	67	Знос
46		Поковка, сталь 40Х, НВ 230,	10	-	1,0	60	50	Знос
47		Поковка, сталь 40Х, НВ 230,	10	-	1,0	60	54	Викришування
48		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	40	1,6	60	87	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
49	Вал- шестерня	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	40	1,6	60	69	Знос
50		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	40	1,6	60	85	Знос
51		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	20	1,6	60	12	Викришування
52		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	20	1,6	60	58	Викришування
53		Поковка, сталь 40Х НВ 230, корка	40	-	1,6	60	48	Руйнація
54		Поковка, сталь 40Х НВ 230,	30	-	1,0	60	220	Знос
55		Поковка, сталь 40Х НВ 230, корка	-	40	1,0	60	30	Руйнація
56		Поковка, сталь 40Х НВ 230, корка	-	40	1,0	60	32	Знос
57		Поковка, сталь 40Х НВ 230, корка	10	40	1,0	60	50	Руйнація
58		Поковка, сталь 40Х НВ 230, корка	10	40	1,6	60	39	Знос
59		Поковка, сталь 40Х НВ 230,	20	-	1,0	60	30	Руйнація
60		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	20	-	1,0	60	30	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
61	Вал- шестерня	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	20	1,0	60	80	Руйнація
62		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	20	-	1,0	60	80	Знос
63		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	20	1,0	60	210	Знос
64		Поковка, сталь 40Х, НВ 230,	20	-	1,6	60	80	Знос
65		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	-	1,6	60	95	Знос
66		Поковка, сталь 40Х, НВ 230,	25	-	1,6	60	45	Викришування
67		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	15	-	1,6	60	59	Знос
68		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	15	-	1,6	60	61	Знос
69	Поршень	Поковка, сталь 34ХН3М	17	-	1,0	60	78	Викришування
70		Поковка, сталь 34ХН3М	5	25	1,25	60	80	Знос
71		Поковка, сталь 34ХН3М	3	20	1,5	60	160	Знос
72		Поковка, сталь 34ХН3М	5	25	1,25	60	75	Знос
73		Поковка, сталь 34ХН3М	16	20	1,5	60	225	Руйнація
74		Поковка, сталь 34ХН3М корка	5	20	1,25	60	160	Знос
1	2	3	4	5	6	7	8	9

75	Поршень	Поковка, сталь 34ХН3М корка	5	35	1,25	60	130	Руйнація
76	Болт	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	30	-	1,5	60	25	Викришування
77		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	30	-	1,5	60	75	Знос
78		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	30	-	1,5	60	86	Знос
79		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	30	1,5	60	120	Знос
80		Поковка, сталь 40ХНА НВ 217, корка	-	30	1,25	27	68	Знос
81	Вал- шестерня	Поковка, сталь 40ХНА НВ 217, корка	-	30	1,5	50	75	Знос
82		Поковка, сталь 40ХНА НВ 217, корка	10	20	1,5	50	35	Викришування
83		Поковка, сталь 40ХНА НВ 217, корка	20	-	1,5	50	100	Знос
84		Поковка, сталь 40ХНА НВ 217, корка	10	30	1,5	50	80	Викришування
85		Поковка, сталь 40ХНА НВ 217, корка	30	-	1,5	50	95	Знос
86		Поковка, сталь 40ХНА НВ 217, корка	-	35	1,5	50	40	Викришування

1	2	3	4	5	6	7	8	9
87	Вал- шестерня	Поковка, сталь 40ХНА НВ 217, корка	10	30	1,5	60	48	Знос
88		Поковка, сталь 40ХНА НВ 217, корка	10	38	1,5	60	54	Викришування
89		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217, корка	20	25	1,5	60	76	Знос
90		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217,	30	-	1,25	60	90	Знос
91		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217, корка	25	-	1,5	60	71	Знос
92		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217, корка	-	38	1,5	60	30	Руйнація
93		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217,	18	-	1,5	60	48	Знос
94		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217, корка	0	30	1,5	60	56	Знос
95		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217, корка	20	25	1,5	60	38	Знос
96		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217,	20	-	1,5	60	75	Викришування
97		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217, корка	25	-	1,5	60	80	Руйнація
98		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217, корка	25	-	1,5	60	65	Знос
99		Поковка, сталь40ХНА , НВ 217, корка	20	-	1,5	60	69	Руйнація

1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	Поршень	Поковка, сталь 34ХН3М НВ 240	30	-	1,5	50	90	Руйнація
101		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 241	15	-	2,5	60	120	Знос
102		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 242	20	-	1,5	60	95	Руйнація
103		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 243	10	25	1,25	60	40	Знос
104		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 244	18	-	1,5	60	120	Знос
105		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 245	-	30	1,25	60	45	Знос
106		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 246	-	20	1,25	60	30	Знос
107		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 247	-	25	1,25	60	65	Руйнація
108		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 248	20	-	1,5	60	75	Знос
109		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 249	20	-	1,5	60	90	Знос
110	Валок	Поковка, Сталь 9ХФ, корка	-	30	1,5	60	5	Руйнація
111		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	30	35	1,5	60	45	Викришування
112		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	25	35	1,22	60	50	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
113	Валок	Поковка, Сталь 9ХФ, корка	30	-	1,5	60	60	Знос
114		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	20	-	1,5	60	40	Знос
115		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	15	30	1,5	60	70	Руйнація
116		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	10	-	1,5	60	100	Знос
117	Валок- рабочий	Поковка, сталь 50ХН	20	35	1,6	55	23	Знос
118		Поковка, сталь 50ХН	30	-	1,5	55	90	Знос
119		Поковка, сталь 50ХН	25	30	1,5	55	94	Знос
120		Поковка, сталь 50ХН	25	30	1,5	55	46	Руйнація
121	Валок опорний	Поковка, сталь 40Х	5	25	1,5	55	35	Знос
122		Поковка, сталь 40Х	5	25	1,5	55	60	Руйнація
123		Поковка, сталь 40Х	25	-	1,5	55	75	Знос
124		Поковка, сталь 40Х	25	-	1,5	55	40	Викришування
125		Поковка, сталь 40Х	25	-	1,5	55	80	Знос
126		Поковка, сталь 40Х	-	25	1,5	60	10	Викришування
127		Поковка, сталь 40Х	25	30	1,5	60	48	Знос
128		Поковка, сталь 40Х	20	28	1,5	60	37	Знос
129		Поковка, сталь 40Х	25	30	1,5	60	65	Викришування
130		Поковка, сталь 40Х	5	25	1,5	60	87	Знос
131		Поковка, сталь 40Х	20	-	1,5	60	45	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
132	Валок рабочий	Поковка, сталь 50ХН	20	-	1,5	60	55	Викришування
133		Поковка, сталь 50ХН	25	-	1,5	60	67	Знос
134		Поковка, сталь 50ХН	-	30	1,5	60	25	Знос
135		Поковка, сталь 50ХН	5	15	1,5	60	75	Знос
136		Поковка, сталь 50ХН	25	-	1,5	60	90	Знос
137		Поковка, сталь 50ХН	25	-	1,5	60	94	Викришування
138		Поковка, сталь 50ХН	10	-	1,5	60	110	Знос
139		Поковка, сталь 50ХН	10	-	1,5	60	80	Викришування
140		Поковка, сталь 50ХН	15	-	1,5	60	75	Знос
141	Шпиндель	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	38	1,0	60	82	Знос
142		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	38	-	1,6	60	40.6	Знос
143		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	-	1,0	60	79	Викришування
144		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	-	1,0	25	82	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
145	Гильза	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	15	40	1,6	40,6	79	Викришування
146		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	20	-	1,6	61	65	Знос
147		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	20	-	1,6	65	33.5	Знос
148		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	-	1,0	60	55	Знос
149		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	15	1,0	60	78	Знос
150		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	15	40	1,6	49	59.4	Руйнація
151		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	8	-	1,0	25	50	Знос
152	Гильза	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	30	-	1,8	60	48	Знос
153		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	-	1,8	55	225	Знос
154		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	-	1,6	55	34	Руйнація

1	2	3	4	5	6	7	8	9
155	Шпindelь	Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	-	35	1,6	65	24	Знос
156		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	35	-	1,0	65	45	Руйнація
157		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	35	-	1,0	65	44	Руйнація
158		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	10	40	1,0	65	80	Знос
159		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	10	40	1,0	65	18	Знос
160		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	-	15	1,0	70	2	Знос
161		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	10	35	1,0	65	40	Знос
162		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	24	-	1,0	65	119	Знос
163		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	28	-	1,0	65	74	Знос
164		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	-	28	1	60	42	Знос
165		Поковка, сталь 40X, HB 230, корка	30	-	1,0	60	5	Руйнація

1	2	3	4	5	6	7	8	9
166	Шпindelь	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	-	1,6	60	240	Знос
167		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	40	1,0	60	148	Знос
168		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	-	1,0	60	65	Знос
169		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	-	1,0	60	61	Знос
170		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	-	1,0	60	52	Викришування
171		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	30	1,0	60	82	Знос
172		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	30	1,6	60	63	Знос
173		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	30	1,6	65	84	Знос
174		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	-	20	1,8	65	22	Викришування
175		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	30	1,8	60	58	Викришування

1	2	3	4	5	6	7	8	9
176	Гильза	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	20	-	1,6	55	34	Знос
177		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	30	-	1,6	55	56	Знос
178		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	30	-	1,6	55	39	Знос
179		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	30	-	1,6	55	35	Знос
180		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	20	1,6	55	32	Руйнація
181		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	26	-	1,6	55	79	Знос
182		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	-	1,6	55	81	Знос
183		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	-	1,6	55	256	Знос
184		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	15	-	1,6	60	79	Знос
185		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	15	-	1,6	60	94	Викришування
186		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	25	-	1,6	60	48	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
187	Гильза	Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	30	1,6	50	57	Руйнація
188		Поковка, сталь 40Х, НВ 230, корка	10	30	1,6	50	62	Руйнація
189	Шпindelь	Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	-	30	1,6	50	65	Знос
190		Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	35	-	1,6	50	70	Знос
191		Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	25	-	1,6	50	80	Знос
192		Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	25	-	1,6	50	75	Знос
193		Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	20	-	1,6	50	35	Знос
194		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	-	30	1,6	50	40	Викришування
195		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	35	-	1,0	50	55	Знос
196		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	35	-	1,0	64	65	Знос
197	Шпindelь	Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	15	-	1,6	60	95	Знос
198		Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	-	40	1,6	50	30	Руйнація

1	2	3	4	5	6	7	8	9
199	Шпindelь	Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	-	35	1,0	64	30	Викришуванн я
200		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	10	35	1,0	64	15	Руйнація
201		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	-	15	1,0	64	195	Знос
202		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	10	35	1,0	64	45	Руйнація
203		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	24	-	1,0	60	35	Викришуванн я
204		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	20	-	1,0	60	95	Знос
205		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	25	-	1,0	60	70	Знос
206		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	10	-	1,6	70	75	Знос
207		Поковка, сталь 40Л, НВ 220, корка	-	40	1,0	60	35	Викришуванн я
208		Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	-	25	1,6	60	45	Викришуванн я
209		Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	30	-	1,6	60	68	Знос
210		Поковка, сталь 40Х, НВ 220, корка	30	-	1,6	50	75	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
211	Поршень	Поковка, сталь 34ХН3М НВ 240	30	-	1,5	50	90	Руйнація
212		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 241	15	-	2,5	60	120	Знос
213		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 242	20	-	1,5	60	95	Руйнація
214		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 243	10	25	1,25	60	40	Знос
215		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 244	18	-	1,5	60	120	Знос
216		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 245	-	30	1,25	60	45	Знос
217		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 246	-	20	1,25	60	30	Знос
218		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 247	-	25	1,25	60	65	Руйнація
219		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 248	20	-	1,5	60	75	Знос
220		Поковка, сталь 34ХН3М НВ 249	20	-	1,5	60	90	Знос
221	Валок	Поковка, Сталь 9ХФ, корка	-	30	1,5	60	5	Руйнація
222		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	30	35	1,5	60	45	Викришування
223		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	25	35	1,22	60	50	Знос

1	2	3	4	5	6	7	8	9
224	Валок	Поковка, Сталь 9ХФ, корка	30	-	1,5	60	60	Знос
225		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	20	-	1,5	60	40	Знос
226		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	15	30	1,5	60	70	Руйнація
227		Поковка, Сталь 9ХФ, корка	10	-	1,5	60	100	Знос
228	Валок- рабочий	Поковка, сталь 50ХН	20	35	1,6	55	23	Знос
229		Поковка, сталь 50ХН	30	-	1,5	55	90	Знос
230		Поковка, сталь 50ХН	25	30	1,5	55	94	Знос
231		Поковка, сталь 50ХН	25	30	1,5	55	46	Руйнація
232	Валок опорний	Поковка, сталь 40Х	5	25	1,5	55	35	Знос
233		Поковка, сталь 40Х	5	25	1,5	55	60	Руйнація
234		Поковка, сталь 40Х	25	-	1,5	55	75	Знос
235		Поковка, сталь 40Х	25	-	1,5	55	40	Викришування
236		Поковка, сталь 40Х	25	-	1,5	55	80	Знос
237		Поковка, сталь 40Х	-	25	1,5	60	10	Викришування
238		Поковка, сталь 40Х	25	30	1,5	60	48	Знос
239		Поковка, сталь 40Х	20	28	1,5	60	37	Знос
240		Поковка, сталь 40Х	25	30	1,5	60	65	Викришування
241		Поковка, сталь 40Х	5	25	1,5	60	87	Знос

ДОДАТОК Б

Таблиця 1 – Імовірнісні експлуатаційні характеристики ступінчастого збірного різця (дві робочі вершини)

Об'єм вибірки N = 45		Коефіцієнт варіації статистич. W = 0,62	Параметри закону розподілу r = 2	Разом критерій $\chi^2 = 2,387$			abs max = 0,045
Середнє значення 49,53	Середнє квадратичне G = 30,89			Кількість ступенів свободи k=I-r-1=3	Рівень значимості >0,050	Xtab ² 7,810	z = 0,301
Теоретичний розподіл Вейбулла- Гнеденко	Ексцес = 0,562 Асиметрія = 0,905 Параметри: a = 54,67 b = 1,64			Довірчий інтервал для T 42,873 <= T <= 58,015		Довірча ймовірність P(z)= 1,0000	

Таблиця 2 – Імовірнісні експлуатаційні характеристики ступінчастого збірного різця (одна робоча вершина)

Об'єм вибірки N = 26		Коефіцієнт варіації статистич. W = 0,35	Параметри закону розподілу r = 2	Разом критерій $\chi^2 = 6,78$			abs max = 0,116
Середнє значення 61,538	Середнє квадратичне G = 21,95			Кількість ступенів свободи k=I-r-1=3	Рівень значимості >0,050	Xtab ² 7,810	z = 0,59
Теоретичний розподіл Вейбулла- Гнеденко	Ексцес = -1,344 Асиметрія = 0,050 Параметри: a = 67,92 b = 3,08			Довірчий інтервал для T 54,7 <= T <= 67,7		Довірча ймовірність P(z)= 0,87	

ДОДАТОК В



УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер ПАО

«Новокраматорский
машиностроительный завод»

А. И. Волошин

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что в условиях ПАТ «НКМЗ» прошли апробацию и внедрены результаты научно-исследовательской работы Д01-2015 «Повышение энергоэффективности процессов механообработки на основе многокритериальной оптимизации параметров технологических систем тяжелого машиностроения»:

1. Программная реализация оптимизационной модели технологической системы тяжелых станков карусельной и фрезерно-расточной группы для пакета программного Simulink. Модели позволяют выполнять оптимизацию параметров системы и режимов резания по критерию максимальной производительности при минимуме мощности резания.

2. Проведены эксплуатационные испытания разработанного сборного отрезного резца для тяжелых токарных станков (разработчики конструкции В.С. Гузенко, С.Л. Миранцов, Е.В. Мироненко – Донбасская государственная машиностроительная академия, В.В. Трунов – ПАТ «НКМЗ»). На конструкцию сборного резца получено положительное решение экспертизы на заявку u201600087 от 14/04/2016.

Применение конструкций сборных отрезных резцов с клиновым креплением режущих элементов, для обработки крупногабаритных деталей на тяжелых токарных и карусельных станках позволяет:

- сократить номенклатуру отрезных резцов за счет применения взаимозаменяемых режущих вставок;
- уменьшить вспомогательное время замены инструмента на 25%;
- увеличить подачу в среднем на 12,5% за счет увеличения жесткости и виброустойчивости конструкции инструмента.

Предполагаемый годовой экономический эффект от рекомендаций, полученных в результате оптимизации параметров технологических систем тяжелых станков карусельной и фрезерно-расточной группы и режимов резания с использованием предложенных моделей, а также внедрения конструкций сборных отрезных резцов с клиновым креплением режущих элементов одного типоразмера составит 42,5 тыс. грн.

От ДНУ

д.т.н., проф. Мироненко Е.В.

Аспирант Гузенко Д.Е.

От ПАО НКМЗ

Начальник лаборатории резания

к.т.н. Носков В.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ:



ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Гузенка Дениса Євгеновича

«Підвищення ефективності процесу чорнової обробки деталей ступінчастими
різцями на важких токарних верстатах»

Дисертаційна робота Д.Є. Гузенка узагальнює дослідження автора теоретичних і прикладних проблем збірного різального інструмента для чорнової обробки деталей на важких верстатах з метою зменшення його витрати, підвищення ринкового потенціалу і конкурентоспроможності підприємства.

Розроблені конструкції ступінчастих збірних різців підвищують продуктивність чорнової обробки деталей з великими перетинами зрізу на важких токарних верстатах за рахунок вдосконаленої схеми різання, яка має тільки одну робочу вершину різця при ступінчастому розміщенню різальних пластин.

Впровадження вищенаведених конструкцій дозволяє знизити кількість поломок збірного різального інструменту і підвищити стійкість різців.

Очікуваний економічний ефект від впровадження удосконалених конструкцій збірного ступінчастого різального інструменту для чорнової обробки, що запропонував дисертант, складає 32700 грн.

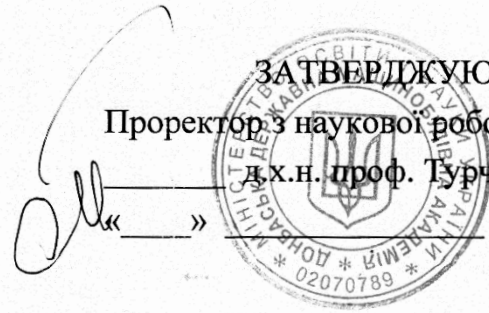
Основні положення і науково-прикладні результати дисертаційної роботи, доведені до рівня конкретних практичних рекомендацій, використовуються як методичне забезпечення при розробці технологічних процесів у ПрАТ КЗВВ.

Досвід ПрАТ КЗВВ свідчить, що науково-методичні розробки і практичні рішення по підвищенні ефективності експлуатації інструмента на важких верстатах, представлені в дисертації Д.Є. Гузенка, корисні для заводів машинобудівної галузі.

Заступник директора
з технічних питань

О.Г. Палашек

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
д.х.н. проф. Турчанін М.А.
«___» _____ 20__ р.



АКТ

використання в навчальному процесі результатів розробок дисертаційної роботи «Підвищення ефективності процесу чорнкової обробки деталей ступінчастими різцями на важких токарних верстатах», виконаної асистентом кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструменти і технології» Донбаської державної машинобудівної академії Гузенко Денисом Євгеновичем.

Я, що нижче підписався, д.т.н. професор кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструменти і технології» ДДМА Васильченко Яна Васильєва, склала даний акт про використання в навчальному процесі в курсах «Різальний інструмент та інструментальне забезпечення автоматизованого виробництва», «Моделювання та оптимізація технологічних систем», «Сучасні фізичні та математичні методи досліджень» результатів дисертаційної роботи «Підвищення ефективності процесу чорнкової обробки деталей ступінчастими різцями на важких токарних верстатах», а саме:

- в курсі «Різальний інструмент та інструментальне забезпечення автоматизованого виробництва» – основи проектування та раціональної експлуатації інструментів на важких токарних верстатах, підвищення надійності конструкцій інструментів для важких верстатів;
- в курсі «Моделювання та оптимізація технологічних систем» – методи розрахунку оптимальних регламентів та керуючих параметрів експлуатації інструментів
- в курсі «Сучасні фізичні та математичні методи досліджень» – методи дослідження динамічних процесів обробки деталей;

Отримані результати також використані у ряді магістерських робіт.

Завідувач кафедрою

«Комп'ютеризовані мехатронні системи,
інструменти і технології» д.т.н. проф.



Я.В. Васильченко