

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Сталінський Дмитро Віталійович

УДК 621.923.2.001.2 (0433)

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ
ПРОЦЕСІВ, ОБЛАДНАННЯ ТА ІНСТРУМЕНТУ
ОБДИРНОГО ШЛІФУВАННЯ

Спеціальність: 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати
та інструменти

Автореферат дисертації на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українському державному науково-дослідному інституті металів (УкрНДІМет), Українському державному науково-технічному центрі «Енергосталь» (УкрДНТЦ «Енергосталь») Міністерства промислової політики України і на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Сизий Юрій Анатолійович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Новосьолов Юрій Костянтинівич,
Севастопольський національний технічний університет, завідувач кафедри технології машинобудування;

доктор технічних наук, професор
Узунян Матвій Данилович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка;

доктор технічних наук, професор
Кальченко Віталій Іванович,
Чернігівський державний технологічний університет, завідувач кафедри металорізальних верстатів і систем.

Провідна установа – Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків.

Захист відбудеться « 23 » березня 2006 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « 22 » лютого 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О. А

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Обдирне шліфування (абразивне зачищення) – один з найбільш ефективних, а тому поширених способів обробки поверхні якісної металопродукції – злитків, блюмсів, слябів, заготовок, готового прокату – в металургійному виробництві, де від ефективності виконання операцій обдирного шліфування залежить не тільки її якість, але часом і сама можливість випуску. Широко використовується обдирне шліфування в машинобудуванні, енергетиці, в добувних галузях, на транспорті при обробці поковок, виливків, зварних металоконструкцій. Обсяги обдирного шліфування неухильно зростатимуть у міру неминучого нарощування чорною металургією України виробництва прокату з легованих, нержавіючих, інструментальних та інших якісних сталей, гостро необхідного для розвитку пріоритетних металоспоживаючих галузей. Тим часом, парк обдирно-шліфувального обладнання переважно складається з морально застарілих і фізично зношених верстатів, підприємства не мають ефективних технологічних регламентів абразивного зачищення, вітчизняний абразивно-обдирний інструмент значно відстає від світового технічного рівня. Як наслідок – неможливість забезпечення необхідної якості і конкурентоспроможності металопродукції, технологічно невиправдані енергетичні витрати, втрати металу та інструменту, погіршення екологічної обстановки на виробництві.

Гострота проблеми характеризується ще й тим, що обдирне шліфування, яке є одним із найменш вивчених видів механічної обробки металу, має безліч специфічних особливостей, що перешкоджає безпосередньому використанню відомих положень і підходів при розробці ефективних технічних рішень.

Отже, проведення теоретичних і експериментальних досліджень і формування на їх базі наукових основ створення високоефективних процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування, що вирішує, у поєднанні з розробкою і освоєнням конкретних об'єктів нової техніки, важливу науково-виробничу проблему забезпечення ефективного і якісного зачищення металопродукції відповідального призначення, є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання досліджень і розробок за темою цієї роботи здійснювалося відповідно до: координаційних планів Українського державного науково-дослідного інституту металів (УкрНДІМет) і Українського державного науково-технічного центру з технології та обладнання, обробки металу, захисту навколишнього середовища та використання вторинних ресурсів для металургії та машинобудування «Енергосталь» (УкрДНТЦ «Енергосталь») за науково-технічним напрямком «Оброблення металопродукції», затверджених Міністерством промислової політики України; Міжгалузевої програми «Забезпечення потреби Мінчормету СРСР у спеціальному серійному та нових видах обладнання для оброблення металопродукції», 1988 р.; Галузевої програми Мінчормету СРСР «Забезпечення підприємств чорної металургії обладнанням та

інструментом для оброблення напівпродукту, сортового, листового прокату, труб і металовиробів», 1990 р.; «Національної програми розвитку гірничо-металургійного комплексу України», 1999 р.; «Національної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу України до 2010 року», 2001 р.

Мета і задачі досліджень. Мета роботи – забезпечення ефективного і якісного абразивного зачищення металопродукції шляхом розробки і промислової реалізації наукових основ створення високоефективних процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- на основі аналізу комплексу «процес – обладнання – інструмент» обдирного шліфування сформувані достатні для створення високоефективних технічних рішень уявлення про область досліджень і розробок;

- розробити основи теорії обдирного шліфування, сформувані принципи керування тепловим і напружено-деформованим станом металу на основі дослідження фізичних процесів, що відбуваються в ньому при обробці;

- розробити теоретичні основи динаміки обдирно-шліфувальних верстатів, виробити методологію оптимізації їх динамічних систем;

- розробити основи компонентики обдирно-шліфувальних верстатів, методологію аналізу компонувань, їх структурної оптимізації і синтезу, а також підходи до оцінки, діагностики та забезпечення при проектуванні технологічної надійності верстатів;

- розробити принципи побудови видової класифікації обдирно-шліфувальних верстатів – типажу, що системно визначає технічні рішення обладнання;

- розробити стратегію і практичні шляхи забезпечення високих різальних властивостей і стійкості абразивно-обдирного інструменту;

- сформувані прикладні основи оптимального проектування процесів, обладнання та інструменту на базі побудови комплексних і локальних САПР, вироблення практичних рекомендацій розробнику;

- розробити, здійснити промислове освоєння, проаналізувати техніко-економічну ефективність нових процесів обдирного шліфування, обладнання та інструменту, виробництв з його випуску, забезпечивши при цьому практичну реалізацію всіх основних результатів досліджень і розробок.

Об'єкт дослідження – процеси, обладнання та інструмент обдирного шліфування.

Предмет дослідження – теорія процесів обдирного шліфування, фізичні явища в металі при обробці, динаміка, компонентика і надійність обдирно-шліфувальних верстатів, технологічні процеси виготовлення, склади і конструкції абразивно-обдирного інструменту, ефективність та якість зачищення металопродукції.

Методи дослідження. В основу досліджень, формування наукових основ і практичних методів створення високоефективних процесів, обладнання та інструменту покладений єдиний концептуальний методологічний принцип, що полягає в обумовленості внутрішньої, параметричної побудови процесів, обладнання та інструменту їх зовнішньою, прикладною характеристикою, об'єктом застосування, призначенням оброблюваної металопродукції, комплексом виробничих вимог. Теоретичні дослідження теплових процесів і напружено-деформованого стану металу при обдирному шліфуванні виконувалися з використанням аналітичних і чисельних методів розв'язання крайових задач математичної фізики, теорії пружності та пластичності, узагальненої теорії міцності. Теоретичні дослідження динаміки верстатів здійснювалися шляхом фізичного і математичного моделювання динамічної системи обдирно-шліфувального верстата та її основних підсистем. Експериментальні дослідження виконувалися з використанням методів рентгеноструктурного і металографічного аналізу, кореляційного аналізу, багатокритеріальної векторної оптимізації. Дослідження проводилися на технологічному обладнанні в умовах металургійних підприємств і на спеціально створеному лабораторному обладнанні та оснащенні з використанням серійного і дослідного абразивно-обдирного інструменту.

У роботі розроблені і використані спеціальні методики теоретичних та експериментальних досліджень, методичні підходи до вишукування високоефективних технічних рішень. Прикладні основи створення процесів, обладнання та інструменту методично об'єднані в розроблені комплексні і локальні САПР, інформаційним і методологічним забезпеченням яких є наукові і практичні результати досліджень і розробок.

Достовірність теоретичних положень роботи підтверджена результатами експериментальних досліджень і практикою промислового використання виконаних розробок.

Наукова новизна отриманих результатів. Розроблено наукові основи створення високоефективних процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування, що містять:

– запропоновану концепцію оптимального проектування процесів обдирного шліфування; створені основи теорії обдирного шліфування, що включають математичний опис фізичних процесів, які відбуваються в металі при обробці, принципи управління тепловим і напружено-деформованим станом металу, реалізація яких забезпечує проведення процесу обробки при регламентованих значеннях максимальної температури поверхні, щільності теплового потоку в метал, розподілу температур, тимчасових і залишкових напруг у поверхневому шарі металу;

– встановлені на базі розроблених основ теорії обдирного шліфування та експериментально підтверджені закономірності, що визначають характер впливу режимних параметрів на фізичні процеси в металі, а також на показники ефективності і якості обробки; розроблені методологію

оцінки ефективності процесів обробки і стратегію технологічного забезпечення високоефективного та якісного зачищення металопродукції, яка передбачає оптимізацію параметрів процесу на базі запропонованого комплексного критерію ефективності і визначення режимів обробки, що запобігають утворенню в поверхневому шарі металу технологічної спадковості, неприпустимої для металопродукції конкретного призначення;

– створену відповідно до запропонованої концепції оптимального проектування обдирно-шліфувального обладнання, на базі розроблених теоретичних основ динаміки обдирно-шліфувальних верстатів, і реалізовану методологію визначення оптимальних параметрів їх динамічних систем, яка включає виявлення і математичний опис джерел коливань, що справляють домінуючий вплив на динамічну якість верстата; установлений на основі математичного моделювання з використанням частотних методів теорії автоматичного управління і дослідження динамічної системи обдирно-шліфувального верстата характер впливу його компоновочних і конструктивних параметрів, а також технологічних факторів процесу обробки на динамічну стійкість верстата, критерієм оцінки якої прийнята стабільність глибини обробки;

– розроблену і реалізовану стратегію забезпечення динамічної якості обдирно-шліфувальних верстатів при їхньому проектуванні, яка полягає в запобіганні резонансу в зміні глибини шліфування при збудженні коливань радіальним биттям абразивно-обдирного круга і забезпеченні значень амплітуди зміни глибини шліфування, що не перевищують величину, яка допускається технологічним регламентом процесу зачищення, при збудженні коливань кривизною оброблюваної заготовки;

– запропоновану методологічну основу побудови видової класифікації обдирно-шліфувальних верстатів – типажу, яка полягає в наданні структурі типажу відповідності структурі виробництва металопродукції, оброблюваної обдирним шліфуванням, що забезпечує обумовленість технологічного, компоновочного і конструктивного рішень верстата, характеристики його модульної та динамічної систем, експлуатаційних можливостей, місцем верстата в типажі, а отже – технологічним призначенням і характером процесу обдирного шліфування;

– основи структурної компонетики обдирно-шліфувального обладнання, методологічну базу яких склали запропоновані і реалізовані підходи до аналізу компонувань і синтезу оптимальних компоновочних рішень обдирно-шліфувальних верстатів, визначення шляхів їхнього конструктивного удосконалення; встановлені закономірності, що визначають системний і прогнозований характер трансформації компоновочного рішення при зміні місця розташування моделі верстата у видовій класифікації обдирно-шліфувальних верстатів – типажі;

– створену на базі запропонованих принципів підходу до формування аспектів технологічної надійності обдирно-шліфувальних верстатів методологію оцінки, діагностики і забезпечення технологічної надійності при проектуванні; встановлені закономірності, що відбивають взаємозв'язок технологічної надійності обдирно-шліфувального верстата з показниками ефективності його експлуатації, можливість підвищення технологічної надійності шляхом оптимізації компоновочного і динамічного рішень верстата, регламентації на оптимальному рівні технологічних параметрів процесу обдирного шліфування;

– розроблену та реалізовану стратегію забезпечення високих різальних властивостей і стійкості абразивно-обдирного інструменту, яка базується на виявлених закономірностях, що визначають вплив запропонованих комплексних наповнювачів абразивних мас, розроблених принципів поліпшення якості їх сировинних компонентів і адгезії абразивних зерен зі зв'язкою, управління реакцією поліконденсації феноло-формальдегідного зв'язуючого на експлуатаційні характеристики абразивно-обдирного інструменту, технологічність і екологічні аспекти його виготовлення.

Практичне значення отриманих результатів. Результати всіх складових комплексу виконаних теоретичних і експериментальних досліджень реалізовані в запропонованих у роботі нових технічних рішеннях і розроблених об'єктах нової техніки. Це дало змогу сформулювати і реалізувати на практиці прикладну складову наукових основ створення високоефективних процесів обдирного шліфування, обдирно-шліфувального обладнання та абразивно-обдирного інструменту будь-якого технологічного призначення без обмежень за марочним, профільним і розмірним сортаментами оброблюваної металопродукції.

Розроблено комплекс оптимізованих за показниками ефективності і якості обробки процесів обдирного шліфування заготовок і готового прокату широкого розмірного сортаменту з якісних конструкційних, інструментальних, легованих, нержавіючих, жароміцних та інших сталей і сплавів на серійному шліфувальному обладнанні різних моделей. Промислове впровадження технологічних процесів на провідних металургійних підприємствах СНД – «Криворіжсталь», «Електросталь», металургійному заводі ім. А. К. Серова, «Серп і Молот», «Іжсталь» – забезпечило без додаткових капітальних витрат підвищення продуктивності обробки, в середньому, на 20÷25%, скорочення втрат металу і витрати абразивно-обдирного інструменту на 15÷20%, високу якість обробки.

Розроблено ряд, що не мають аналогів за технічними рішеннями і експлуатаційними можливостями, базових моделей високопродуктивних і економічних обдирно-шліфувальних верстатів, технічні рішення яких реалізують високоефективні процеси обдирного шліфування та оптимізовані за критеріями динамічної якості, компонетики та технологічної надійності, що

забезпечило в результаті впровадження верстатів на металургійних підприємствах «Серп і Молот», «Іжсталь» та інших підвищення продуктивності зачищення, в середньому, в 2,5÷3 рази, скорочення на 20÷40% втрат металу й абразивно-обдирного інструменту.

З використанням результатів виконаних досліджень розроблено і затверджено новий типаж обдирно-шліфувальних верстатів.

На базі виконаних у роботі досліджень розроблено комплекс складів, технологічних процесів виготовлення і конструкцій абразивно-обдирного інструменту, покладений в основу створення спеціалізованих виробництв і освоєння серійного випуску інструменту, експлуатаційні характеристики якого, як показала практика промислової експлуатації інструменту на Кременчуцькому сталеливарному заводі, «Азовмаші», НКМЗ, «Турбоатомі», «Дніпротяжмаш» та на інших підприємствах, в 2,5÷3 рази перевершують аналогічні показники продукції, що випускається в СНД, і відповідають за своїм технічним рівнем інструменту провідних світових виробників при суттєво меншій вартості.

Результати виконаних досліджень покладені в основу розроблених алгоритмів, інформаційного і методологічного забезпечення систем автоматизованого проектування процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування.

Сумарний фактичний економічний ефект від упровадження об'єктів нової техніки, розроблених у роботі, становить 2,36 млн руб. (у цінах 1991 р.) і 376,9 тис. грн. Річний дохід від функціонування спеціалізованого абразивного виробництва становить понад 2,7 млн грн.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем самостійно сформульована наукова ідея роботи, запропоновані напрямки її розробки та реалізації. Самостійно виконано весь комплекс теоретичних і експериментальних досліджень на основі особисто розроблених методологічних підходів, математичних і фізичних моделей, понять і визначень, розроблені процеси обдирного шліфування, технологічні завдання на проектування, компонування, динамічні рішення та ескізні проекти описаного в роботі обдирно-шліфувального обладнання, типаж обдирно-шліфувальних верстатів, технологічні процеси виготовлення, склади і конструкції абразивно-обдирного інструменту, технологічне завдання на проектування і ескізний проект спеціалізованого виробництва з його випуску, алгоритми, інформаційне і методологічне забезпечення описаних у роботі комплексних і локальних систем автоматизованого проектування процесів, обладнання та інструменту. Виконання робочої конструкторської і проектної документації за описаними в роботі розробками здійснювалося під керівництвом здобувача. Здобувач очолював і брав особисту участь у виконанні комплексу робіт із промислового освоєння розробок.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались на Всесоюзній науково-технічній конференції «Інтенсифікація технологічних процесів механічної обробки»

(Ленінград, 1986 р.), на Всесоюзному науково-технічному семінарі «Прогресивні види оброблення прокату і заготовок» (Електросталь, 1988 р.), на Другій всесоюзній науково-технічній нараді «Застосування ЕОМ у наукових дослідженнях і розробках» (Дніпропетровськ, 1989 р.), на Республіканській науково-технічній конференції «Надтверді матеріали та інструменти в ресурсозберігаючих технологіях» (Київ, 1989 р.), на Всесоюзній науково-технічній конференції «Моделювання фізико-хімічних систем і технологічних процесів у металургії» (Новокузнецьк, 1991 р.), на Міжнародному науково-технічному семінарі «Інтерпартнер» (Харків, 1994 р.), на галузевих координаційних нарадах Міністерства чорної металургії СРСР і Міністерства промислової політики України з науково-технічного напрямку «Оброблення металопродукції» (Москва, Харків, Київ, Донецьк, Дніпропетровськ, 1986–1995 рр.), на Міжнародній науково-технічній конференції «Використання відходів виробництва» (Рівне, 1999 р.), на Четвертому міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків (Львів, 1999 р.). Повністю дисертація доповідалась на XIV Міжнародному науково-технічному семінарі «Високі технології: тенденції розвитку», Інтерпартнер – 2005 (Алушта, 2005 р.) і об'єднаному семінарі кафедр «Технологія машинобудування і металорізальні верстати» та «Інтегровані технології машинобудування» НТУ «ХП» (Харків, 2005 р.).

Публікації. За матеріалами роботи опубліковано 85 друкованих робіт, у тому числі 21 робота – у фахових виданнях ВАК України, 3 монографії, 11 статей у наукових журналах, 16 статей у збірниках наукових робіт, 18 – у збірниках доповідей і тез науково-технічних конференцій, 37 авторських свідоцтв і патентів.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків і 13 додатків. Повний обсяг дисертації становить 513 сторінок, з яких 166 ілюстрацій на 92 сторінках, 30 таблиць на 33 сторінках, 15 таблиць за текстом, 13 додатків на 43 сторінках, список використаних літературних джерел з 330 найменувань на 31 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми роботи і розв'язуваної науково-технічної проблеми, сформульовані мета і задачі досліджень, визначена наукова новизна роботи та практичне значення отриманих результатів.

У розділі 1 здійснено аналіз комплексу «процес – обладнання – інструмент» обдирного шліфування як об'єкта наукових досліджень, конструкторських і технологічних розробок. Дано загальну характеристику сфери досліджень і розробок, зазначено, що більшість операцій обдирного шліфування призначена для видалення дефектного шару металу, на відміну від надання

поверхні деталі заданих властивостей або конфігурації в інших процесах механічної обробки, чим пояснюється застосування принципово інших схем обробки, набагато вища енергетика процесів, використання обладнання та інструменту, що радикально відрізняються за своїми характеристиками і конструкціями.

Абразивну обробку можна по праву вважати одним із найбільш вивчених процесів. Їй присвячені фундаментальні дослідження Є. М. Маслова, М. Ф. Семка, А. І. Грабченка, Г. Б. Лур'є, Ю. К. Новосьолова, В. І. Островського, Г. В. Бокучави, М. Д. Узуняна, О. В. Якімова, О. М. Филімонова, В. О. Сипайлова й інших учених. Створення наукових основ проектування металорізальних верстатів – одна з найбільш пророблених галузей інженерної науки, де, аналогічно процесам, пріоритет належить визнаній у світі вітчизняній науковій школі, яка представлена науковими працями Д. М. Решетова, В. О. Кудінова, Ю. В. Тимофєєва, О. І. Авер'янова, В. В. Камінської, О. С. Пронікова, В. І. Кальченка, О. І. Левіна, М. Я. Орликова та багатьох інших учених. Однак, як показав аналіз, через наявність безлічі принципових відмінностей обдирно-шліфувальних верстатів і процесів, які вони реалізують, від іншого обладнання та процесів металообробки унеможлиблюється безпосереднє використання результатів численних наукових праць при проектуванні процесів і верстатів обдирного шліфування. Аналогічним чином може бути охарактеризований комплекс питань стосовно абразивно-обдирного інструменту.

Поряд з науково-технічною і патентною літературою, передовим виробничим досвідом, у роботі узагальнено, систематизовано та проаналізовано дані про металопродукцію, що піддається обдирному шліфуванню, про її поверхневі дефекти, вимоги стандартів до якості поверхні металопродукції, оснащеність металургійних підприємств обдирно-шліфувальним обладнанням. Проаналізовано негативні наслідки для цього обладнання, до яких призвів спад виробництва високоякісної металопродукції, що обумовив моральне і фізичне спрацювання обладнання, термін роботи більшої частини якого (60%) перевищив 25-річний віковий рубіж. Дано оцінку обмеженим сортаментним можливостям наявного на підприємствах обдирно-шліфувального обладнання, 75% якого розраховано на обробку круглого прокату діаметром 70?250 мм і квадратного – зі стороною 80?200 мм.

Проаналізовано особливості процесів обдирного шліфування як виду механічної обробки металу, які характеризують, зокрема, енергетичні аспекти обробки – знімання металу в одиницю часу, глибину обробки, питомі витрати енергії, що перевершують в $10^2\text{?}10^4$ разів аналогічні показники операцій чистового шліфування, а також особливості, обумовлені застосуванням пружних схем обробки, при яких забезпечується відстеження зоною шліфування скривленої оброблюваної поверхні заготовки, на відміну від жорстких схем інших процесів механічної обробки, коли траєкторія руху інструменту визначає поверхню заготовки, яка формується.

Рис. 1. Схеми процесів обробки:

a – чистове шліфування;

б – обдирне шліфування

Схеми процесів обробки показані на рис. 1.

Аналіз обдирно-шліфувальних верстатів як виду металооброблювального обладнання (на рис. 2 наведений один із розроблених у роботі верстатів) показав пріоритетне значення оптимізації компоновочних рішень, забезпечення динамічної стійкості і технологічної надійності.

У результаті аналізу наукових і виробничих даних про абразивно-обдирний інструмент встановлено, що наукові основи створення високостійкого та продуктивного інструменту повинні охоплювати оптимізацію складу, технологічних режимів виготовлення, поліпшення якості сировинних компонентів, вишукування ефективних конструкцій інструментів, розробку спеціалізованих виробництв з випуску високоякісного інструменту.

Рис. 2. Обдирно-шліфувальний верстат мод. 33 Кр45-130В-60

Сформульовано основні напрямки досліджень і розробок, спрямованих на досягнення мети роботи.

У розділі 2 наведені розроблені теоретичні основи обдирного шліфування і методологія оптимізації процесів обробки. Запропоновано концепцію оптимального проектування процесів, під яким ми розуміємо розробку режимних параметрів процесу при оптимальному рівні його основних показників за заданими критеріями. Основний методологічний принцип, реалізований також у підходах до оптимального проектування обладнання та інструменту, полягає в обумовленості внутрішньої, параметричної будови процесу обдирного шліфування його

зовнішньою, прикладною характеристикою, сферою застосування, призначенням оброблюваної металопродукції, комплексом виробничих вимог.

Побудова системи оптимального проектування процесів вимагає наявності їх достовірного теоретичного опису, виявлення і врахування закономірностей, що характеризують фізичні процеси в металі, наявності принципів керування ними. У результаті виконаних досліджень теплових процесів у металі при обдирному шліфуванні (рис. 3 і 4), встановлено, що управління тепловим станом металу полягає в забезпеченні можливості призначення параметрів процесу обробки на рівні, що відповідає регламентованим значенням максимальної температури поверхні, характеру розподілу температур у поверхневому шарі, щільності теплового потоку в метал та інших показників. Виявлено і проаналізовано важливі для оптимального проектування процесів закономірності.

Рис. 3. Залежність щільності теплового потоку від глибини шліфування

Рис. 4. Вплив зусилля притиску абразивного круга і швидкості осьової подачі прокату на зміну температури

Тепловий стан металу і дія сил різання визначають при обдирному шліфуванні рівень тимчасових і залишкових напруг, які найчастіше призводять до тріщиноутворення, як у процесі зачищення, так і при подальшій обробці заготовок.

Побудова універсальної моделі напружено-деформованого стану металу при обдирному шліфуванні здійснено на прикладі обробки шестигранного прокату на розробленій у роботі лінії мод. 33Ш30-60С-60. Схема обробки, а також дії сил різання і градієнта температур показані на рисунках 5 і 6. Задача є пружно-пластичною. Як припущення в ній прийняте просте навантаження, при побудові рішення використані положення теорії пластичної течії.

Диференційні рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \tilde{\sigma}_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial \tilde{\sigma}_2} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial \tilde{\sigma}_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial \tilde{\sigma}_2} = 0; \quad (1)$$

Геометричні рівняння Коші, що зв'язують приріст деформацій і переміщень:

$$d\varepsilon_{11} = \frac{\partial U_1}{\partial x_1}; \quad d\varepsilon_{22} = \frac{\partial U_2}{\partial \tilde{\sigma}_2}; \quad d\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial U_1}{\partial \tilde{\sigma}_1} + \frac{\partial U_2}{\partial \tilde{\sigma}_2}. \quad (2)$$

Рис. 5. Схема обробки шестигранного прокату на обдирно-шліфувальній лінії мод.33Ш30-60С-60:

P_y, P_z, P_x – сили різання: зусилля притиску круга (нормальна складова), тангенціальна й осьова складові; S, t – ширина і глибина обробки

Рис. 6. Схема дії сил різання і градієнта температур при обробці шестигранного прокату

Фізичні рівняння стану записані у тому вигляді, в якому вони надалі використовуватимуться в алгоритмах методу скінченних елементів (фрагмент сіткової області показаний на рис. 6):

$$\begin{aligned}
 d\sigma_{11} &= 2\mu \left(d\varepsilon_{11} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} d\varepsilon_{kk} \right) - \frac{3}{2} \frac{S_{11} S_{ke}}{\sigma_u^2 (1+H/3\mu)} d\varepsilon_{ke} - \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\nu}; \\
 d\sigma_{22} &= 2\mu \left(d\varepsilon_{22} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} d\varepsilon_{kk} \right) - \frac{3}{2} \frac{S_{22} S_{ke}}{\sigma_u^2 (1+H/3\mu)} d\varepsilon_{ke} - \frac{\alpha E \Delta T}{1-2\nu}; \\
 d\sigma_{12} &= 2\mu d\varepsilon_{12} - \frac{3}{2} \frac{S_{12} S_{ke}}{(1+H/3\mu)} d\varepsilon_{ke}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Інтенсивність напруг, девіатор напруг:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} \cdot S_{ij}}; \quad S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}; \tag{4}$$

Нормальна напруга:

$$\sigma = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}), \tag{5}$$

де: $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, i, j$ – компоненти тензорів напруг і деформацій; H – тангенс кута нахилу кривої $\sigma_u = \sigma_u(\varepsilon_u^P)$; ε_u – інтенсивність пластичних деформацій; S_{ij} – компоненти девіатора напруг; σ_u – інтенсивність напруг; δ_{ij} – символ Кронекера, U_i – компоненти переміщень.

Відповідно до принципу мінімуму повної потенційної енергії системи, розв'язання задачі

зводиться до відшукування мінімуму функціонала повної потенційної енергії, заданого у вигляді функції компоненти вектора переміщень:

$$I(dU) = \int_{\Omega} (d\sigma_{11}d\varepsilon_{11} + d\sigma_{22}d\varepsilon_{22} + d\sigma_{12}d\tau_{12}) dx dy - \int_{\partial\Omega} (dx^{(1)}dU_1 + dx^{(2)}dU_2) \cdot t dS, \quad (6)$$

де: t – товщина досліджуваного елемента поверхневого шару металу.

Відповідно до загального підходу, прийнятому у варіаційних методах числення, виконується дискретизація досліджуваної області, яку розбивають на скінченне число елементів і вводять припущення про лінійну зміну переміщень усередині кожного елемента. Вираз для повної потенційної енергії системи в матричній формі:

$$I(\delta) = \sum_{e=1}^M \left[\int_{\Omega} \frac{1}{2} \{\delta\}^T [B^e]^T [D^e]^T [B^e] \{\delta\} \cdot t dx dy - \int_{\Omega} \{\delta\}^T [B^e]^T [D^e]^T \cdot \{\varepsilon_o\} t dx dy - \int_{\partial\Omega} \{\delta\}^T [N^e]^T \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \cdot t dS, \quad (7)$$

де: $\{\varepsilon_o\} = \alpha \Delta T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$ – вектор початкової деформації, викликаної тепловим впливом; $[B]$, $[N]$, $[D]$ –

матриці похідних функцій форми, функцій форми і пружної деформації, dS – диференціал дуги.

Мінімум функції відшукується диференціюванням виразу за вектором $\{\delta\}$ вузлових переміщень і прирівнюванням результату до нуля. Матриця пружної деформації визначається співвідношенням:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Для пластичної області:

$$[D^P] = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} - \frac{S_1^2}{S} & \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} - \frac{S_1 S_2}{S} & \frac{S_1 S_6}{S} \\ \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} - \frac{S_1 S_2}{S} & \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} - \frac{S_2^2}{S} & \frac{S_2 S_6}{S} \\ \frac{S_1 S_6}{S} & \frac{S_2 S_6}{S} & \frac{E}{2(1-\nu)} - \frac{S_6^2}{S} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Розрахунок залишкових напруг здійснювався з використанням теореми про розвантаження, в умовах характерного для обдирного шліфування пружного-пластичного стану:

$$\sigma_{зал.} = \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^* = \sigma_{ij}^H - \sigma_{ij}^P, \quad (10)$$

де: σ_{ij} – напруги, отримані при розв’язанні пружно-пластичної задачі; σ_{ij}^* – напруга σ_{ij} в умовах повного навантаження; σ_{ij}^H , σ_{ij}^P – пружно-пластичні напруги при навантаженні та розвантаженні.

Установлений домінуючий вплив градієнту температур у поверхневому шарі на рівень напруг. З метою зниження напруг, градієнт підлягає мінімізації з використанням розробленої методології управління тепловими процесами в металі при обробці. Виявлена доцільність призначення найвищих швидкостей подачі заготовки і обертання круга, розбиття припуску, що видаляється, на кілька проходів.

Виконано дослідження з оптимізації процесів обдирного шліфування за показниками ефективності. Метою оптимізації є пошук для конкретних виробничих умов сполучення керованих режимних факторів, яке забезпечує найвищу продуктивність обробки при мінімальних втратах металу, інструменту, енергії, інших ресурсів, або забезпечення на заданому рівні одного з перелічених або комплексного параметра.

Критеріями можуть бути знімання металу і знос інструменту в одиницю часу ($?M_{мет}$, $?M_{кр}$), коефіцієнт шліфування ($K_{ш} = (?M_{мет} / ?M_{кр})$), глибина обробки і сили різання (t , P_y , P_z), питома собівартість обробки ($C_{шт} = C / ?M_{мет}$). Дослідження показали неефективність побудови інтегральних критеріїв через принципові розходження у фізичному змісті окремих показників процесу, що входять до них. Запропонований найбільш інформативний для умов обдирного шліфування комплексний критерій – коефіцієнт ефективності шліфування, що визначається співвідношеннями:

$$K_E = n \cdot ?, \text{ кг}\cdot\text{год.}, \quad n = \frac{M \cdot \Delta M_{кр}}{\Delta M_{мет}}, \quad \tau = \frac{M}{\Delta M_{мет}}, \quad (11)$$

де: n – маса абразивного інструменту, що витрачається на видалення заданої маси металу (M , кг), кг; $?$ – час, витрачений на видалення заданої маси металу. Критерій, графічно проілюстрований на рис. 7, характеризує витрату інструменту, знімання металу і витрачений на це час. Оптимальним режимам відповідає мінімум K_E . Запропоновано підхід до визначення оптимальних значень режимних параметрів процесу обробки (зусилля притиску круга P_y і швидкості осьової подачі заготовки $V_{o.n.}$) на базі використання розробленого критерію:

$$P_y^{opt} = P_{y2} - \frac{(P_{y3} - P_{y1}) \cdot (K_{\hat{A}3} - \hat{E}_{\hat{A}1})}{4(\hat{E}_{\hat{A}1} + \hat{E}_{\hat{A}3} - 2\hat{E}_{\hat{A}2})}; \quad (12)$$

$$V_{o.n}^{opt} = V_{o.n.2} - \frac{(V_{o.n.3} - V_{o.n.1}) \cdot (K'_{\dot{A}3} - \hat{E}'_{\dot{A}1})}{4(\hat{E}'_{\dot{A}1} + \hat{E}'_{\dot{A}3} - 2\hat{E}'_{\dot{A}2})}, \quad (13)$$

де: P_{y1}, P_{y2}, P_{y3} ; $V_{o.n.1}, V_{o.n.2}, V_{o.n.3}$ – мінімальне, середнє і максимальне значення P_y і $V_{o.n.}$ у межах параметричних границь області оптимізації процесу; K_{E1}, K_{E2}, K_{E3} – значення K_E при P_{y1}, P_{y2}, P_{y3} і $V_{o.n.2}$; K_{E1}, K_{E2}, K_{E3} – значення K_E при P_y^{opt} і $V_{o.n.1}, V_{o.n.2}, V_{o.n.3}$. Установлено кореляцію комплексних критеріїв – K_E і C_{num} .

Відповідно до розробленої концепції оптимального проектування процесів обдирного шліфування, другою, не менш важливою для багатьох оброблюваних матеріалів його складовою, є визначення режимів обробки, що забезпечують задану якість поверхні металу. Ключовим моментом запропонованої стратегії є регламентація показників якості поверхні, виходячи з подальшого використання обробленого металу, шляхом запобігання утворенню неприпустимої технологічної спадковості.

Дослідження фізичних процесів у контакті абразивного круга з металом показали, що поверхневий шар металу, який був підданий складному деформаційному й тепловому впливу при обдирному шліфуванні, має неоднорідну структуру, як показано на рис. 8. Шар I глибиною $10^{-2} \approx 1,0$ мм – деформований метал з викривленою кристалічною решіткою, із знеуглецьованими ділянками, мікронадривами. Шар II глибиною 0,5–8,0 мм, як правило, текстурований у напрямку сили різання. Шар III – метал з початковою структурою. Дослідження показали відсутність взаємозв'язку структури та властивостей обробленого металу із припікоутворенням на його поверхні.

Рис. 7. Залежність коефіцієнта ефективності шліфування від зусилля притиску круга і швидкості осьової подачі металу
Швидкість осьової подачі заготовки: 1–3 м/хв.; 2–10 м/хв.; 3–16 м/хв.; 4–20 м/хв.

Рис. 8. Структура поверхневого шару прокату зі сталі 40X
x400

Установлена доцільність поділу сортаменту сталей, оброблюваних обдирним шліфуванням, на три групи. Перша група: метал, що йде на холодну обробку тиском. Неприпустимій технологічній спадковості – поверхневому загартуванню, утворенню знеуглецьованого шару

тощо – запобігає управлінню тепловим станом металу при обробці. Для металу другої групи, призначеного до подальшої механічної обробки, критерієм якості є максимальна температура поверхні. Ця температура не повинна перевищувати температури початку різкого зниження деформаційної здатності металу – область I на рис. 9. Третя група: метал, що йде на подальшу гарячу обробку тиском. Неприпустимо тріщиноутворення в процесі зачищення або при подальшому нагріванні. Регламентації підлягають тимчасові і залишкові напруги.

а)

б)

Рис. 9. Номограми залежності максимальної температури поверхні від режимів обдирного шліфування: а) – сталь ХВГ; б) – сталь Р6М5. I – область якісної обробки

Розроблено методологію визначення режимів високоякісної обробки, ілюстровану залежностями:

$$V_{o.n} \geq 2,5 \sqrt{\frac{\beta \cdot P_y^{1,2}}{T_\partial}}, \quad (14)$$

де: $\beta [(\text{кН} \cdot 10^3)^{-1,2} \cdot (\text{м/хв.})^{2,5} \cdot ^\circ\text{C}] = \{$ $(3,5?4,0) \cdot 10^3$ для кругів ПП 500 ?600 мм;
 $(6,0?9,0) \cdot 10^3$ для кругів ПП 250?400 мм,

T_∂ – температура початку різкого зниження деформаційної здатності оброблюваної сталі при нагріванні.

Для процесів, що передбачають чорнові та чистові проходи:

$$V_{o.n.чист.} \geq 2,5 \sqrt{\left(\frac{P_{y \text{ чорн.}}}{P_{y \text{ чист.}}}\right)^{1,2} \frac{T_{A_{C1}}}{T_\partial}} \cdot V_{o.n.чорн.} \quad (15)$$

Таким чином, запропонована стратегія забезпечення якості обробки при обдирному шліфуванні полягає у визначенні на основі аналізу теплового і напружено-деформованого стану металу режимних параметрів процесу, що не призводять до утворення технологічної спадковості, неприпустимої для металопродукції конкретного призначення.

У розділі 3 викладені результати теоретичних і експериментальних досліджень динаміки обдирно-шліфувальних верстатів, наведена розроблена методологія оптимізації їх динамічних систем, що є складовою частиною оптимального проектування обдирно-шліфувального обладнання. Розроблені загальні положення динаміки обдирно-шліфувальних верстатів (ОШВ) і підхід до оптимального проектування їх динамічних систем (ДС), що базується на досягненні необхідного рівня динамічної якості верстата в умовах забезпечення його компоновочним і конструктивним рішеннями стійкості ДС при дотриманні регламентованих технологією оптимальних показників процесу обробки. Виходячи з технологічних задач, що вирішуються при обдирному шліфуванні, як критерій динамічної стійкості прийнята стабільність глибини обробки.

На основі аналізу компоновочних рішень основних видів ОШВ виявлені основні підсистеми їх ДС, встановлено функціональний взаємозв'язок між ними, що належить до джерел коливань (фізичних процесів) і до зміни, як наслідок, режимів обробки, як це схематично показано на рис. 10.

На відміну від канонічних підходів, з урахуванням специфіки ОШВ, виявлені і описані джерела коливань, що справляють домінуючий вплив на динамічну якість верстата. Для низькочастотних коливань це скривлення оброблюваного прокату, для високочастотних – сумарне діяння радіального биття круга і відцентрової сили його невривноважених мас.

Рис. 10. Підсистеми ДС ОШВ і їхній функціональний взаємозв'язок

Розроблена і математично інтерпретована універсальна фізична модель основної підсистеми: «інструмент–процес–прокат» (ІПП), що дає змогу аналізувати будь-який ОШВ у варіантах одно-, двох- і трьохмасової схем.

Математичні моделі пов'язують у придатні для аналізу залежності динамічні параметри: сили, маси, жорсткості, коефіцієнти демпфірування, переміщення, амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) в умовах впливу на ДС перерахованих вище основних джерел коливань ОШВ.

Математична інтерпретація двохмасової фізичної моделі, наведеної на рис. 11, має вигляд:

– при діянні кривизни прокату $h(t)$:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + C_1 x_1 - C_2 x_2 = 0, \\ m_2 (\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1) + b_2 (\dot{x}_2 + \dot{x}_1) + C_2 x_2 = m_2 \ddot{h} + b_2 \dot{h} + F(t); \end{cases} \quad (16)$$

a) б) в)

Рис. 11. Двохмасова модель ДС ОШВ:

a) – відсутність контакту; б), в) – статична, динамічна рівновага

– при діянні трьох основних джерел коливань: кривизни прокату $h(t)$, круга h_k і його дисбалансу $F(t)$:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + C_1 x_1 - C_2 x_2 = 0, \\ m_2 (\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1) + b_2 (\dot{x}_2 + \dot{x}_1) + C_2 x_2 = m_2 \ddot{h} + b_2 \dot{h} + m_2 \ddot{h}_k + b_2 \dot{h}_k + F(t). \end{cases} \quad (17)$$

Передаточні функції за узагальненою координатою x_2 (відхилення глибини шліфування від регламентованого значення) при кожному із діянь – h , h_k і F :

$$\begin{aligned} W_h(s) &= \frac{x_2(s)}{H(s)} = \frac{1}{\det A} (m_1 s^2 + b_1 s + C_1)(m_2 s^2 + b_2 s) = \\ &= \frac{(m_1 s^2 + b_1 s + C_1)(m_2 s^2 + b_2 s)}{(m_2 s^2 + b_2 s + C_1)(m_2 s^2 + b_2 s + C_2) + C_2 (m_2 s^2 + b_2 s)}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$W_{h_k}(s) = \frac{x_2(s)}{H_k(s)} = \frac{(m_1 s^2 + b_1 s + C_1)(m_2 s^2 + b_2 s)}{(m_1 s^2 + b_1 s + C_1)(m_2 s^2 + b_2 s + C_2) + C_2 (m_2 s^2 + b_2 s)}; \quad (19)$$

$$W_F(s) = \frac{x_2(s)}{F(s)} = \frac{m_1 s^2 + b_1 s + C_1}{(m_1 s^2 + b_1 s + C_1)(m_2 s^2 + b_2 s + C_2) + C_2(m_2 s^2 + b_2 s)}, \quad (20)$$

де: $C_1, C_2; b_1, b_2$ – жорсткості і коефіцієнти демпфірування в кінематичних зв'язках; x_1, x_2 – переміщення прокату, зміни глибини шліфування.

АЧХ одномасової моделі системи ПП при діянні кривизни прокату $h(t)$ і радіального биття круга h_k :

$$A_h(\omega) = \frac{x}{h} = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} = \frac{\sqrt{(m^2 \omega^4 - m \omega^2 C + b^2 \omega^2)^2 + C^2 b^2 \omega^2}}{(C - m \omega^2)^2 + b^2 \omega^2}. \quad (21)$$

Теоретичне визначення жорсткості системи «прокат–опори» (ПО), що також є підсистемою ДС ОШВ, являє собою вирішення задачі про пружну деформацію багатоопорних, статично невизначених балок. Проаналізовані всі можливі схеми розташування прокату в механізмі подачі заготовок ОШВ. Теоретична залежність для визначення жорсткості системи ПО при найменш жорсткому, консольному розташуванні прокату має вигляд:

$$C_{ПО} = \left[\frac{a^2(a+b)}{3EI} + \frac{1}{j_B} \frac{(a+b)^2 + a^2 j_B/j_A}{b^2} \right]^{-1}, \quad (22)$$

де: I – момент інерції плоского перерізу прокату; j_A, j_B – жорсткості опор A і B .

Рис. 12. Вплив маси шліфувальної бабки на АЧХ Рис.13. Вплив жорсткості системи ПО на АЧХ

У результаті досліджень встановлено, що частота збудження коливань нерівностями прокату завжди менша найнижчої частоти власних коливань систем ПП і ПО, що гарантує відсутність резонансу, який можливий при шліфуванні з обертанням прокату, а також – на частоті обертання круга. Виявлено і проаналізовано характер впливу на динамічну якість верстата його узагальнених конструктивних параметрів. Наприклад, як впливає із графіка, наведеного на рис. 12, для ОШВ, які реалізують обробку з обертанням заготовки, доцільна мінімізація маси шліфувальної бабки, що знижує амплітуду коливань. Графік, наведений на рис. 13, ілюструє доцільність конструктивного підвищення жорсткості системи ПО.

Досліджено динаміку основних приводів ОШВ: приводу головного руху (ПГР) – обертання круга і приводу притиску абразивного круга (ППАК).

Входом у підсистему ПГР ОШВ є тангенціальна складова сили різання (див. рис. 10). Коливання цієї сили при діянні на систему ППП нерівностей прокату, круга і його дисбалансу призводять до зміни навантаження на ПГР, а отже – до збуджування крутильних коливань елементів приводу, тобто – до коливань швидкості різання (див. рис. 10) і, як результат, – до змін глибини обробки. Передаточна функція динамічної системи ПГР, що є необхідною для розрахунку резонансних частот, визначається виразом:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{M_o(s)} = \frac{-\frac{1}{I_p} s - \frac{1}{T_E I_p}}{s^2 + \frac{1}{T_E s} + \frac{2M_K P_{II}}{I_p}}. \quad (23)$$

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ):

$$W(j\omega) = \frac{\frac{2M_K P_{II}}{T_E I_p}}{\left[\frac{2M_K P_{II} - \omega^2 I_p}{I_p} \right]^2 + \frac{\omega^2}{T_E^2}} + \frac{\left\{ \frac{\omega}{T_E^2 I_p} - \frac{\omega}{I_p} \left[\frac{2M_K P_{II}}{I_p} - \omega^2 \right] \right\}}{\left(\frac{2M_K P_{II} - \omega^2 I_p}{I_p} \right)^2 + \frac{\omega^2}{T_E^2}} j. \quad (24)$$

Амплітудно-частотна характеристика:

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}. \quad (25)$$

Передаточна функція спрощеної моделі:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{M_o(s)} = -\frac{K_{cm}}{T + 1}, \quad (26)$$

де: M_o – момент опору, прикладений до ротору двигуна; K_{cm} – статичний коефіцієнт підсилення; $T=1/\omega_{cnp}$ – постійна часу, що характеризує інерційність електродвигуна; ω_{cnp} – спряжувана частота, $T_E=1/\omega_o$ – електромагнітна постійна часу двигуна; ω_o – частота електромережі; M_K – критичний момент двигуна; P_n – число пар полюсів; I_p – момент інерції ротору; ω – кругова частота ротору; $P(\omega)$, $Q(\omega)$ – дійсна й уявна частини рівняння (24).

Установлена неможливість появи резонансу в результаті низькочастотного діяння нерівностей прокату. Дослідження показали доцільність використання при оптимізації динамічних характеристик ПГР одномасової моделі. При цьому, розрахунок оптимальних параметрів ДС

ОШВ, призначених для обробки з максимальним рівнем зусиль притиску круга 1,0÷1,6 кН і маючих потужність електродвигуна ПГР 7÷13,5 кВт (верстати для зачищення мілкосортного прокату), може виконуватися з достатнім ступенем точності без урахування впливу динамічних властивостей ПГР на динамічну якість ОШВ.

Найбільш складним елементом типового рішення електрогідравлічного ППАК є клапан тиску, математична динамічна модель якого (27) являє собою систему диференціальних рівнянь (витрат масла в гідросистемі і рівноваги золотника), лінеаризовану відносно точки статичної рівноваги:

$$\begin{cases} Q_k = \frac{V_o}{B} \Delta P + f_3 \Delta \dot{x}_3 + k_{Qx3} \Delta x_3 + k_{QP1} \Delta P_1 \\ \frac{m}{C} \Delta \ddot{x}_3 + \frac{f_3^2}{Ck_{\partial p3}} \Delta \dot{x}_3 + \Delta x_3 = \frac{f_3}{C} \Delta P_1 \end{cases}, \quad (27)$$

де: Q_k – витрата масла; V_o – об'єм масла в трубопроводах; B – модуль об'ємної пружності масла; f_3 – площа торців золотника;

$$k_{Qx3} = \mu_3 \pi d_3 \sqrt{P_{10}/\rho}; k_{QP1} = \mu_3 \pi d_3 \sqrt{1/2 \cdot P_{10} \rho}; 1/k_{\partial p3} = \frac{128\mu}{\pi} \sum_{i=1}^4 \frac{l_i}{d_i^4};$$

μ_3 – коефіцієнт витрати золотника; d_3 , P_{10} , x_3 – діаметр, тиск і зсув золотника; μ – динамічна в'язкість масла; l_i , d_i – довжина та діаметр перерізу i -го каналу; m , c – маса і жорсткість пружини золотника.

Після перетворень Лапласа:

$$\Delta P_1(s) = \frac{1/k_{QP1}}{T_l s + 1} [Q_{kl}(s) - k_{Qx3} (T_{yk} s + 1) \Delta x_3(s)], \quad (28)$$

$$\Delta x_3(s) = \frac{k_{x3p} \Delta P_1(s)}{T_k^2 s^2 + 2\xi_{kl} T_{kl} s + 1}, \quad (29)$$

де: $T_l = \frac{V_o}{eK_{QP1}}$; $T_{yk} = f_3/k_{Qx3}$ – постійна часу напірної лінії керуючого каналу; $k_{x3p} = f_3/C$ – коефіцієнт

передачі; $T_{kl} = (m/c)^{1/2}$ – постійна часу; ξ_{kl} – коефіцієнт відносного демпфірування каналу.

У результаті моделювання решти елементів приводу, дослідження впливу його параметрів на ДС ОШВ виявлена домінуюча в динамічному відношенні конструктивна характеристика ППАК – сила тертя в гідроциліндрі, що при проектуванні приводу підлягає мінімізації.

Викладення результатів досліджень динаміки ОШВ показало, що стратегія визначення оптимальних параметрів їх динамічних систем полягає в рішенні двох основних задач: запобігання резонансу в зміні глибини шліфування при збуджуванні коливань радіальним биттям круга і його дисбалансом; забезпечення значень амплітуди зміни глибини шліфування, менше допустимої технологічним регламентом процесу величини при збуджуванні коливань кривизною оброблюваного прокату.

Аналіз досліджень динаміки ОШВ завершується запропонованим підходом до розрахунку і аналізу критерію динамічної стійкості і вибору оптимальних параметрів динамічної системи верстата.

Розділ 4 охоплює дослідження компонетики і надійності ОШВ, створення методологічної бази їх оптимального проектування. Виходячи з названого вище основного методологічного принципу підходу до оптимального проектування процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування, запропонована концепція оптимального проектування ОШВ. В основу концепції покладене висунуте наукове положення, згідно з яким при забезпеченні відповідності структури видової класифікації ОШВ – типу структури виробництва металопродукції, оброблюваної обдирним шліфуванням, базовою галуззю застосування ОШВ – чорною металургією, технологічне, компоновочне і конструктивне рішення ОШВ, характеристика його модульної і динамічної систем, експлуатаційні можливості визначаються місцем верстата в типажі, а отже – технологічним призначенням і характеристикою процесу, що реалізує верстат.

Виконано аналіз тенденцій удосконалювання технічних рішень ОШВ, систематизовані і проаналізовані їхні технологічні та конструктивні особливості, у тому числі верстатів, розроблених у цій роботі, як виду обладнання металургійного призначення. Дослідження дали підставу зробити висновок про виправданість прийнятого в роботі комплексу підходів до створення технологічних, динамічних і компоновочних рішень верстатів нових поколінь. Приклад компоновочного рішення ОШВ для суцільного зачищення шестигранного прокату діаметром 30÷60 мм показаний на рис. 14.

На підставі виконаних досліджень запропоновано новий напрямок створення ОШВ – верстата, що поєднують компоновочні і конструктивні властивості спеціалізованого обладнання з технологічними можливостями обладнання універсального.

Рис. 14. Обдирно-шліфувальна лінія 33Ш30-60С-60:

1, 2 – механізми завантаження й вивантаження заготовок; 3 – шліфувальні комплекси;
4 – кантователі; 5 – механізми осьової подачі заготовок; 6 – пульт керування

Розроблений згідно з зазначеним вище методологічним підходом і затверджений новий типаж ОШВ ґрунтується на вироблених визначеннях і формулюваннях.

Виконано комплекс досліджень і розроблено основи компонентики ОШВ. Через технологічну та конструктивну специфіку, компонування ОШВ являє собою взаємопов'язаний, незмінний, у цілому, комплекс механізмів, які, у найбільш прийнятному для практики варіанті, є модулями. Розроблені загальні положення, які характеризують модульну систему і компоновочне рішення верстата, зокрема, структурна формула компонування ОШВ визначена як формалізована характеристика компонування, що ілюструє склад і структуру модульної системи верстата, придатна для кількісної оцінки якості компонування та його синтезу.

Виходячи з основного положення концепції оптимального проектування верстатів, компоновочне рішення ОШВ – його внутрішня будова – визначається місцем у видовій класифікації верстатів – типажі, тобто технологічним призначенням – зовнішньою характеристикою. Тому загальний вигляд структурної формули компонування запропонований таким, що складається з двох тотожних частин, одна із яких відбиває технологічне призначення верстата – інформаційна частина, а друга – внутрішню будову – характеристична частина:

$$\begin{array}{c}
 \text{Характеристична частина} \\
 \hline
 \text{конструктивний модуль кореня} \quad \text{технологічний модуль кореня} \\
 \hline
 \text{Інформаційна частина} \\
 \hline
 \text{33Кр45-130В-60(Б)} = (A+B) \left\{ \left| \frac{N_1}{O_1} + \dots + \frac{N_i}{O_i} \right| + \left| \frac{C_1}{U_1} + \dots + \frac{C_i}{U_i} \right| \right\} (L+M), \quad (30) \\
 \hline
 \text{Атрибути} \quad \text{Корінь} \quad \text{Атрибути}
 \end{array}$$

де: $N_1 \dots N_i$; $C_1 \dots C_i$ – компоненти кореня; $O_1 \dots O_i$; $U_1 \dots U_i$ – визначники компонентів.

До основних розділів інформації, яку повинна нести структурна формула, належить технологічне призначення верстата, у тому числі: базовий вид зачищення і сортамент оброблюваної металопродукції, а також характеристика його модульної системи, компоновочного рішення і технологічних можливостей, зокрема: види шліфувального комплексу та механізму подачі заготовок, кількість, види та характеристики основних технологічних модулів компонування, види керованих технологічних параметрів і багато іншого. Сформовано перелік параметрів, які складають конструктивні і технологічні компоненти кореня формули і їх визначники.

Розроблено методологію побудови структурних формул компоновань, яка включає формулювання, позначення і правила відбиття у формулі атрибутів характеристичної частини, компонентів модулів кореня і їх визначників. Структурна формула компоновання обдирно-шліфувальної лінії мод. 33Ш30-60С-60, показаної на рис. 14, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 33Ш30-60С-60 = & \left(\frac{ШК}{КП} + \frac{МПЗ}{Рольг + Тр - Ап} \right) \left\{ \left| \frac{5N_{TM}}{ШК + МПр + МПЗ + Кант + Пр^E} + \right. \right. & (31) \\
 & + \frac{4N_{yTM}}{ШК + МПр + Кант + Пр^E} + \frac{4N_{uTM}}{ШК + МПр + МПЗ + Кант} + 6N_{CM} + 6N_{шк} + \frac{N_{nd}}{МПр} \left. \right| + \\
 & \left. \left| \frac{8C_{yTn}}{3P_y + 2V_{o.n.} + t + \alpha_K + V_K} + \frac{4C_{Ed}}{Вріз + Ос + Кант + Рев} + 0C_{nn} + \frac{3C_{ТО}}{Спл + Виб + Світл} \right| \right\} \\
 & (Мзав. + Мев.).
 \end{aligned}$$

З даної структурної формули випливає, зокрема, що компоновання містить п'ять технологічних модулів: шліфувальний комплекс (ШК), механізм притиску абразивного круга (МПр) та ін., механізм базування і переміщення заготовки має шість секцій, компонованням забезпечуються вісім керованих технологічних параметрів та інша інформація.

Розгляд структурної формули дає змогу фахівцеві, який здійснює аналіз відомого компоновання або проектування компоновання нового ОШВ, повністю уявити модульну структуру компоновання, вид і параметри функціональних технологічних модулів, взаємозв'язок між ними, технологічні можливості компоновання.

Розроблені принципи кількісної оцінки і аналізу якості компоновань базуються на використанні восьми запропонованих оцінювальних критеріїв, розрахункових залежностей і граничних значень, що характеризують основні показники компоновань: технологічні можливості, технологічну керованість, компактність, універсальність, технологічність і т. ін. Установлено кореляцію значень оцінювальних критеріїв з компоновочними рішеннями конкретних ОШВ.

Одним із важливих розділів структурної компонентики ОШВ є порівняльне дослідження компоновань верстатів, які вирішують близькі технологічні задачі, що дає змогу виявити позитивні сторони і недоліки компоновань – необхідний атрибут оптимального проектування ОШВ. Виконано та проаналізовано порівняння компоновань розроблених ОШВ із верстатами провідних виробників даного виду обладнання. Приклад порівняння проілюстрований на рис. 15. Установлена можливість виявлення переваг і недоліків компоновань, конструктивних шляхів їх удосконалювання, а також оцінки на стадії розробки верстата доцільності його подальшого конструювання, виходячи з досягнення запланованого техніко-економічного результату. Дослідження показали суттєву перевагу компоновань ОШВ, розроблених на основі виконаних досліджень у ході проведення цієї роботи.

а)

б)

Рис. 15. Порівняльне дослідження обдирно-шліфувальних верстатів:

а – розроблений у роботі ОШВ мод. 33Кр20-80С-90 ;

б – безцентрово-шліфувальний верстат мод. СЛ-501

1 – обдирний шліфувальний комплекс; 2 – стрічковий шліфувальний комплекс; 3 – маніпулятор; 4 – пульт керування

1 – станина; 2, 6 – механізми переміщення шліфувальних комплексів; 3, 5 – шліфувальні комплекси; 4 – оброблювана заготовка

$$\begin{aligned}
 33Кр20-80С-90 &= \left(\frac{ШК}{КП} + \frac{МПЗ}{М} \right) \left\{ \frac{7N_{TM}}{ШК_о + ШК_л + МПр_о + МПр_л + О_ц + МПЗ} + \frac{7N_{yTM}}{Пр^E + ШК_о + ШК_л + МПр_о + МПр_л + О_ц + МПЗ + Пр^E} + \frac{N_{иTM}}{О_ц} + 3N_{CM} + 2N_{шк} + \frac{N_{нд}^*}{МПр} \right\} \\
 &+ \left| \frac{9C_{yTn}}{3P_y + 2V_{o.n.} + V_k + t + H_{звинт} + \omega_{заг}} + \frac{5C_{Ed}}{Оберт + Ос + Гвинт + Врез + Рев} + 0C_{нп} + \frac{5C_{ТО}}{Спл + Виб + Світл + Фас + Чист} \right\} \\
 СЛ-501 &= \left(\frac{ШК}{Кар/Рам} + \frac{МПЗ}{Рольг} \right) \left\{ \frac{7N_{TM}}{ШК_о + ШК_б + МПер_о + МПер_б + МПЗ + О_ц + Пр^E} + \frac{6N_{yTM}}{ШК_о + ШК_б + МПер_о + МПер_б + О_ц + Пр^E} + 0N_{иTM} + 4N_{CM} + 2N_{шк} + \frac{N_{нд}^*}{МПер} \right\} \\
 &+ \left| \frac{5C_{yTn}}{2V_{o.n.} + t + H_{звинт} + \omega_{заг}} + \frac{C_{Ed}}{Гвинт} + C_{нп}^* + \frac{2C_{ТО}}{Спл + Чист} \right\}
 \end{aligned}$$

Оціночні критерії компонування:

Оціночні критерії компонування:

Критерії K_{T_6}	K_{TV}	K_{PK}	K_{KK}	K_{TK}	$K_{УК}$	$K_{кон.к}$	$K_{УНК}$
Кількісні значення	0,71	2,0	5,0	0,66	0,77	1,05,0	0,07
Резюме норм.	висок.	висок.	висок.	висок.	висок.	висок.	недост.

Критерії K_{T_6}	K_{TV}	K_{PK}	K_{KK}	K_{TK}	$K_{УК}$	$K_{кон.к}$	$K_{УНК}$
Кількісні значення	0,28	0,71	1,0	0,5	1,4	0,86	2,0
Резюме	обм.низьк.	низьк.	висок.	низьк.	висок.	норм.	низьк.

Порівняння компонувань ОШВ мод.33Кр20-80С-90 і мод.СЛ-501 за оціночними критеріями

$\delta k_i = \frac{K_i(33Кр20-80С-90)}{K_i(Сл-5d)}$	$\delta_{КТВ}$	$\delta_{КТУ}$	$\delta_{КРК}$	$\delta_{ККК}$	$1/\delta_{КТК}$	$\delta_{КУК}$	$\delta_{Ккон.к.}$	$\delta_{КУНК}$
	2,53	2,81	5,0	1,32	1,81	1,16	2,5	>>

Аналіз компонувань діючого обдирно-шліфувального обладнання з використанням запропонованого в роботі підходу забезпечує можливість оцінки доцільності застосування того або іншого верстата у створюваному або реконструйованому виробництві.

Розроблено методологію синтезу оптимального компоновочного рішення ОШВ, яка передбачає задання кількісних значень критеріїв оцінки компонувань, визначення за запропонованими розрахунковими залежностями значень компонентів кореня структурної формули, складання на основі знайдених значень структурної формули компонування, що з'явиться базою для його розробки конструктором.

Наведені і проаналізовані приклади практичної реалізації положень розроблених основ структурної компонетики ОШВ.

Виконано аналіз характеру взаємозв'язку параметрів компонувань ОШВ із їх типажною характеристикою. Установлена відповідність виду компонування місцю верстата в типажі, наявність системності в зміні структурних формул компонувань поряд із зміною моделей і модифікацій верстатів у межах кожної гама типажу, виявлено основні компоновочні закономірності цих змін, що повною мірою відповідає викладеному вище основному науковому положенню розробленої концепції оптимального проектування ОШВ.

Завершальним етапом розділу роботи, присвяченого формуванню наукових основ створення вискоєфективного обладнання обдирного шліфування, є дослідження його технологічної надійності і розробка підходу до її забезпечення при проектуванні.

Розроблено загальні положення і концепцію підходу. За основний об'єкт досліджень прийнятий запропонований у роботі показник: технологічна надійність, що трактується як властивість верстата зберігати в часі задані технологічні функції з дотриманням регламентованого кількісного рівня параметрів процесу. Установлено, що технологічна надійність ОШВ може бути вивчена і описана на основі кількісної інтерпретації та аналізу комплексу показників, які є похідними від основного поняття теорії надійності машин – відмови, сформульованої в роботі стосовно до ОШВ як втрачання верстатом працездатності на початковій стадії втрати надійності, починаючи з неможливості реалізації оптимізованого процесу на потрібному рівні.

До числа сформульованих у результаті досліджень наукових положень належать, зокрема, такі: оптимізація динамічної якості ОШВ забезпечує його високу технологічну надійність; підвищення компоновочної і конструктивної якості верстата збільшує імовірність його безвідмовної роботи; зростання кількості керованих технологічних параметрів підвищує технологічну надійність верстата.

Запропоновано підхід до діагностики технологічної надійності ОШВ, який дає змогу встановити факт експлуатації верстата в інтервалі технологічної надійності і статистично оцінити

запас надійності за регламентованою величиною відхилення від параметрів нормальної експлуатації.

Виявлена кореляція між показниками технологічної надійності та ефективності експлуатації ОШВ, встановлено домінуючий за ступенем впливу на технологічну надійність керований параметр процесу обробки – зусилля притиску круга, визначена необхідна величина стабільності даного параметра.

Сформульовані практичні рекомендації з реалізації оптимального рівня технологічної надійності ОШВ на стадії його проектування.

Розділ 5 роботи охоплює дослідження, розробку принципів і практичних шляхів забезпечення високих експлуатаційних характеристик абразивно-обдирного інструменту, оскільки наявність високостійкого, продуктивного й економічного інструменту є невід'ємним атрибутом реалізації високоефективних процесів та обладнання обдирного шліфування.

Виконані порівняльні дослідження побудови кращих світових зразків абразивно-обдирного інструменту на бакелітовій зв'язці, яка проілюстрована на рис. 16 відом структури абразивних зерен, показали техніко-економічну безперспективність наслідування досвіду провідних закордонних компаній, що вирішують проблему забезпечення високих експлуатаційних властивостей інструменту шляхом удосконалювання хімічних аспектів його виготовлення на базі взаємодії широкого спектра компонентів, за умови використання високоякісних сировинних матеріалів.

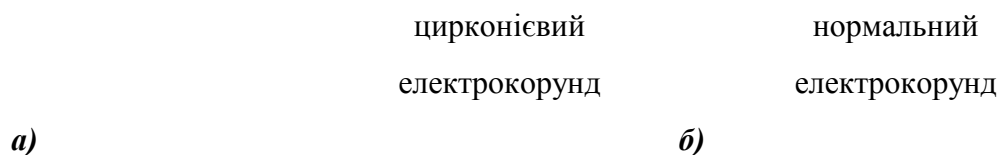


Рис. 16. Структура електрокорундових абразивних зерен в обдирних кругах:

a) – компанії «Norton»; *б)* – Косулинського абразивного заводу

На основі конкретизації відповідно до специфіки обдирного шліфування поняття якості інструменту – максимальна продуктивність і стійкість при мінімальній вартості – запропоновано і

реалізовано чотири взаємозв'язані напрямки досліджень і розробок, які склали в комплексі наукові і прикладні основи створення високоефективного абразивно-обдирного інструменту. Йдеться про оптимізацію складу інструменту: вишукування ефективних зв'язувальних наповнювачів, рецептур абразивних мас і альтернативних видів сировинних компонентів; про розробку на основі досліджень нових технологій виготовлення інструменту; про розробку його раціональних конструкцій; про створення на основі виконаних досліджень і розробок спеціалізованих виробництв з випуску високоякісного інструменту.

Установлено, що впливом на фізико-хімічні процеси у феноло-формальдегідному зв'язуючому при його поліконденсації шляхом уведення наповнювачів заданих властивостей забезпечується поліпшення експлуатаційних характеристик інструменту. Розроблено ряд ефективних і доступних у реалізації процесів, що забезпечують підвищення різальних властивостей інструменту в результаті введення до складу зв'язуючого запропонованих у роботі комплексних наповнювачів, у тому числі – базованих на застосуванні техногенних відходів: подрібнених вогнетривких матеріалів і скловолокна, металоабразивної стружки. Актуальність пошуку альтернативних абразивних матеріалів зумовила розробку новолачної смоли, доступної у виготовленні безпосередньо при виробництві інструменту, а також технологій отримання і застосування абразивних зерен, вилучених з відходів інструменту.

Поліпшення якості вітчизняних електрокорундових абразивних зерен, актуальність якого очевидна з розгляду рис. 16, забезпечують розроблені технологічні процеси, які передбачають заповнення пор у зернах сполуками на основі кремнійорганічних полімерів, що забезпечує підвищення в 1,2÷1,5 раза швидкості знімання металу і коефіцієнта шліфування.

У результаті виконаних досліджень розроблено комплекс технологічних процесів, які забезпечують поліпшення адгезії зерна зі зв'язкою механічним (підвищення рівномірності розподілу компонентів маси, обертання інструменту при термообробці) і хімічним (нові зволожувачі абразивних мас) шляхами, що підвищує в 1,3÷1,6 раза різальні властивості інструменту.

Дослідженнями встановлено, що управління реакцією поліконденсації феноло-формальдегідного зв'язуючого шляхом регламентованого силового впливу на абразивну масу в заданих температурних і часових інтервалах забезпечується зміцнення зв'язки, суттєве підвищення якості інструменту. Розроблені процеси та обладнання – промислова технологія силової бакелізації, технологія термообробки під тиском, які проілюстровані на рисунках 17 і 18, забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей інструменту порівняно з традиційними технологіями гарячого пресування у 2÷3 рази.

Виконані дослідження покладені в основу розроблених методів підвищення технологічності і поліпшення екологічних аспектів виготовлення інструменту.

Знайдені в результаті досліджень склади і запропоновані технологічні процеси виготовлення інструменту стали базою виконаної розробки нових конструкцій абразивних кругів для таких ефективних видів обробки, як самоосцилююче, переривчасте і сегментне шліфування, що забезпечило зростання експлуатаційних показників в 1,3÷1,7 раза.

Виконані дослідження та розробки покладені в основу створеного спеціалізованого абразивного виробництва продуктивністю 6000 т/рік абразивно-обдирного інструменту, промислова експлуатація якого свідчить про його відповідність рівню продукції провідних світових виробників.

:

Рис. 17. Установа силової бакелізації

1 – заготовка абразивного круга;
2 – термобіметалеві диски; 3 – вакуумна камера; 4 – пресформа

Рис. 18. Контейнер для термообробки

абразивного інструменту під тиском:
1 – термічний поршень; 2 – заготовки абразивних кругів

У розділі 6 викладена розробка прикладних основ оптимального проектування процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування.

Найбільш ефективним шляхом об'єднання результатів виконаних досліджень, сформульованих наукових положень, розроблених підходів у єдину методологію створення високоефективних процесів, обладнання та інструменту є побудова комплексних і локальних систем автоматизованого проектування (САПР). Другою, не менш важливою складовою прикладних основ є формування за результатами досліджень практичних рекомендацій розробнику.

Запропоновано загальні положення підходу до побудови САПР процесів, обладнання та інструменту, які сформульовані на основі адаптації канонічних положень теорії САПР до специфіки обдирного шліфування. У розділі описані розроблені алгоритми комплексних систем автоматизованого проектування процесів обдирного шліфування – САПР – ТПОШ(К) і обдирно-

шліфувального обладнання – САПР – к ОШВ, а також локальних САПР, що входять до складу комплексних систем: проектування процесів, оптимізованих за показниками ефективності – САПР – ТПОШ «Ефективність» і якості обробки – САПР – ТПОШ «Якість», проектування оптимальних норм вироблення і витрати абразивного інструменту – САПР – ТПОШ «Нормування», проектування абразивного інструменту – САПР – ТПОШ «Абразив»; проектування оптимального компонованого рішення верстата – САПР – к ОШВ «Компонування», проектування оптимальної динамічної системи – САПР – к ОШВ «Динаміка», розробки технологічного завдання на проектування верстата – САПР – к ОШВ «ТЛЗ».

Інформаційною і методологічною основою систем стали результати досліджень і розробки, виконані в цій роботі.

У розділі викладені також розроблені методи забезпечення динамічної якості ОШВ при проектуванні, що включають вибір оптимальних конструктивних параметрів і реалізацію на прикладі конкретного обладнання розроблених підходів і рішень при його проектуванні, наведені практичні рекомендації конструкторові ОШВ.

Розділ 7 присвячений створенню та аналізу техніко-економічних показників промислового впровадження високоефективних процесів обдирного шліфування, обдирно-шліфувального обладнання та абразивно-обдирного інструменту. В результаті комплексного підходу до розв'язання науково-технічної проблеми, що полягало в поєднанні наукових досліджень і інженерної реалізації їх результатів, усі складові теоретичних і експериментальних досліджень були практично втілені у виконаних в цій роботі розробках: нових технічних рішеннях і об'єктах нової техніки, що реалізують ці рішення. Більшість розробок впроваджена у виробництво і освоєна в промисловій експлуатації на найбільших металургійних комбінатах СНД – «Криворіжсталь», «Електросталь», Серовськом, «Іжсталь», «Серп і молот» та інших підприємствах.

Впровадження розроблених процесів ефективного і якісного обдирного шліфування металопродукції з легованих, конструкційних, інструментальних, жароміцних сталей і сплавів забезпечило без додаткових капітальних витрат підвищення продуктивності зачищення в середньому на 20÷25%, скорочення втрат металу і витрати абразивного інструменту на 15÷20%. Експлуатація підприємствами розроблених у цій роботі високопродуктивних і економічних ОШВ забезпечило підвищення продуктивності зачищення в 2,5÷3 рази, скорочення на 20÷40% втрат металу та інструменту. Рівень технічних рішень, реалізованих в абразивно-обдирному інструменті, що випускається серійно, як показала практика його промислового застосування, забезпечує підвищення в 2÷5 разів рівня експлуатаційних характеристик порівняно з кращими зразками

інструменту СНД і відповідність рівню продукції провідних світових виробників при суттєво меншій вартості.

Сумарний фактичний економічний ефект від впровадження об'єктів нової техніки, розроблених у ході виконання цієї роботи, становив 2,36 млн руб. (у цінах 1991 р.) і 376,9 тис. грн., потенційний економічний ефект становить 104,1 млн. руб. (у цінах 1991 р.). Сумарний фактичний річний дохід від функціонування спеціалізованого абразивного виробництва перевищує 2,7 млн грн.

ВИСНОВКИ

1. Виконаний при проведенні дисертаційної роботи комплекс теоретичних і прикладних досліджень, висунуті наукові положення, розроблені і реалізовані на промислових підприємствах об'єкти нової техніки та технології склали базу вперше сформованих наукових основ створення високоефективних процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування, що забезпечують рішення важливої і актуальної науково-технічної проблеми – ефективного і якісного зачищення металопродукції відповідального призначення, підвищення її конкурентноспроможності, зниження матеріальних витрат при виробництві, поліпшення екологічної обстановки на виробництві.

2. Запропоновано концепцію оптимального проектування процесів обдирного шліфування, створені основи теорії обдирного шліфування, які включають математичний опис фізичних процесів, що відбуваються в металі при обробці, принципи управління тепловим і напружено-деформованим станом металу, реалізація яких забезпечує ведення процесу обробки при регламентованих значеннях максимальної температури поверхні, щільності теплового потоку в метал, характеру розподілу температур, тимчасових і залишкових напруг у поверхневому шарі металу.

3. У результаті виконаних теоретичних і експериментальних досліджень процесів обдирного шліфування виявлені закономірності, що визначають характер впливу режимних параметрів на фізичні процеси в металі, а також на показники ефективності і якості обробки, розроблені методологія оцінки ефективності процесів обробки і стратегія технологічного забезпечення високоефективного і якісного зачищення металопродукції, яка передбачає оптимізацію параметрів процесу на базі запропонованого комплексного критерію ефективності і визначення режимів обробки, які запобігають утворенню в поверхневому шарі металу технологічної спадковості, неприпустимої для металопродукції конкретного призначення.

4. Відповідно до запропонованої концепції оптимального проектування обдирно-шліфувального обладнання, на базі розроблених теоретичних основ динаміки обдирно-

шліфувальних верстатів, створена й одержала практичну реалізацію методологія визначення оптимальних параметрів їх динамічних систем, яка включає виявлення і математичний опис джерел коливальних процесів, що справляють домінуючий вплив на динамічну якість верстата; установлений на основі математичного моделювання з використанням частотних методів теорії автоматичного управління і дослідження динамічної системи обдирно-шліфувального верстата характер впливу його компоновочних і конструктивних параметрів, а також технологічних факторів процесу обробки на динамічну стійкість верстата, критерієм оцінки якої прийнята стабільність глибини обробки.

5. Виконані теоретичні й експериментальні дослідження дали змогу визначити стратегію забезпечення динамічної якості обдирно-шліфувальних верстатів при їх проектуванні, яка полягає в запобіганні резонансу в зміні глибини шліфування при збуджуванні коливальних процесів радіальним биттям абразивно-обдирного круга і забезпеченні значень амплітуди зміни глибини шліфування, що не перевищують величину, яка допускається технологічним регламентом процесу зачищення, при збуджуванні коливальних процесів кривизною оброблюваної заготовки.

6. Виходячи з прийнятої концепції оптимального проектування, розроблено новий типаж обдирно-шліфувальних верстатів – їх видова, структурна класифікація. Методологічною основою типу є висунуте наукове положення, згідно з яким при забезпеченні відповідності структури типу структури виробництва металопродукції, оброблюваної обдирним шліфуванням, базовою галуззю застосування обдирно-шліфувальних верстатів – чорною металургією, технологічне, компоновочне і конструктивне рішення верстата, характеристика його модульної і динамічної систем, експлуатаційні можливості визначаються місцем верстата в типажі, а отже – технологічним призначенням і характеристикою процесу обдирного шліфування.

7. На базі розроблених теоретичних і прикладних основ структурної композиції обдирно-шліфувальних верстатів, принципів підходу до забезпечення надійності їх експлуатації запропонована і реалізована при створенні нових видів обладнання методологія аналізу компоновки і синтезу оптимальних компоновочних рішень обдирно-шліфувальних верстатів, оцінки, діагностики, прогнозування та забезпечення при проектуванні їх технологічної надійності.

8. У результаті виконаних досліджень визначені закономірності, що характеризують вплив конструктивних параметрів верстата і технологічних факторів процесу обробки на якість компоновочного рішення та рівень технологічної надійності обдирно-шліфувального верстата, установлений і проаналізований відповідаючий прийнятій концепції оптимального проектування системний взаємозв'язок параметрів компоновки верстата з його типажною характеристикою.

9. Розроблена на базі виконаних досліджень і реалізована при створенні спеціалізованого абразивного виробництва стратегія забезпечення високих різальних властивостей і стійкості

абразивно-обдирного інструменту, яка базується на виявлених закономірностях, що визначають вплив запропонованих комплексних наповнювачів абразивних мас, розроблених принципів поліпшення якості їх сировинних компонентів і адгезії абразивних зерен зі зв'язкою, управління реакцією поліконденсації феноло-формальдегідного зв'язуючого на експлуатаційні характеристики абразивно-обдирного інструменту, технологічність і екологічні аспекти його виготовлення.

10. Розроблено прикладні основи оптимального проектування процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування, що базуються на запропонованих алгоритмах комплексних і локальних САПР, методологічною та інформаційною основою яких стали результати виконаних досліджень і створені розробки.

11. Результати всіх складових комплексу виконаних теоретичних і експериментальних досліджень реалізовані в розроблених у цій роботі нових технічних рішеннях і об'єктах нової техніки: у високоефективних процесах обдирного шліфування, продуктивних і економічних обдирно-шліфувальних верстатах, що не мають аналогів за технічними рішеннями і експлуатаційними можливостями, у високостійкому абразивно-обдирному інструменті, виробництві з його випуску, захищених 37 авторськими свідоцтвами й патентами. Більшість розробок упроваджена у виробництво, що забезпечило сумарний фактичний економічний ефект у розмірі 2,36 млн руб. (у цінах 1991 р.) і 376,9 тис. грн. Річний дохід від функціонування спеціалізованого абразивного виробництва становить 2,7 млн грн.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сталинский Д.В. Компонетика и надежность обдирочно-шлифовальных станков. – Харьков: Регион, 2002. – 200 с.
2. Сталинский Д.В. Теория и методы проектирования технологии обдирочно-шлифования. – Харьков: Рубикон, 2001. – 230 с.
3. Сталинский Д.В., Сизый Ю.А. Оптимальное проектирование динамических систем обдирочно-шлифовальных станков. – Харьков: Харьковский государственный политехнический университет, 2000. – 113 с. Здобувачем розроблені методологія досліджень, динамічні моделі, розрахункові методи, висновки і практичні рекомендації.
4. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Митин В.А. Собственные колебания станка для обдирочно-шлифования проката // Динамика и прочность машин: Республ. межвед. научн.-техн.

сб. – Харьков, 1987. – Вып. 46. – С. 41 – 46. Здобувачем виконана постановка задачі дослідження, розробка фізичної моделі, аналіз і узагальнення результатів.

5. Сталинский Д.В., Акмен Р.Г., Кубрик Б.И. Математическая модель теплового состояния заготовки при абразивной зачистке // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1987. – № 8. – С. 141 – 144. Здобувачем сформульована задача дослідження, розроблений алгоритм математичної моделі, виконаний аналіз і узагальнення результатів.

6. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Савран Г.В. Повышение динамической устойчивости обдирочно-шлифовальных станков // Станки и инструмент. – 1989. – № 6. – С. 44 – 45. Здобувачем запропонована методологія підходу, критерії оцінки динамічних властивостей верстатів, виконаний аналіз і узагальнення результатів досліджень.

7. Сталинский Д.В., Аршавский В.З., Степанов В.А., Пацека И.Е. Разработка нового типажа обдирочно-шлифовальных станков // Сталь. – 1992. – № 7. – С. 54 – 58. Здобувачем запропонована методологія розробки типажу, розроблена його структура.

8. Сталинский Д.В., Аршавский В.З., Тришевский О.И. Перспективы совершенствования операций абразивной зачистки проката // Сталь. – 1992. – № 1. – С. 62 – 66. Здобувачем розроблені перспективні напрямки розвитку операцій абразивного зачищення проката.

9. Сталинский Д.В., Яровая Л.Г., Диденко Н.М., Калинин В.И., Бирман Г.А. Система автоматизированного проектирования технологических процессов обдирочного шлифования // Сталь. – 1994. – № 3. – С. 44 – 45. Здобувачем розроблені алгоритм, методологічне та інформаційне забезпечення системи, виконані аналіз і узагальнення результатів досліджень.

10. Сталинский Д.В., Яровая Л.Г., Ивченко Т.А. Влияние веществ – дегидротантов на степень завершенности реакции поликонденсации феноло-формальдегидного связующего // Химическая промышленность: Науч.-технич. сб. – Черкассы: НИИТЭХИМ, 1996. – Вып. 2. – С. 13 – 17. Здобувачем сформульована задача досліджень, запропонований підхід, виконаний аналіз і узагальнення результатів.

11. Сталинский Д.В., Яровая Л.Г., Ивченко Т.А. Использование кремнийорганических, полиамидных и фенольных смол в качестве связующего абразивного инструмента // Химическая промышленность: Науч.-технич. сб. – Черкассы: НИИТЭХИМ, 1996. – Вып. 4. – С. 18 – 21. Здобувачем сформульована задача досліджень, запропонований підхід, виконаний аналіз і узагальнення результатів.

12. Сталинский Д.В. Управление тепловым состоянием металла при обдирочном шлифовании // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 1999. – Вып. 47. – С. 65 – 72.

13. Сталинский Д.В., Крат В.И. Автоматизированный агрегат для удаления волнообразного износа с поверхности катания рельсов трамвайного пути // Вестник городского электрического транспорта России. – 1999. – № 4. – С. 15 – 17. Здобувачем розроблені оптимізований процес обробки, компонувальне і динамічне вирішення агрегату.

14. Сизий Ю.А., Сталінський Д.В. Моделирование та оптимізація верстатів пружної схеми шліфування // Машинознавство. – 2000. – № 8. – С. 31 – 36. Здобувачем запропонована методологія досліджень, розроблені динамічні та компоновані рішення верстатів, сформульовані висновки.

15. Сталинский Д.В. Технологическая надежность обдирочно-шлифовальных станков // Авиационно-космическая техника и технология: Труды Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, – 2000. – С.236. – 244.

16. Сталинский Д.В. Обоснование критериев оценки качества металла при абразивной зачистке // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 1. – С. 91 – 95.

17. Сталинский Д.В. Инженерные методы определения режимов высококачественной обработки при абразивной зачистке металлопродукции // Металл и литье Украины. – 2002. – № 1 – 2. – С. 27 – 30.

18. Сталинский Д.В. Метод определения оптимальных режимов абразивной зачистки проката // Сталь. – 2002. – № 6. – С. 52 – 55.

19. Сталинский Д.В. Комплексная система автоматизированного проектирования технологических процессов обдирочного шлифования в металлургии // Металлургия: Сб. науч. тр. – Донецк: Донецкий государственный технический университет, 2002. – Вып. 40. – С. 180 – 187.

20. Сталинский Д.В. Оптимальное проектирование технологических процессов обдирочного шлифования // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 5. – С. 84 – 87.

21. Сталинский Д.В. Динамика привода главного движения обдирочно-шлифовального станка // Вестник машиностроения. – 2003. – № 3. – С. 42 – 46.

22. Пат. 43962 Украина, МКИ⁷В29С43/02, В30В11/06. Установка силовой бакелизации / Д.В. Сталинский, Л.Г. Яровая, Г.П. Большов, М.А. Вергелес, В.И. Кулич, В.Ф. Макаровский, В.И. Гранкин, А.С. Гранкин (Украина); УкрГНТЦ «Энергосталь». – №2000052713; Заяв. 12.05.2000; Оpubл. 15.06.2004, Бюл. № 6. – 4 с.: ил. Здобувач запропонував виконати установку односекційною, оснастити нагрівальну камеру столом и ковпаком, обладнати у вертикальній стінці термопару, термоізолювати всі поверхні.

23. Пат. 43946 Украина, МКИ⁷В24Д20. Масса для изготовления абразивного инструмента / Д.В. Сталинский, Л.Г. Яровая, М.А. Вергелес, В.Ф. Макаровский, Т.А. Ивченко, А.Ю. Пирогов, П.В. Романченко, В.И. Гранкин (Украина); УкрГНТЦ «Энергосталь». – №2000010015; Заяв.

04.01.2000; Опубл. 15.01.2004, Бюл. № 1. – 3 с.: ил. Здобувач запропонував включити до складу зволожувача розчин феноло-формальдегідної смоли в насиченому одноатомному спирті, співвідношення компонентів маси і зволожувача.

24. Пат. 49525 Україна, МКИ⁷B22C5/04. Агрегат для приготовления формовочной массы / Д.В. Сталинский, В.И. Куклич, А.Ю. Пирогов, Г.П. Большов, П.П. Нога, А.С. Гранкин, В.Ф. Макаровский, Л.Г. Яровая, В.И. Гранкин (Украина); УкрГНТЦ «Энергосталь». – №2001128838; Заяв. 20.12.2001; Опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9. – 3 с.: ил. Здобувач запропонував оснастити агрегат бункерами, кареткою з ваговимірювальним приладом, розмістити завантажувальні та розвантажувальні прорізи на одній лінії.

25. Пат. 43613 Україна, МКИ⁷B28C5/18, B01F15/00. Установка для приготовления смесей / Д.В. Сталинский, В.И. Куклич, М.А. Вергелес, Г.П. Большов, А.Ю. Пирогов, П.П. Нога, А.С. Гранкин (Украина); УкрГНТЦ «Энергосталь». – №2001042355; Заяв. 09.04.2001; Опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7. – 4 с.: ил. Здобувач запропонував виконати поворотний стіл переміщувальним у вертикальній площині, зв'язати гнучкими зв'язками з механізмом очистки і мішалкою, оснастити ємність лопастями з регламентованими кутами установки.

26. А. с. 1618586 СССР, МКИ⁵B24B1/00, B24B27/03. Способ абразивной обработки / Д.В. Сталинский, Л.Г. Яровая, Г.В. Савран, И.Е. Пацека, Ю.В. Савран (СССР); УкрНИИМет. – №4456975; Заяв. 19.07.1988; Опубл. 07.01.1991, Бюл. № 1. – 3 с. Здобувач запропонував підтримувати постійним відношення зусилля шліфування до знімання металу при чистовій і чорновій обробці, розрахункову формулу.

27. А. с. 1793622 СССР, МКИ⁵B24B1/00, B24B27/033. Способ определения оптимальных режимов шлифования / Д.К. Нестеров, Д.В. Сталинский, Г.В. Савран, Л.Г. Яровая, И.Е. Пацека, Ю.В. Савран, Г.И. Ильиных, Ф.Ф. Лоренц (СССР); УкрНИИМет, Metallurgicheskiy z-d im. A.K. Serova. – № 4766587; Заяв. 05.12.1989; не публ. (лиценз. темат.). – 4 с.: ил. Здобувач запропонував як вихідний параметр зусилля притискання круга, зміну зусилля при постійній швидкості подачі, визначення коефіцієнта ефективності шліфування, розрахункову формулу.

28. Пат. 1520770 Российская Федерация, МКИ⁴B24B1/00. Способ обдирочного шлифования / Д.В. Сталинский, Л.Г. Яровая, В.З. Аршавский, И.Е. Пацека, Г.В. Савран, Ю.В. Савран (Украина); УкрНИИМет; Заяв. 20.04.1987; Опубл. 27.10.1995, Бюл. № 38. – 3 с.: ил. Здобувач запропонував формулу для визначення швидкості осьового переміщення заготовки, що запобігає виникненню шліфувальних тріщин.

АНОТАЦІЇ

Сталінський Д.В. Наукові основи створення високоефективних процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2006.

У дисертації вирішена важлива й актуальна науково-технічна проблема забезпечення ефективного і якісного зачищення металопродукції відповідального призначення. Запропоновано концепцію оптимального проектування процесів обдирного шліфування, відповідно до якої вперше розроблені основи теорії обдирного шліфування, методологія оцінки ефективності процесів і стратегія технологічного забезпечення високоефективного і якісного зачищення металопродукції. Відповідно до запропонованої концепції оптимального проектування обдирно-шліфувальних верстатів уперше розроблені теоретичні основи їх динаміки, нова видова, структурна класифікація верстатів – типаж, основи структурної компонентики обдирно-шліфувальних верстатів і принципи підходу до забезпечення надійності їх експлуатації. Результати виконаних досліджень покладені в основу вперше розробленої і реалізованої стратегії забезпечення високих різальних властивостей та стійкості абразивно-обдирного інструменту.

Уперше розроблені прикладні основи оптимального проектування процесів, обладнання та інструменту обдирного шліфування, що базуються на запропонованих алгоритмах комплексних і локальних САПР. Результати всіх складових комплексу виконаних досліджень реалізовані в розроблених нових технічних рішеннях і об'єктах нової техніки; більшість розробок впроваджена у виробництво. Сумарний фактичний економічний ефект становив 2,36 млн руб. (у цінах 1991 р.) і 376,9 тис. грн. Річний дохід від створеного абразивного виробництва становить 2,7 млн грн.

Ключові слова: обдирне шліфування, обдирно-шліфувальний верстат, абразивно-обдирний круг, зачищення, температура, напружено-деформований стан, динамічна система, типаж верстатів, компонентика, оптимізація, надійність, електрокорунд, бакеліт.

Сталинский Д.В. Научные основы создания высокоэффективных процессов, оборудования и инструмента обдирочного шлифования. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструмент. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2006.

В диссертации решена важная и актуальная научно-техническая проблема обеспечения эффективной и качественной зачистки металлопродукции ответственного назначения.

Предложена концепция оптимального проектирования процессов обдирочного шлифования, в соответствии с которой впервые разработаны основы теории обдирочного шлифования, базирующиеся на математическом описании физических процессов, происходящих в металле при обработке, и формировании принципов управления тепловым и напряженно-деформированным состоянием металла.

На основе выявленных в результате теоретических и экспериментальных исследований закономерностей о влиянии режимных параметров на физические процессы в металле, показатели эффективности и качества обработки, впервые разработаны методология оценки эффективности процессов обработки и стратегия технологического обеспечения высокоэффективной и качественной зачистки металлопродукции.

В соответствии с предложенной концепцией оптимального проектирования обдирочно-шлифовальных станков впервые разработаны теоретические основы их динамики, созданы и реализованы методология определения оптимальных параметров динамических систем, стратегия обеспечения динамического качества обдирочно-шлифовальных станков при их проектировании.

Разработана новая видовая, структурная классификация обдирочно-шлифовальных станков – типаж, методологической основой построения которого явилось соответствие структуре производства металлопродукции, подвергаемой обдирочному шлифованию.

Впервые разработаны основы структурной компонентики обдирочно-шлифовальных станков и принципы подхода к обеспечению надежности их эксплуатации. Создана и реализована методология анализа компоновок станков и синтеза их оптимальных компоновочных решений, оценки, диагностики, прогнозирования и обеспечения при проектировании технологической надежности станков.

Результаты выполненных исследований положены в основу впервые разработанной и реализованной стратегии обеспечения высоких режущих свойств и стойкости абразивно-обдирочного инструмента.

Впервые разработаны прикладные основы оптимального проектирования процессов, оборудования и инструмента обдирочного шлифования, базирующиеся на предложенных алгоритмах комплексных и локальных САПР.

Результаты всех составляющих комплекса выполненных теоретических и экспериментальных исследований реализованы в разработанных в работе новых технических решениях и объектах новой техники, защищенных 37 авторскими свидетельствами и патентами. Большинство разработок внедрено в производство. Суммарный фактический экономический эффект – 2,36 млн руб. (в ценах 1991 г.) и 376,9 тыс. грн. Годовой доход от функционирования созданного абразивного производства составляет 2,7 млн грн.

Ключевые слова: обдирочное шлифование, обдирочно-шлифовальный станок, абразивно-обдирочный круг, зачистка, температура, напряженно-деформированное состояние, динамическая система, типаж станков, компонетика, оптимизация, надежность, электрокорунд, бакелит.

Stalinsky D.V. Scientific basis of developing highly effective processes, equipment and tool for rough grinding. – Manuscript.

Dissertation for D.Sc. degree in technics, speciality 05.03.01 – machining processes, equipment and tool. – National Technical University «Kharkov Polytechnical Institute», Kharkov, 2006.

The important and actual scientific-and-technical problem of providing an effective and qualitative conditioning of metal products for critical purposes is solved in the dissertation. The concept of optimal designing of rough grinding processes is proposed. According to this concept for the first time the bases of the rough grinding theory, methodology of an engineering estimation of processes' efficiency and strategy of technological providing of highly effective and qualitative conditioning of metal products are suggested. According to the proposed concept of optimal designing of abrasive-and-grinding equipment theoretical bases of their dynamics, new kind and structural classification of equipment (type), bases of structural arrangement of abrasive-grinding equipment and approaches providing reliable operation are developed. Results of the carried out researches were assumed as the basis of the strategy, which has been developed and used for the first time to provide high cutting properties and durability of abrasive-grinding tool.

For the first time applied bases of optimal designing of processes, equipment and tool for rough grinding based on the suggested algorithms of complex and local automatic designing systems are developed. Results of all researches have been used to develop novel technical approaches and equipment, the majority of which have been introduced into industry. Total actual economic benefit has made 2.36 million roubles (in prices of 1991) and 376.9 thousand grivnas. Annual profit from the organized abrasive production makes 2.7 million grivnas.

Keywords: rough grinding, grinding machine, abrasive-grinding wheel, conditioning, temperature, stressed-strained state, dynamic system, machine type, arrangement, optimization, reliability, alundum, bakelite.