Міністерство освіти і науки України
Інститут модернізації змісту освіти
Державний університет «Житомирська Політехніка»
Вінницький національний технічний університет
Полоцький державний університет
Механіко-машинобудівний інститут
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України
Фізико-технічний інститут НАН Білорусі

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю

ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТ

CONFERENCE PROCEEDINGS

X All-Ukrainian Scientific and Technical Conference with international participation

“MACHINING PROCESSES, MACHINE TOOLS AND TOOLS”

м. Житомир,
6–9 листопада 2019 р.

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Житомирська Політехніка»
Вінницький національний технічний університет
Механіко-машинобудівний інститут
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України
Полоцький державний університет
Інститут модернізації змісту освіти НАН Білорусі
Фізико-технічний інститут НАН Білорусі
Белградський університет (Сербія)

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю

ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТ

м. Житомир, 6–9 листопада 2019 р.

Друкується за рішенням Вченої ради
Державного університету «Житомирська політехніка»
(протокол № 10 від 30.09.2019 р.)

Житомир
Державний університет «Житомирська політехніка»
2019

УДК 621(082)

Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «**Процеси механічної обробки, верстати та інструмент**», 6–9 листопада 2019 року.– Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – 211 с.

ISBN 978-966-683-529-4

Відображено сучасний стан і напрямки розвитку технологій та обладнання процесів механічної обробки матеріалів; виготовлення, зміцнення та відновлення деталей машин; автоматизації виробництва. Наведено результати досліджень, що пов'язані із вирішенням актуальних проблем машинобудування; створення нових конструкцій верстатів та їх елементів, інструментів; підвищення ефективності технологічних процесів.

Матеріали представлені в авторській редакції

Видається за рішенням Вченої ради
Державного університету «Житомирська політехніка»
від 30.09.2019 р. № 10

ISBN 978-966-683-529-4

© Державний університет
«Житомирська політехніка»

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Житомирська Політехніка»
Вінницький національний технічний університет
Механіко-машинобудівний інститут
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України
Полоцький державний університет
Інститут модернізації змісту освіти НАН Білорусі
Фізико-технічний інститут НАН Білорусі
Університет м. Белград

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Голова:

Олійник О.В., Державний університет «Житомирська політехніка», д.е.н., проф., перший проректор (м. Житомир, Україна)

Співголови:

Клименко С.А., Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, д.т.н., проф., заст. директора з наукової роботи (м. Київ, Україна)

Кузєй А.М., Фізико-технічний інститут НАН Білорусі, д.т.н., проф., зав. лабораторією (м. Мінськ, Білорусь)

Мельничук П.П., Державний університет «Житомирська політехніка», д.т.н., проф., почесний ректор (м. Житомир, Україна)

Секретар конференції:

Балицька Н.О., Державний університет «Житомирська політехніка», к.т.н., доц., доцент (м. Житомир, Україна)

Члени організаційного комітету:

Антонюк В.С., Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(м. Київ, Україна)
Виговський Г.М., Державний університет «Житомирська політехніка»
(м. Житомир, Україна).
Власюк А.П., Озерненська гімназія (смт. Озерне Житомирського району
Житомирської області, Україна).
Гладський М.М., ТОВ «Прогрестех-Україна» (м. Київ, Україна).
Громовий О.А., Державний університет «Житомирська політехніка»
(м. Житомир, Україна)
Козлов Л.Г., Вінницький національний технічний університет
(м. Вінниця, Україна)
Кравченко М.П., ТОВ «Техносервіс-АВ»
(м. Коростень Житомирської області, Україна)
Лєбєдєв В.Я., Фізико-технічний інститут НАН Білорусі
(м. Мінськ, Білорусь)
Петраков Ю.В., Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(м. Київ, Україна)
Полонський Л.Г., Державний університет «Житомирська політехніка»
(м. Житомир, Україна)
Попок Н.Н., Полоцький державний університет
(м. Новополоцьк Вітебської області, Білорусь)
Степчин Я.А., Державний університет «Житомирська політехніка»
(м. Житомир, Україна)
Танович, Л. Белградський університет (м. Белград, Сербія)
Шевченко О.В., Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(м. Київ, Україна)

ЗМІСТ

Покриття для різальних інструментів з полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору
Клименко С.А., Клименко С.Ан., Копєйкіна М.Ю., Манохін А.С. 13

Отрезные сегментные круги как аварийно-спасательный инструмент
Бабич В.Е., Кузєй А.М. 16

Исследования в области развития нового поколения металлообрабатывающих станков
Танович Л. 19

Еволюція фрези
Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І. 25

Гібридні процеси оброблення композиційних матеріалів: тенденції сучасного машинобудування
Саленко О.Ф., Мельничук С.П., Гаврушкевич А.Ю., Щетинін В.Т., Ченчева О.О., Мохамед Р.Ф.Будар, Мельничук П.П. 29

Development of a new generation of machine-tool equipment for accuracy of machining
El-Dahabi Farouk Wahid 37

The effect of plasma coating deposition on the change in nanohardness and wear resistance of piston rings
Hlushkova D.B., Kostina L.L., Voronkov A.I. 39

Управління технологічними процесами з використанням систем штучного інтелекту
Алексєєва Т. А., Хейфець І. М. 41

Дослідження параметрів поверхневого шару, утвореного за допомогою йонно-плазмового термоциклічного азотування
Антонюк В.С., Прихожа Д.В., Рутковський А.В. 44

Композиционные порошки для магнитно-абразивной обработки
Бабич В.Е., Якубовская С.В. 47

Рекомендації для забезпечення якісних показників плоских поверхонь деталей торцевим фрезеруванням
Балицька Н.О. 49

Моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну
Баранди́ч К.С., Іванов Д.Є. 51

Механизм изнашивания твердого сплава ВК-15 при магнитно-абразивной обработке
Биткаша В.С., Хомич Н.С., Якубовская С.В. 54

Вплив режимів різання на шорсткість поверхні при токарній обробці пористого матеріалу
Божко Т.Є., Гальчук Т.Н. 57

Технологічні передумови багатокоординатної обробки деталей із важкооброблюваних матеріалів
Бойко І.А., Івщенко Л.Й. 59

Захисне покриття для металів методом хімічного осадження із газової фази
Бойко Ю.І., Семена О.В., Яновський В.А. 60

Розробка конструкції CO_2–лазерного різака
Бондарчук О.С., Головня В.Д. 61

Стійкість різальних інструментів із тведого сплаву після хімічної пасивації
Ботвинко В.П., Клименко С.Ан. 65

Технологічні можливості лезового інструменту, оснащеного нанокомпозитом «алмаз-WC»
Бочечка О.О., Куриляк Т.О., Клименко С.А., Копєйкіна М.Ю. 66

Финишная обработка деталей с детонационными покрытиями
Бурыкин В.В. 69

Дослідження напружено-деформованого стану шпиндельного вузла верстата для чистового фрезерування площин
Виговський Г.М., Глембоцька Л.Є., Плисак М.М. 73

Дослідження залежності витрати алмазу від швидкості різання
Войналович О.О., Камських О.В. 75

Комплексне технологічне оснащення адаптивного типу для токарної обробки кільцевих деталей
Волошин В.Н., Луців І.В., Буховець В.М. 77

Визначення пружного стану деталі після механічної обробки
Волошко О.В., Вислоух С.П. 78

Аналіз ефективності виробництва корпусів клапану Ду15
Воронцов Б.С. 80

Контроль температуры закалочной и охлаждающей жидкости на станции охлаждения в установках ТВЧ
Гайлевич Э.В., Зизико А.В., Скавыш И.А., Цыкунов П.Ю. 81

Развитие мобильного машиностроительного производства на основе многофункциональных технологических модулей
Гвоздь Г.И., Попок Н.Н., Хмельницкий Р.С. 83

Підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин застосуванням карбовібродугового методу
Герук С.М. 86

Автоматизація зварювання і наплавлення з використанням промислових роботів
Герук С.М., Сукманюк О.М. 87

Розширення технологічних можливостей обладнання для об'ємного штампування обкочуванням за рахунок утворення додаткових сил тертя
Гожій С.П., Кліско А.В. 88

Аналіз можливостей моделювання режимів навантаження кінематичної пари «шестерня-зубчасте колесо» засобами САПР
Головня В.Д., Мельник О.Л., Стрілець О.Р. 91

Вивчення принципів і можливостей взаємодії CAD/CAM/CAE/PDM систем і систем віртуальної реальності
Громовий О.А. 93

Використання плазмоелектролітних покривів в якості електроізоляційних на алюмінієвих корпусах алмазних шліфувальних кругів
Гуцаленко Ю.Г., Пупань Л.І., Руднєв О.В., Севидова О.К., Тітаренко О.В. 95

Формування пружного стану деталей в процесі їх механічної обробки і керування ним режимами різання
Давидюк Л.П., Вислоух С.П. 96

Підвищення якості інструментальної підготовки машинобудівного виробництва шляхом вдосконалення нормативної бази
Денисенко Ю.О., Залога В.О. 99

Система оцінювання ризиків відмов інструменту
Денисенко Ю.О., Залога В.О., Іваненко І.Е 101

До шліфування деталей у вільному абразивному середовищі
Денисюк В.Ю., Карманський М.В., Лапченко Ю.С., Ніщот Р.В., Симонюк В.П. 102

Досвід викладання тем «Розмірний аналіз конструкцій» і «Розмірний аналіз технологічних процесів механічної обробки» у Вінницькому національному технічному університеті
Дерібо О.В., Дусанюк Ж.П., Козлов Л.Г., Репінський С.В. 104

Епіламування поверхні як активатор покращення штампування холоднокатаних листових сталей
Дощечкіна І.В., Лалазарова Н.О., Татаркіна І.С. 105

Оптимальна швидкість переміщення алмазного зерна при шліфуванні каменю
Дрозд К.О., Соболевський Р.В. 108

Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни
Заставский К.О., Майборода В.С. 110

Снижение повреждаемости контактных поверхностей хвостовиков лопаток компрессора ГТД
Ивщенко Л.И., Сахнюк Н.В. 113

Особливості оброблення деталей типу оболонок складного профілю із крихких неметалевих матеріалів
Калафатова Л.П., Рева О.О. 115

Атестація метрики промислових роботів як напрям підвищення ефективності технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв
Кирилович В.А., Кравчук А.Р., Мельничук П.П. 118

Модернізація мехатронного переналагоджуваного пристосування типу "Призма"
Кирилович В.А., Слюсар Є.В. 119

Арочні зубчасті колеса та автоматизація їх побудови в CAD системах
Клочко О.О., Охріменко О.А., Поліщук В.О. 121

Експериментальне дослідження адгезійної міцності зносостійких покриттів на оптичних виробах після їх електронно-променевого модифікування
Коваленко Ю.І., Антонюк В.С. 123

Підвищення ефективності обробки отворів на багатоцільових верстатах
Коваленко Я.П., Мельничук П.П. 125

Використання адитивних технологій у ливарному виробництві
Коваль Ю.О., Головня В.Д. 127

Модернізація системи керування промислового робота ПМР-0,5-200КВ
Козлов Л.Г., Коломійчук А.В., Лозінський Д.О. 128

Дослідження шорсткості поверхневого шару після обробки поверхневим пластичниим деформуванням
Козлов Л.Г., Сердюк О.В., Сухоруков С.І. 130

Виявлення законів еволюції в машинобудуванні
Кузнєцов Ю.М. 131

Процес абразивної обробки як фрикційна взаємодія: особливості та елементний склад частинок шламу на ріжучій поверхні алмазних кругів
Лавріненко В. І., Солод В.Ю. 132

Прогрессивные конструкции ротационных инструментов для обработки крупногабаритных деталей
Лебедев В.Я. 136

Расчетно-графическое 3D моделирование площадей среза и силовых зависимостей при обработке концевыми фрезами
Лещенко А.И. 139

Забезпечення умов вібростійкої обробки розточувальними оправками на токарному верстаті
Ліщінер-Іващенко О.В., Шевченко О.В. 142

Магнитно-абразивная обработка плоских поверхностей головками на постоянных магнитах
Майборода В.С., Слободянюк И.В., Джулий Д.Ю., Зелинко А.И. 145

Формирование регулируемых блочно-модульных торцовых фрез
Максимчук А.С., Попок Н.Н. 149

Забезпечення якості поверхневого шару при розточуванні отворів у корпусних деталях
Медвєдєв В.В., Шихалєєв М.М. 151

Графи структурних груп (груп Ассура) II та III класів плоских важільних механізмів
Мельничук С.В., Шостачук А.М. 152

Ефективне обладнання для очистки рідини від твердих часток в системах експлуатації мор металорізальних верстатів
Молчанов В.Ф. 155

Аналіз умов зниження віброактивності торцевого фрезерування
Отаманський В.В., Степчин Я.А. 158

Аналіз моделювання технології виготовлення заготовок із порошків
Пастернак В.В., Самчук Л.М., Ільчук Н.І., Гулієва Н.М. 161

Механічні методи підвищення стійкості різального інструмента
Пелех М.П., Петрученко О.С. 163

Неоднозначність результатів теоретичних досліджень стійкості консольних інструментальних оправок
Перевозник К.Р., Фролов В.К. 165

Методи усунення вібрацій при обробленні різанням
Петраков Ю.В. 168

Моделювання лінійного хірургічного степлера для з'єднання тканин з технологією високочастотного зварювання в програмному середовищі «SOLIDWORKS»
Пичак Р.В., Вислоух С.П. 170

Розширення технологічних можливостей багатостадійної вібраційної обробки деталей автомобілів
Пікула М.В., Стадник О.С., Морозюк С.В. 172

Визначення залежностей теорії різання в алгоритмах при реалізації нейронних мереж процесів різання
Равська Н.С., Клочко О.О., Ковальова Л.І., Івановський О.А. 173

До методики визначення силових параметрів токарної обробки структурно-неоднорідних матеріалів
Рудь В.Д., Савюк І.В. 175

Шлифование цилиндрических поверхностей чашечными алмазными кругами
Рябченко С.В., Сильченко Я.Л., Федоренко В.Т. 177

Дослідження зносостійкості різального інструменту при обробці складних фасонних поверхонь на основі нелінійного узгодження формотворних рухів
Скоркін А.О., Старченко О.П. 179

Моделювання періоду стійкості твердосплавних різців при обробленні титанових сплавів
Соколова О.А., Вислоух С.П. 181

Тепловий режим шліфування з додатковими проміжними правками шліфувального круга.
Степанов М.С., Іванова Л.П., Літовченко П.І. 183

Математичнне моделювання динамічних переміщень наземних роботизованих комплексів з врахуванням складних дорожніх умов
Струтинський В.Б., Юрчишин О.Я. 185

Проблеми стандартизації та сертифікації спорядження для екстремального використання
Тіхенко В.М., Сущинська С.О. 188

Полірування оптичних поверхонь деталей зі скла та ситалів
Філатов Ю.Д., Сідорко В.І., Ковальов В.А., Ковальов С.В. 190

Способы обработки материалов на основе фрикционного взаимодействия
Харламов Ю.А., Полонский Л.Г. 193

Забезпечення якості виробів в технологічних комплексах
Хейфец М.Л., Колмаков А.Г., Клименко С.А. 196

Дослідження кінетики сушки брикетів із шламів шліфувальних верстатів
Чернишов О.В., Музичка Д.Г., Тищенко В.А., Яновський В.А. 199

Дослідження якості поверхні при виготовленні моделей на 3D-принтері
Чонка Е.Я., Новаковський О.Г., Сєров В.В. 201

Дослідження впливу відстані між пропилами на ефективність процесу створення тіл обертання
Шахрай А.О, Криворучко А.О. 203

Вплив мікрорельєфу поверхні основи на формування плівочного антифрикційного покриття
Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Артюхов А.М., Чернявський О.О. 206

С.А. Клименко, д.т.н., проф.,
С.Ан. Клименко, к.т.н.,
М.Ю. Копєйкіна, к.т.н., с.н.с.,
А.С. Манохін, к.т.н.,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

ПОКРИТТЯ ДЛЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ З ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ НАДТВЕРДИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

З метою вдосконалення різальних інструментів з полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ) необхідно створювати покриття, принцип роботи яких ґрунтується на комплексі трибологічних і механо-хімічних ефектів, що обумовлюють здатність покриттів зберігати свою цілісність і властивості під дією високих температур і контактних напружень.

Однією з основних тенденцій у розробки таких покриттів є забезпечення нанорозмірності як структурних елементів, так і окремих шарів в багатошарових композиціях. Формування нанорозмірної структури матеріалу покриттів пов'язано з вибором зернистості, оптимальної за критерієм міцності, виходячи з балансу між залежністю по Холу-Петчу і виразом, що визначає швидкість зернограничної повзучості при зменшенні розміру зерен.

Перспективними, з точки зору застосування на різальних інструментах з ПКНБ, є нанокомпозитні покриття. Це обумовлено поєднанням високих значень фізико-механічних властивостей, стійкості до окислення і дисоціації хімічних сполук, що входять до їх складу, внаслідок особливостей структури нанокомпозитних плівок.

Набув поширення спосіб створення нанокомпозитних покриттів типу *n*MeN/α-фаза – вони формуються з нанозерен твердих нітридів перехідних металів з аморфної межкристалітної фазою-матрицею з TiB_2, Si_3N_4, BN та інших нітридів неметалів, що утворюють ковалентні зв'язки. Висока твердість таких покриттів обумовлена тим, що через малі розміри нанозерен зароджування і ковзання дислокацій пригнічуються, в той час як висока когезійна міцність тонкої межзереної фази блокує зернограничнє ковзання. Аморфна складова при цьому здатна найкращим чином узгоджуватися з поверхнею нанокристалів і забезпечує гарне зчеплення, що призводить до суттєвого підвищення міцності у системі основа-покриття. Такі покриття мають незвичайну комбінацію механічних властивостей: – висока (40–100 ГПа) твердість; – високе (80–94%) пружне відновлення; – граничні (> 10%) пружні напруження; – висока (від 10 до більш ніж 40 ГПа) міцність на розтягнення, близька до ідеальної міцності для непластичних матеріалів. Більш того, наноструктура і відповідний їй надтвердий стан може залишатися стабільними при температурах, які перевищують 1100 °С.

Оцінка значень контактних навантажень на різальних інструментах з ПКНБ показує, що середні нормальні та дотичні контактні напруги при обробці сталей високої твердості досягають значень до 2500 і 1100 МПа відповідно. Знизити величину навантажень можна, якщо конструкція покриття буде включати верхній шар, що виконує функції приробки. Основною вимогою до такого прошарку є поєднання пластичності і міцності, при тому що твердість його може бути істотно нижче, ніж твердість основного масиву матеріалу покриття.

Матеріал шару приробки повинен мати аморфно-кристалічну низькомодульну структуру (α-BN, α-Si_3N_4 або α-TiB_2), що дозволить йому виконувати роль твердого змащення.

Термостійкість є другою за значимістю вимогою, що пред'являються до покриттів на інструментах з ПКНБ. Найбільш термостійкими є покриття, що містять алюміній і хром. Оксидна плівка, яка утворюється на поверхні, захищає основний масив матеріалу покриття від окислення аж до температури 850 °С. Подібно механічним властивостям, термостійкість покриття також значною мірою визначається не тільки його хімічним складом, а й структурою. Зокрема, нанокомпозитні системи типу *n*MeN/α-фаза характеризуються підвищеною термостійкістю.

Логічним продовженням концепції структурно зумовленої термостійкості є наступний підхід. Зерна, в тому числі і нанорозмірні, з яких складається масив покриття, контактують з вільною поверхнею і границі зерен є провідниками для кисню, обумовлюючи окислювальні процеси у всьому обсязі покриття. В якості методу підвищення термостійкості покриття пропонується використовувати інтергранулярну склоподібну фазу, формування якої можна забезпечити в нанокомпозитах, наприклад, шляхом збільшення (> 40%) вмісту кремнію і, відповідно, фази α-Si_3N_4. При концентрації кремнію більше 50% структура покриття аморфна і аж до температури 1300 °С окислюється виключно тонкий поверхневий шар покриття без будь-яких змін в його об’ємі.

Інший механізм підвищення стійкості інструментів з ПКНБ реалізується при використанні «само-адаптивних» покриттів. Основна ідея полягає не в запобіганні окисленню, а в використанні цього явища для управління параметрами контактної взаємодії при різанні та зниження коефіцієнту тертя і, отже, термобаричного навантаження в зоні контакту. Подібні покриття в процесі різання окислюються, утворюючи поліоксидну вторинну структуру (трібоплівку), що виграє роль твердого змащення. Наприклад, при точінні інструментом з покриттям AlN-Ti(Cr)B_2 на його поверхні формується поліоксидна трібоплівка, що включає Al_2O_3, Fe_2O_3 і оксинітрид алюмінію $Al_xO_vN_z$. Дані сполуки мають термостабільність до 1300 °С, крім того в таких системах утворюються гомогенні ряди твердих розчинів оксидів, що мають гарну змащувальну здатність. Дослідження елементного складу покриття після обробки різанням показали, що на глибині 70 нм має місце різке збільшення кількості кисню і, таким чином, зовнішній нанорозмірний шар інтенсивно окислюється, переходячи в продукти зносу, і знову окислюється. При цьому в шарі, розташованому на глибині від 30 до 70 нм, утворюються обмежені тверді розчини на основі Al_2O_3 (системи Al_2O_3-Fe_2O_3, Al_2O_3-TiO_2, Al_2O_3-AlN).

Подальший розвиток такого підходу може бути пов'язаний зі створенням систем, що містять SiC і AlN, які є хімічно стабільними при температурах понад 1300 °С.

Розроблено концепцію підвищення стійкості різальних інструментів з ПКНБ, яка базується на зменшенні температури в контактній зоні різання при нанесенні на робочі поверхні інструменту покриття, що зменшує коефіцієнт тертя. Таким покриттям може бути плівка з BN. Основною відмінністю цього покриття є його аморфно-кристалічний структурний стан і близькість за хімічним складом до матеріалу основи. Ефект досягається за рахунок: – зниження твердості в порівнянні з інструментальною основою, що зменшує внутрішні залишкові напруження в покритті і знижує крихкість його матеріалу; – зменшення модуля Юнга, що підвищує пружні властивості покриття і стійкість до абразивного стирання; – зниження коефіцієнта тертя, що сприяє зменшенню термобаричного навантаження на робочих ділянках інструменту. Випробування, проведені на машині тертя, показали зниження коефіцієнта тертя від 0,4 до 0,3 в діапазоні швидкостей відносного переміщення 75–90 м/хв.

Ще одним підходом до підвищення стійкості інструменту, в якому явно проявляється ідея використання покриття як проміжного середовища, що надає прямий вплив на параметри процесу різання, є введення до складу покриття компонентів, які є інгібіторами протікання хімічних реакцій в зоні контактної взаємодії інструментального композиту з оброблюваним матеріалом. Пригнічуючи хімічно обумовлений механізм зношування різальних інструментів з ПКНБ, такі покриття збільшують їх стійкість при високошвидкісному різанні або при обробці конструкційних матеріалів, компоненти яких виявляють високу хімічну активність в парі з нітридом бору.

На основі аналізу результатів значної кількості досліджень механізму впливу покриттів на зношування інструментів з ПКНБ можна виділити кілька взаємопов'язаних підходів для їх створення: – вибір структурних складових покриття, які в процесі обробки різанням забезпечують формування на робочих поверхнях інструменту високотемпературних поліоксидних трібоплівок, що грають роль твердого змащення і ефективно знижують інтенсивність зношування інструменту; – введення до складу покриття сполук, що є інгібіторами реакцій хімічної взаємодії та дозволяють зрушити початок активної хімічної взаємодії в зоні обробки в діапазон більш високих швидкостей різання; – зниження коефіцієнта тертя і контактних навантажень на робочих ділянках інструменту за рахунок твердого змащення і шару покриття з функцією приробки; – забезпечення необхідного структурного стану покриття.

В.Е. Бабич, к.т.н., доц.,[1]
А.М. Кузей, д.т.н., проф.,[2]
Университет гражданской защиты МЧС Беларуси[1],
Физико-технический университет НАН Беларуси[2]

ОТРЕЗНЫЕ СЕГМЕНТНЫЕ КРУГИ КАК АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Отрезные сегментные круги показали свою высокую эффективность при обработке камня, бетона, железобетона и широко применяются в строительстве. Эффективность применения отрезных сегментных кругов в различных областях обусловлена их высокой степенью специализации, адаптацией для обработки отдельных материалов, применением высокопрочных алмазных порошков, свойства которых также адаптированы к различным условиям эксплуатации. Однако при обработке (резании) изделий из чугуна и стали, отрезные сегментные круги по эффективности уступают абразивным кругам. Существуют области (резание крупных конструкций из стали, изделий из чугуна, в заводских и полевых условиях), где использование отрезных сегментных кругов может быть экономически оправдано. Помимо этого существует проблема демонтажа сооружений при ликвидации последствий техногенных катастроф, где необходим инструмент, адаптированный к обработке группы материалов: стали, бетона, железобетона и т.д. Одной из причин низкой эффективности отрезных сегментных кругов является контактное взаимодействие алмазных зерен и связки со сталью, следствием которого является перенос продуктов износа на поверхность сегментов и ускоренный их износ.

В работе методами электронной сканирующей микроскопии, энергодисперсного анализа изучены процессы контактного взаимодействия сегментов (алмазосодержащих композиционных материалов) при обработке стали. Кругами (350×3,5×40, АС 180, 500/400, 50 отн.% и 350×3,5×40, АС180, 500/400, 125 отн.%), установленными на аварийно-спасательном инструменте с мотоприводом, в условиях, имитирующих работу при ликвидации чрезвычайной ситуации (демонтаж конструкции) в течение 10 мин резали лист стали марки Ст 45 толщиной 5 мм.

Скорость резания листа стали кругом с концентрацией 125 отн.% алмазных зерен в сегменте в 4 раза превышала скорость резания кругом с концентрацией алмазных зерен 50 отн.%. Резание кругом с концентрацией 50 отн.% алмазных зерен проходило со снижением режущей способности. Резание кругом с концентрацией алмазных зерен 125 отн.% происходило с постоянной скоростью. Анализ морфологии поверхности сегментов с концентрацией алмазных зерен 50 отн.% показал, что после 10 минут работы на поверхности присутствуют отдельные, частично разрушенные зерна. На поверхности сегментов с концентрацией алмазных зерен 125 отн.% присутствуют как целые, так и разрушенные зерна. Отпечатки от выкрошившихся зерен присутствуют

на поверхности матрицы в отдельных сегментах. Пленки продуктов износа присутствуют на отдельных участках матрицы сегментов и алмазных зерен (рис. 1, *а, б,* 2, *а*). Пленки продуктов износа стали на поверхности матрицы имеют переменный состав и состоят из железа 54 мас.%, кислорода 24,8 мас.%, углерода 21,2 мас.%. На поверхности алмазных зерен (после растворения пленок железа) присутствуют микротрещины, царапины, ориентированные в направлении обработки, углубления, заполненные продуктами износа (рис. 2, *б*). Подобные микрорельефы образуются и после воздействия (800 К, 30 мин) на поверхность алмазных зерен расплава нитрата калия (рис. 2, *в*). Рельефы, образующиеся на поверхности листа стали после резания кругами, представляют собой совокупность гребней с округлыми и плоскими вершинами и впадин, заполненных продуктами износа стали (рис. 2, *г*).

Процессы резания листа стали отрезными кругами протекают при высоких (1700 – 1850 К) температурах в зоне фрикционного контакта, об этом свидетельствует морфология поверхности износа стали, состав продуктов износа на поверхности сегментов (рис. 2, *г*).

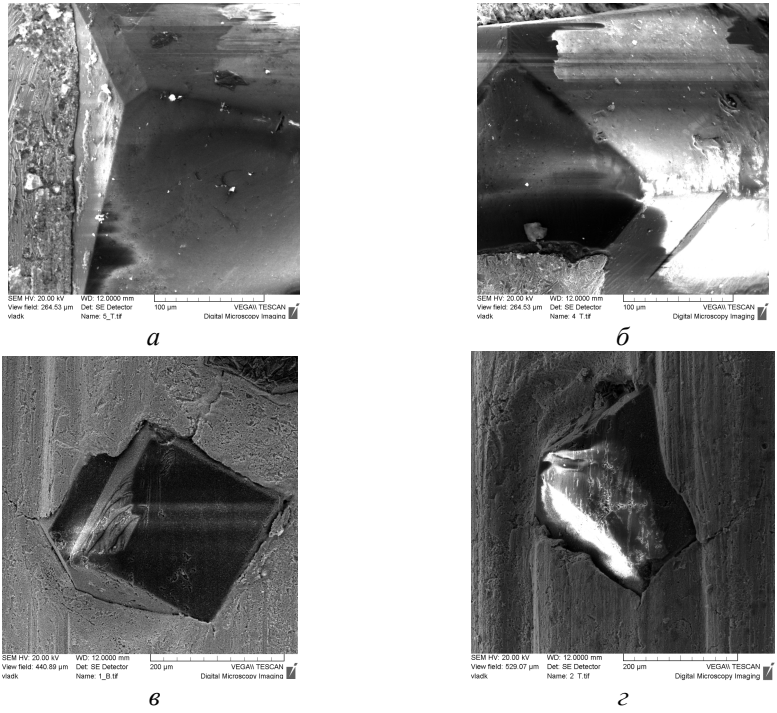


Рис. 1. Морфологии поверхностей износа композиционных материалов. Концентрация алмазных зерен: а, в – 125; б, г – 50 отн.%

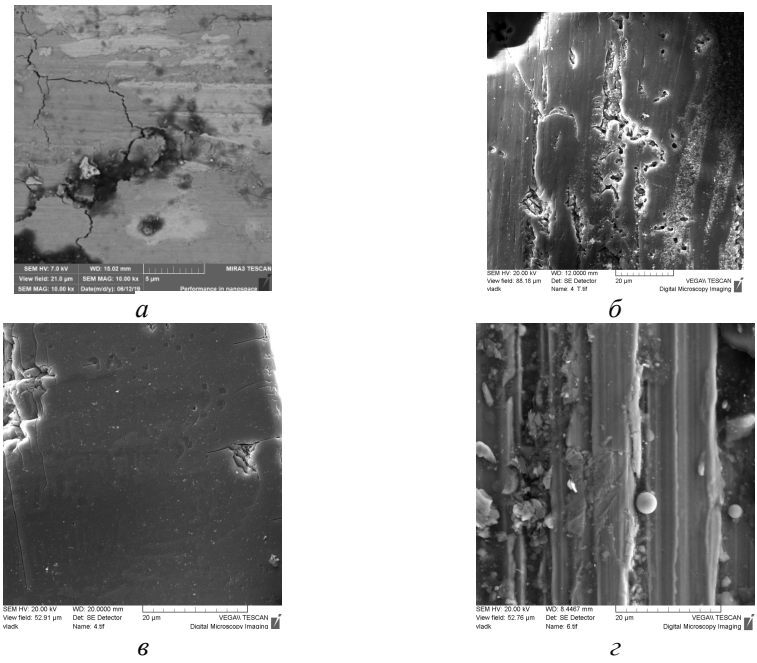


Рис. 2. Морфологии поверхностей износа (а, г): а – матрица композиционного материала; г – сталь. Микроструктура нарушенного слоя на поверхности алмаза (б, в). Концентрация алмазных зерен: б – 125 отн.%; в – 50 отн.%

Морфология поверхности износа стали (листа) указывает, что алмазные зерна перемещаются в приповерхностном слое, а матрица контактирует с поверхностью стали. Перемещение алмазных зерен в слое стали, температура которого близка к температуре плавления железа, снижает твердость и прочность алмаза, а взаимодействия (растворение) с железом способствует переносу железа на поверхность алмаза (и матрицы). Периодически повторяющиеся циклы переноса и срыва пленок железа с поверхности алмаза, сопровождающиеся повышением и снижением температуры, динамическими ударными нагрузками приводят к образованию микротрещин, а затем нарушенного слоя. Хрупкому разрушению алмазных зерен предшествует стадия усталостного разрушения, которое локализовано в нарушенном слое. Перенос продуктов износа железа на поверхность матрицы снижает скорость ее износа, а хрупкое разрушение алмазных зерен магистральными трещинами подавляет согласованное изнашивание матрицы и алмазных зерен, т.е. реализацию механизма «самозатачивания», обеспечивающего постоянное значение режущей способности инструмента. Увеличение концентрации алмазных зерен в композиционном материале снижает удельные нагрузки на зерна, фрикционное взаимодействие матрицы с железом, что приводит к увеличению длительности периода изнашивания алмазных зерен на поверхности сегмента. Таким образом, перенос продуктов износа на поверхность

сегментов (явление «засаливания») является следствием функционального взаимодействия композиционного материала со сталью. Увеличение концентрации алмазных зерен в сегменте позволяет нивелировать этот эффект, что делает возможным разработку эффективного инструмента для резания групп материалов.

Л. Танович, д.т.н., проф.,
Белградский университет, Сербия

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

Микро-производство подразумевает создание продуктов с размерами от несколько микрометров до нескольких миллиметров высокой точности размеров из различных материалов. В настоящее время, во всем мире, как в научно-исследовательских учреждениях, так и в промышленности имеется большой интерес к области микро-производства. Сегодня микро-производство интенсивно развивается как ответ на повышающийся спрос на миниатюрную продукцию, изготавливающуюся часто в небольших количествах, может иметь сложную форму с особыми требованиями по качеству поверхности. На рис. 1 показаны примеры микро-продуктов, а на рис. 2 – промышленные микро-производственные системы.

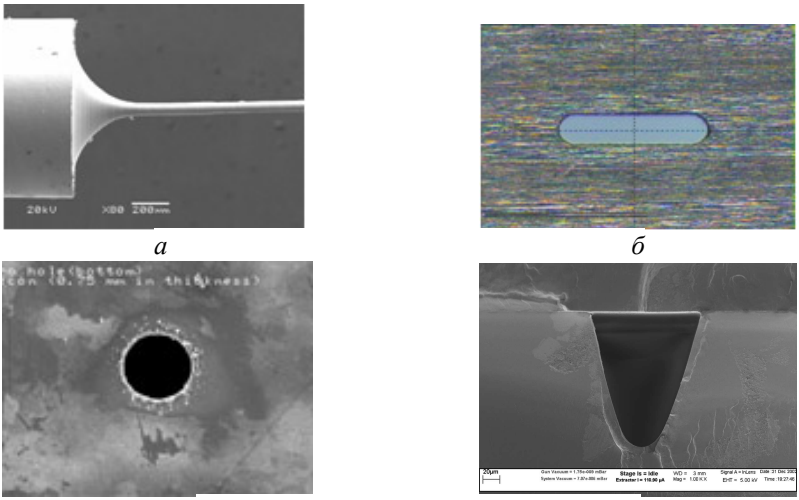
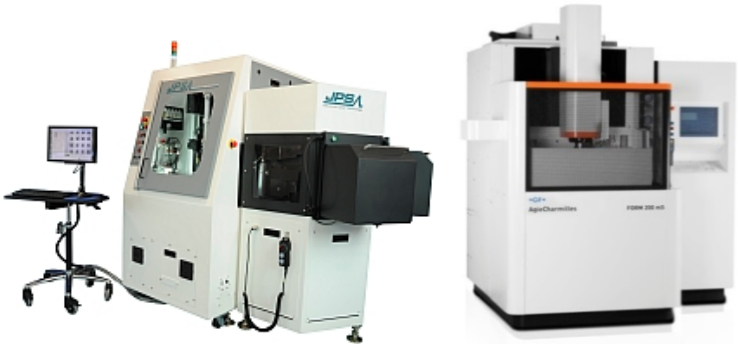
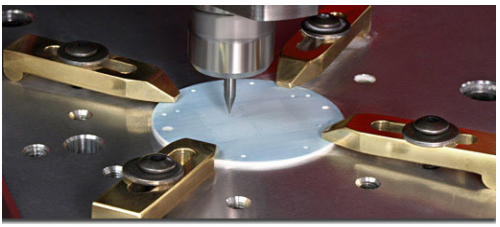


Рис. 1. Вал диаметром 30 мкм (а), паз шириной 100 мкм (б), отверстие диаметром 50 мкм (в), канал шириной 70 мкм (г)



а *б*



в

Рис. 2. Промышленные микромашины: а – лазерная система; б – микро-EDM машина; в – стенд для микро-сверления

Особым случаем миниатюризации являются дигитальные компьютеры, размеры которых в последние 50 лет уменьшились в 10^6 раз.

Многие виды промышленности требуют изготовления миниатюрных компонентов, что сопровождается снижением потребления энергии и затрат материалов, используемых в производстве, упрощением обрабатывающих систем, увеличением скоростей, чувствительности и селективности систем, необходимостью использования в технологиях новых эффектов и т.п.

Микро-обработка и системы для микро-обработки. Микро-производственные процессы могут быть разделены в четыре главные категории: субстрактивные, аддитивные, форминг и гибридные.

Механические микро-обрабатывающие процессы, в основном, модифицированные или простые конвенциальные макро-механические обрабатывающие процессы, не связанные с размерами изделий. Процессы характеризуются хорошей геометрической взаимосвязью между инструментом и обрабатываемой поверхностью. Это подразумевает использование инструмента с малым радиусом округления режущей кромки. Одним из доминирующих факторов при микро-резании является отношение глубины резания и радиуса округления режущей кромки, связанное с так называемым эффектом минимальной толщины стружки. С ним связана предельная глубина резания, ниже которой стружка не образуется. Механика процесса резания значительно отличается от случая макро-обработки, так как в рассматриваемом

случае доминирующим является механизм царапания по отношению к классическому скалыванию. Специфика данного процесса требуют включения в рассмотрение зернистой структуры материала и всех возможных источников дефектов в нем, приводящих к нестабильности процесса обработки.

В настоящее время в мире делаются большие усилия по исследованию и созданию машин микро/мезо-размеров. На рис. 3 показаны прототипы машин, разработанных Northwestern University (NU), которые представляет собою полностью 3-осевые микро/мезо-обрабатывающие центры с ЧПУ, обеспечивающие субмикронную точность обработки.

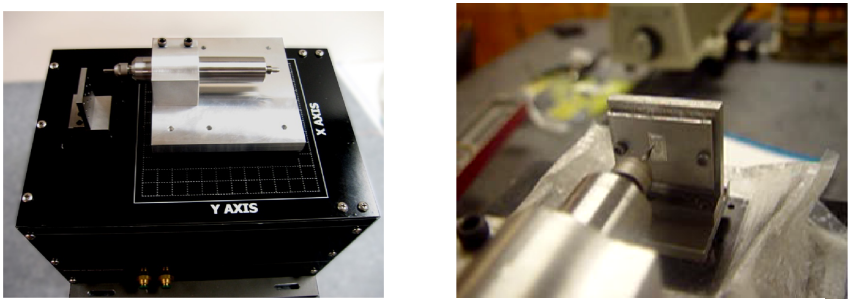


Рис. 3. Машины микро/мезо-размеров: рабочая зона 25×25×25 мм, подача 700 мм/с, скорость вращения инструмента 120 К мин$^{-1}$

На вопрос – что обусловило направление развития микро-машин, ответ вероятно можно найти в необходимости изготовления новых микро-изделий, которые можно производить на таких машинах с большой экономией энергии и сбережением окружающей среды. Необходимо указать на проблемы, присутствующие у таких машин: сложность в управлении по осям, большая подвижная масса, значительные ускорения, необходимость ультрабольших чисел оборотов шпинделя, неточность микро-инструментов и низкая точность изготавливаемых изделий. Отмеченные проблемы могут быть частично решены несколькими способами: уменьшением передвигаемых масс, развитием алгоритмов управления, созданием контрольной стратегии достижения требуемой топографии поверхности, введением активной компенсации в обрабатывающие системы и т.д.

Размеры микро-машин составляют не более 100×100×100 мм. Экономия электроэнергии при их использовании ~ 80 кВ/день (машины средней мощности ~ 12 кВ, машины меньшей величины ~ 2 кВ).

Микро-EDM процессы – это безконтактные процессы, основанные на возникновении дуги или искры между электродами (инструментом и деталью), благодаря которыми возникает частичный местный нагрев и плавление обрабатываемого материала. Имеются варианты микро-EDM с использованием электродов и проволоки, которые позволяют изготавливать детали размерами ≥ 5 мкм (рис. 4). Несмотря на то, что электроды изнашиваются с меньшей скоростью, чем скорость снятия материала изделия, существует проблема, связанная с потерей

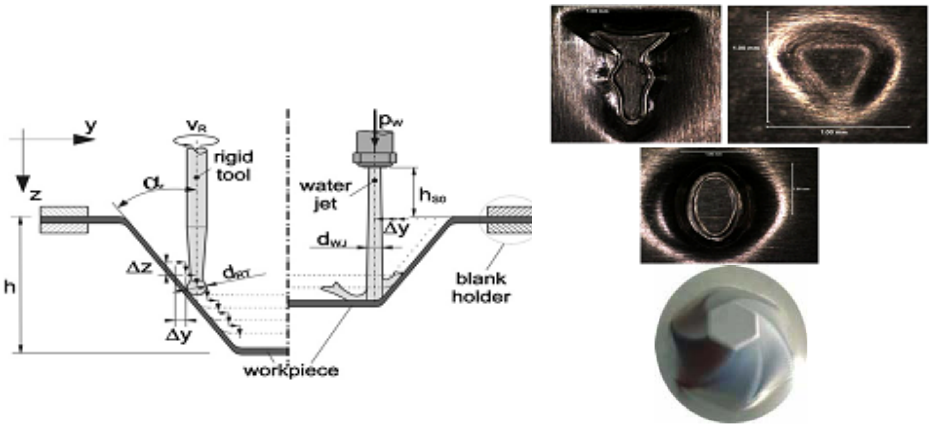
точности, что требует развития и использования стратегии компенсации износа электрода. Вторая, более крупная проблема, относится к повреждению обработанной поверхности за счет теплового воздействия и относительного слабого представлении о протекающих явлениях на микро- уровне.



а *б*

Рис. 4. Микрослот, обработанный в микро-EDM-процессе (а), и коммерчески доступная гибридная микро-ЭДМ-машина (б)

Микро-инкрементальная формовка (IF) - техника формовки металлического листа, выполняемая движущимся универсальным инструментом – формирующим элементом, который перемещается по заранее определенной орбите, приводя до частичной деформации листа к требуемой форме (рис. 5). Эта технология реализуется без изготовления инструмента требуемой формы и позволяет достигнуть лучших свойства материала в сравнении с традиционной формовкой.

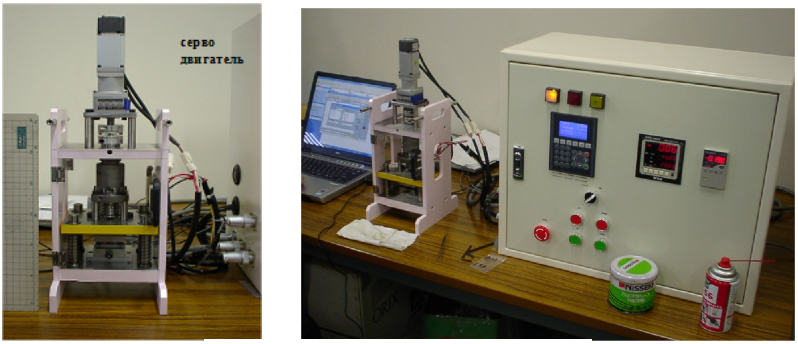


а *б*

Рис. 5. Схема инкрементного формования одноточечным жестким инструментом (слева) и водяной струей (правым) (а), детали, образованные IF на трехкоординатной машине с ЧПУ Mori-seiki (б)

Первые исследования в области микро-IF были проведены Saotome и Okamoto, которые разработали ЧПУ-машину для формовки алюминиевой фольги толщины 10 мкм.

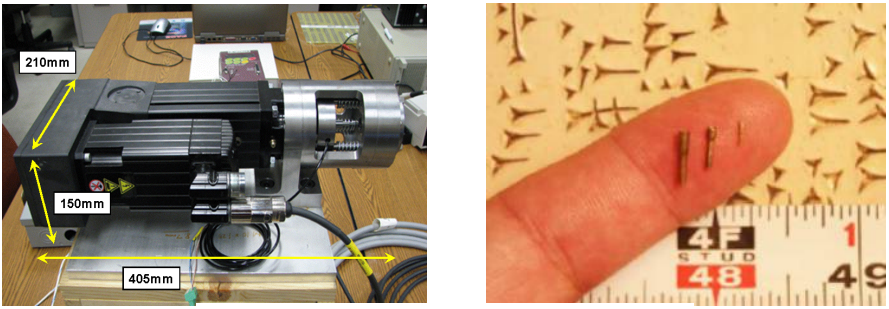
Микро-штамповка – высокопроизводительный процесс с большой степенью использования материала. Он является идеальным для массового производства микроструктурных компонентов с размерами < 1 мм (микро-контакты). Микроштамповка является простым вариантом штамповки, которая выполняется на машине, включающей привод и инструмент (рис. 6).



а *б*

Рис. 6. Микропресс (а) и микро-штамповка (б) (Nagoya Institute of Technology)

Микро-экструзия – высокопроизводительный процесс с большой степенью использования материала. Он, как и микро-штамповка, является идеальным для массового производства микроструктурных компонентов размеров < 1 мм (микро-контакты) (рис. 7).



а *б*

Рис. 7. Машина для микроэкструзии (а), типичные экструдированные компоненты (б)

Машины с параллельной кинематикой. Из-за специфических особенностей параллельных механизмов и машин на их основе, исследования в данной области и дальше интенсивно продолжаются и развиваются на высоком уровне с

кооперацией возможностей университетов, исследовательских институтов и промышленности. Эти исследования связаны с синтезом новых механизмов, моделированием, управлением, разработкой проектов, разработкой и использованием металлообрабатывающих станков и роботов. Исследования в Белградском университете начались 1996 г. Это были первые работы в данной области в Сербии и согласно долгосрочной программе их целью было создание нового поколения отечественных металлообрабатывающих станков и роботов.



Рис. 8. Версия промышленного прототипа «ЛОЛА пн101_4»

На рис. 8 показана первая версия прототипа, разработанного совместно с компанией ЛОЛА Систем AD Белград в 2004 г. Сотрудничество по этой программе продолжается до сих пор с ЛОЛА Институтом из Белграда.

Параллельный робот «ДЕЛЬТА» разработан на основе положения о том, что нет необходимости в использовании двигателя, мощностью несколько кВ для манипуляции частями машины массой несколько грамм. Оригинальная схема робота показан на рис. 9. Такая, на первый взгляд комплексная структура механизмов с большой частью сегментов, обеспечивает движущейся плите три степени свободы. Четвертая степень свободы, то есть ориентация, обеспечивается с помощью актуатора на неподвижной плите, момент которой переносится с помощью двух карданных шарниров и телескопического вала или с помощью актуатора на внутренней стороне платформы.





Рис. 9. ДЕЛЬТА-механизм с поворачивающимися шарнирами

Реализация проекта по созданию ДЕЛЬТА-робота базируется на большом комплексе исследований сложных кинематических моделей, разработанных с

учетом минимального количества параметров, что делает его более эффективным в отношении существующих подходов, не только в части управления, но и в части эффективных алгоритмов для калибровки и компенсации, совершенствование которых продолжается и с настоящее время.

Вывод. Благодаря актуальному тренду миниатюризации в настоящее время имеет место интенсивный спрос на энергетически эффективные миниатюрные компоненты. В данной работе представлены некоторые направления исследований развития новых методов обработки и микро-машин для обработки широкой гаммы деталей из металлов, полимеров, керамики и пр. Обрабатывающие системы нового поколения – основа развития производственных технологий во всех отраслях промышленности. На Машиностроительном факультете Белградского университета проводятся исследования в области металлообрабатывающих станков и роботов нового поколения с параллельной кинематикой, создания обрабатывающих систем для многоосевой обработки, совершенствования и применения управляемых систем, испытания обрабатывающих систем в производственных условиях.

Е.К. Посвятенко, д.т.н., проф.,
Н.І. Посвятенко, к.т.н., доц.,
Національний транспортний університет

ЕВОЛЮЦІЯ ФРЕЗИ

Кінематика фрезерування полягає у обертанні фрези навколо своєї осі і руху подачі оброблюваної деталі або цього інструменту. Рух подачі, головним чином, є прямолінійним. За рівнем продуктивності фрезерування поступається тільки зовнішньому протягуванню. Із загального парку металообробного обладнання у машинобудуванні питома вага фрезерних верстатів сягає понад 20%. Фрези вирізняються великою різноманітністю типів, форм і призначення.

Щодо історії фрези. Цей металорізальний інструмент є відносно молодим: перші фрези виникли і були використані у машинобудуванні у 30-х роках XIX ст., тобто при завершенні промислової революції кінця XVIII – початку XIX ст.ст.

Попередником фрезерного верстату слід вважати універсальний токарно-гвинторізний верстат Генрі Модслі з механізованим рухомим супортом, що переміщувався у поздовжньому і поперечному напрямах. Супорт було створено у 1794 р., а завершено роботу над конструкцією токарного верстату у 1800 р. На зламі названих століть було винайдено вуглецеву інструментальну сталь із вмістом вуглецю 0,6–1,5%, кремнію 0,2–0,4% і марганцю 0,15–0,35%. Перші фрези були виготовлені саме із такої сталі, що забезпечувало процес різання на швидкостях 6–11 м/хв.

Найбільш досконалий на той час фрезерний верстат учня Г. Модслі Джеймса Несміта (1830 р.) був фактично спеціалізованим токарним верстатом

зі зміненою кінематичною схемою. Водоохолоджувана фреза вставлялася у патрон, а деталь кріпилася на оправці з пристроєм повороту на 60°.

Слід зазначити, що у першій половині XIX ст. зубчасте колесо завдяки дослідженням профілювання і, у першу чергу, за схемою евольвенти, механізованому поділу заготовки, а також створенню спеціалізованого зубофрезерного верстата з супортом Г. Модслі і використанням дискових та пальцевих модульних фрез, набуло практично сучасного вигляду. Фрезерні верстати стають основою вертикально-, горизонтально-фрезерних, верстатів для фрезерування зубчастих коліс, нарізання різьби фрезеруванням і т.п. У 1855 р. у США Брауном спроектовано перший фрезерний верстат для нарізання зубчастих коліс огинанням. У подальшому у цій державі було створено цілу гаму фрезерних верстатів "Лінкольн".

Електродвигун, як основа приводу, на початку 80-х років XIX ст. став замінювати парову машину, яка домінувала у машинобудуванні як привід металорізальних верстатів понад 100 років. У цей же час почалось удосконалення передачі енергії від двигуна до робочої машини. Ще у кінці століття можна було бачити у цеху центральний привідний вал і систему пасових передач від останнього до верстату у кожному механічному відділенні чи цеху у цілому.

Потім на промислових підприємствах було введено груповий електропривод, який передбачав розосередження енергії одного потужного електродвигуна на кілька менш потужних і розміщення останніх безпосередньо у цеху. При цьому кожна із груп верстатів мала свій привід і більш точне та гнучке управління. Однак, лише впровадження індивідуального електроприводу за схемою "один електродвигун – один верстат" спростило конструкцію останнього і дозволило повністю відмовитись від громіздких пасових передач.

Визначна роль у розвитку фрези і процесу фрезерування належить харківському вченому і викладачеві В.С. Кнаббе (9.02.1849–2.08.1914 рр.) У 1892 р. він видав фундаментальну монографію „Фреза и ея роль в современном машиностроении”, де узагальнив досвід кількох десятків передових європейських підприємств із нової на той час технології фрезерування, а також визначив напрямки розвитку цієї технології і власне фрези. Велика заслуга В.С. Кнаббе полягає в тому, що він уперше вивчив і узагальнив величезний матеріал щодо використання фрези у виробництві.

Ним показані початкові хибні тенденції у розвитку фрези як різального інструменту, які полягали у наданні їй максимально можливого за складністю профілю і великої кількості дрібних “ножовочних” зубців. Перше призводило до дорожнечі фрез та низької технологічності їх виготовлення, а друге – до зниження продуктивності фрезерування, оскільки процес потрібно було часто зупиняти для очистки міжзубового простору від запакетованої стружки, а також до проблем з переточками затупленого інструменту. Вченим підкреслено, що успіх фрези (шарошки) у виробництві залежить від неодмінного застосування крупних зубців, які менше забиваються стружкою порівняно з дрібними; від винайдення способу заточувати затуплені фрези і від

здешевлення виготовлення самих фрез. Важливим результатом досліджень В.С. Кнаббе є науково обґрунтоване визначення тієї області обробки матеріалів різанням, де застосування фрезерування є найбільш вигідним. З позицій загальних принципів обробки деталей, що вимагали копіювання, В.С. Кнаббе науково обґрунтував переваги фрезерування перед іншими технологічними операціями обробки металів. Ним зроблено висновок про доцільність закладання в проекти нових машинобудівних заводів саме фрезерних верстатів для зниження собівартості продукції. У Західній Європі книга стала відомою у 1893 р. завдяки авторському перекладу німецькою мовою і отримала схвальні відгуки авторитетних науковців та інженерів.

У ще одній своїй книзі "Современные машиностроительные заводы и применяемые ими новые способы холодной обработки металлов" автор детально досліджує історію створення швидкорізальної сталі, починаючи з винайдення у 1861 р. самогартівної сталі Р. Мушета, яка першою з інструментальних сталей була легована вольфрамом, кількість якого доходила до 5,5%. Досліди з вольфрамвміщуючою сталлю, що були проведені у 1900 р. у США у заводських умовах, показали переваги сталі Тейлора-Уайта над сталлю Мушета по стійкості інструменту в 11–30 разів. У праці В.С. Кнаббе розкрито суть патенту Тейлора, яка полягає в особливості способу нагрівання і гартування, що призвело до перевороту у справі термообробки стальних інструментів. Компетентне дослідження історії створення швидкорізальної сталі, яке було викладено В.С. Кнаббе вперше, супроводжувалось також глибоким аналізом причин, які перешкоджали широкому впровадженню цієї сталі у виробництво. Швидкорізальна сталь, як відомо, і на сьогодні є основним матеріалом для виготовлення фрез.

Матеріали для фрез. Як відзначалось вище, такими матеріалами були спочатку інструментальні евтектоїдні та заевтектоїдні сталі, які на початку XX ст. замінили сталь Тейлора–Уайта (сучасне маркування Р18). Потім її замінила сталь Р6М5 (з метою зменшення частки дефіцитного вольфраму). Сталь Р6М5 має наступні механічні властивості: твердість 63–64 HRC; границя міцності на згинання 2900–3400 МПа, ударна в'язкість 2,7–4,8 Дж/м^2 і теплостійкість 600–620 °С. Найбільше застосування серед кобальтових та ванадієвих швидкорізальних сталей для фрез мають марки: Р6М5К5 і Р6М5Ф3, які відносять до сталей підвищеної тепло- і зносостійкості. Проте, поряд з високою зносостійкістю, ванадієві сталі мають погану шліфуємість через наявність в них карбідів ванадію (VC), твердість яких не поступається твердості зерен електрокорунду (Al_2O_3). Введення кобальту до складу сталі Р6М5К5 суттєво підвищує твердість до (66–68 HRC) і теплостійкість до (640–650 °С). Крім того, підвищується теплопровідність сталі, оскільки кобальт приводить до такого ефекту. Це дає можливість використовувати сталь Р6М5К5 для фрезерування важкооброблюваних жароміцних і неіржавіючих сталей і сплавів, а також конструкційних сталей підвищеної міцності. У цих випадках період стійкості фрез у 3–5 разів вищий, ніж при використанні сталей марок Р18 та Р6М5. Проте, слід відзначити, що виробництво сталі Р6М5 від усього обсягу випуску швидкорізальних сталей в Україні сягає 80%.

Крім того, робоча частина фрез у ряді випадків виконується твердосплавною або із полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ). Твердосплавні фрези дозволяють підвищити швидкості різання у 2–4 рази, проте значно нижча межа міцності на згин обмежує використання твердих сплавів у конструкції фрез. Титановольфрамові тверді сплави застосовуються у різальній частині цього інструменту. Сплав марки Т5К10 має червоностійкість 850–900 °С, межу міцності на згин до 1700 МПа і твердість 87–92 HRA. Це дає можливість застосовувати такий сплав, а також інші споріднені тверді сплави марок Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10 для ножів торцевих фрез.

Фрези, що оснащені ПНТМ, бувають торцевими, кінцевими, дисковими та черв'ячними. Торцеві фрези, як найбільш розповсюджений вид цього інструменту, випускають з механічним кріпленням вставок, круглих та багатогранних різальних пластин; насадні і хвостові; однозубі та багатозубі; однорядні, ступінчасті і багаторядні; фрези для обробки відкритих, напівзакритих і закритих поверхонь. Найбільш розповсюдженими в теперішній час є торцеві збірні регульовані фрези з пластинами із ПНТМ або вставками з цього матеріалу. Промисловістю випускаються регульовані торцеві насадні (однорядні та ступінчасті) фрези діаметром 100–800 мм і нерегульовані ступінчасті фрези діаметром 100–400 мм з механічним кріпленням різальних елементів. Для обробки пазів в деталях із важкооброблюваних матеріалів застосовують дискові фрези і пили, які оснащено ПНТМ. При цьому монолітні або двохшарові різальні елементи кріпляться методом паяння з наступним заточуванням. Випускають також дискові фрези з механічним кріпленням змінних вставок із ПНТМ для обробки пазів у деталях із загартованих сталей. Черв'ячні зуборізні фрези, які оснащено різальними елементами із ПНТМ, працюють за двома схемами – кромковою та профільною. За типом різальних елементів черв'ячні фрези поділяють на фрези з механічним кріпленням змінних вставок або паяним. Конструктивно черв'ячні фрези можуть складатися з одної або двох напівфрез. Як правило, різальна частина фрези виготовляється із ПНТМ на основі нітриду бору.

Сучасні фрези найчастіше випускають зі зносостійкими покриттями. Найбільш надійним моношаровим покриттям є плівкове покриття золотистого кольору із нітриду титану (TiN). Товщина цього покриття знаходиться у межах 2–10 мкм, тобто є співрозмірною із шорсткістю основи (твердого сплаву чи швидкорізальної сталі). Твердість покриття сягає 21–36 ГПа, тобто це покриття є надзвичайно зносостійким. При переточуванні фрез, що завжди здійснюють по передній поверхні, покриття залишається неушкодженим і захищає найбільш уразливу задню поверхню зуба. Серед методів фізичного осадження покриттів (PVD), за допомогою яких отримують покриття із нітриду титану, найбільше розповсюдження набув метод КІБ (конденсації речовини з плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням). Межа міцності TiN на згин 240 МПа, а температура плавлення 2950 °С.

О.Ф. Саленко, д.т.н., проф.[1],
С.П. Мельничук[1],
А.Ю. Гаврушкевич, к.т.н.[1],
В.Т. Щетинін, к.т.н., проф.[2],
О.О. Ченчева, к.т.н.[2],
Мохамед Р.Ф. Будар, асп.[2],
П.П. Мельничук, д.т.н., проф.[3],
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського[1],
Кременчуцький національний університет імені Михайло Остроградського[2],
Державний університет «Житомирська політехніка»[3]

ГІБРИДНІ ПРОЦЕСИ ОБРОБЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ: ТЕНДЕНЦІЇ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

Сучасні композиційні матеріали на основі скляних і вуглецевих волокон володіють унікальним комплексом властивостей, що дозволяє їх із успіхом використовувати в аерокосмічній техніці, автомобілебудуванні, ядерній та тепловій енергетиці.

Мала вага, прогнозована анізотропія механічних властивостей, висока стійкість до впливів агресивних середовищ робить такі матеріали практично незамінними у сучасному машинобудуванні. Однак у той же час неоднорідність структури, міцність армувальних компонентів, їх висока абразивна спроможність, ускладнює обробку механічними або фізико-технічними методами, обумовлює активний пошук нових видів, методів і способів впливу з метою кінцевого формоутворення готових виробів.

Такі роботи можна умовно класифікувати за кількома ознаками, що відображають сутність заходів із забезпечення ефективності обробки:

– створення прогресивних конструкцій різального інструменту;

– застосування сучасних інструментальних матеріалів, кераміки та надтвердих матеріалів;

– зміна стану зони обробки, застосування активізаторів процесу різання/мікрорізання;

– заходи із «конструювання» виробу та використовуваного матеріалу із врахування подальшої механічної обробки;

– розробка і впровадження гібридних процесів, спроможних змінювати умови і види керованого впливу на оброблювані композиційні заготовки.

При цьому головною умовою використання розробок є забезпечення мінімальності дефектного шару на створюваних поверхнях, передування елімінації або іншого глибинного пошкодження матеріалу виробу за адгезійним або когезійним механізмами.

Якщо перші напрямки удосконалення процесів оброблення композитів є відомими і достатньо поширеними (вони базуються на фундаментальних

працях науковців Харківської та Київської шкіл різання, зокрема, М.Ф. Семка, Г.В. Шабалина, П.С. Редька, Е.М. Левенберга, А.И. Грабченка, В.Л. Доброскока, В.А. Федоровича, Б.А. Перепелиці та ін.), то останні три напрями нині тільки починають активно розроблятися.

Так, в ряді робіт (дослідників В.М. Орла, О.О. Ченчевої, Є.Є. Лашка) показано, що зміна умов навантаження зони різання, зміна напруженого стану в місцях контакту із різальним або абразивним інструментом) може суттєво зменшити опір руйнуванню матеріалу.

Значні перспективи у контурній обробці матеріалів має і метод обробки потужним рідинним струменем. Гідроабразивне різання із компенсацією динамічних явищ (С.В. Коваленко) та попередньою ідентифікацією гідрорізної системи (О.В. Фомовська) дозволяє отримувати якісних різ матеріалів як карбон-полімерної так і карбон-карбонової груп.

Важливою проблемою при обробці композитів, особливо карбон-карбонової групи, є виділення тепла. Причиною є висока відновлюваність навантаженого та поверхнево-деформованого шару, внаслідок чого в місці контакту інструменту з матеріалом виділяється теплота $q = fpv$, де f – коефіцієнт тертя; p – контактний тиск; v – швидкість ковзання.

Утворене одномірне температурне поле отримують на основі рішення диференціального рівняння

$$q = q_0 A = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x}(0,t), \qquad T(x,t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right),$$

і для півбескінечного простору визначається так:

$$T(z,t) = \frac{2Aq_0\sqrt{\alpha_T}}{\lambda_T}\left[\sqrt{t}i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right) - \sqrt{t-\tau}i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T (t-\tau)}}\right)\right].$$

Саме тому в роботі О.О. Ченчевої пропонується обробку композитів виконувати виключно в умовах циклічно-періодичного навантаження, коли не тільки змінюється напруження у зоні контакту, а і забезпечується активне відведення продуктів руйнування. Такі умови можна забезпечувати як шляхом спрямованої дії на інструмент, так і підведенням додаткової енергії у зону механічного впливу.

В.М. Орел пропонує створювати додаткове навантаження в зоні різання, на яку впливає різальний інструмент (тепер – водо абразивний струмінь), яке викликатиме появу розтяжних напружень у площині, перпендикулярній до осі дії різальної сили.

Утворені напруження, що одночасно залежать від струминного навантаження мікроділянок поверхні у зоні різання та від рівня попереднього навантаження зони різання, наприклад, від прикладення відповідних зусиль P до торця оброблюваної листової заготовки розмірами $b \times l \times h$, за умови початкової відсутності тріщин, у функції часу становитимуть

$$\hat{\sigma}(t) = \sqrt{\left(\frac{R_c}{f_k}\cos\alpha\right)^2 + \left(\frac{P\sin\omega t}{(b-l)h}\right)^2},$$

що викликатиме випереджаюче зростання мікротріщин від величини a_0 до

$$h_d = \nu \frac{a_0}{\sqrt[n/2-1]{1-\frac{CQ_m d_c}{\xi(N) m s_k k}}},$$

де N – кількість циклів навантаження;

$$C = a_0^{n/2-1}\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^n\left(\frac{\rho}{\bar{c}}\right)^n,\ K = \frac{1}{\sqrt{\pi}(n/2-1)},$$

ν – коефіцієнт Пуассону; a_0 – початкове пошкодження поверхні; ρ – густина матеріалу; n, c – константи матеріалу; s_k – швидкість контурної подачі; Q_m – витрата абразиву; m – середня маса однієї абразивної частинки, d_c – діаметр струменя, σ - створювані в зоні різання напруження.

Дослідженнями установлено, що зменшення опору руйнування гідроабразивному різанню відбуватиметься як внаслідок зниження міцності матеріалу T, $T=k\sigma_m$, що відповідає рівнянню

$$Q = 0{,}106\cdot\left(\frac{p}{100}\right)^{2,4}\cdot d_c^{-0,27}\cdot h^{-0,35}\cdot\left(\frac{T'}{100}\right)^{-0,75},$$

де p – тиск витікання, МПа; d_c – діаметр струминної насадки, мм; h – товщина оброблюваного матеріалу, мм; T' – міцність матеріалу, $T' = k(\sigma_p - \sigma_a)$, так і за рахунок явищ тріщиноутворення, за якого

$$l(t) = l_{\max} + \frac{K^{\left[2+\alpha\left(1-\frac{\beta}{2}\right)\right]}}{\Delta\sigma_d{}^2\sqrt{\pi}}dN,$$

причому dN є функцією часу і визначається частотою коливань навантаження.

Зміна частоти прикладання навантаження N в діапазоні 5–50 Гц показала наступне. Зі зростанням частоти прикладання навантаження усереднена швидкість зростання тріщин за кожен наступний цикл різко сповільнюється, з одночасним зростанням сітки тріщин. В цьому випадку тріщини біфуркують, поширюючись у різні напрями відносно лінії дії силового навантаження. Аналіз впливу форми коливань довів, що суттєву відмінність від усереднених результатів виміру ростру тріщин має лише випадок прикладання пилкоподібних навантажень, від дії яких тріщини зростають на 20–25% у порівнянні із квазігармонійним навантаженням. Усі інші види навантажень істотних відмінностей не мають (рис. 1).

Проілюстроване вище доводить, що кілька розрізнених впливів може мати і синергетичний вплив на процес різання.

Якщо взяти до уваги, що формування властивостей виробу здійснюється шляхом виконання ряду технологічних переходів, при яких відбувається повна або часткова зміна початкових властивостей виробу (заготовки). Технологічні перетворення заготовки у виріб здійснюються цілеспрямованою сукупністю технологічних впливів $W_{ij}(t_k)$ матеріального $S_o(t_k)$, $S_o(t_k)\in R_{ni}\cap M_{ni}$, енергетичного $E_o(t_k)$ та інформаційного $I_0(t_k)$ типів, що дає змогу уявити схему формування

вихідних властивостей відповідно до рис. 2 і записати: $W_{ij}(t_k) = S_o(t_k) \cup E_0(t_k) \cup I_o(t_k)$.

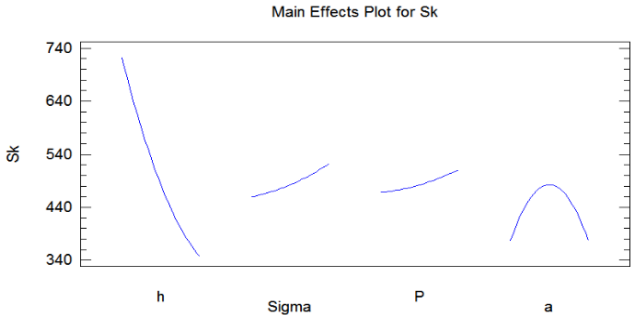


Рис. 1. Головні ефекти та поверхні відгуку для параметру швидкості контурної подачі у функції товщини, амплітуди та частоти коливань

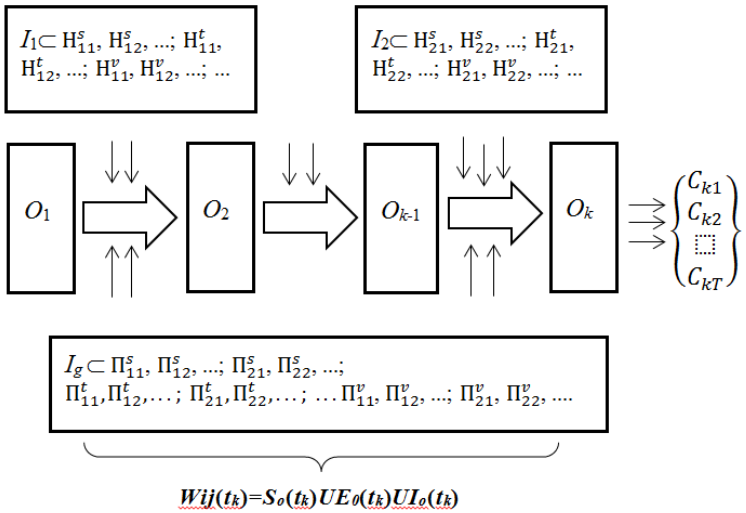


Рис. 2. Приклад формування властивостей виробу диференційованим або інтегрованим способами

Приймемо до уваги, що технологічні впливи інструменту на виріб мають здійснюватися на кількох рівнях одночасно, то реалізації технологічних впливів відобразиться матрицею виду:

$$A_3^{\Pi} = \begin{Vmatrix} \Pi^S_{11} & \Pi^S_{12...} & \Pi^S_{21} & \Pi^S_{22...} & H^S_{11} & H^S_{12...} & H^S_{21} & H^s_{22...} & E^S_{11} & E^S_{12...} & E^S_{21} & E^S_{22...} \\ \Pi^t_{11} & \Pi^t_{12...} & \Pi^t_{21} & \Pi^t_{22...} & H^t_{11} & H^t_{12...} & H^t_{21} & H^t_{22...} & E^t_{11} & E^t_{12...} & E^t_{21} & E^t_{22...} \\ \Pi^v_{11} & \Pi^v_{12...} & \Pi^v_{21} & \Pi^v_{22} & H^v_{11} & H^v_{12...} & H^v_{21} & H^v_{22...} & E^v_{11} & E^v_{12...} & E^v_{21} & E^v_{21...} \end{Vmatrix}$$

де $\Pi^{s}_{11,}\Pi^{s}_{12,}...$, $\Pi^{t}_{11,}\Pi^{t}_{12,}...$, $\Pi^{v}_{11,}\Pi^{v}_{12,}...$ – варіанти переривних технологічних впливів за відповідними осями *s*, *t* та *v* системи координат *s, t, v;* $H^{s}_{11,}H^{s}_{12,}...$, $H^{t}_{11,}H^{t}_{12,}...$, $H^{v}_{11,}H^{v}_{12,}...$ – різні варіанти безперервних технологічних впливів за відповідними осями *s*, *t* та *v* системи координат *s, t* и *v*; $E^{s}_{11,}E^{s}_{12,}...$ – варіанти разових технологічних впливів.

Тож маємо альтернативи виконання технологічних впливів у вигляді інтегрованої дії (обробка гібридним інструментом) або, навпаки, диференційованої (один ФЕ формується кількома діями) (рис. 2).



Рис. 3. Фото отриманих зразків для механічних випробувань

У випадку, якщо ФЕ виробу E_m отримується при реалізації переривчастих технологічних впливів Π^{t}_{ij} і Π^{t}_{ij+k} із одночасним використанням *k* інструментів, то застосування одного (гібридного) інструменту відповідатиме $R_{nj} = \bigcap_{i=1}^{\rho_i} R_{si}$ де R_{nj} – поле утворених нових видів інструментів; R_{si} – *i*-я сукупність відомих технічних рішень; ρ_i – вагомість підмножини відомих рішень. І навпаки, формування ФЕ кількома технологічними впливами відповідає умові $M_{nj} = \bigcap_{i=1}^{\rho_i} M_{si}$, де M_{nj} – поле утворених нових видів технологічних впливів.

На основі вище викладеного розглянемо виготовлення дослідного зразка розмірами $b \times l \times h$ з кубічної заготовки розмірами $B \times L \times H$, причому зразок має криволінійні ділянки з радіусами r_i.

Позначимо: R_1 – фрезерування; R_2 – обробку абразивним кругом; R_3 – обробку засобами зворотно-поступального руху (реноватор); R_4 – свердлування; R_5 – гідроабразивне різання. Можливі такі технологічні операції: (R_2)–(R_1); (R_2)–(R_5); (R_2)–(R_4)–(R_5). При оптимізації процесу за критерієм мінімізації часу обробки для заданого рівня якості отриманий варіант (R_2)–(R_4)–(R_5), результат якого поданий на рис. 3. Така послідовність операцій дозволяє максимально повно використовувати всі переваги гідроабразивного різання

(значне скорочення часу обробки) і уникнути деструкції матеріалу в момент пробою струменем.

У разі необхідності виконання профільного отвору або внутрішнього контуру для заготовок значної товщини застосовують попереднє свердлування; у противному випадку необхідності отримувати отвір немає, а різання розпочинають із вільного торця.

Сполучення різних за природою впливів веде як до істотного підвищення продуктивності процесу, так і до отримання принципово нових ефектів, обумовлених дією такого гібридного впливу. І яскравим прикладом такого сполучення є використання лазерно-струминного способу різання композитів (рис. 4).



а *б* *в*

Рис. 4. Струминно-лазерна головка (а), її загальний вигляд (б) та комплекс ЛСК-400-5 для реалізації гібридної обробки (в)

В результаті статистичного опрацювання даних визначено ступінь впливу технологічних режимів на глибину борозенки різа, отриманого у зразках досліджуваних матеріалів. відповідні регресійні рівняння зведені до табл. 1–4. Узагальнення отриманих даних дозволяє зробити ряд суттєвих висновків.

Отримання контрольних різів показало, що результати моделювання із використанням розробленою авторами узагальненої моделі розвитку ерозії в анізотропному середовищі при струминно-променевому впливі в цілому задовільно узгоджуються із експериментами.

Таблиця 1 – Залежність глибини борозенки різа h від тиску технологічної рідини $p_ь$ (МПа)

Матеріал	Товщина	Регресійне рівняння	R-статистика
Композит типу ТК	5–10	$h = -0{,}12+0{,}044p-0{,}00012p^2$	0,85
Сталь 40Х		$h = -0{,}85+0{,}055p-0{,}00016p^2$	0,96
CBN		$h = -0{,}09+0{,}013p-0{,}000486p^2$	0,92
Карбон С49	2–15	$h = -1{,}08+0{,}055p-0{,}00013p^2$	0,94
СВА		$h = -0{,}12+0{,}044p-0{,}00016p^2$	0,88

Примітка. Тиск вимірювали із точністю 10%

Таблиця 2 – Залежність глибини борозенки різа h від частоти імпульсів лазеру f (Гц)

Матеріал	Товщина	Регресійне рівняння	R-статистика
Композит ТК	5–10	h=1,36+0,0037f–0,000008f^2	0,92
Сталь 40Х		h=2,12+0,0137f–0,000092f^2	0,95
CBN		h=0,15+0,0010f–0,000073f^2	0,89
Карбон С49	2–15	h=0,54+0,0093f–0,000032f^2	0,97
СВА	1–15	h=0,62+0,0064f–0,000017f^2	0,93

Примітка. Частоту змінювали ступінчасто

Таблиця 3 – Залежність глибини борозенки різа h від тривалості імпульсів лазеру τ (мс)

Матеріал	Товщина	Регресійне рівняння	R-статистика
Композит типу ТК	5–10	h=0,44+0,026τ–0,0000065τ^2	0,96
Сталь 40Х		h= –0,121771+0,023τ–0,00005τ^2	0,89
CBN		h= –0,002+0,0017τ–0,0000031τ^2	0,93
Карбон С49	2–15	h= 0,074+0,022τ–0,000056τ^2	0,94
СВА	1–15	h= –0,122+0,044τ–0,00013τ^2	0,97

Примітка. Тривалість встановлювали за можливостями генератора накачування

Таблиця 4 – Залежність глибини борозенки різа h від швидкості робочої подачі s, мм/с

Матеріал	Товщина	Регресійне рівняння	R-статистика
Композит типу ТК	5–10	$h_1 = \frac{1}{1{,}39 + 0{,}0080s}$	0,88
Сталь 40Х		$h_1 = \frac{1}{0{,}32 + 0{,}0045s}$	0,91
CBN		$h_1 = \frac{1}{2{,}34 + 0{,}0410s}$	0,92
Карбон С49	2–15	$h_1 = \frac{1}{0{,}79 + 0{,}0049s}$	0,89
СВА	1–15	$h_1 = \frac{1}{0{,}844 + 0{,}0056s}$	0,92

Примітка. Швидкість задавали системою ЧПК

Максимальна відмінність очікуваної глибини різа (при порівнянні з реальною деструкцією матеріалу) спостерігається для матеріалів із армуванням скляними волокнами, що можна пояснити ефектом вторинного термічного руйнування матриці за рахунок світлопровідних властивостей наповнювача. Ефект проявляється сильніше при зменшенні швидкості руху робочої подачі.

Аналіз картин мікроруйнування показав (рис. 5, 6), що тривалістю дії струминно-променевого потоку можна регулювати глибину пропалювання і

утворення умовного вирви, який не зважаючи на наближення його форми до циліндроїду, не є абсолютно симетричним. Регулюючи тривалість імпульсу лазеру та швидкість переміщення по поверхні можна формувати ступінчасту структуру поверхні із забезпеченням розмірів «пікселю» на рівні 0,1 мм (при окремих реалізаціях дослідів вдавалося досягти розміру 0,05 мм).

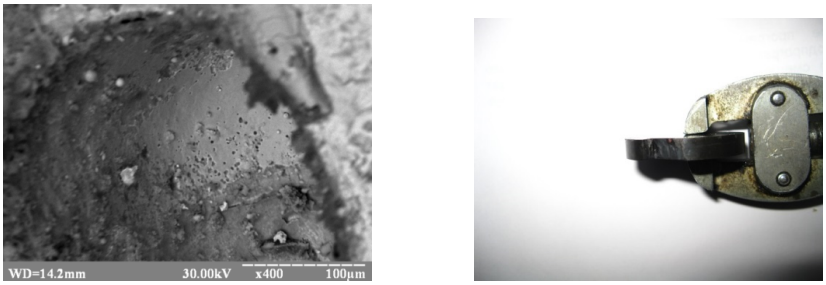
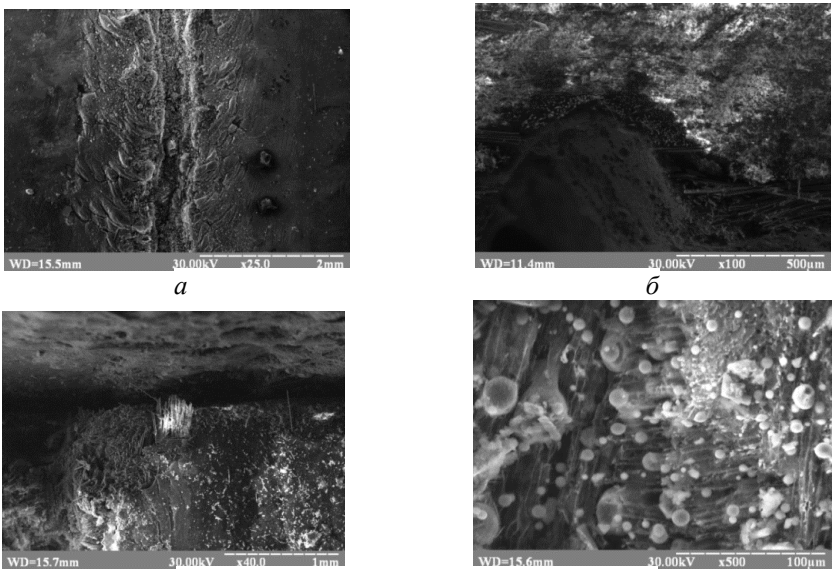


Рис. 5. Мікроруйнування та ванна розплаву матеріалу CBN



а *б*

в *г*

Рис. 6. Мікрофотографії різів волокнистих композитів: на фото (б) спостерігається висока якість борозенки, яка відсутня на фото (в); на останньому спостерігається корпускуляція волокон

Аналіз мікрофотографій лазерно-струминного різання волокнистих композитів доводить, що використання рідини дозволяє передувати виникненню водо насиченого шару, забезпечує задовільну якість крайки та низький рівень шорсткості.

Проведені дослідження також показали, що плазма, яка виникає у зоні струминно-променевого впливу, є головним чинником руйнування матеріал. Зменшення тривалості імпульсу менш ніж до 20 мс при генерації випромінювання призводить до припинення руйнування матеріалу. Отже, доцільно встановлювати частоту подання імпульсів 100 Гц при тривалості 50 мс.

Отже гібридизація обробних процесів є дієвим високоефективним способом поліпшення якості обробки та системно може залучатися до системи створення виробів із композитів.

El-Dahabi Farouk Wahid, PhD
Lebanese University, Tripoli, Lebanon

DEVELOPMENT OF A NEW GENERATION OF MACHINE-TOOL EQUIPMENT FOR ACCURACY OF MACHINING

The creation of new developing technical systems, which include machine tools and robotic systems, require further improvement of their subsystems. One of these subsystems is machine tool equipment designed to manipulate, install and clamp objects of various shapes (blanks or parts, cutting tools or their elements). Currently, the search for new solutions is impossible without an interdisciplinary approach and the use of the latest scientific achievements in various fields, combined in the form of NBIKS technologies (nano-bio-info-cogno-socio) and using artificial intelligence.

The challenges of the fourth industrial revolution “INDUSTRY 4.0” are mainly focused on artificial intelligence, full automation with the use of robots, robotic systems, communications, the creation of a new generation of intelligent production while significantly reducing the time and cost of manufacturing products.

In this case, machine tool and tooling, is of great importance, expanding the technological capabilities of automated equipment and increasing its technical and economic indicators. In recent years, using the system-morphological approach, fundamentally new clamping mechanisms and devices have appeared: high-precision, self-adjusting, wide-range, fast-adjusting, high-speed and multifunctional. Their application allowed to solve the problems:

– saving metal by eliminating the secondary operation of trimming the face after cutting short parts (especially in the bearing industry);

– increase machining accuracy due to chucks with a fixed cylindrical collet and double clamping;

– switching to processing cheap non-calibrated rolled products – hot rolled bars and pipes instead of calibrated ones;

– reduction in the number of readjustments and time for readjustment.

The application of the genetic-morphological approach in was oriented towards the clamping of one axisymmetric rotating object with access to the radial and axial clamping principles, which limited the field of search for new solutions. Works and especially prof. Shinkarenko V.F. allowed us to expand our worldview on an

interdisciplinary approach in science and technology, in particular, on the evolutionary and genetic synthesis of anthropogenic systems that develop over time.

The solution to the problem of simultaneous multi-place clamping of rotating objects with the application of a tangential force displaced from the axis of rotation determined the relevance of the present research.

All these studies are reduced to ensuring the accuracy of processing, since accuracy is one of the most important indicators of the quality of machines, significantly affecting all the criteria for the operability of their mechanisms, and, consequently, the output indicators of machines.

The development of technology is associated with a continuous increase in the requirements for the accuracy of machines, including tooling, including its preservation under load and in time. Improving the accuracy of machines increases their productivity due to the possibility of reducing the number of working passes, optimizing machining modes by creating a new generation of machine tool equipment, and reducing the complexity of the final operations.

In this way, the economic efficiency of improving the accuracy of machines is determined by two factors of national economic importance:

– improving the quality of machines, devices and other products manufactured on machine tools;

– increased machining performance.

Accuracy affects the operation of machines according to the following criteria:

– dynamic loading, vibration and noise;

– strength due to dynamic loads, the use of multi-contact designs, stress concentration;

– loss of friction, heating and wear, non-optimal gaps and surface condition;

– reliability associated with all performance criteria, their mutual influence, as well as initial accuracy margins;

– speed associated with dynamic loads and heating;

– material consumption due to limited speed and additional harmful loads.

The accuracy of parts and mechanisms should ensure the exact position and movement of the links.

The requirements for the roughness and accuracy of the surfaces of parts are established taking into account their functions.

Errors of machines and machine tools by their nature can be divided into:

– own, not related to external influences,

– manufacturing and assembly errors;

– systematic errors due to the principle of operation of machines or process;

– errors from external influences without irreversible changes in the system - elastic and temperature deformations;

– errors from irreversible changes in machine parameters – wear, aging, warping.

Most machines and parts fail not because of damage and general obsolescence, but because of a loss of accuracy due to wear, hugs, warping, resulting in a significant reduction in the main output devices of machines, especially tooling.

D.B Hlushkova, Dr. Tech. Sciences, Prof.,
L.L. Kostina, Ph.D., Assoc.,
A.I. Voronkov, Dr. Tech. Sciences, Prof.,
Kharkiv National Automobile and Highway University

THE EFFECT OF PLASMA COATING DEPOSITION ON THE CHANGE IN NANOHARDNESS AND WEAR RESISTANCE OF PISTON RINGS

As it is indicated in the work, the wear resistance of metal is determined by combination of a structure and series of properties, that is namely high hardness and plasticity in absence of fragility, stability of mechanical properties in the conditions of work for wearing, the high saturation and the uniform distribution of alloying elements. In the work it is set that the intensity of relaxation processes proceeding at a friction has a substantial effect on wear resistance. Lately for the improvement of operating characteristics of materials it is widely used the treatment of surfaces with high intensive sources of energy, the interaction of which with materials results in running of processes related to the structure change. Foremost there is a change of crystal lattice parameter, the dislocation structures are formed, ultra-dispersive phases are appeared. The result of such processes is the appearance of residual internal stresses in surface layers of material. A series of works deals with methods of determination and study of nature of residual stresses forming in the coatings got at vacuum-arc precipitation.

The objective of this work is a research of the multi-layered nanostructural coating applied on the piston rings surface for their wear resistance improvement.

The material on the multi-layered coating was applied by means of vacuum-arc method was the grey cast-iron widely used in different branches of engineering. As it is generally known, grey cast-iron has good casting and antifriction characteristics, it is insensible to the defects of surface, suppresses well the vibrations. Chemical composition of grey cast-iron, %: 3,49 C; 2,49 Si; 0,56 Mn; 0,08 Ni; 0,06 S; 0,11 P; Fe.

Studies undertaken last years testify that multicomponent and multi-layered coatings excel the monolayer coatings in properties [5]. Multi-layered two-phase nanostructural coatings TiN-MoN were precipitated in the vacuum-arc plant "Bulat-6". General time of cleaning was 10 minutes. Further they turned on simultaneously both the vaporizers and precipitated Ti-Mo, after that they gave nitrogen to the chamber and precipitated nitride of molybdenum, and from the opposite side - nitride of titan to continuously rotating rollers. Such parameters as current of arc, direct voltage on the back U_{nn}, impulse voltage on the back U_{nu}, pressure of nitrogen, amount of layers of spraying were varied, the time of spraying was 2 hours.

Nanoindentation was conducted by means of a pyramid of Berkovich at loading 0,5 H with loading and unloading executed automatically. Metallography researches were conducted by means of electronic microscope, study of the structural state of coverages was performed on a scanning microscope. The quantity of residual stresses in near-surface layers was determined on the difraktometr rentgenovskiy DRON-2 by means of procedure of multiplied inclined shootings in radiation of copper anode

with graphite monochromator. The tests for wear resistance were performed on the plant SMTs-2.

The conducted tests of nanohardness gave the opportunity to get information about the character of distribution of nanohardness in the surface skims of coating Ti-Mo-N.

It is shown the chart of distribution of nanohardness to the depth of 200 nm, due to which it is clear that increases a little. At that the loading was reaching the maximal value at intrusion into the surface for depth of 200 nm (Fig. 1). Young's modulus has the value 250 GPa.

Received dependences testify that nanohardness is maximal in surface layers. This conformity to natural law coincides with the results stated in works.

The analysis of deflected mode has demonstrated that the highest value of compression corresponds to the depth ~ 10 nm. Such result was received in case of applying coating TiN-MoN at arc I_a = 100–170 A, direct voltage on the substrate U_{nn} = 40, impulse voltage on the back U_{nu} = 2000, nitrogen pressure $1 \cdot 10^{-3}$ mm of mercury column, continuous rotation of 2700 layers. Deformation of compression constitutes – 2,2% on such depth.

The obtained data match the chart of nanohardness indicates that the maximal value of nanohardness takes place on the depth the order of 10 nm.

The texture observed at the study on the electronic microscope (Fig. 2) is of important factor in forming the residual stresses in coating. The reason of residual stresses is an impact of ionic bombardment.

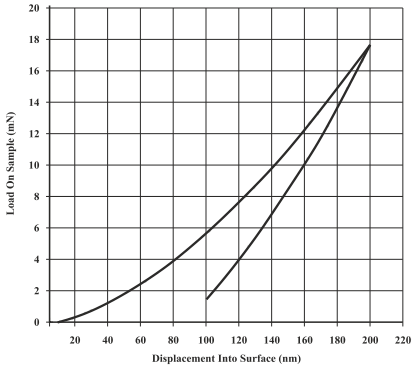


Fig. 1. Chart of loading distribution

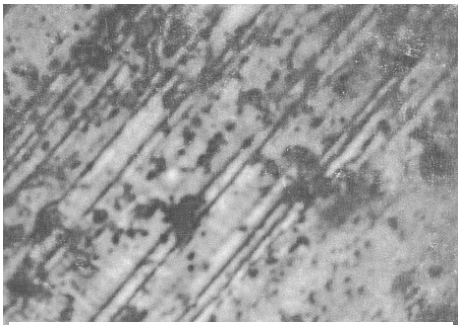


Fig. 2. Electronic photography of surface layer structure ×10000

Research of the structural state of coatings showed that at the layer thickness about 2 нм there is no interface border and that's why a spectrum is revealed on diffractive spectrums that is typical for monophasic state and material is hardened not much. The hardness increases at occurrence of the second phase. Thus, as follows from the results of studying the coatings by means of the scanning microscope, the cells on the coating surface are expressed in relief, that can be explained by means of the processes of their dispersion by the ions of molybdenum and titan during precipitation. In case of studying the layers of thickness about 10 nm it is observed

the forming of two-phase structural state. The interfaces occupy a large specific volume, that is accompanied by the increasing of compressive stresses. It must result in hardening, The study of microfractograms of multi-layered coating has shown that formed chips have a regular enough shape specified for destruction of metal under the effect of compression. The research of layers of thickness the order of 20 nm showed more washed out interface border that leads to the reduction of specific deposit of borders.

Spraying the multi-layered coatings TiN-MoN on grey cast-iron creates compressive stresses on the surface.

At the very surface it is observed the maximal value of nanohardness at spraying the coating Ti-Mo-N.

Linear wear of cast-iron sprayed with coating Ti-Mo-N decreases in 8 times.

Nanohardness increases on proximately 40% in the same conditions of spraying at continuous rotation with the increasing of amount of layers from 1800 to 2700.

Nanohardness increases on proximately on 25% at increasing of vacuum for all identical parameters of spraying the coating.

The vacuum-arc precipitation performed at impulse voltage on a base U_{nu}, equal to 2000 provides the increasing of nanohardness on 30 % as compare to without impulse one at all other equal conditions for conducting the experiment.

Т.А. Алексєєва[1],
І.М. Хейфець[2],
Полоцький державний університет[1],
Інститут підготовки наукових кадрів НАН Білорусі[2]

УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Вирішення актуальних технологічних проблем, створення особливо складних технічних об'єктів, що включає моделювання та управління ними, неможливо без використання методів штучного інтелекту (ШІ), спрямованого на певні завдання при їх специфічний алгоритмізації.

Залучення методів ШІ передбачає використання інтелектуальних систем управління (ІСУ). В їх основі лежить ідея побудови високоорганізованих систем автоматичного управління, що базуються на використанні моделей змінної складності і невизначеності, з виконанням таких інтелектуальних функцій, притаманних людині, як прийняття рішень, планування поведінки, навчання і самонавчання в умовах мінливого зовнішнього середовища.

Навчання – здатність системи покращувати свою поведінку в майбутньому, грунтуючись на попередній експериментальній інформації про результати взаємодії з навколишнім середовищем. Тоді відбувається самонавчання-навчання системи без зовнішнього коригування, тобто без вказівок «учителя».

В результаті ІСУ – така система, в якій знання про невідомі характеристиках керованого об'єкта і навколишнього середовища формуються в процесі навчання та адаптації, а отримана при цьому інформація використовується в процесі автоматичного прийняття рішень для поліпшення якості управління.

Необхідна ознака ІСУ – наявність бази знань, яка містить відомості, моделі і правила, що дозволяють уточнити поставлену задачу управління і вибрати раціональний спосіб її вирішення. Різні рівні інтелектуальності відповідають ІСУ та інтелектуальні «у великому» і «в малому».

Інтелектуальні «у великому» – організовані та функціонують відповідно до п'ятьма принципами: – взаємодії з реальним зовнішнім світом через інформаційні канали зв'язку; – відкритості системи для підвищення інтелектуальності і вдосконалення власної поведінки; – наявності механізмів прогнозу зміни зовнішнього світу і власної поведінки системи в умовах, що змінюються; – наявності багаторівневої ієрархічної структури, що відповідає правилу підвищення інтелектуальності і зниження вимог до точності моделей у міру підвищення рівня ієрархії в системі; – зберігання функціонування при розриві зв'язків або втрати керуючих впливів від вищих рівнів ієрархії.

Інтелектуальні «в малому» не задовольняють перерахованим принципам, але використовують при функціонуванні знання як засіб подолання невизначеності вхідної інформації, опису керованого об'єкта або його поведінки.

Експертні системи мають справу з завданнями штучного інтелекту на верхньому рівні, працюючи з символічною інформацією для отримання висновків про навколишнє середовище і формування відповідних управлінських рішень з урахуванням ситуації, або прогнозованої ситуації. Вони накопичують евристичні знання і, маніпулюючи ними, намагаються імітувати поведінку експерта.

Експертний регулятор – це об'єднання традиційного регулятора (контролера) і експертної системи, що утворює верхній, супервизорний рівень управління і включає наступні підсистеми: – підсистема ідентифікації і прогнозу, що забезпечує знаходження математичної моделі об'єкта по співвідношенню між його вихідними і вхідними змінними в процесі функціонування; – база даних, що містить безперервно оновленні попередні, поточні, прогнозні дані про характеристики об'єкта і зовнішнього середовища, а також інформацію про граничні значеннях відповідних параметрів; – база знань, яка містить інформацію про специфіку роботи об'єкта, мету, стратегію і алгоритм управління, результати ідентифікації і прогнозу характеристик об'єкта; – підсистема логічного висновку, що здійснює вибір раціональної для даної ситуації структури і параметрів регулятора, а також алгоритмів ідентифікації та прогнозу; – підсистема інтерфейсу, організуюча інтерактивний режим по наповненню бази знань за участю експерта (режим навчання) і забезпечує спілкування з користувачем-оператором.

Виконання функцій побудови динамічної моделі об'єкта і його середовища, а також підтримки контакту з зовнішнім світом дозволяє відносити експертну систему до класу динамічних (активних), або експертних систем реального часу.

Основу технологій автоматизованого проектування і виробництва, контролю та управління становить метод аналітичного синтезу замкнутих систем управління, і отримані з його допомогою алгоритми управління, дозволяють забезпечити на етапі синтезу задані характеристики процесів управління, а на етапі моделювання задані, або досяжні показники якості.

Технології автоматизованого проектування і управління за складом, структурою, форматам вхідних даних і представлених результатів певною мірою можуть розглядатися як різновид SADT-технології (Structured Analysis and Design Technique). У більш детальному формулюванні, призначенням SADT-технології є проектування та управління процесами, що складаються з послідовності багатофакторних впливів та операцій, що характеризуються сукупністю оптимізованих параметрів якості.

SADT-діаграма початкового «нульового» рівня (А0), сформована на підставі традиційного підходу до проектування процесів, передбачає наявність чотирьох основних функцій (блоків): управління проектуванням (А1), розробка варіанту технологічного процесу (А2), оцінка його собівартості (А3) і оцінка його якості (А4).

Найбільш складною для деталізації є функція (А2) з розробки технологічного процесу. Результатом декомпозиції цього блоку є SADT-діаграма рівня А2, в якій представлені як процеси формування сукупності математичних моделей, що моделює програмний комплекс, так і власне процес моделювання.

Згідно з отриманими з статистичної моделі даними, при структурному синтезі процесу комбінованої обробки, для деталізації на SADT-діаграми технологічної операції доцільно розділяти групи фізико-механічних і геометричних параметрів якості. В результаті проведеного статистичного аналізу отриманих багатофакторним плануванням експериментальних моделей, встановлено, що для управління геометричними параметрами слід використовувати кінематичні фактори і раціонально розміщувати інструмент, а для управління фізико-механічними параметрами – термомеханічні фактори і регулювати потужність концентрованого джерела енергії.

Разом з тим, необхідно відзначити, що зміна умов проведення технологічної операції в зв'язку з випуском інших деталей, вибором нових оброблюваних матеріалів, прогресивних інструментів та інших причин, потребує проведення нових експериментів і накопичення експериментальних даних для побудови статистичних моделей. Тому для управління процесами в динамічних системах в реальному часі потрібні методи ШІ.

Найбільшого поширення при проектуванні ІСУ отримали методи інтелектуального управління: експертні та нечіткі системи; нейронні мережі та генетичні алгоритми.

Нейронні мережі (НМ) – розділ ШІ, для обробки сигналів в якому використовуються явища, аналогічні явищам, що відбуваються в нейронах живих організмів. Їх найважливішою особливістю є можливість паралельної обробки інформації усіма ланками. Величезна кількість міжнейронних зв'язків дозволяє значно прискорити процес обробки інформації і зробити можливим перетворення

сигналів в реальному часі. Велике число міжнейронних зв'язків забезпечує стійкість НМ до помилок: в цьому випадку функції пошкоджених зв'язків беруть на себе справні лінії і діяльність мережі не зазнає істотних збурень.

Генетичні алгоритми (ГА) – велика група методів адаптивного пошуку та багатопараметричної оптимізації, пов'язана принципами природного відбору і генетики. Генетичні алгоритми – це методи випадкового глобального пошуку, копіюють механізми природної біологічної еволюції. ГА оперують з популяцією оцінок потенційних рішень, генеруючи за принципом «виживає найбільш пристосований» все ближчі до оптимального рішення. Процес такої послідовної генерації призводить до еволюції популяцій індивідуумів, які краще відповідають навколишньому середовищу в порівнянні з попередніми.

Системний підхід дозволяє моделювати і управляти технологічним процесом, представленим у вигляді окремих блоків, що істотно спрощує опис складних явищ, не випускаючи з виду просторово-часову структуру модельованої системи, характер зв'язку між окремими рівнями і підсистемами.

В результаті можна стверджувати, що гібридизація є однією з основних тенденцій розвитку систем управління із застосуванням ШІ.

В.С. Антонюк, д.т.н., проф.,[1]
Д.В. Прихожа, студ.,[1]
А.В. Рутковський, к.т.н.,[2]
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»[1],
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка
Національної академії наук України[2]

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ, УТВОРЕНОГО ЗА ДОПОМОГОЮ ЙОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ

Формування на поверхнях деталей машин, робочих органах, інструментах і інших конструкціях необхідних фізичних, хімічних і експлуатаційних властивостей найбільш успішно реалізується при використанні підходів і технологічних методів інженерії поверхні шляхом модифікування їх поверхневих шарів. Модифікування поверхневих шарів дозволить збільшити термін експлуатації деталей шляхом підвищення їх зносо- і корозійної стійкості, відновлення працездатності, а також значно зменшити витрати легованих сталей і сплавів.

Різноманіття видів модифікування поверхневих шарів пояснюється тим, що не один з них не може претендувати на універсальність (азотування, нітроцементація тощо). Застосування даних методів не завжди дозволяє забезпечити всі вимоги до поверхневого шару матеріалу. У зв’язку з цим

актуальним являється розробка нових технологій, за допомогою яких підвищується корозійна стійкість, міцність, а також можливість поєднання в одному матеріалі різних фізичніх властивостей.

Одним з сучасних напрямків підвищення зносостійкості, поверхневої міцності та корозійної стійкості є метод йонно-плазмового термоциклічного азотування заснованого на постійному накопиченні від циклу до циклу позитивних змін в структурі металів за рахунок впливу імпульсів короткої тривалості та великої амплітуди.

Переваги методу йонно-плазмового термоциклічного азотування над традиційним вакуумним азотуванням заключаються в нагрівання поверхневого шару деталі без прогріву її серцевини; скорочення тривалості обробки; залишені без змін форми та чистоти поверхні виробу; екологічно чистому методі.

Цей процес в 1,5–2,0 рази скорочує трудомісткість виготовлення, так як деталі обробляються при невисокій твердості матеріалу і надходять на зміцнення в остаточно обробленому вигляді, а в порівнянні з іншими видами азотування - йонною азотацією і нітроцементацією забезпечує більшу глибину зміцненого шару і більш рівномірну товщину дифузійного шару.

Мета роботи – дослідження параметрів азотованого поверхневого шару матеріалу, при різних режимах обробки, утвореного за допомогою йонно-плазмового термоциклічного азотування.

Для зміцнення поверхневих шарів деталей в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України створений діючий комплекс іонно-плазмового термоциклічною азотування «Віпа-1» (рис. 1), що складається з вакуумної камери і автоматизованої системи контролю та управління.

Обробку поверхні деталі здійснюють шляхом подачі на деталь пульсуючого напруги і в результаті отримують пульсуючі термоциклов, що значно підвищує швидкість дифузійного насичення деталі азотом. При цьому знижується енергоспоживання за рахунок скорочення тривалості процесу і відмови від пічного нагріву. Обробка проводиться у вакуумній камері при відсутності конвективних втрат тепла.

Нагрівання зразка здійснювали за рахунок енергії тліючого розряду. При цьому нагрівався тільки поверхневий шар зразка без повного прогріву його серцевини.

Експериментальні дослідження параметрів поверхневого шару утвореного за допомогою йонно-плазмового термоциклічного азотування проводили на зразках зі сталі 40Х13 ГОСТ 2590-2006.

Іонно-плазмове термоциклічною азотування експериментальних зразків проводили в суміші Ar і N_2, деталі зміцнюючих при циклічній зміні температури 550 °С, при напрузі тліючого розряду 400–600 В.

Експериментальні дослідження на зразках проводили при температурі азотування 450–680 °С, тиск (0,55–1,83) Торр, робоча пульсуюча напруга коливадась від 400 до 1000 В, з тривалістю імпульсу 10–20 мс і величиною

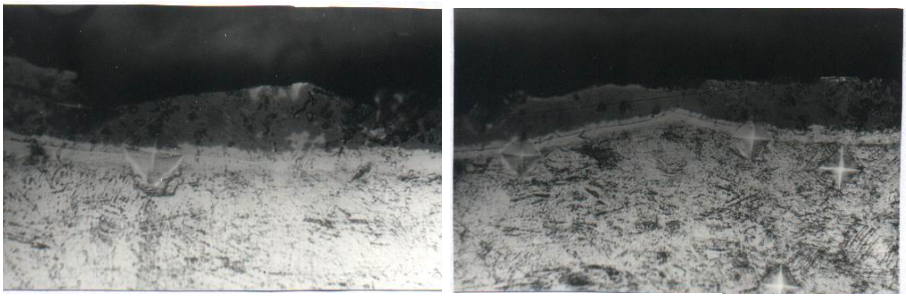
періоду подачі імпульсів 40 мс, при цьому циклічно змінювали температуру процесу вище або нижче температури евтектоїдного перетворення.

Період азотування складав – $t = 50–360$ хв., при цьому повністю виключається повний перегрів деталі.

Насичення поверхні зразків відбувалося рівномірно в камері, що забезпечувало рівномірну глибину дифузійного шару на зразку.

Отримані таким чином, зміцненні деталі методом іонно-плазмового термоциклічною азотування фактично являють модифікований (легований) поверхневий шар матеріалу деталі, який отримують шляхом адресного підведення енергії масообміну.

На рис. 1 показана типова мікроструктура шару зразка. На мікрошліфах видно, колір цієї фази неоднорідний і змінюється у напрямку від поверхні до підкладки, що говорить про різний її складі.



×500 ×800

Рис. 1. Мікроструктура азотованого шару зразка:
Режими обробки: тиск Р =0,6 Торр;температура – Т =450 °С;
час азотування 6 год.

Вимірювання розподілу мікротвердості по глибині шару, показало, що мікротвердість зростає в напрямку від поверхні шару сірої фази до підкладки.

Аналіз отриманих результатів показав, що окрім зміцненого нітридного поверхневого шару матеріалу, на поверхні формується темно-сірий наліт товщиною до 50мкм.

Вивчення мікроструктури зразків показало, що при йонно-плазмовоиу термоциклічному азотуванні зразків зі сталі 40×13 товщина зони азотованого шару складається з сірої фази – 15–47 мкм, та нітридна зона – 2–3 мкм.

Аналізуючи зразки виявлено, що щільність нітридногоповерхневого шару при температурі 600 °С більша від щільності нітридногоповерхневого шару при температурі 540 °С.

Висновки: Дослідження параметрів азотованого поверхневого шару матеріалу, утвореного за допомогою йонно-плазмового термоциклічного азотування при різних режимах обробки,, показали, що наявність нітридного шару матеріалу завжди супроводжується утворення сірої фази а щільність нітридного шару пропорційна величині тиску.

Запропонована технологія термоциклического йонного азотування в безводневих середовищах підвищує твердість, зносостійкість, корозійну стійкість і межа витривалості деталей.

Випробування на корозійно-абразивний знос показали, що азотованні зразки мають більш високу стійкість, ніж зразки отримані іншими способами поверхневого зміцнення.

Зносостійкість зразків азотованих термоциклическим йонним азотуванням приблизно дорівнює стійкості зразків із шаром твердого (гальванічного) хрому товщиною 200 мкм.

В.Е. Бабич, к.т.н., доц.[1],
С.В. Якубовская, к.т.н., доц.[2],
Университет гражданской защиты МЧС Беларуси[1],
Белорусский национальный технический университет[2]

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОРОШКИ ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Технологии магнитно-абразивной обработки позволяют обеспечивать непрерывный контакт абразивной массы из не жестко связанных между собой магнитным полем частиц с поверхностью детали, что делает возможным совмещение чистовой и черновой обработки без переустановки детали. Производительность процессов магнитно-абразивной обработки зависит и от характеристик инструмента: его состава, структуры. Инструментом (единичным) в процессах магнитно-абразивной обработки является магнитная частица физико-механические характеристики, которой обеспечивают резание (износ) различных материалов. Наиболее эффективными в процессах магнитно-абразивной обработки являются частицы состоящие, по крайней мере, из двух компонентов – магнитного и абразивного. При прочих равных условиях производительность процесса магнитно-абразивной обработки будет определяться структурой инструмента (частицы) и его составом. Основными методами получения магнитно-абразивных порошков являются металлургический и порошковой металлургии. Вариация метода порошковой металлургии – плакирование поверхности магнитной компоненты частицы абразивными зернами позволяет получить магнитно-абразивные порошки с повышенным содержанием зерен абразива на поверхности, т. е. участвующих в процессе резания.

В работе методами сканирующей электронной микроскопии изучено влияние гранулометрического состава абразивных зерен, концентрации связующего на морфологию поверхности магнитно-абразивных порошков. В качестве абразива использовали порошки карбида кремния фракции 10/7 мкм и 80/63 мкм, в качестве связующего – легкоплавкое стекло системы $Na_2O{\cdot}ZnO{\cdot}Al_2O{\cdot}P_2O_5$ с температурой начала растекания 700 К, магнитная

компонента – порошок железо-титанового сплава фракции 800/400 мкм. Морфология поверхности порошков определяется концентрацией связующего, соотношением магнитной и абразивной компонент (рис. 1).

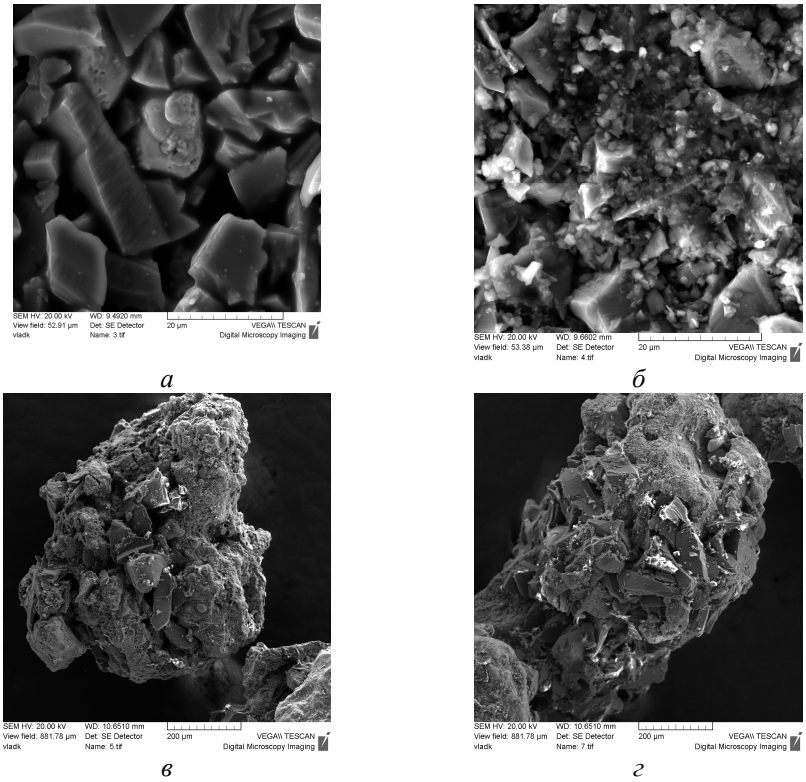


Рис. 1. Морфология поверхности частиц магнитно-абразивного порошка. Объемное содержание связующего в плакирующем слое: а – 20; б – 30 об.%

Абразивная способность композиционных порошков фракции 80/63 (20 об.% связующего) и фракции 10/7 мкм (20, 30 об.% связующего) при магнитно-абразивной обработке пластин твердого сплава ВК-15 составляла $1{,}2\cdot10^{-3}$; $3\cdot10^{-4}$; $8{,}3\cdot10^{-4}$ г/см^2·мин соответственно. Различия в абразивной способности композиционных порошков с карбидом кремния фракции 10/7 обусловлены различной прочностью удержания зерен карбида кремния связующим. Близкие значения режущей способности композиционных порошков фракции 10/7 мкм (30 об.% связующего) обусловлены большей концентрацией зерен карбида кремния участвующих в процессах резания, что свидетельствует о большей эффективности композиционных магнитно-абразивных порошков со структурой магнитное ядро – плакирующий абразивный слой.

Н.О. Балицька, к.т.н., доц.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ТОРЦЕВИМ ФРЕЗЕРУВАННЯМ

Проблема забезпечення якості плоских поверхонь деталей машин на сьогодні є однією з найважливіших у машинобудуванні. Вона обумовлює необхідність вирішення різних задач щодо вдосконалення конструкцій обладнання, інструменту, технологій оброблення тощо.

Якість поверхні та поверхневого шару оцінюється за показниками, які можна розділити на дві групи:

– геометричні показники поверхні;

– фізико-механічні властивості поверхневого шару.

До геометричних показників якості відносять точність розмірів, відхилення форми, хвилястість, шорсткість. До фізико-механічних властивостей поверхневого шару належать мікротвердість, залишкові напруги, структура, хімічний склад.

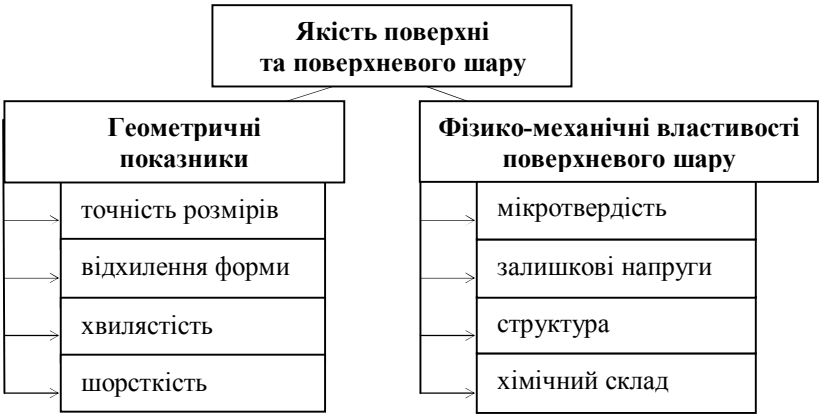


Рис. 1. Показники якості поверхні та поверхневого шару

Основними факторами, що визначають показники якості поверхні, є: точність та жорсткість всієї технологічної системи; режими різання; схема різання та стратегія обробки; конструктивні та геометричні параметри інструмента, його зносостійкість; температура та спосіб охолодження зони різання; спосіб відведення стружки, тривалість обробки тощо.

Найбільш поширеним методом обробки плоских поверхонь деталей машин є торцеве фрезерування, що забезпечує високу продуктивність і оптимальні показники якості оброблених поверхонь. Таким чином, постійно посилюються вимоги до якісних показників поверхонь заготовок отриманих торцевим

фрезеруванням, що викликає необхідність невпинного вдосконалення технологій фрезерування та їх інструментального забезпечення.

Фахівці провідних фірм-виробників різального інструменту та машинобудівних підприємств дають наступні рекомендації для забезпечення високої якості поверхні та поверхневого шару при торцевому фрезеруванні:

– діаметр фрези повинен бути в 1,2–1,5 раза більший за ширину заготовки;

– застосовувати попутне фрезерування для покращення умов відведення стружки та підвищення стійкості ножів фрез, особливо твердосплавних;

– враховувати максимальну товщину стружки та розташування фрези відносно заготовки для вибору оптимальної подачі;

– для отримання дзеркальної поверхні застосовувати високошвидкісне різання та пластини із керметів;

– забезпечувати отримання товстої стружки на вході і тонкої стружки на виході ножа із зони різання для зменшення вібрацій шляхом вибору правильної стратегії обробки (установка фрези зі зміщенням від осі заготовки; з круговою подачею; з безперервним врізанням фрези);

– мінімізувати кількість врізань для зменшення напружень в інструменті, підвищення його стійкості, та зменшення коливань;

– уникати фрезерування переривчастих елементів поверхонь (отворів, пазів), оскільки це навантажує різальні кромки інструмента, створює додаткові врізання і виходи ножів із зони різання, або зменшувати удвічі рекомендовану величину подачі на ділянці заготовки з такими елементами;

– для фрез з круглими пластинами важливо зменшувати подачу при підході до стінки або уступу, оскільки глибина різання в таких місцях різко збільшується;

– застосовувати стандартні пластини у комбінації із однією або двома пластинами Wiper, при цьому подача збільшується до 4 разів без втрати якості обробки;

– для фрезерування в’язких матеріалів використовувати МОР або масляний туман;

– застосовувати пластини з покриттям PVD з гострими кромками на глибинах різання 0,5–0,8 мм;

– для обробки жароміцних сплавів обирати фрези з круглими пластинами, оскільки вони мають найбільш міцні різальні кромки та забезпечують плавне різання;

– обирати фрези з дрібним кроком ножів, а при великій ширині контакту застосовувати фрези з нерівномірним кроком ножів, які стримують виникнення гармонічних коливань та зменшують вібрації.

Забезпечення високої якості поверхонь після торцевого фрезерування, яке часто є завершальним етапом обробки, дозволить забезпечити також і високі експлуатаційні характеристики готових деталей машин, найважливішими серед яких є зносостійкість і опір втомі матеріалу.

К.С. Барандич, к.т.н.,
Д.Є. Іванов, студ.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБУ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ

Генеративні технології, які складають важливий розділ інтегрованих технологій, в останнє десятиліття отримали значний розвиток і охопили надзвичайно об'ємні галузі промислового виробництва в авіації, автомобілебудуванні, приладобудуванні, медициніі, археології тощо.

Генеративний дизайн – це процес конструювання структури деталі та її параметрів при заданому критерії оптимальності зі збереженням або поліпшенням її функціональних можливостей.

На відміну від традиційних технологій проєктування, генеративний дизайн дозволяє змінити стандартну геометрію на геометрію, спеціально адаптовану під певну технологію виготовлення. І це може бути, як традиційна технологія (наприклад, лиття), так і адитивний процес.

Програмне забезпечення для генеративного дизайну (топологічної оптимізації) перебудовує початкову геометричну модель об'єкта. При цьому завантажується геометрична модель виробу, яка раніше створена іншим методом. Завантажуючи модель в певне програмне забезпечення, ми маємо змогу відзначити місця, які не будуть підлягати змінам, наприклад, це можуть бути місця для кріплення.

Все інше, що не потрапило в ці зони, але також належать деталі, називаються *design space*, тобто це ті зони деталі, де програма генерує нову геометрію.

Відповідно до службового призначення виробу та умов експлуатації прикладаються навантаження, які деталь повинна витримувати, тобто створюється силова схема навантажень. І далі, на основі заданих параметрів, програма створює нову оптимізовану геометрію, де критерієм оптимізації є мінімальна маса деталі. Між незмінними місцями для кріплення вона вибудовує нову модель.

Процес побудови нової моделі досить витратний за часом і вимагає великих обчислювальних ресурсів. Далі для верифікації отриманої моделі виконується аналіз напруження в кожному перетині деталі, з метою визначення допустимості отриманої геометрії. При цьому викормстовується метод скінченних елементів. Для кожного елементу виробу програма генерує та вирішує інтегральні рівняння, враховуючи при цьому взаємозв'язок між усіма перетинами.

У випадку негативного висновку виконується перебудова геометрії деталі. Потім геометрія затверджується і може бути передана на наступний етап підготовки виробництво.

Генеративний дизайн, як правило, має аморфні форми, в яких немає плоских, прямих ліній, а можуть бути сплайни другого порядку. При дотриманні тих же самих експлуатаційних властивостей деталі таке моделювання дозволяє зменшити масу виробу, що є дуже важливим при проектуванні та виготовленні багатьох механізмів та машин. Зниження маси виробу при збереженні функціоналу виробу – це завдання номер один в літакобудуванні, авіакосмічній галузі і автомобілебудуванні тощо.

Для топологічної оптимізації обирають деталі в механізмах приладів та машин, які припускають зменшання маси при збереженні їх експлуатаційних властивостей.

Як приклад розглянуто деталь «Коромисло», яка є відповідальною деталлю при роботі поворотного механізму (рис. 1).

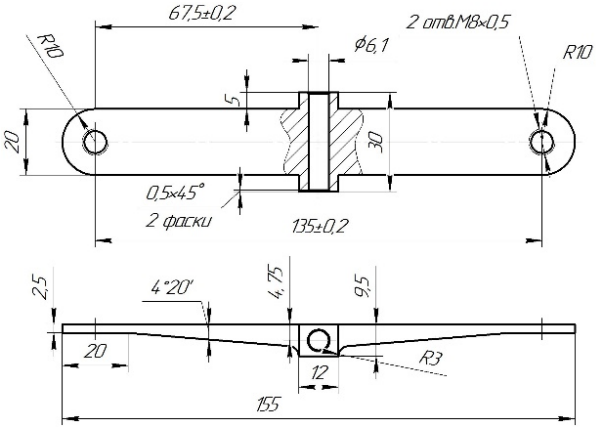


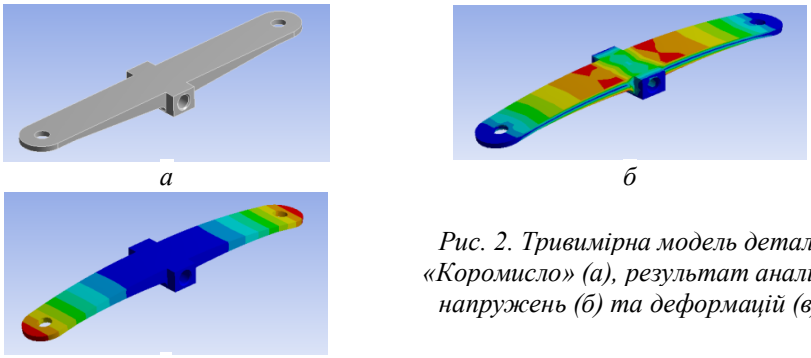
Рис. 1. Ескіз деталі «Коромисло»

Деталь виготовлена зі сталі 40Х ГОСТ 4543-71 та має масу 102 г. На першому етапі аналізували початкова геометрія деталі, яка орієнтована для виготовлення традиційними методами виробництва на універсальному обладнанні. Тривимірну модель деталі створювали в програмному середовищі Solid ST 10 (рис. 2, *а*), яку в подальшому імпортували в ANSYS Workbench.

Використання програмного забезпечення ANSYS обумовлено необхідністю аналізу стану деталі в процесі її експлуатації. Програма дозволяє моделювати закріплення та прикладені сили на деталь, що в свою чергу дає можливість визначити розподіл напружень в матеріалі деталі та деформації.

Для аналізованої деталі виконували її закріплення у вигляді фіксації по внутрішній поверхні центрального отвору, а прикладання робочих сил здійснювали на внутрішні циліндричні поверхні отворів під кріплення. Виходячи з умов експлуатації величина робочих сил складала 500 Н.

Результат аналізу моделювання напружень та деформації представлено на рис. 2, *б* та рис. 2, *в*, з яких видно, що напруження знаходяться в діапазоні від 212,26 кПа до 63,113 МПа, а деформація – від 0 до 0,28336 мм.

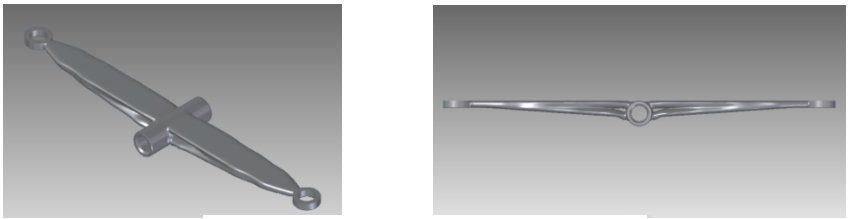


а *б* *в*

Рис. 2. Тривимірна модель деталі «Коромисло» (а), результат аналізу напружень (б) та деформацій (в)

Далі переходили до етапу топологічної оптимізації, яку виконували також в середовищі Solid ST 10, де критерієм оптимізації деталі була її мінімальна вага.

Для цього випадку виконували зменшення ваги деталі на 50%, результати якого представлені на рис. 3, *а* та рис. 3, *б*.



а *б*

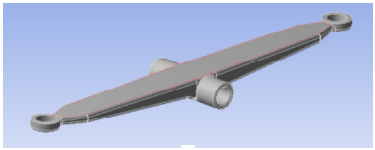
Рис. 3. Результат генеративного дизайну: ізометричний вид (а), вид зліва (б)

Через складність отриманої форми поверхні деталі дане рішення потребує подальшого допрацювання спеціалістом.

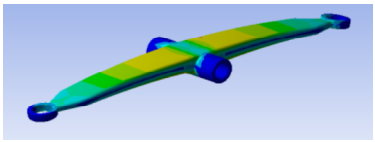
Таким чином, отримано модель деталі (рис. 4, *а*), яка має масу 61,5 г, що приблизно на 40% менше від початкової маси деталі. Далі повторювали етап аналізу напружень і деформаціїї, як і для початкової деталі у програмному середовищі ANSYS, результати представлені на рис.4, *б* та рис.4, *в*.

При цьому значення напруження знаходяться в діапазоні від 23,951 кПа до 105,48 МПа, а диформації – від 0 до 0,3258 мм. На цьому етапі аналізується можливість використання деталі з такою геометрією в механізмі з огляду на її фізико-механічні характеристики, якщо результат аналізу є негативним, то відбувається повторна оптимізація моделі деталі

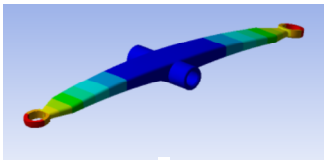
Висновок. Використання методів генеративного дизайну та програмного забезпечення Solid ST 10 при моделювання конструкції виробу дозволило зменшити масу удосконалених деталей при збереженні їх експлуктаційних властивостей.



а



б



в

Рис. 4. Тривимірна модель деталі «Коромисло» (а), результат аналізу напруженнь (б) та деформацій (в)

В.С. Биткаша[1],
Н.С. Хомич, к.т.н.[1],
С.В. Якубовская, к.т.н.[2],
Унитарное предприятие «Полимаг»[1],
Белорусский национальный технический университет[2]

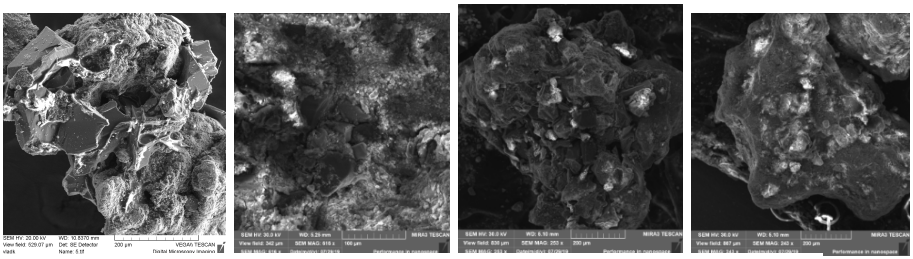
МЕХАНИЗМ ИЗНАШИВАНИЯ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК-15 ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Технологические, экономические показатели процессов абразивной обработки при прочих равных условиях определяются видом, структурой, составом применяемых инструментов. В процессах магнитно-абразивной обработки применяется специфический вид инструмента, представляющий собой множество частиц объединенных в сгусток магнитным полем. Единичным инструментом является отдельная частица, однако режущими элементами (единичными инструментами на микроскопическом уровне) являются вершины, грани либо зерна абразива, на ее поверхности. Форма, размеры, физико-механические характеристики, площадь, занимаемая ими на поверхности магнитно-абразивной частицы будут определять эффективность процессов и качество обработки поверхности. В процессах магнитно-абразивной обработки применяются материалы различного состава, структуры. Очевидно, что максимальную концентрацию режущих элементов обеспечивает структура, включающая ядро (магнитное) на поверхности которого расположены режущие элементы – зерна абразива.

Методами электронной сканирующей микроскопии, энергодисперсионного анализа изучено влияние концентрации абразивных зерен в магнитно-абразивном порошке на морфологию поверхности пластин твердого сплава ВК-15. В качестве магнитно-абразивного порошка использовали порошок (ферроабраз-310) фракции 1000/400 мкм, на поверхности частиц которого

расположены зерна карбида кремния фракции 80/63 мкм. Концентрация карбида кремния в магнитно-абразивных порошках составляла 8 и 15 мас.%. Обработку пластин твердого сплава проводили на установке М-14 (производства УП «Полимаг», Беларусь) при скорости вращения магнитного индуктора 600 об/мин. Длительность обработки составляла 10 и 15 мин.

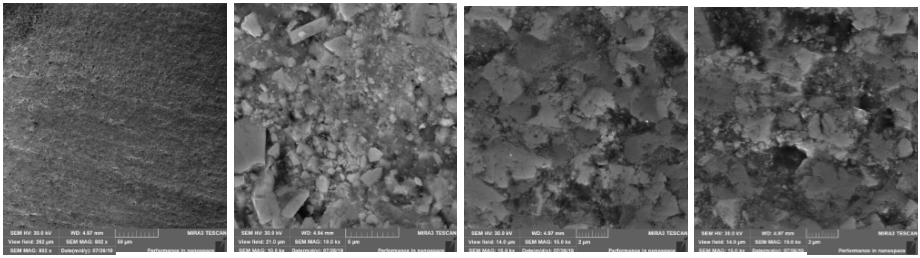
Магнитно-абразивная обработка пластин твердого сплава сопровождается изменением морфологии поверхности магнитно-абразивных порошков (рис. 1). В порошке с 8 мас.% карбида кремния зерна выкрошены уже после 10 мин обработки (рис. 1 *а*, *б*). В порошке с 15 мас.% карбида кремния зерна карбида после 10 мин обработки выкрошены частично и присутствуют на поверхности магнитно-абразивного порошка после 15 мин обработки (рис. 1 *в*, *г*).



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Морфология поверхности магнитно-абразивных порошков после обработки пластин твердого сплава ВК-15.
Содержание зерен карбида кремния, мас.%: а, б – 8; в, г – 15.
Длительность обработки, мин: а – исходное состояние, в – 10; б, г – 15

Микрорельеф на поверхности пластин твердого сплава представляет собой совокупность выступов со сглаженными вершинами, на фоне которых расположены отдельные более крупные (5–8 мкм) впадины. Магнитно-абразивная обработка пластин (10 мин), вне зависимости от состава порошка, формирует на поверхности микрорельеф образованный пологими гребнями и впадинами, ориентированными в направлении обработки, среди которых присутствуют борозды, также ориентированные в направлении обработки (рис. 2, *а*). Микрорельефы, образованные на поверхности пластин после их обработки в течение 10 и 15 минут порошком с 15 мас.% зерен карбида кремния, представляют собой совокупность частиц карбида вольфрама со следами сколов, выступающими из кобальтовой матрицы. После 15-минутной обработки, микрорельеф представляет собой совокупность разрушенных и целых частиц карбида вольфрама со следами разрушений на поверхности (рис. 2, *б*). Обработка пластин твердого сплава порошком с 8 мас. % зерен карбида кремния в течение 10 и 15 мин, формирует сглаженные микрорельефы, образованные частицами карбида вольфрама со следами обработки на поверхности и углублениями от разрушенных зерен (рис. 2, *в*).



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Морфология поверхности пластин твердого сплава ВК-15 после обработки магнитно-абразивными порошками с 8 мас. % (а, в, г) и 15 мас. % (б) зерен карбида кремния.
Длительность обработки, мин: а, в – 10; б, г – 15

Шероховатость поверхности пластин после обработки магнитно-абразивными порошками с 8 и 15 мас.% карбида кремния в течение 15 мин снижается с 1,055–1,100 мкм до 0,784–0,856 мкм и 0,852–0,876 мкм соответственно.

Морфология поверхностей пластин после магнитно-абразивной обработки порошками с 8 и 15 мас. % карбида кремния показывает, что изнашивание твердого сплава происходит по абразивному механизму, несмотря на близкие значения микротвердости карбида вольфрама и карбида кремния. Однако микрорельефы на поверхности частиц карбида вольфрама указывают на изнашивание по механизму хрупкого разрушения (рис. 2, *б*). Рельеф, образованный на поверхности пластин твердого сплава имеет признаки (борозды ориентированные в направлении обработки) характерные для абразивного механизма изнашивания, однако волнистый микрорельеф из гребней и впадин нельзя однозначно отнести к морфологическим признакам абразивного механизма изнашивания. Различия между микрорельефами, образованными порошками с 8 и 15 мас.% карбида кремния могут быть обусловлены как более интенсивным воздействием порошка с большей концентрацией карбида кремния, так и воздействием вершин, граней материала ядра. Увеличение концентрации зерен карбида кремния в порошке приводит к более интенсивному динамическому воздействию их вершин, граней на поверхность частиц карбида вольфрама. Следствием этого является формирование в частицах карбида вольфрама сети микротрещин (нарушенного приповерхностного слоя) и снижению их прочности. Внедрение вершины зерна карбида кремния, выступающей над остальными, в зерно карбида вольфрама и перемещение в нем, приводит к образованию борозды. Множественные соударения вершин зерен карбида кремния с поверхностью пластин (а также размерный фактор) нивелируют различия в физико-механических характеристиках карбида вольфрама и кобальта и способствуют формированию сглаженных микрорельефов. Волнистый микрорельеф на поверхности пластин возникает вследствие неравномерного распределения частиц и различий

значений магнитной индукции в сгустке. При концентрации частиц карбида кремния в порошке 8 мас. % в изнашивании поверхности пластин (дефектного поверхностного слоя) участвуют вершины и грани железо-титанового сплава ядра с меньшей твердостью, чем карбид вольфрама, что и приводит к формированию различных морфологий поверхности пластин.

Основным механизмом изнашивания пластин твердого сплава при магнитно-абразивной обработке является хрупкое разрушение, сопутствующим – абразивное изнашивание.

Т.Є.Божко, к.т.н.,
Т.Н. Гальчук, к.т.н.,
Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ПРИ ТОКАРНІЙ ОБРОБЦІ ПОРИСТОГО МАТЕРІАЛУ

На мікрорельєф поверхневого шару, поряд з пористістю й розмірами спеченого виробу, впливають і технологічні умови обробки: режими різання, силовий та температурний вплив процесу різання. В літературі питання впливу режимів обробки на якість поверхні пористих тіл висвітлені недостатньо. Тому проведення теоретичних та експериментальних досліджень в цьому напрямку є актуальними.

Експерименти проводились на зразках із порошків заліза марки ПЖР-3. Для дослідів використовувались зразки пористістю 10, 15, 25 та 30%, які виготовлялись методом гідростатичного формування та спікалися при температурі 1050 ^{o}C в захисному середовищі.

Було проведено дослідження впливу подачі на чистоту обробленої поверхні для матеріалів різної пористості. Виявлено, що із зміною подачі від 0,035 до 0,4 мм/об чистота обробленої поверхні матеріалів безперервно погіршується. Вплив подачі на чистоту зростає зі збільшенням пористості матеріалу. Якщо із зміною подач від 0,035 до 0,1 мм/об при обробці матеріалу з пористістю 30% висота мікронерівностей для заліза на 94 мкм, то при обробці матеріалу з пористістю 10% це збільшення відповідно дорівнює 85 мкм.

Було проведено дослідження впливу швидкості різання на шорсткість поверхні. Виявлено, що чистота обробленої поверхні зі збільшенням швидкості різання покращується і тим більше, чим нижче пористість. У діапазоні швидкостей різання 30–300 м/хв зі зростанням швидкості різання висота мікронерівностей зменшується більш різко при обробці матеріалу з пористістю 30%. При подальшому підвищенні швидкості різання від 300 м/хв і вище чистота обробленої поверхні поліпшується незначно, особливо для низько пористого матеріалу. Це призводить до того, що при високих швидкостях різання пористість матеріалу практично мало впливає на чистоту обробленої

поверхні. Такий вплив швидкості різання на чистоту можна пояснити дією температурною-швидкісного чинника на фізико механічний стан матеріалу в зоні різання, так як температура різання при інших рівних умовах зі збільшенням пористості зростає. Крім того, погіршення чистоти обробленої поверхні при зниженні швидкості різання пов'язане зі структурними особливостями пористого матеріалу.

Чистота обробленої поверхні при низьких швидкостях різання неоднорідна і характеризується наявністю блискучих ділянок, які мають форму лусочок, видимих зерен і навіть відкритих пор, що виходять на поверхню. Кількість і розмір таких розривів помітно зменшуються при зниженні пористості оброблюваного матеріалу і підвищення швидкості різання.

Було проведено дослідження впливу переднього кута різця на чистоту обробленої поверхні пористого матеріалу. Найбільш чиста поверхня виходить при обробці різцем, передній кут якого коливається в межах ± 5°. Збільшення і зменшення переднього кута різця від оптимальних значень призводить до збільшення шорсткості поверхні, причому до більш помітного погіршення чистоти обробленої поверхні веде зменшення переднього кута. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням кута різання або зі зменшенням переднього кута ускладняється напружений стан матеріалу в зоні різання.

Досліджено вплив радіуса заокруглення різальних кромок різця на чистоту обробленої поверхні. Помічено, що із збільшенням радіуса заокруглення ріжучих кромок до 3 мм, то висота мікронерівностей різко зменшується. Це зменшення складає 11 мкм для пористості 30%, 8 мкм для пористості 25% і 5 мкм для пористості 15%. При наступному збільшенні радіуса заокруглення ріжучих кромок чистота обробленої поверхні може дещо погіршитись, якщо пружна система деталь – верстат – інструмент не володіє достатньою жорсткістю.

Висновки:

1. Найбільш суттєвий вплив на чистоту обробленої поверхні пористих матеріалів має подача. З метою поліпшення чистоти обробленої поверхні необхідно застосовувати малі подачі, причому чим вища пористість матеріалу, тим менше за інших рівних умов має бути подача.

2. Швидкість різання також впливає на чистоту обробленої поверхні пористих матеріалів. Для отримання високої чистоти обробленої поверхні при обробці матеріалів з різною пористістю необхідно збільшувати швидкість різання тим більше, чим вище пористість матеріалу.

3. На чистоту обробленої поверхні пористих матеріалів суттєво впливає радіус заокруглення ріжучих кромок різців. З метою поліпшення чистоти обробленої поверхні необхідно застосовувати великі радіуси заокруглення, причому радіус заокруглення повинен бути тим більше, чим вище пористість матеріалу.

4. Найкраща чистота обробленої поверхні пористих матеріалів виходить при роботі різцем, передній кут якого не виходить з меж ± 5°.

І.А. Бойко, к.т.н.[1],
Л.Й. Івщенко, д.т.н., проф.[2],
АТ «Мотор Січ»[1],
Національний університет «Запорізька політехніка»[2]

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ БАГАТОКООРДИНАТНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Широке застосування в сучасному машинобудуванні високошвидкісних багатоцільових верстатів (БЦВ) призводить до появи можливості значного скорочення циклу обробки деталей і вузлів за рахунок об'єднання операцій технологічних процесів, скорочення машинного часу обробки при застосуванні принципів і стратегій високошвидкісного різання тощо. Не обійшли ці тенденції такі високотехнологічні і наукоємні галузі виробництва як авіадвигуно- і ракетобудування.

Основними особливостями деталей, що застосовуються у авіадвигунобудуванні є складна вихідна геометрія, високі вимоги до точності і шорсткості оброблених поверхонь. Приблизно 70% усіх відповідальних вузлів турбореактивних двигунів виготовляються із матеріалів, що відносяться до групи важкооброблюваних (S за класифікацією ISO 513:2014).

Виконання багатокоординатної обробки на БЦВ нерозривно пов'язано із необхідністю вирішення великої кількості технічних задач, серед яких: раціональне використання робочої зони верстата враховуючи необхідність обертання поворотних і переміщення рухомих вузлів; необхідність використання інструментальних оправок і інструментів з великим вильотом; постійна зміна величин частот власних коливань і амплітуди коливань переднього кінця шпиндельного вузла в залежності від того, в якій частині робочої зони верстата відбувається обробка тощо.

Однією з найголовніших умов забезпечення оброблюваності важкооброблюваних матеріалів є висока динамічна якість металорізального обладнання, яка характеризується рівнем супротиву системи до виникнення коливань та ступенем впливу вимушених коливань на точність обробки і шорсткість оброблених поверхонь. Різання важкооброблюваних матеріалів супроводжується значним тепловиділенням, що значно знижує стійкість різального інструменту і призводить до його передчасного руйнування, а також збудженням коливань, які погіршують шорсткість оброблених поверхонь та зменшують період працездатності обладнання.

Однак висока динамічна якість технологічного обладнання не єдина передумова забезпечення оброблюваності важкооброблюваних матеріалів. Пристосування, що використовується для встановлення деталі на стіл верстата, значною мірою може вливати на показники його динамічної якості. За рахунок використання запропонованого у пристосування вдалось значно розширити кількість оброблених за одну установку поверхонь, забезпечити мінімальні вильоти різального інструменту і оправок, уніфікувати оснащення і відкинути

необхідність виготовлення окремого пристосування для кожної деталі, перенести процес різання у більш сприятливу зону у межах робочої зони верстата.

Незважаючи на те, що більшість БЦВ оснащуються високошвидкісними шпиндельними вузлами, максимальна частота обертання котрих сягає 40000 об/хв., а продуктивність різання сучасними інструментами значно підвищилась, важкооброблюваних матеріалів і надалі обробляються у нижньому діапазоні частот обертання шпинделя (до 2500 об/хв.). Висока в'язкість жароміцних матеріалів зумовлює обробку із значними силами різання, що в свою чергу вимагає забезпечення високої потужності мотор-шпинделя у нижньому діапазоні частот обертання. Зазначені особливості вимагають застосування нових підходів при призначенні режимів різання і підборі стратегій обробки. Одним із таких засобів підвищення продуктивності різання є використання принципів фрезерування із високими подачами. Особлива геометрія різального інструменту забезпечує можливість різання із подачами від 0,3 до 2 мм/зуб.

Наявність інформації щодо таких динамічних характеристик, як частоти власних коливань елементів верстата і амплітуди коливань збудження, дозволяє забезпечити оминання резонансних явищ при різанні важкооброблюваних матеріалів ще на етапі технологічної підготовки виробництва і розробки керуючих програм, що в свою чергу забезпечить значне зростання продуктивності обробки.

Ю.І. Бойко, к.т.н., доц.[1],
О.В. Семена, студ.[1],
В.А. Яновський, доц.[2],
Національний університет харчових технологій[1],
Державний університет «Житомирська політехніка»[2]

ЗАХИСНЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ МЕТАЛІВ МЕТОДОМ ХІМІЧНОГО ОСАДЖЕННЯ ІЗ ГАЗОВОЇ ФАЗИ

Корозія металів завдає колосальної шкоди сучасним економікам. Ці втрати могли б бути в сотні і тисячі разів більше, якщо не захищати поверхню металевих виробів, завдяки нанесенню на поверхню різних захисних шарів або плівок, або модифікуючи властивості поверхні.

Існує два підходи до вирішення проблеми. З одного боку, щоб підвищити корозійну стійкість (жаростійкість, жароміцність) і зносостійкість металевих виробів, створюються нові матеріали. Але при цьому існує досить суттєвий недолік – висока вартість тугоплавких і корозійностійких матеріалів. А другий підхід – нанесення цих металів у вигляді захисних шарів на відносно недорогий матеріал основи деталі.

Як правило, після використання фізичних методів осадження деталі вимагають додаткової обробки, що вкрай важко після нанесення, наприклад,

твердих і крихких керамічних покриттів, типу оксиду цирконію, корунду. Мінімізувати подібні негативні ефекти можна методом хімічного осадження з газової фази (Chemical vapor deposition, CVD). Для обробки цим методом деталь поміщають в пари одного або декількох речовин, які, вступаючи в реакцію і/або розкладаючись, утворюють на поверхні деталі необхідний матеріал покриття або плівки. Газоподібні продукти реакції несуться з зони осадження потоком газу-носія. Але і у методу CVD в існуючому сьогодні вигляді, є свої недоліки. Справа в тому, що для осадження покриттів з тугоплавких металів, як правило, використовують їх галогеніди, які вимагають високих температур, а це неприйнятно для більшості матеріалів-підкладок. Для зниження температури осадження, їх відновлюють воднем. Однак вплив водню на матеріали покриття і підкладки може призводити до утворення нових сполук і фаз, викликати деградацію структури матеріалів і їх додаткову крихкість. Тому важливо скорегувати метод CVD таким чином, щоб покриття, що відповідають за своїми якостями всім вимогам (міцні, безпористі, тугоплавкі) можна було наносити в безводневому середовищі. Для реалізації цього процесу необхідно одночасно подавати в зону осадження газоподібні галогеніди тугоплавкого металу (тантал, молібден і ін.) та металу-відновника - цинку або кадмію. Відновлення галогеніду супроводжується осадженням плівки металу. Для отримання карбідних плівок в зону реакції додатково подають чотирихлористий (або чотирьохбромістий) вуглець або проводять відновлення метаном.

Висновок. Пропонована методика нанесення дозволить створювати багатошарові захисні покриття на поверхні деталей, що складаються з верхнього щільного шару осаджених матеріалів (з щільністю близькою до теоретичної) і дифузійного шару, що забезпечує високу зчіплюваність покриття з матеріалами, що потрібно захистити, тобто пропоновані технологічні рішення дозволять проводити безводневе, відносно низькотемпературне газофазне осадження покриттів на деталі складної форми, отримуючи високочисті покриття, відтворювані за складом.

О.С. Бондарчук, студ.,
В.Д. Головня, к.пед.н.,
Державний університет «Житомирська Політехніка»

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ CO_2–ЛАЗЕРНОГО РІЗАКА

Одним з найбільш значущих винаходів минулого століття можна вважати винахід лазера, який зараз використовується практично у всіх сферах життя. Слово LASER утворилося від скорочення англійського словосполучення «light amplification by stimulated emission of radiation» – «посилення світла за допомогою вимушеного випромінювання»

Ще в 1916 р. Альбертом Ейнштейном було зпрогнозовано можливість переходу атомів з вищого енергетичного стану в нижчий під дією зовнішнього впливу. При цьому переході звільняється деяка кількість енергії, і таке випромінювання називається вимушеним. Вимушене випромінювання і лежить в основі роботи лазерів.

Принцип дії лазера ґрунтується на вимушеному випромінюванні фотонів світла під впливом зовнішнього електромагнітного поля.

Ефект лазера (лазерна генерація) може виникнути тільки в тому випадку, коли число атомів у збудженому стані перевищує число атомів в стані спокою. Середовище з такими характеристиками, можна підготувати, накачавши його додатковою енергією з певного зовнішнього джерела. Ця операція так і називається – накачування. Саме від способу накачування і розрізняються лазери за типами. Накачування може здійснюватися при впливі електромагнітного випромінювання, електричного струму, електричного розряду, пучка релятивістських електронів, а також хімічної реакції. Вид використовуваної енергії залежить від того, яке саме застосовується активне (робоче) середовище.

Використання газу в лазері в якості активного середовища, має дуже важливу якість – це висока оптична однорідність, тобто промінь світла в газі розсіюється і спотворюється в найменшій мірі. Лазер на основі газу характеризується високою спрямованістю і монохроматичністю випромінювання, а також може працювати в безперервному режимі. Набагато підвищити потужність газового лазера можна при використанні різних методів збудження і збільшення тиску газу. Тому данні лазери найбільш часто використовуються там, де необхідна дуже висока спрямованість і монохроматичність променю. Найперший газовий лазер був створений в 1960 році на основі суміші гелію і неону, який до цього дня залишається найбільш поширеним. Після цього було створено (і ще створюються), безліч найрізноманітніших газових лазерів, де використовуються квантові переходи нейтральних іонів, атомів і молекул в різних діапазонах спектру світлового променю (від ультрафіолетового до інфрачервоного, і навіть рентгенівського випромінювання).

Лазерні різаки – чудові інструменти, що дають можливість створювати багато різних речей. Від простих ящиків до гравірування детальної графіки на дереві чи побудови складних тривимірних об’єктів.

Лазерний різак – це машина, керована комп'ютером, яка використовує лазерний промінь для точного вирізання або гравірування матеріалу. Лазерний промінь змушує матеріал локально горіти, плавитися або випаровуватися. Вид матеріалу, який лазер може вирізати, залежить від типу лазера та конкретної потужності машини.

Загалом CO_2 лазерні різаки складаються з: CO_2–лазерної трубки, високовольтного блоку живлення, чиллеру (для охолодження трубки), системи дзеркал (для перенаправлення лазерного променю), лазерної головки з лінзою, електронної системи контролю та керування. Робота лазерного різака зводиться до того аби перенаправити та сфокусувати лазерний промінь в потрібному місці.

Лазерне випромінювання виходить з трубки та потрапляє на дзеркало (рис. 1), встановлене під кутом 45° і повертає промінь на 90° в робочу зону. Наступне дзеркало закріплено на профілі осі X (рис. 2), переміщується разом з цією віссю, воно також повертає промінь на 90°.

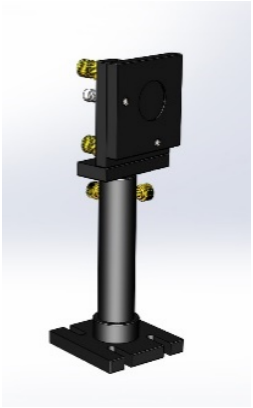


Рис. 1. Тримач першого дзеркала



Рис. 2. Тримач другого дзеркала

На самій вісі встановлена каретка з спеціальної головкою в якій крім ще одного дзеркала, що повертає промінь з горизонтальної площини вертикально вниз, встановлена фокусна лінза (рис. 3), яка збирає лазерний пучок в точку. Таким чином відбувається переміщення лазерного випромінювання в площині XY (рис. 4).

Товщина яку може різати лазерний різак, безпосередньо залежить від потужності лазерної трубки. Лінза спочатку фокусує потужність лазерного променю вниз в єдину точку. Відстань між лінзою та точкою фокусування називається фокусною відстанню, чим далі від фокусу знаходиться матеріал, тим менша потужність променю буде досягати його, тому якщо ми намагаємося вирізати щось досить тонке скажімо, 6-міліметровий матеріал, тим більша потужність лазеру буде зосереджена на цьому (рис. 5), для більш товстішого матеріалу потрібно використовувати більш потужніший лазер.



Рис. 3. Тримач третього дзеркала у зборі з лазерною

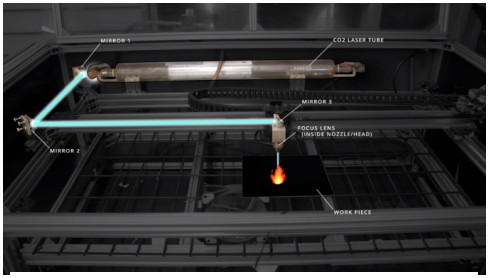


Рис. 4. Кінематика CO_2 лазерного різака



Рис. 5. Фокус лазерного променю

Оскільки більш потужні лазери є досить вартісними, обмежимо масштаб проекту. Опиратимемось на те, що вартість має бути такою, щоб мати можливість використовувати його для хобі та малого бізнесу, а це означає, що будемо розглядати CO_2–лазери з діапазоном потужності між 40 і 120 Вт, звісно цього недостатньо для розрізання металу, але таким лазером можна обробляти такі матеріали як: дерево, фанера, шкіра, резина, папір, акрил (оргскло), пластмаси, а також гравіювати граніт, мармур, кераміку, скло.

Виходячи з цього заводський лазерний різак буде мати досить малу робочу зону, що в деяких випадках може викликати неможливість обробки. Саме тому була розпочата розробка лазерного CO_2 різака з робочим полем 900x1200 мм.

На даний момент спроектовано тримачі дзеркал, лазерну голівку, направляючі та корпусні елементи різака. Також прорахована кінематика осей та приблизна вартість виготовлення. Всі розрахунки та проектування проводяться з урахуванням складності складання готового різака, можливість вдосконалення та співвідношення ціна/якість. Так наприклад, переміщення по вісі Y проводиться на роликах, а переміщення по вісі X на рейсовій направляючій, оскільки на цій вісі встановлена голівка, яка у випадку гравіювання буде переміщуватись швидше відносно вісі X. Деякі елементи конструкції можна виготовити за допомогою адитивних технологій (3D–принтера).

На підставі вище сказаного можна зробити висновок, що власна розробка та складання CO_2 лазерного різака є більш економічно доцільною у порівнянні з готовими рішеннями, що присутні на ринку.

В.П. Ботвинко, к.т.н., с.н.с.,
С.Ан. Клименко, к.т.н,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

СТІЙКІСТЬ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ТВЕДОГО СПЛАВУ ПІСЛЯ ХІМІЧНОЇ ПАСИВАЦІЇ

На сьогоднішній день практично всі провідні виробники твердосплавних різальних інструментів наносять на робочі поверхні захисні, зносостійкі покриття. Найбільш часто в якості матеріалу покриттів використовують нітриди та карбіди різних тугоплавких металів нанесені PVD, CVD методами.

В даній роботі розглянуто альтернативний метод підвищення стійкості твердосплавних різальних інструментів марки Т15К6 та Т5К10 шляхом пасивації їх робочих поверхонь хлорним залізом та розчином Мурокамі, що дає змогу створити поверхневий твердий шар із карбідів WC, (Ti,W)C з високоточним рівнем дискретності, який міцно з'єднаний з основою інструменту.

При пасивації відбувається часткове витравлення кобальту з поверхневого шару інструменту з утворенням міцно зчеплених з карбідним скелетом солей тугоплавких металів вольфраму та титану, які є відомими антифрикційними присадками (типу MoS_2, WS_2).

Стійкісні дослідження отриманих інструментів проводилися при точінні сирої сталі ХВГ (220–240 НВ). Результати досліджень приведені на рис. 1.

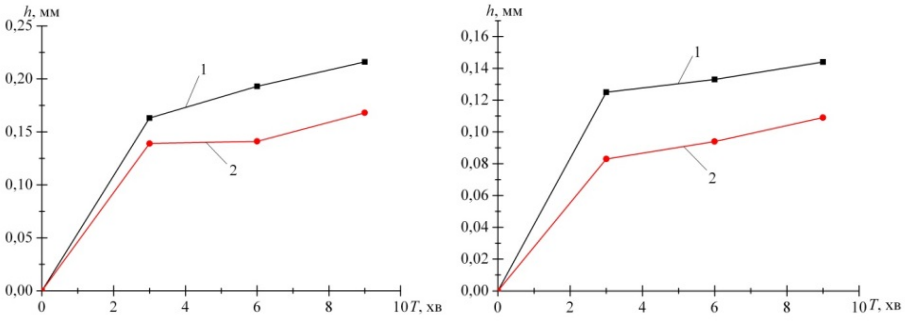
Аналіз отриманих результатів показує, що використання хімічної пасивації дозволяє підвищити стійкість різальних інструментів в середньому на 35–40 %. Такий ефект досягається тим, що після пасивації на поверхні різального інструменту утворюється шар карбідного скелета з підвищеною твердістю та високими антифрикційними властивостями, що дозволяє зменшити адгезійну взаємодію поверхні інструменту зі стружкою.

Механізм зношування інструментів, які піддавались пасивації та стандартних інструментів має схожий характер – інтенсивне абразивне стирання по задній поверхні та утворення лунки зносу по передній поверхні, проте слід відмітити, що при використанні інструменту після пасивації спостерігається зменшення інтенсивності утворення наросту на передній поверхні, що пов'язано із зменшенням тертя на контактних ділянках інструменту та зменшення адгезійної взаємодії з оброблюваним матеріалом.

В деяких випадках, при використанні агресивних розчинів на основі $FeCl_3$, який інтенсивно розчиняє кобальт, може викликати підвищення пористості поверхні, що послаблює міцність робочих поверхонь інструменту.

Після пасивації твердого сплаву марки ВК3М хлорним залізом ($FeCl_3$) подальше вивчення робочих ділянок інструменту безконтактним інтерференційним нанопрофілометром Micron-Alpha показало, що процес пасивації суттєво впливає на топографію поверхні, підвищуючи їх шорсткість в середньому до двох раз по параметру *Rz*. Лабораторна перевірка інструментів,

які пройшли процес пасивації агресивними розчинами показала зменшення стійкості інструментів, а в деяких випадках руйнування і викришування різальної кромки, що пов'язано з її ослаблюванням.



а *б*

Рис. 1. Залежність стійкості різальних інструментів від часу точіння сталі ХВГ для а – Т15К6; б – Т5К10;
1 – стандартний інструмент, 2 – після хімічної пасивації
(v =110 м/хв; S = 0,14 мм/об; t = 0,25 мм)

О.О. Бочечка, д.т.н., с.н.с.,
Т.О. Куриляк, к.т.н.,
С.А. Клименко, д.т.н., проф.,
М.Ю. Копєйкіна, к.т.н., с.н.с.,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

ТЕХНОЛОГІЧНІ МОЖЛИВОСТІ ЛЕЗОВОГО ІНСТРУМЕНТУ, ОСНАЩЕНОГО НАНОКОМПОЗИТОМ «АЛМАЗ-WC»

Широке застосування в сучасному виробництві виробів з твердих сплавів, кольорових металів і сплавів, полімерних та інших композиційних матеріалів вимагає вдосконалення технологій їхньої механічної обробки, що забезпечують як високу продуктивність, так і необхідну якість оброблених поверхонь. Для їх лезової обробки найбільш перспективними є різальні інструменти, оснащені полікристалічними надтвердими композитами на основі синтетичного алмазу (ПКА).

Однією з основних сучасних тенденцій удосконалення робочих матеріалів для різальних інструментів є застосування наноструктурних композитів. Це в повній мірі відноситься і до полікристалічних надтвердих матеріалів. Перспективним показало себе використання в наноструктурних ПКА вольфраму та його сполук.

У даній роботі, на прикладі точіння зразків з ряду конструкційних матеріалів, розглянуто технологічні можливості різального інструменту, оснащеного пластинами RNMN 070300 з нанокомпозиту «алмаз-WC».

Порівняння працездатності інструментів з композитом «алмаз-WC» і алмазно-твердосплавних пластиною (АТП) (ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України) під час точіння твердого сплаву ВК15 показало істотно велику ефективність першого при швидкостях різання > 20 м/хв. (рис. 1). При цьому зношування інструменту має абразивний характер і в процесі точіння переважно зношується задня поверхня інструменту з утворенням фаски зносу без істотного руйнування різальної кромки (рис. 2).

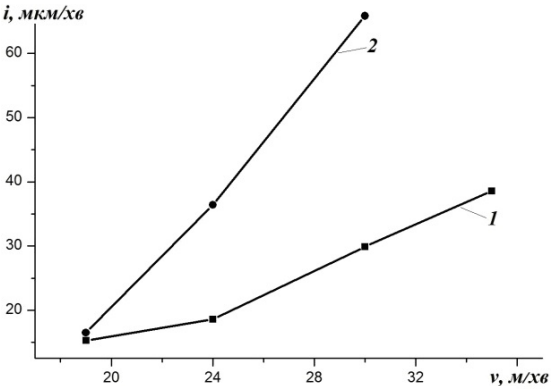
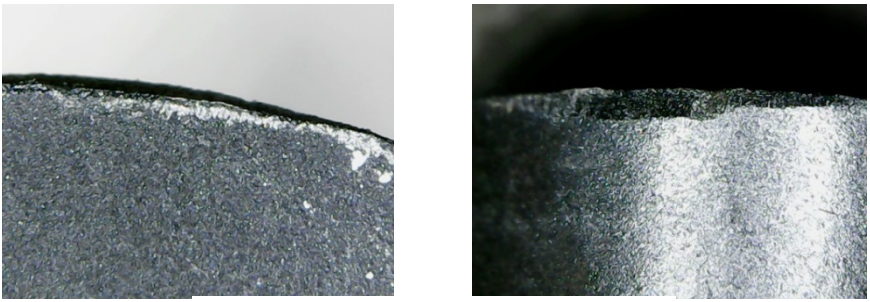


Рис. 1. Залежність швидкості зношування інструменту, оснащеного нанокомпозитом «алмаз-WC» (1) і АТП (2), від швидкості різання під час точіння твердого сплаву ВК15 (S = 0,1 мм/об; t = 0,2 мм)

Обробка втулок з вуглеграфіту АГ 1500-С05 виконується при швидкостях різання 300–350 м/хв. При цьому важко оцінити стійкість інструменту в зв'язку з низькою інтенсивністю його зношування.



а *б*

Рис. 2. Контактні ділянки передньої (а) і задньої (б) поверхонь інструменту з нанокомпозитом «алмаз-WC» після точіння твердого сплаву ВК15 (v = 36 м/хв; S = 0,14 мм/об; t = 0,2 мм)

Інструмент з нанокомпозиту «алмаз-WC» дозволяє обробляти деталі, виготовлені із силікованого графіту, наприклад втулки підшипників в дизельних турбодвигунах, виготовлені з матеріалу СГП (SiC – 74,81%, Si –

17,18%, твердість – 70–72 HRC). Після п'яти проходів за швидкості різання v = 43 м/хв (l = 80 мм; $S_п$ = 0,025 мм/об; t = 0,25 мм) знос по задній поверхні інструменту $h_з$ = 0,35 мм. За обробки зі швидкістю різання 60 м/хв при інших постійних параметрах знос інструменту склав $h_з$ = 0,40–0,45 мм.

Для забезпечення високої продуктивності обробки виробів із силікованого графіту по кірці рекомендуються режими різання: v = 50–60 м/хв.; S = 0,14–0,17 мм/об.; t = 0,10–0,25 мм.

Найбільш широкою областю використання лезового алмазного інструменту є обробка виробів з кольорових металів і сплавів. Під час обробки алюміній-кремнієвих сплавів спостерігається повільне зношування інструменту з нанокомпозиту «алмаз-WC», інтенсивність якого визначається вмістом кремнію в оброблюваному матеріалі.

Під час обробки поршнів ДВС зі сплаву АЛ25 в широкому діапазоні швидкостей різання (160–700 м/хв.) спостерігається утворення наросту (особливо інтенсивно в діапазоні низьких швидкостей різання) і налипання оброблюваного матеріалу на передній поверхні інструменту (рис. 3), що призводить до зростання висотних параметрів шорсткості обробленої поверхні.

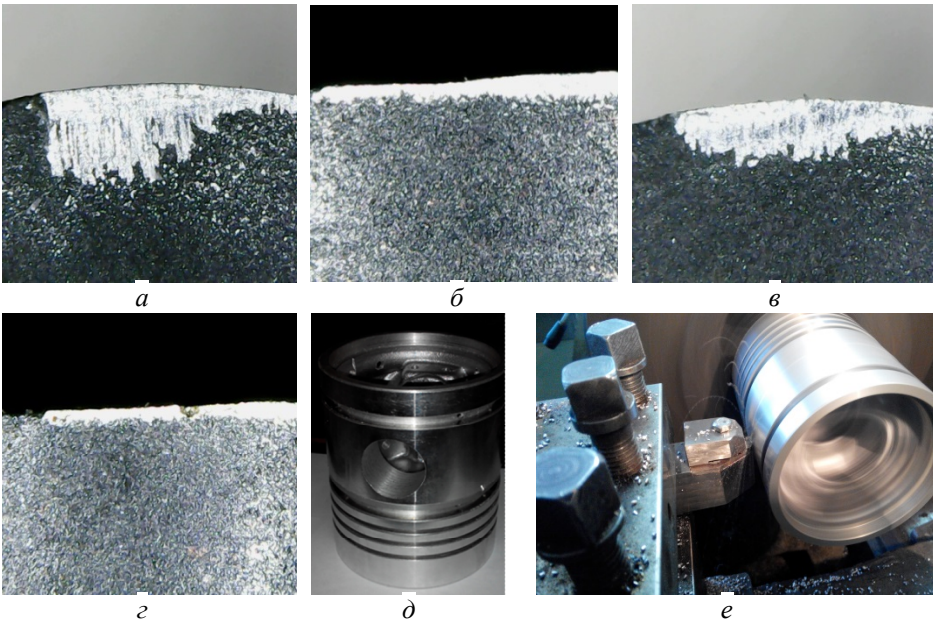


Рис. 3. Контактні ділянки на передній (а, в) і задній (б, г) поверхнях інструменту після точіння сплаву АЛ25 (а, б – v = 160 м/хв; S = 0,1 мм/об; t = 0,2 мм; в, г – v = 570 м/хв; S = 0,1 мм/об; t = 0,2 мм), загальний вигляд поршня ДВЗ (д) і точіння спідниці поршня (v = 570 м/хв; S = 0,05 мм/об; t = 0,2 мм) (е)

Застосування технологічних середовищ дозволяє істотно поліпшити якість обробленої поверхні. Так, під час обробки поршнів ДВС інструментом з нанокомпозиту «алмаз-WC» з використанням 3–5% розчину концентрату «Триболіт» і вакуумного масла ВМ6 не спостерігається наростоутворення, а шорсткість обробленої поверхні *Ra* в порівнянні з «сухим» точінням знижується від 1,2 до 0,8 мкм.

Використання круглої різальної пластини за рахунок повороту навколо осі забезпечує 6–8 періодів стійкості інструменту. Під час обробки ділянок поршня з канавками під компресійні кільця і отвором під шатунний палець (v = 570 м/хв; S = 0,05 мм/об; t = 0,2–0,3 мм) мають місце ударні навантаження (рис. 3), проте, на інструменті, оснащеному нанокомпозитом «алмаз-WC», не спостерігається сколювання різальної кромки, що свідчить про високу ударну міцність нанокомпозиту.

Слід зазначити, що оброблювані матеріали, розглянуті в даній роботі, характеризуються підвищеною абразивної здатністю, що істотно ускладнює механічну обробку виробів з них. В цьому випадку алмазний інструмент є найбільш працездатним – він забезпечує високі продуктивність знімання матеріалу і стійкість різального інструменту, а також дозволяє отримати необхідну якість обробленої поверхні виробів.

В.В. Бурыкин, к.т.н.,
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины

ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ С ДЕТОНАЦИОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Нанесение детонационным напылением (ДН) защитных покрытий на поверхности деталей, работающих в условиях интенсивного износа, является эффективным методом увеличения срока их службы, позволяет снизить металлоемкость изделий, сократить использование дефицитных материалов, одновременно повышая ресурс работы машин и механизмов за счет увеличения стойкости деталей против разрушающих воздействий. Путем изменения технологических параметров ДН удается управлять процессами физико-химических превращений в порошках при нанесении покрытий и регулировать состав и свойства формируемых слоев. Отличительной особенностью метода ДН, является то, что упрочняемые или восстанавливаемые изделия не подвергаются существенному нагреву в процессе нанесения, не изменяя физико-механических свойств их материалов.

Сущность метода ДН весьма проста: в трубу (ствол) заполненной газовой взрывчатой смесью помещаются напыляемые частицы порошка, после чего в газе возбуждается детонация. Взаимодействуя с продуктами детонации, частицы нагреваются и ускоряются в направлении напыляемой поверхности

детали, при столкновении с которой они образуют плотное и хорошо сцепленное с ней покрытие. Далее следует релаксация давления, продукты детонации почти полностью выходят из ствола, который продувается не реагирующим газом, вновь наполняется газовой взрывчатой смесью, происходит вбрасывание порции порошка, инициирование детонации и так далее. При каждом выстреле напыляется 1–7 мкм толщины покрытия на площади, приблизительно равной диаметру ствола (20–30 мм). Выход детонационной волны в атмосферу сопровождается интенсивной звуковой волной амплитудой 130 ДБ на расстоянии 2 метров от среза ствола. Наиболее широкое применение в качестве материалов для ДН нашли оксид алюминия ($A1_2O_3$) и сплавы и композиты на основе никеля. $A1_2O_3$ имеет достаточно хорошую износостойкость в довольно широком диапазоне скоростей и нагрузок, высокую жаростойкость и коррозионную стойкость. Основным недостатком этих покрытий являются невысокие прочностные свойства и пластичность. Покрытия на основе никеля имеют значительно более высокие механические свойства, но обладают меньшей износостойкостью. Технология ДН позволяет достигать шероховатость *Ra* получаемых покрытий 1,25–0,32 мкм, что дает возможность не обрабатывать ее в случае, если покрытие наносится с целью защиты от механического износа, эрозии или коррозии. Однако сопрягаемые поверхности деталей, в зависимости от применяемого материала покрытий, проходят механическую обработку до получения требуемой микрогеометрии, что не нашло отражение в ряде монографий и обзорных статей, посвященных применению технологии ДН. В частности, недостаточно внимания уделено рассмотрению обработки финишными методами и процессам, протекающим в поверхностном слое напыленного покрытия во время резания, способам управления этими процессами и эксплуатационными свойствами обработанных покрытий.

Цель данной работы – исследование финишных методов обработки эластичными инструментами керамических покрытий, нанесенных ДН на деталях машин и механизмов.

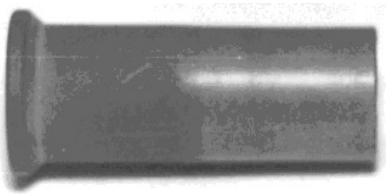


Рис. 1. Втулка после ДН

В качестве образцов использовались тонкостенные втулки (рис. 1) с цилиндрической площадью S = 20–30 см^2. Перед экспериментами втулки шлифовались с последующим полированием, затем обезжиривались ацетоном. Напыление дисперсного порошка $A1_2O_3$ (40–60 мкм) производилось на детонационной установке. Толщина покрытия измерялась микрометром МК 1003 (класс точности 2) и равнялась 150–250 мкм. Шероховатость поверхности 0,63–0,32 мкм. Проверка адгезионной прочности покрытия проводилась путем механического соскоба и показала достаточно хорошее сцепление спеченного порошка с поверхностью втулки. Для более полного определения характеристик покрытий требуются дальнейшие исследования в соответствии с

ГОСТ 9.302 и ГОСТ 27953. В табл. 1 приведены характеристики полученного покрытия после ДН порошком Al_2O_3.

Таблица 1 – Характеристики покрытия после ДН порошком Al_2O_3

Материал	Плотность ρ, г/см^3	Общая пористость $П_{общ.}$, %	Микро-твердость $H_μ$, ГПа	Предел прочности при растяжении $σ_{вр}$, МПа	Прочность сцепления покрытия с подложкой $σ_{сц}$, МПа	Коэффициент теплопро-водности λ, Вт/(м·к)
Al_2O_3	3,4–3,5	1,0–2,0	11,0–12,0	147–150	60–120	0,7–2,9

К преимуществам ДН порошком Al_2O_3 относят высокую прочность сцепления и плотность, а также возможность нанесения покрытия на подложки без изменения свойств материала основы. Кроме того, из всех существующих только данный метод позволяет создавать покрытия из металлокерамики: карбидов вольфрама, титана и кобальта, нитридов титана и бора, окиси алюминия. При этом свойства покрытий практически не отличаются от свойств аналогичных сплавов, полученных методами спекания.

Из отечественного и зарубежного опыта известно, что трудоемкость финишных операций в общей трудоемкости восстановления деталей может превышать 20%. Сложность и многообразие форм поверхностей затрудняют создание универсальных методов их финишной обработки. Известные методы обработки лезвийными инструментами, связанным и свободным абразивами, поверхностным пластическим деформированием, а также электрохимические и комбинированные методы, позволяющие обеспечить шероховатость поверхности в широком диапазоне значений (*Ra* 0,05–0,32), имеют ряд существенных недостатков, к которым относятся многостадийность и большая трудоемкость обработки при повышенных требованиях к качеству поверхности, затруднительность обработки изделий сложной конфигурации при высоких требованиях к точности, формирование в процессе обработки дефектного поверхностного слоя, негативное влияние на физико-механические свойства поверхности и другие.

Основные направления развития обработки резанием связаны с ее интенсификацией за счет новейших и синтеза существующих методов обработки. Смещение технологических показателей в размерной обработке в направлении более высокой степени точности и качества в результате изменения соотношения отдельных видов обработки. Уменьшается объем токарной обработки за счет внедрения абразивной обработки, увеличивается доля прецизионного шлифования и, напротив, внедрение лезвийной обработки сверхтвердыми материалами может вытеснить абразивную обработку.

Качество поверхности и детали в целом формируется в процессе выполнения практически всех технологических операций. Однако окончательные показатели качества поверхностей формируются на чистовых и отделочных операциях, среди которых превалирует шлифование и

полирование. Операции абразивной обработки являются финишными в технологических процессах механической обработки, поэтому низкое качество и брак особенно недопустимы, так как они влекут за собой большие потери, обусловленные стоимостью выполнения всех предыдущих операций. Финишная обработка закрепленным абразивом тонкостенных деталей по сравнению с монолитными в связи с интенсивным тепловыделением вызывает изменение исходного состояния поверхностного слоя и коробление формы изделия. Решением данной проблемы может быть использование эластичных инструментов.

Одним из перспективных методов финишной обработки изделий упрочненных или восстановленных детонационными покрытиями из порошков окиси алюминия является полирование лепестковыми кругами из алмазных лент (рис. 2), обеспечивающее снижение шероховатости поверхности, характеризующееся стабильностью процесса, высоким качеством, производительностью и низкой себестоимостью обработки.



Рис. 2. Круг лепестковый из алмазных лент

Преимущество полирования такими кругами перед другими эластичными инструментами заключается в том, что прерывистый, импульсный характер резания и вентиляционный эффект, возникающий в зоне обработки, способствуют обновлению затупившихся абразивных зерен и быстрому удалению шлама. Высокая эластичность инструмента обеспечивает оптимальный контакт рабочей поверхности режущего элемента с деталью сложного профиля. Они не требуют правки, обладают способностью принимать профиль обрабатываемой поверхности в течение всего времени работы. При этом высокая режущая способность и износостойкость инструмента обеспечивает стабильное качество поверхностного слоя изделия. При полировании этими кругами деталей с детонационными покрытиями на основе Al_2O_3 достигается шероховатость поверхности *Ra* 0,04–0,16, производительность процесса обработки в 1,3–1,5 раза выше, чем при использовании других эластичных инструментов из алмазных лент, а затраты на инструмент сокращаются на 30–40 %.

Применения ДН и финишных методов их обработки предусматривает повысить технический и технологический уровень производства, надежность и долговечность деталей машин и оборудования, снизить металлоемкость и трудоемкость изготовления технологической оснастки, обеспечить экономию конструкционных, быстрорежущих и инструментальных сталей, сократить сроки технологической подготовки производства, создать технологические заделы для разработки техники нового поколения.

Г.М. Виговський, к.т.н., доц.,
Л.Є. Глембоцька, к.т.н.,
М.М. Плисак, асп.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА ВЕРСТАТА ДЛЯ ЧИСТОВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ПЛОЩИН

Працездатність машин значною мірою залежать від якісних характеристик складових деталей. При цьому значна увага приділяється не тільки параметрам досягнення геометричної точності деталей, але й фізико-механічним характеристикам поверхневого шару. Процес експлуатації деталей супроводжують знакозмінні силові навантаження, дія теплових джерел, агресивних середовищ тощо. Деталі повинні протистояти зовнішнім впливам протягом заданого періоду роботи – це буде забезпечувати надійну роботу механізмів та машин у цілому. При цьому від якості поверхневого шару залежать експлуатаційні властивості – зносостійкість, корозійна стійкість тощо.

Одним із прогресивних методів підвищення якості обробки плоских поверхонь є застосування процесів чистового фрезерування косокутними торцевими фрезами.

При цьому деформації технологічної системи в значній мірі визначають якість обробки плоских поверхонь деталей.

При торцевому фрезеруванні похибки обробки внаслідок деформацій можуть складати до 90% сумарної похибки обробки.

Характерною особливістю торцевого фрезерування є змінність товщин зрізу по дузі контакту різального елемента фрези із заготовкою. При цьому виникають складові сили різання, які змінюють свою величину, напрям дії і призводять до похибок обробки деталей у поперечному напрямку внаслідок динамічних деформацій технологічної системи.

Динаміка торцевого фрезерування характеризується також процесами врізання та виходу кожного різального елемента із зони різання, що в свою чергу впливає на динамічні деформації технологічної системи.

У повздовжньому напрямку (у направленні подачі) похибки обробки пов’язані насамперед зі змінністю сил різання при врізанні і при виході фрези із контакту з заготовкою із-за змінності ширини фрезерування, при цьому різко змінюється кількість різальних елементів, що одночасно приймають участь у різанні і виникають похибки повздовжнього профілю, які є повільно змінними, статичними.

Авторами було досліджено напружено-деформований стан торцевих фрез косокутного різання і їх вплив на формування макропрофілю оброблених поверхонь, але при цьому не розглядались питання впливу інших складових технологічної системи.

Разом з тим, однією із складових технологічної системи, яка сильно впливає на якість обробки є верстат, на якому здійснюється процес фрезерування.

Дослідження показують, що у формуванні показників точності взаємного розташування поверхонь і точності форми, вплив шпиндельного вузла становить 50–90% у загальному розподілі точності верстата.

Метою виконаних досліджень було побудова твердотільної моделі шпиндельного вузла та оцінка пружно-деформованої характеристики шпинделя фрезерного верстата для прогнозування впливу на якісні характеристики формування профілю геометрії оброблених поверхонь.

3D модель шпиндельного вузла (рис. 1) виконана у програмному забезпечені SolidWorks.

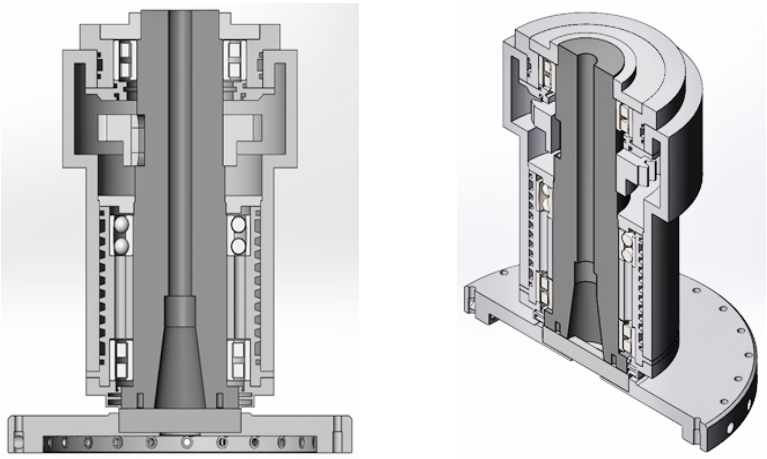


Рис. 1. 3D-модель шпиндельного вузла

У шпиндельному вузлі в якості задньої опори використовується двухрядний роликовий радіальний підшипник 3182122 класу точності 4, а в якості передньої – двухрядний роликовий радіальний підшипник 3182124 класу точності 2 та радіально-упорний шариковий двухрядний підшипник 178824 класу точності 4, які забезпечують жорстку фіксацію шпинделя.

Комплексний інженерний аналіз напружено-деформованого стану шпинделя вертикально-фрезерного верстата здійснено за допомогою модуля Simulation, інтегрованого в середовище.

Для розрахунку були використані наступні вихідні дані: консольно-вертикально-фрезерний верстат мод. 6П10, торцева фреза діаметром $D = 440$ мм, оснащена різальними елементами з полікристалічного надтвердого матеріалу – Гексаніт-Р. Матеріал заготовки – сірий чавун СЧ21 (160–250 НВ), розміри 1500×850×700 мм. Для виконання чистового фрезерування прийнято глибину різання $t = 0{,}75$ мм, подачу $Sz = 0{,}1$ мм/зуб, швидкість різання $V = 500$ м/хв., частоту обертання шпинделя $n = 380$ об/хв., складову силу різання $Pz = 367$ Н, крутний момент на шпинделі $M = 800$ Н·м та відцентрову силу – 380 рад/с.

Для чорнового фрезерування заготовки – плита розміром 1500×850×700 мм зі сталі 12Х18Н9Т ($\sigma_в$= 610 МПа), приймаємо глибину різання t = 6 мм, подачу S_z = 0,25 мм/зуб, швидкість різання V = 135 м/хв., частоту обертання шпинделя n = 100 об/хв., складову силу різання P_z = 9728 Н, крутний момент на шпинделі M = 21400 Н·м та відцентрову силу – 628 рад/с.

Проведено розрахунок шпиндельного вузла, у результаті якого було визначено, як впливає процес обробки різних деталей на деформацію та переміщення шпинделя вертикально-фрезерного верстата. Отримані результати розрахунків показують, прогин переднього кінця шпинделя під час обробки деталі: з сірого чавуну СЧ21 складає 0,0012мм; з жаропрочної сталі 12Х18Н9Т становить 0,0037мм, а переміщення в осьовому напрямку відповідно 0,23 мм та 0,017 мм, що спричиняє відхилення положення формоутворюючих різальних елементів та негативно впливає на якісні характеристики поверхневого шару в цілому.

Застосовані методики та алгоритми розрахунків, які використані при дослідженні деформованого стану шпиндельного вузла, можуть бути застосовані для аналізу конструкцій шпиндельних вузлів інших верстатів та прогнозування вихідних характеристик оброблених поверхонь.

О.О. Войналович, студ.,
О.В. Камських, к.т.н., доц.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВИТРАТИ АЛМАЗУ ВІД ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ

Розпилювання природного каменю є однією з основних операцій в каменеобробці. Саме розпилювання граніту багато в чому залежить від того, для чого буде потрібен виріб з природного каменю. Для виробництва будь-якого фасонного виробу необхідно одержати відповідні заготовки. Для цих цілей використовують каменерізні верстати різних модифікацій.

Основна вимога до даного устаткування – можливість розпилу плити природного каменю з максимальною точністю і швидкість виконання робіт при мінімальних витратах на інструмент. Від чого залежить як якість виробів з природного каменю, так і його собівартість.

Для дослідження було використано інструмент фірми «Діамант Ді» (Україна). Для знаходження питомої витрати алмазів в інструменті визначається лінійний знос алмазних різальних елементів шляхом вимірювання їх розмірів до і після роботи.

Дослідження проводились при розпилюванні блоку Жежелівського граніту розміри 2×1×1 м на плити товщиною 20 мм. Заміри витрати інструменту здійснювались за допомогою мікрометра після виконання кожних 5 пропилів.

Питома витрата алмазів по робочому контуру, віднесена до одиниці поверхні розпилу, дорівнює

$$q = \frac{\Delta G \cdot n_c}{S_p}, \text{ карат/м}^2, \quad (1)$$

де ΔG – різниця між масою алмазів до початку розпилювання і після закінчення, карат; n_c – кількість алмазних сегментів, шт.; S_p – площа розпилу, м^2.

Результати виконаного дослідження наведені у табл. 1. Графічна залежність витрати алмазів від швидкості різання для Жежелівського граніту представлена на рис. 1.

Таблиця 1 – Результати виконаного дослідження

Швидкість різання, м/с	Об'єм алмазоносного шару, см^3	Маса алмазів G, карат	ΔG, карат	Питома витрата алмазів, карат/м^2
0	0,659	2,176	–	–
22		2,174	0,002	0,115
23	0,658	2,171		
24	0,657	2,167	0,005	0,229
25	0,655	2,160	0,007	0,344
26	0,652	2,151	0,009	0,458
27	0,648	2,140	0,011	0,573
28	0,644	2,126	0,014	0,687

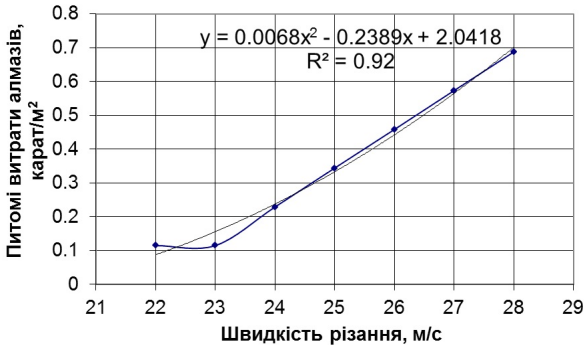


Рис. 1. Залежність питомих витрат алмазів від швидкості різання при розпилюванні високоміцних гранітів

Аналітично вищерозглянуту залежність можна описати рівнянням наступного вигляду:

$$q = 0{,}0068 \cdot V_p^2 - 0{,}2389 \cdot V_p + 2{,}0418, \text{ карат/м}^2. \quad (2)$$

Коефіцієнт кореляції 0,92, що свідчить про досить тісний зв'язок між параметрами, що досліджуються.

Аналіз отриманих результатів (див. рис. 1) дозволяє зробити ви висновок, що найбільш оптимальними швидкостями різання при розпилюванні високоміцних

гранітів є 22 та 23 м/с. При подальшому збільшенні швидкості різання спостерігається чітка тенденція до збільшення витрати інструмента, що призводить до значного збільшення собівартості розпилювання і тому є небажаним.

Отже співставивши отримані вище результати впливу швидкості різання на продуктивність і витрати алмазів, можна зробити висновок, що для розпилювання високоміцних гранітів швидкість різання недоцільно збільшувати вище 23 м/с.

В.Н. Волошин, к.т.н., доц.,
І.В. Луців, д.т.н., проф.,
В.М. Буховець,
Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

КОМПЛЕКСНЕ ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ АДАПТИВНОГО ТИПУ ДЛЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ КІЛЬЦЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

Розмірна токарна обробка кільцевих деталей сильно залежить від деформацій оброблюваних поверхонь під дією сил різання і закріплення з подальшим формуванням пов'язаних з цим похибок обробки. Головною проблемою при цьому є недостатня жорсткість заготовки і в цілому технологічної системи. Внаслідок закріплення кільцевих деталей у багатьох випадках їх деформації співрозмірні з допуском на механічну обробку. Тому досягнення заданих параметрів точності форми обробленої поверхні кільцевих заготовок стає складним технологічним та виробничим завданням. Мінімізація похибки обробки можлива лише при правильно вибраних методах обробки і засобах технологічного оснащення. Вони повинні сприяти зменшенню основних похибок, які можуть виникнути на різних стадіях реалізації технологічного процесу обробки маложорстких кільцевих деталей.

На відміну від однорізцевої обробки багатолезове розточування внутрішніх поверхонь кільцевих заготовок, є одним із ефективних методів зменшення макро- і мікропохибок обробки, а також неприпустимих коливань, які виникають при різанні. Для зменшення впливу сили затиску на точність обробки кільцевих деталей доцільно застосовувати затискні пристрої, що забезпечують: розподіл затискного зусилля за рахунок збільшення кількості точок його прикладання в зоні контакту; розподіл затискного зусилля за рахунок збільшення зони контакту; регулювання затискного зусилля.

Тому застосування розробленого комплексного технологічного оснащення, яке включає багатолезове інструментальне оснащення адаптивного типу та відповідні затискні пристрої з рівномірним розподілом зусилля затиску та можливістю його регулювання є ефективним методом мінімізації пружних деформацій і деформацій внаслідок дії сил різання при обробці внутрішніх поверхонь кільцевих деталей.

Проведено обґрунтування рекомендацій щодо використання дворізцевого оснащення адаптивного типу при обробці деталей кільцевих деталей, яке забезпечує рівність радіальних і тангенціальних складових сил різання. Запропоновано методику визначення похибки форми кільцевих деталей, яка враховує вплив сил різання при обробці дворізцевим оснащенням та сил реакції в стику між заготовкою і затискними елементами. Її основою стали теоретичні підходи до визначення деформації кільцевих заготовок при зовнішньому навантаженні силами затиску та внутрішніми навантаженням, викликаними силами різання при обробці дворізцевим самоналагоджувальним оснащенням. Дана методика дозволяє за кінцевим профілем після обробки дворізцевим самоналагоджувальним оснащенням і прогнозуючій моделі сил реакції затискних елементів визначати мінімальну кількість затискних елементів та діапазон прийнятних сил затиску, що гарантує необхідний допуск круглості кільцевих циліндричних деталей, забезпечуючи їх надійний затиск під час обробки.

Зменшити похибки форми від дії сил затиску, або уникнути їх взагалі, можна при використанні принципово нових затискних пристроїв, робота яких базується на замиканні силового контуру по колу. Такі схеми затиску реалізовані в розроблених затискних патронах гідравлічного типу із оболонковими та втулковими затискними елементами. Запропоновані затискні пристрої дуже добре поєднуються із приводом затиску верстата (гідравлічним, електромеханічним), і, як свідчать результати проведених теоретичних досліджень методом скінченних елементів, створюють зусилля затиску майже по всій поверхні кільцевої заготовки та забезпечують його регулювання в потрібному діапазоні.

О.В. Волошко,
С.П. Вислоух, к.т.н., доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНОГО СТАНУ ДЕТАЛІ ПІСЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

На сучасному етапі розвитку приладобудування робота багатьох інженерів, технологів, науковців в цій галузі направлена на підвищення ефективності виробничих процесів з метою виготовлення деталі заданими параметрами якості, до яких відносяться показники поверхневого шару пружний стан температурна деформація та глибина наклепу. Вказані показники значні мірі впливають на довговічність та надійність експлуатації деталі. Дослідження впливу режимів оброблення на стан поверхневого шару розглянуто в роботах Залога В.О., Мазур М.П., Криворучко Д.В., Ключников С.І., Махутов Н.А., Пасічник О.А. та інші.

Незважаючи на велику кількість робіт в області дослідження пружного стану, як і раніше недостатньо вивчена задача перерозподілу залишкових напружень в

поверхневому шарі деталей. Крім того, багато використовуваних методів розрахунку залишкових напружень і деформацій складні для ефективного використання в виробничих умовах або мають ряд суттєвих обмежень.

Тому поставлена задача створення методики визначення параметрів пружного стану деталі після механічної обробки, які всебічно враховують умови виготовлення та реальну її конструкцію. Пропоюється розв'язання цієї задачі реалізувати в два етапи шляхом поєднання методів математичного та комп'ютерного моделювання.

На етапі математичного моделювання за вихідними даними про оброблювальний та інструментальний матеріал визначаються раціональні режими різання, що забезпечують необхідні значення параметрів якості поверхневого шару. За основу визначення раціональних режимів різання на цьому етапі доцільно взяти методику, розроблену С.П. Вислоухом і О.В. Волошко[1].

За результатами отриманих режимами різання визначаються силові і температурні характеристики процесу різання[2].

Перевірку отриманих на етапі математичного моделювання режимів різання пропонується здійснювати засобами комп'ютерного моделювання. Для цього пропонується використовувати CAE-системи інженерного аналізу FEMAP, що базується на методі кінцевих елементів.

Засобами цієї системи визначаються параметри пружного поверхневого шару деталі під дією силових та температурних деформацій. Перевагою комп'ютерного моделювання стану деталі є те що воно враховує геометричну форму деталі. Отримані результати комп'ютерного моделювання порівнюються з відповідними їх значеннями що задані конструктором з врахуванням експлуатації деталі. Якщо вказані параметри не задовольняють вказаним вимогам то виконуються коригування режимів різання для конкретних технологічних умов оброблення деталі. Після чого виконуються розрахунки вихідних параметрів поверхневого шару деталі з новими режимами різання з подальшим комп'ютерним моделюванням засобами системи FEMAP.

Запропонована методика визначення параметрів поверхневого шару шляхом поєднання математичного та комп'ютерного моделювання дозволяє отримати оптимальні режими обробки деталі що враховують умови обробки та реальну конструкцію деталі. Пропонується використовувати дану методику в системах автоматизованого проектування та при розв'язані задач визначення пружно деформованого стану деталі в умовах її експлуатації. Використання такої методики моделювання параметрів якості обробки деталей дозволяє скоротити цикл технологічної підготовки виробництва, підвищити якість виготовлення деталей та знизити вартість виробів.

---

[1] Вислоух С. П. Методика моделювання та оптимізації параметрів процесу різання / С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Резание и инструмент в технологических системах: Международный научно-технический сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – Выпуск 70. – С. 90–99.

[2] Волошко О.В. Математичне моделювання параметрів технологічних процесів механічної обробки деталей приладів / С.П. Вислоух, О.В. Волошко / Вісник НТУУ „КПІ". Серія приладобудування. – 2005. – Вип. 29, 2005. – С. 63–67

Б.С. Воронцов, д.т.н., проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА КОРПУСІВ КЛАПАНУ Ду15

Підвищення ефективності виробництва неможливо без обліку наявності «вузьких місць» в технологічному ланцюжку, викликаних нераціонально спроектованим технологічним процесом, який слабо враховує пропускну здатність обладнання, планову і аварійну зупинки верстатів.

На кафедрі технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблено систему моніторингу верстатів з ЧПК, яка дозволяє проводити моніторинг обробки деталей в режимі реального часу. Використання цієї системи дозволяє визначити надійність обладнання, співвідношення часу його роботи і зупинок. Цю інформацію було використано для подальших досліджень технологічної системи.

Для вирішення поставленої задачі використовувалась комп'ютерна система Tecnomatix® Plant Simulation, яка дозволяє моделювати, досліджувати і оптимізувати логістичну технологічну систему і пов'язані з ними процеси. Використовуючи стохастичні інструменти цієї системи з можливостями об'єктно-орієнтованого і тривимірного моделювання, було досліджено шляхи підвищення точності і ефективності виробництва, пропускної здатності і загальної продуктивності системи. На рис. 1 показано залежність кількості випущеної продукції «Корпус клапана Ду15» за місяць від надійності обладнання, що отримана шляхом проведення математичного експерименту на розробленій, за допомогою комп'ютерної системи Tecnomatix® Plant Simulation, імітаційній моделі виробничої дільниці.

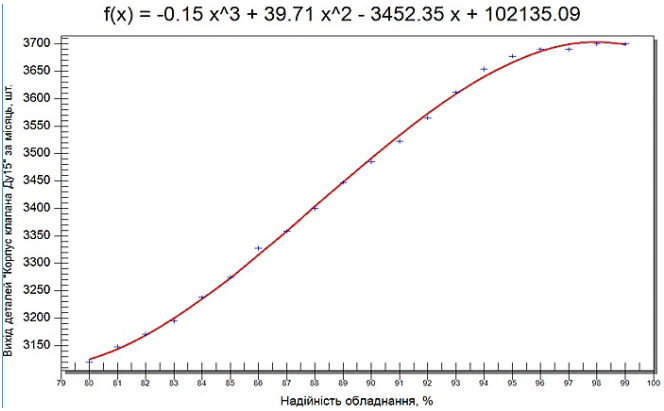


Рис. 1. Залежність кількості випущеної продукції «Корпус клапана Ду15» за місяць від надійності обладнання

В результаті проведених на моделі експериментів було досліджено вплив різних параметрів виробничої системи на її організаційно-технічні характеристики, динаміку завантаження обладнання і працівників, диспропорцію в виробничому процесі, наявність "вузьких місць", виявлені переваги та недоліки пропонованих змін технологічної системи.

Э.В. Гайлевич, асп.,
А.В. Зизико, асп.,
И.А. Скавыш, асп.,
П.Ю. Цыкунов, асп.,
Физико-технический институт НАН Беларуси

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАКАЛОЧНОЙ И ХОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА СТАНЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ В УСТАНОВКАХ ТВЧ

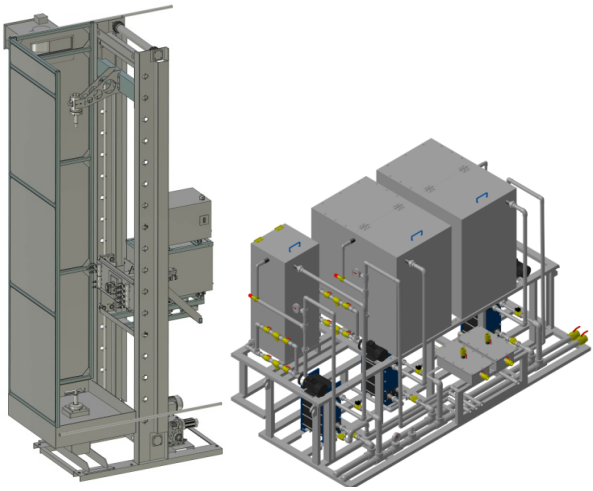
Одним из основных требований к установкам ТВЧ является полный контроль температуры как закалочной среды, так и температуры жидкости, охлаждающей узлы и агрегаты установки. Основным охлаждаемым элементом установки является непосредственно преобразователь частоты. Современные преобразователи очень требовательны к чистоте и постоянным температурным характеристикам охлаждающей жидкости. Для этого используют замкнутые контуры охлаждения с аппаратным поддержанием требуемой температуры на входе в преобразователь.

Контроль температуры закалочной жидкости необходим для получения нужной структуры обрабатываемой детали. Так повышение температуры приводит к нарушению теплофизических свойств жидкости (если используются различные эмульсии), что приводит к снижению коэффициента теплоотдачи, что в свою очередь приводит к нарушению скорости охлаждения и нарушению структуры закаленного слоя. Также превышение температуры закалочной жидкости приводит к преждевременному ее испарению. В этом случае, например, при сканирующей закалке, уже закаленные слои не получают достаточного охлаждения. Они нагреваются за счет еще не остывших глубинных нагретых зон, что приводит к неравномерному разупрочнению (самоотпуск), а вследствие и к короблению детали.

Таким образом, установки, производимые в Физико-техническом институте, оснащаются многоконтурными станциями охлаждения закалочной среды, а также охлаждающей жидкости для преобразователья частоты и прочих агрегатов, если требуется. На рис. 1 представлена установка ФТИ 3.178.

Для охлаждения преобразователя ТВЧ и блока согласования, а также снабжения комплекса индукционного нагрева закалочными жидкостями в состав комплекса входит станция охлаждения, имеющая три раздельных

контура для подачи-откачки жидкостей, а также четвертый контур охлаждения закалочных жидкостей технической водой.



а *б*

Рис. 1. Установка ФТИ 3.178: а – закалочная камера с блоком преобразователя; б – станция охлаждения

Для поддержания заданной температуры закалочной жидкости в комплексе используются теплообменник и нагреватель жидкости. Поддержание заданной температуры выполняется программируемым логическим контроллером Siemens S7-1200, который получает сигнал с аналоговых датчиков температуры, установленных в контурах подачи жидкости. В качестве датчиков температуры используются датчики термосопротивления, подключаемые к модулю ввода аналоговых сигналов Siemens. При сигнале от датчика термосопротивления, соответствующему температуре жидкости ниже заранее заданной уставки, производится нагрев жидкости включением нагревателя, установленного в контуре подачи закалочной жидкости непосредственно перед спрейером. При сигнале от датчика термосопротивления, соответствующему температуре выше заранее заданной уставки, производится охлаждение закалочной среды открытием электромагнитного клапана на входе теплообменника, в следствие чего в теплообменник поступает техническая вода. Отдельно производится контроль температуры контура охлаждения технической водой, при превышении температуры которой работа останавливается.

Уставка рабочих температур производится оператором перед началом работы комплекса при помощи ввода необходимых значений на сенсорной панели оператора. Далее выбирается необходимый тип закалочной жидкости, при этом включается соответствующий насос подачи закалочной жидкости. В дальнейшем работа станции охлаждения и регулирование температур

жидкостей выполняется автоматически. Данные температурных датчиков обрабатываются программируемым логическим контроллером, сохраняются и доступны для оператора в виде графика на сенсорной панели оператора.

Во время работы комплекса система управления контролирует уровень жидкости в каждом из баков при помощи девяти датчиков уровня (по три в каждом баке). Визуализация наполнения баков реализована графически на сенсорной панели оператора.

Дозирование протока закалочной жидкости регулируется автоматически при помощи шарового крана с электроприводом, на основании сигнала обратной связи с расходомера в соответствии с программной уставкой.

Г.И. Гвоздь,
Н.Н. Попок, д.т.н., проф**.,**
Р.С. Хмельницкий, к.т.н.,
Полоцкий государственный университет

РАЗВИТИЕ МОБИЛЬНОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

С учетом анализа тенденций развития машиностроения изложена концепция мобильного производства и методика создания технологических модулей, рассмотрена модель комплексного вида обработки резанием и формирование многофункциональной технологической оснастки для ее реализации.

Определение технологических возможностей производства осуществляется на основе сравнения степеней сложности проектирования и изготовления базовых изделий (которые ранее серийно выпускались на действующем предприятии и определяли технологический базис предприятия) и нового изделия (которое принимается к освоению в производстве). С использованием критерия наибольшего применения (частоты встречи) типовых узлов и деталей изделий на этом этапе мобильной реорганизации производства выбирается изделие наиболее рациональное для технологического базиса данного предприятия.

Разработаны методики экспресс оценки степени сложности изделий и степени мобильности машиностроительного производства. Для станочных изделий показатель степени сложности Q рассчитывается по формуле:

$$Q = G_{cc} \cdot k_к \cdot k_м \cdot k_в \cdot k_э \cdot k_г, \quad (1)$$

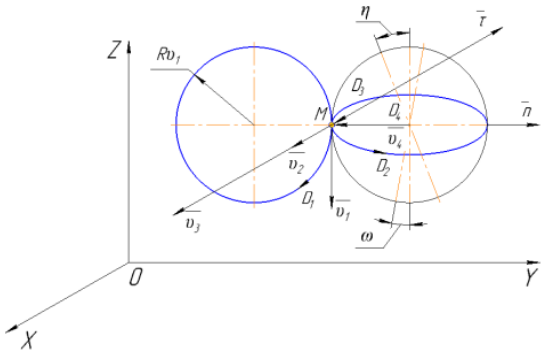
где G_{cc} – группа структурной сложности изделия; $k_к$ – коэффициент концептуальной сложности изделия; $k_м$ – коэффициент новизны решений; $k_в$ – коэффициент изменения веса изделия; $k_э$ – коэффициент изменения эксплуатационных характеристик изделия; $k_г$ – коэффициент изменения габаритных размеров изделия.

Мобильность производства может быть определена как доля отклонения в степенях сложности нового и базового изделий или технологий, отнесенная к степени сложности базового изделия или технологии и рассчитана по формуле:

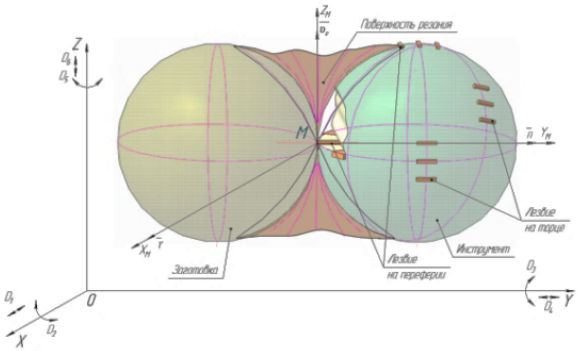
$$K_M = \frac{Q_б}{(\pm(Q_н - Q_б)+1)}, \quad (2)$$

где $K_М$ – коэффициент мобильности; $Q_б$ и $Q_н$ – степени сложности соответственно новых и базовых изделий и технологий.

Максимально учесть многообразие признаков обработки резанием позволяет комплексный вид, реализующий сложный нестационарный процесс резания по многоэлементной кинематической схеме, например, точефрезерование или фрезеточение многолезвийными вращающимися инструментами, которые могут служить в качестве модели (объекта исследований) разновидностей процесса резания и режущих инструментов (рис. 1, *а*, *б*).



а

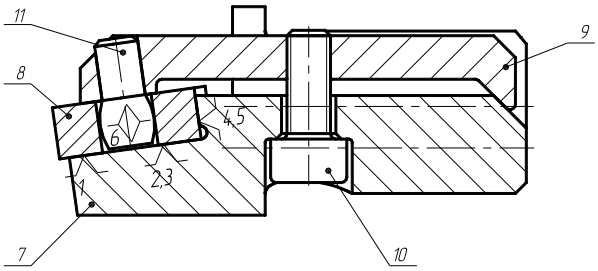


б

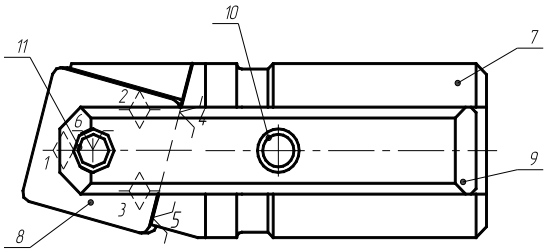
Рис. 1. Схема комплексной обработки резанием:
а – кинематическая схема, б – схема обработки

Комплексность рассматриваемого вида обработки обеспечивается за счет того, что предлагаемая схема позволяет осуществлять физическое и математическое моделирование других разновидностей обработки резанием.

Для реализации комплексной обработки предлагаются сборные режущие инструменты, построенные по модульному принципу. В основе каждого типа модульного режущего инструмента находится унифицированный резцовый блок. Конструкция блока резцового является оригинальной, технологичной в изготовлении и надежной в работе (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Резцовый блок: а – главный вид; б – вид сверху; 1, 2, 3 – установочная база, 4 и 5 – направляющая база, 6 – опорная база, 7 – корпус режущего инструмента, 8 – сменная режущая пластина, 9 – прихват, 10 – винт, 11 – штифт;
⩘, ◊ – знаки базирования; 1…6 – степени свободы

Формирование блочно-модульного режущего инструмента осуществляется следующим образом. В соответствии с обрабатываемым конструктивным элементом и поверхностью детали выбирается пластина режущая, затем конструкция блока резцового с соответствующим механизмом зажима пластины режущей; резцовый блок вставляется в корпусной модуль и зажимается специальным механизмом.

В результате формируется набор технологической оснастки в виде резцов расточных, резьбовых, проходных и т.д., фрез торцовых, дисковых, охватывающих и т.д., головок расточных, зуборезных и т.д.

Посадочные поверхности конструктивных модулей согласовываются с установочными элементами станочного оборудования и приспособлений. Сочетание блочно-модульных режущих инструментов со танком, приспособлением и режимом резания определяет технологический модуль мобильности производства.

С.М. Герук, к.т.н., доц., с.н.с.,
Житомирський агротехнічний коледж

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН ЗАСТОСУВАННЯМ КАРБОВІБРОДУГОВОГО МЕТОДУ

У структурі парку сільськогосподарських машин України ДРО ГОМ близько 80% від загальної їх кількості.

Зношені ДРО ГОМ значно знижують ефективність і якість проведених робіт, їх використання призводить до недотримання агротехнічних термінів. Крім цього, ґрунтообробна техніка додатково простоює через заміну зношених ДРО ГОМ.

Аналіз робіт дослідників дозволив виділити низку теоретичних і практичних проблем, які залишаються нерозв’язаними й нині.

Наплавлення є найпоширенішим способом відновлення деталей. Його широке застосування пояснюється високими техніко-економічними показниками.

Одним із шляхів підвищення зносостійкості і ресурсу деталей є застосування зміцнюючих технологій.

Перспективним методом зміцнення, що дозволяє значно підвищити зносостійкість робочих поверхонь деталей технологічних машин різного призначення, є їх карбовібродуговое зміцнення (КВДЗ) з використанням вугільного електрода і металокерамічних паст.

Технічні вимоги для сошників до вітчизняної техніки передбачає їх виготовлення зі сталі 65Г, або її замінника – сталі М76 та сталі 45 з термообробкою на твердість 39–44 HRC. Сошники іноземних виробників виготовлені із більш зносостійких сталей, зокрема сошники фірми Bellota – зі сталі 28MnB5, фірми Case – зі сталі Earth Metal.

1. Міцносні показники металокерамічних зміцнюючих покрить в 2,3 рази вище деталі із загартованої Ст.65Г ДРО ГОМ.

2. Ударна в'язкість металокерамічних покрить також вище, але не набагато. Причина полягає в тому, що матеріал матриць металокерамічного шару сталевий.

Цей метод не вимагає високих витрат на матеріали і обладнання, що робить його найбільш привабливим для впровадження.

Лабораторні дослідження на зносостійкість зразків з дисків фірми «Bellota» (сталь Mn28B5) на машині тертя в середовищі кварцового піску підтвердили високу зносостійкість, що забезпечує карбовібродугове наплавленням металокераміки на Ст.65Г, тобто в 4,03–10,55 раз вище зразків з

нового диска «Bellota». В якості робочого середовища застосовували кварцовий пісок розмір фракцій якого складав 80–100 мкм.

Швидкість переміщення – 125,28 м/хв (7,5 км/год); тиск грунту на зразок – 1,25 кГ/см^2 (122,6 кПа).

Викладене вище дозволить забезпечити наступний ефект:

- зростання зносостійкості в 1,5–2,5 рази;
- підвищити ресурс дискових робочих органів;
- забезпечити достатньо високу продуктивність та якість зміцнення;
- зменшити витрати на зміцнення робочої поверхні.

С.М. Герук, к.т.н., доц., с.н.с.[1],
О.М. Сукманюк, к. істор.н., доц.[2],
Житомирський агротехнічний коледж[1],
Житомирський національний агроекологічний університет[2]

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗВАРЮВАННЯ І НАПЛАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

Однією з перших країн, які стали на шлях роботизації процесу зварювання, була Японія, де виготовленням та впровадженням у виробництво роботів займалися такі фірми як «ShinMaywa», «Osaka Transformer », «HITACHI», «YASKAWA» – «MOTOMAN-L10» *і* «MOTOMAN-*L3*».

Роботизація того часу була спрямована, в основному, на зварювальне виробництво. Вищеперераховані фірми також приділяли увагу й розвитку робототехнічних комплексів, які використовувались для відновлення (зварювання та наплавлення) деталей машин, у тому числі і сільськогосподарських.

В кінці 80-х років XX ст. на ремонтних підприємствах Чехословаччини застосовувався метод відновлення зношених частин деталей за допомогою напівавтоматичного зварювання в середовищі вуглекислого газу.

Характерною рисою організації ремонтного виробництва в США, Канаді, Німеччині, Англії, Японії та інших країнах є фірмовий метод ремонту.

Чітко відпрацьовані господарсько-договірні відносини при ремонті в розвинутих країнах забезпечують високий рівень організації і якості цих робіт, а також гарантію надійності відновленої деталі.

На підприємстві Лондонського транспортного управління англійської фірми «Engine Rebuilders» перед відновленням деталі розподіляються, в залежності

від характеру дефектів, на сім маршрутів, де їх об'єднують в партії оптимального об'єму.

Відновлення деталей на великих підприємствах здійснюється поточним методом.

Крім блоків циліндрів та колінчатих валів, підприємства можуть ремонтувати деталі паливної апаратури (американська фірма «Lawless») чи рами вантажних автомобілів (канадські фірми «Equipment Gervais Jnc» і «Paling Collision»). Спеціалізація також здійснюється і в середині підприємств.

Отже, впровадження і використання роботів для зварювання і наплавлення при відновленні деталей сільськогосподарських машин дозволить по новому, на більш високому науково-технічному рівні вирішити задачу створення комплексної автоматизації на підприємствах, переглянути функції між людиною і машиною, суттєво підвищить продуктивність праці.

С.П. Гожій, д.т.н., проф.,
А.В. Кліско,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ ЗА РАХУНОК УТВОРЕННЯ ДОДАТКОВИХ СИЛ ТЕРТЯ

Одним з перспективних напрямів розширення технологічних можливостей обладнання для штампування обкочуванням є утворення і цілеспрямоване використання додаткових сил тертя, що утворюються на контактній поверхні заготовки і активного інструменту.

Сили тертя при штампуванні обкочуванням виникають постійно і вони діють протягом всього робочого періоду обробки. Їх величина, напрям і локальна інтенсивність залежать від багатьох факторів: – кінематичних і геометричних параметрів обладнання і інструменту; – наявності або відсутності механізму гальмування обертального руху інструменту, який використовують при виготовленні виробів із складною торцевою поверхнею, тощо.

В більшості випадків сили тертя на контакті між інструментом і торцевою поверхнею заготовки намагаються максимально зменшити. Вочевидь, що наявність сил тертя і, відповідно, витрати додаткової роботи на її здолання збільшують загальні енерговитрати. Але намагання зменшити або оптимізувати енерговитрати не завжди можливо реалізувати оскільки сам осередок контакту між інструментом і заготовкою має складну геометрію змінну в часі, а розподіл контактних напружень на ній, а значить і сил тертя, не рівномірний по поверхні. Тому виникають ситуації, коли при штампуванні обкочуванням з обробкою незагальмованим віл обертання інструментом, а саме в такому

випадку вплив контактних сил тертя мінімальний, він самовільно на початковій фазі обробки обертається в одну сторону, а згодом на кінцевій стадії змінює напрям обертання, що свідчить про і зміну напряму сумарної сили тертя на контактній поверхні.

В ряді випадків утворення додаткових контактних сил тертя призводить до утворює ефектів, які в залежності від потреб можна позитивно використовувати при розробці нових технологічних процесів або стабілізації параметрів у тих, що вже застосовуються. Найбільш очевидними випадками застосування додаткових сил тертя є їх спрямування або в напряму загальних пластичних деформацій або навпроти них. Іншими словами виникає можливість керувати утворенням більш жорстких або більш м'яких схем напруженого стану, тобто зменшувати енерговитрати чи досягати підвищених характеристик пластичності матеріалу. В практичній діяльності, особливо при реалізації процесів об'ємного формоутворення в холодному стані, частіше затребуваним є досягнення підвищених ступенів деформації. Енерговитрати при цьому дещо зростають, але можливість безруйнівного деформування має більшу проблемність при реалізації і високу виробничу затребуваність.

На рис. 1 представлені схеми, що пояснюють механізм утворення додаткових контактних сил тертя на контактній поверхні між активним інструментом та заготовкою.

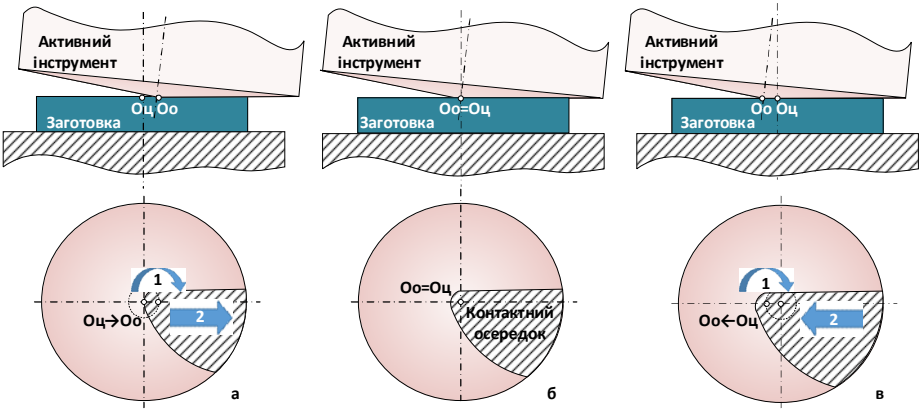


Рис. 1. Схеми утворення додаткових сил тертя на контактні поверхні при об'ємному штампуванні обкочуванням (а – центр обкочування Оо *зміщений праворуч відносно центу заготовки* Оц*; б – центр обкочування* Оо *співпадає з центром заготовки* Оц*; в – центр обкочування Оо зміщений ліворуч відносно центу заготовки* Оц*; 1 – напрям кругової траєкторії обкочувального руху контактного осередку; 2 – напрям утворення додаткових сил тертя на поверхні заготовки)*

Зокрема, на рис. 1, *а* представлений випадок, коли центр обкочування Оо зміщується праворуч відносно центу заготовки Оц і має кругову траєкторію 1

обкочувального руху відносно нього. В даному випадку обкочувальне переміщення контактного осередку буде супроводжуватись ще і відносним ковзанням активного інструменту по поверхні обкочування в радіальному напрямку від центру та утворенням додаткових сил тертя. Така дія активного інструменту спонукає до інтенсифікації радіальних деформацій в контактному осередку. У випадку, що представлений на рис. 1, *б* центр обкочування Оо співпадає з центром заготовки Оц. Таке спеввдношення характеризується мінімальними енерговитратами, але не означає відсутність виникнення і впливу сил тертя. Сили тертя будуть виникати на контактному осередку в залежності від напряму течії металу в ній, але переважно вони будуть діяти в тангенціальному напряму, а в радіальному – практично відсутніми. Вирішальним, в плані наявності і визначення частки складової радіальних сил тертя, буде геометрія самого контактного осередку, яка має певні обмеження з позицій ефективності процесу. Вважається, що процес найбільш ефективний при досягненні співвідношення площі контактного осередку до площі торця заготовки як 1:10.

Третій випадок (див. рис. 1, *в*) є протилежним по дії сил тертя до першої схеми. Центр обкочування Оо зміщується ліворуч відносно центу заготовки Оц і має кругову траєкторію 1 обкочувального руху відносно нього. В даному випадку обкочувальне переміщення контактного осередку також буде супроводжуватись відносним ковзанням активного інструменту по поверхні обкочування в радіальному напрямку, але до центру та утворенням додаткових сил тертя. Така дія активного інструменту буде протидіяти периферійній течії металу в канатному осередку, що призведе до зміни схеми напруженого го стану на всебічне, підвищення питомих зусиль і, загалом, підвищення критичних ступенів деформування.

Необхідно відмітити ще один позитивний момент при деформуванні з утворенням додаткових сил тертя – це набуття поверхнею заготовки, по який здійснюється обробка, підвищених характеристик щодо шорсткості поверхні. Така обставина пояснюється ефектом вигладжування, що виникає при відносному проковзуванні активного інструменту. З іншої сторони, при практичному застосуванні цього паралельного технологічного ефекту слід намагатись виконувати обробку за мінімальну кількість циклів обкочування.

Практична реалізація технології об’ємного штампування обкочування з утворенням додаткових сил тертя не викликає зайвих витрат на обладнання та оснащення як при розробці нових технологічних процесів, так і при стабілізації і поліпшенні певних параметрів існуючих. Регулювати положенням центру обкачування Оо відносно центру заготовки Оц можливо за рахунок довжини (висоти) активного інструменту, що ефективно виконати за рахунок набору підкладних шайб.

Розглянуті пропозиції щодо розширення технологічних можливостей обладнання для об’ємного штампування обкочуванням за рахунок утворення додаткових сил тертя були використані для стабілізації технологічного процесу виготовлення деталей з надтонким фланцем (товщиною до 0.5 мм), які використовуються в якості складових напівпровідникових виробів (діодів і тиристорів) пігулкового типу та інших вакуумних виробах.

В.Д. Головня, к.пед.н.[1],
О.Л. Мельник, к.т.н.[1],
О.Р. Стрілець, к.т.н.[2],
Державний університет «Житомирська політехніка»[1],
Національний університет водного господарства та природокористування[2]

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ КІНЕМАТИЧНОЇ ПАРИ «ШЕСТЕРНЯ-ЗУБЧАСТЕ КОЛЕСО» ЗАСОБАМИ САПР

Сучасні машинобудівні підприємства займаються розробкою і виробництвом технологічних машин, в у тому числі металорізальних верстатів, редукторів, коробок швидкостей тощо, які часто включають в себе велику кількість складних механізмів з переміщеннями і динамічною взаємодією. Після завершення проектного етапу, виріб переходить в стадію створення дослідного зразка, де і виникають проблеми при випробуваннях: заклинювання, недостатнє переміщення, неможливість збірки та інші негативні фактори. Це впливає на швидкість виходу продукції на ринок і збільшення собівартості через великі витрати на створення дослідних зразків.

Все це разом призводить до зниження конкурентоспроможності продукту. Застосування сучасних методів проектування та аналізу дозволяє скоротити витрати на розробку дослідних зразків. Сучасні методи проектування продукції машинобудування вимагають від інженера-конструктора знань методології вирішення проектних та дослідницьких задач за допомогою обчислювальної техніки, навичок проектування, конструювання та аналізу за допомогою CAD/CAM/CAE систем.

Розробка зубчастих передач, що відповідають високому науково-технічному і виробничому рівню, є складним завданням, що вимагає спільного розгляду всіх показників якості передачі, що проектується, а також конструктивних і технологічних шляхів їх забезпечення з урахуванням економічних чинників.

Слід зазначити, що від працездатності зубчастих передач, здатності їх витримувати значні навантаження залежить довговічність всього агрегату, саме тому вдосконалення методів розрахунку режимів навантаження і міцності елементів зубчастих механізмів є актуальною проблемою сучасного машинобудування.

Аналіз напружено-деформованого стану зубчастого зачеплення потрібен для оцінки міцності зубчастої передачі. Основною задачею такого дослідження є розрахунок зубів на контактну міцність та міцність при згині.

При розрахунку контактних напружень враховуються напруження в полюсі зачеплення, а при розрахунку згинальних напружень – в небезпечному перетині при основі зуба. Традиційно режими навантаження кінематичної пари «шестерня-зубчасте колесо» визначаються шляхом аналітичного вирішення задачі Герца про стискання двох циліндрів при розрахунку контактних

напружень, а також вирішенням задачі про консольно-затиснену балку при визначенні напружень згину. Оскільки дана модель відрізняється від реального зубчастого зачеплення, то в методику розрахунку вводяться уточнення у вигляді емпіричних коефіцієнтів. Спираючись на перелічені фактори, можна стверджувати, що в сучасному машинобудуванні виникає необхідність отримання більш точної інформації про напружено-деформований стан матеріалу зубів кінематичної пари «шестерня-зубчасте колесо».

В даний час, коли прогрес в машинобудуванні вже немислимий без докладного дослідження напружено-деформованого стану деталей машин, інженери почали широко використовувати чисельні методи аналізу, серед яких найбільшу популярність набув метод кінцевих елементів.

Проведення дослідження режимів навантаження кінематичної пари «шестерня-зубчасте колесо» методом кінцевих елементів базується на 3D-моделі зачеплення, що і є першою перешкодою, оскільки отримати тривимірні моделі зубчатих коліс засобами традиційних CAD-систем доволі складно, для цього потрібно правильно побудувати профіль зуба в поперечному перерізі. Враховуючи це виробниками CAD-систем було розроблено модулі, що дають змогу отримувати тривимірні моделі зубчатих коліс на основі проведених розрахунків, зокрема:

– КОМПАС-Shaft 3D – спеціалізований додаток для системи КОМПАС-3D, що призначений для автоматизації проектування і побудови тривимірних моделей валів, втулок, елементів механічних передач. До складу КОМПАС-Shaft 3D входить модуль КОМПАС-GEARS який дає змогу проводити геометричні розрахунки та розрахунки на міцність черв'ячних, циліндричних і конічних зубчастих передач, а також ланцюгових і пасових передач;

– GearTrax програмний продукт компанії Camnetics Inc., USA, який може бути підключений до різноманітних CAD-систем, таких як: SOLDWORKS, AutoCAD Inventor та Solid Edge. Пакет включає в себе такі можливості: автоматичне створення моделей різноманітних зубчастих зачеплень з наступною передачею їх до CAD-систем, перевірку сталевих конструкцій на відповідність нормам, моделювання інерційного і рухомого навантаження, розтягування/стиснення нелінійних елементів з початковими зазорами, комбінування розрахункового навантаження, аналіз великих лінійній деформацій тощо.

На основі отриманих тривимірних моделей розрахунок режимів навантаження кінематичної пари «шестерня-зубчасте колесо» методом кінцевих елементів можна проводити з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, наприклад:

– SOLIDWORKS Simulation – за допомогою даного програмного продукту можна вирішувати наступні задачі: розрахунок конструкцій на міцність, постановка і вирішення контактних задач, розрахунок збірок, визначення власних форм і частот коливань, розрахунок конструкції на стійкість, втомні розрахунки, імітація падіння, теплові розрахунки, розрахунок нелінійних контактних задач, аналіз втомних напружень і визначення ресурсу конструкцій, проводити оптимізацію параметрів моделі тощо.

– ANSYS Mechanical – включає в себе повний набір лінійних та нелінійних елементів, зручну для використання та редагування базу матеріалів, а також широкий набір методів вирішення задач. Це дозволяє швидко вирішувати складні завдання, навіть якщо вони включають нелінійний контакт.

– ABAQUS – універсальна система, що використовується для проведення аналізу складних лінійних і нелінійних інженерних систем. Даний комплекс має власний препростпроцесор ABAQUS/CAE і може бути інтегрованим з багатьма CAD-системами та іншими програмними продуктами.

– NASTAN – можливість розрахунку напружено-деформованого стану, запасу міцності, власних частот та форм коливань, аналіз стійкості, дослідження динамічних процесів, вирішення задач теплопередачі, аналіз складної контактної взаємодії тощо. У даній системі передбачена можливість моделювання різних типів матеріалів, включаючи композиційні та гіперпружні.

Моделювання методами кінцевих елементів дозволяє зменшити кількість фізичних прототипів і випробовувань, що дасть змогу прискорити повернення інвестицій з рахунок зменшення часу розробки, а також сприяє розвитку більш гнучкого процесу проектування, призведе до створення інноваційних, високоякісних продуктів і процесів виробництва, що, у свою чергу, ініціює перехід на більш високий рівень виводу продукції на ринок за менший проміжок часу і з меншими витратами.

Застосування комп’ютерних технологій на всіх стадіях проектування і дослідження дозволяє створити правильне, більш точне уявлення про те, що відбувається в механізмах і системах при їх роботі, уточнити кінематичні і силові зв’язки, розкрити можливості їх вдосконалення в нових, більш ефективних напрямках, дозволить істотно поліпшити їх вихідні характеристики.

О.А. Громовий, к.т.н., доц.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

ВИВЧЕННЯ ПРИНЦИПІВ І МОЖЛИВОСТЕЙ ВЗАЄМОДІЇ CAD/CAM/CAE/PDM СИСТЕМ І СИСТЕМ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Процес прототипіювання при конструюванні та розробці промислового дизайну на підприємствах галузі машинобудування та інших галузей промисловості – область, де використання систем віртуальної реальності дає значні конкурентні переваги. Використання віртуального оточення дозволяє створювати і сприймати конструкторові віртуальний прототип як реальний і змінювати його в реальному часі. Віртуальні прототипи дозволяють відмовитися від натурних моделей і забезпечити зв'язок між окремими підрозділами підприємства або різних субпідрядників, що працюють над

різними аспектами одного і того ж завдання. Особливо актуальні подібні системи на стадії концептуального дизайну.

Віртуальне прототипіювання дозволяє змоделювати життєвий цикл запропонованого проекту, суттєво підвищити продуктивність і якість проектування.

Етапами віртуального прототипіювання таких систем є: збір вихідних даних, моделювання об'єкта, візуалізація, виготовлення фізичного прототипу. Відповідно необхідним інструментарієм є: координатно-вимірювальне устаткування, CAD/CAM/CAE/PDM системи, 3D-стереовізуалізація і системи інтерактивної взаємодії, багатокоординатні верстати з ЧПК, оброблювальні центри, 3D-принтери.

Областями застосування віртуального прототипіювання є: дизайн, моделювання зборок, дослідження ергономіки споживачів, дослідження ергономіки робітників на підприємстві, візуалізація, планування, маркетинг.

Для спільної роботи і прийняття колективних рішень використовуються центри віртуальної реальності для PLM, іммерсійні центри (3D collaboration and decision Center (3D cadCenter)).

В лабораторії по імітації польотів компанії Lockheed на базі тренажера виконується моделювання віртуальних польотів з метою вивчення зручності взаємодії пілота з устаткуванням кабіни на етапі проектування літака.

В склад центр віртуальної реальності для віртуального інтерактивного прототипіювання компанії Фольксваген cadCenter / vipCenter входить:

1. Проекційна система віртуальної реальності (3D візуалізації) різної конфігурації (для сприйняття обсягу необхідні спеціальні окуляри), cadCenter з плоским або панорамним екраном високої чіткості або vipCenter з 2–6 екранами високої чіткості у вигляді кімнати (клас CAVE);

2. Графічний генератор - потужна спеціалізована графічна станція або графічний (візуалізаційний) кластер, який дозволяє синхронно обробляти та видавати необхідний потік візуальної 3D інформації. Устаткування підтримує роботу з такими пакетами як: VIRTOOLS, CATIA, DMU, UGS Viz Mockup, PTC DVmockup;

3. Периферія систем віртуальної реальності включає набір пристроїв, що дозволяють підсилювати ступінь інтерактивності – системи трекінга, тактильного зворотного зв'язку і т.п.

Передовими підприємствами використовується імітаційне моделювання фізичної взаємодії між віртуальними деталями машин і механізмами.

При цьому віртуальне складання дозволяє перевірити ступінь стикування деталей виробів до початку етапу реального складання. Так високоефективним проектування літаків Boeing і Learjet, в яких перевірка якості складання всієї системи здійснюється у віртуальному просторі.

Технології віртуальних випробувань дозволяють частково замінити натурні випробування на комп'ютерні. За оцінками Ford Motor Company, тільки заміна натурних випробувань реальних автомобілів чисельними експериментами, застосування технологій віртуальної реальності дозволяє різко підвищити

якість проектування, значно знизити час розробок і зменшити вартість процесу конструювання.

Використання в системах для віртуального прототипіювання таких систем як трекінг дає можливість відпрацювання елементів людино-машинної взаємодії, ергономіки і т.п. ще на етапі цифрового макета.

Практично всі провідні компанії миру застосовують технології віртуальної реальності у своїх конструкторських і дизайнерських центрах.

Таким чином, розвиток систем віртуальної реальності, прототипіювання потребує подальшого вивчення принципів і можливостей взаємодії CAD/CAM/CAE/PDM систем і систем віртуальної реальності для застосування їх на підприємствах галузі машинобудування.

Ю.Г. Гуцаленко, с.н.с.[1],
Л.І. Пупань, к.т.н.[1],
О.В.Руднєв, к.т.н.[1],
О.К. Севидова, к.т.н.[1],
О.В. Тітаренко, к.т.н.[2],
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»[1],
Національна академія Національної гвардії України[2]

ВИКОРИСТАННЯ ПЛАЗМОЕЛЕКТРОЛІТНИХ ПОКРИВІВ В ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ НА АЛЮМІНІЄВИХ КОРПУСАХ АЛМАЗНИХ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ

Успішне застосування покривів, отриманих плазмоелектролітним оксидуванням (ПЕО), в багатьох галузях промисловості базується на їх високих функціонально-експлуатаційних показниках. Найчастіше ПЕО застосовують для обробки алюмінієвих та інших сплавів для створення на їх поверхні покривів з високою зносо-, тепло- та корозійною стійкістю. Оскільки такий покрив на сплаві з алюмінієвою основою належить до діелектриків, перспективним варіантом може бути застосування ПЕО на алюмінієвих корпусах алмазних шліфувальних кругів для їх електроізоляції від верстатів під час електрофізикохімічного шліфування.

Діелектричні властивості покривів ПЕО безпосередньо пов’язані з властивостями їх поверхні. Саме тому для визначення раціональних умов формування цих покривів необхідно встановити зв'язок між чинниками ПЕО (насамперед, це склад електроліту, тривалість процесу, густина струму) та якістю поверхні (насамперед, пористістю) і електричними характеристиками.

Дослідження процесу оксидування за двома електричними режимами – довільно падаючої потужності (ДПП) на анодно-катодному (змінному) струмі та гальваностатичному (ГС) на випрямленому анодному струмі показують, що формування електроізоляційних покривів на поверхні сплаву Д16Т

відбувається зі зростанням вихідного показника *Ra* в 2–6 разів. Визначальним чинником такого впливу є концентрація рідкого скла. Мінімальний показник *Ra* забезпечує електроліт складу 1 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла та густина струму 5 А/дм^2. На таких поверхнях фіксується незначна відносна кількість пор з розміром від 1–6 мкм. Збільшення часу електролізу до 2 год. призводить до зменшення як кількості, так і розміру відкритих пор.

Показники питомого об'ємного опору та електричної міцності мають якісну кореляцію з мікрогеометричними показниками та пористістю покривів. Підвищена пористість, зокрема відкрита, призводить до їх суттєвого погіршення, оскільки електрична міцність повітря у ній складає ~ 3 V/μм.

За абсолютними значеннями діелектричних показників перевагу в 1,2–1,9 разів мають покриви, сформовані в режимі ДПП протягом 2 годин в лужно-силікатному розчині (1 г/л КОН + 6 г/л рідкого скла) та технічному розчині натрієвого рідкого скла (12 г/л рідкого скла). Відповідні значення питомого об'ємного опору становлять 3,2–4,3·10^9 Ω·м, а електричної міцності – 10–13 V/μм. Отримані показники діелектричних властивостей покривів ПЕО повністю задовольняють вимоги до електроізоляції алмазних шліфувальних кругів.

Л.П. Давидюк, студ.,
С.П. Вислоух, к.т.н., доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФОРМУВАННЯ ПРУЖНОГО СТАНУ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕСІ ЇХ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ І КЕРУВАННЯ НИМ РЕЖИМАМИ РІЗАННЯ

Відомо, що основним інструментом формоутворення при механічній обробці є різання матеріалу заготовки. Процес різання неможливий без докладання значних сил з боку різального інструменту, а також появи температурних полів, які призводять до виникнення напружень і деформацій в поверхневому шарі деталі. Таким чином, технологічні процеси виготовлення деталей, особливо при обробці різанням, безпосередньо впливають на формування їх пружно-деформованого стану. У свою чергу нерівномірність розподілу залишкових напруг є однією з головних причин деформації високоточних деталей в процесі їх експлуатації.

Тому до процесу механічної обробки пред'являють високі вимоги, для забезпечення яких потрібно розв'язання широкого кола практичних задач, які можна поділити на дві великі групи. Першу групу становлять задачі вдосконалення технологічних процесів підвищення якості деталей, головним чином, шляхом формування високої якості поверхневого шару і оптимального рівня залишкових напруг, що істотно впливають на довговічність, витривалість, і інші характеристики надійності.

До другої групи належать питання підвищення точності і стабільності на всіх етапах виробництва, які можуть бути вирішені застосуванням ефективних методів управління стабільністю виробничих процесів і контролю якості виробів.

Найбільшу складність представляє вирішення питань першої групи, тому що на формування структури поверхневого шару надає певний вплив явище технологічної спадковості, яке проявляється у впливі маршруту обробки на формування фізико-механічних властивостей матеріалу деталі, а також похибок обробки. Тобто, на формування властивостей поверхневого шару впливають в тій чи іншій мірі всі операції лезвійної обробки технологічного процесу, їх режими, різальний інструмент, характер взаємодії різального інструменту і заготовки тощо.

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

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

Встановлено, що найбільш істотними факторами, які впливають на величину залишкових напруг, є режими різання, наявність і вид мастильно – охолоджувальної рідини, а також деякі елементи геометрії ріжучої частини інструменту – передній кут γ, радіус при вершині r і радіус заокруглення різальної кромки ρ.

При деяких умовах істотними можуть виявитися і інші чинники: фізико-механічні і теплофізичні властивості заготовки, умови тепловіддачі (при обробці тонкостінних деталей) тощо. Крім того, нерівномірний розподіл напружень по поверхні деталі відбувається також внаслідок видалення різних за величиною шарів матеріалу (тобто через знімання нерівномірних припусків), яке практично завжди супроводжує механічну обробку високоточних деталей. Також в тих місцях, де різальний інструмент знімає більший припуск, виникає більш інтенсивне теплове поле, що приводить до створення в даній зоні місцевих напружень. Останні, релаксуючи, викликають пружні переміщення – форма деталей порушується.

Використання в якості керуючих такі параметри, як геометрія ріжучого інструменту, використання мастильно – охолоджувальних рідин тощо, призводить до більш істотної зміни існуючого технологічного процесу, що є в більшості випадків небажаним. Крім того, так як більшість матеріалів деталей приладобудування є важкооброблюваними, то це накладає певні вимоги до інструментальних матеріалів і геометрії різального інструменту, що також робить використання геометрії інструменту в якості керуючого параметра небажаним.

Багато з існуючих методик розрахунку сил різання мають ряд обмежень. Основними недоліками експериментальних методів є: частковий характер залежностей параметрів, використання лише невеликої кількості факторів, що

впливають на сили різання, багато важливих факторів, такі як геометрія інструменту, фізико-механічний стан оброблюваного матеріалу враховуються тільки через поправочні коефіцієнти.

Отримані експериментальним шляхом статистичні формули мають обмежене застосування, тому що результати експериментів не можна переносити на інші процеси, що виходять за межі поставлених дослідів. Кожна експериментальна формула не може бути використана для режимів обробки матеріалів, що мають інші механічні, хімічні та теплофізичні властивості. Крім того, для визначення складових експериментальної формули для нового матеріалу потрібно постановка нової серії великої кількості дослідів, що є досить трудомістким і до того ж часом вимагає великих витрат на матеріал. Теоретичні методи через їх великі спільності дозволяють точно визначати взаємозалежний вплив факторів, що впливають на сили різання, але для реальних розрахунків, які використовуються на виробництві такі формули складні. Зокрема в формулах, що представляють теоретичний метод, в явному вигляді не присутня швидкість різання, через що складно отримати зв'язок керованого (сили) і керуючого (режими різання). Ця обставина негативно позначається на можливості використання цієї методики в виробничих умовах.

Аналіз наукової літератури дозволив встановити, що є доцільно управляти величиною залишкових деформацій і напружень за допомогою режимів різання, тобто за допомогою зміни швидкості різання, подачі і глибини різання. Основною перевагою використання цих параметрів, крім того, що вони мають найбільший вплив на формування пружно-деформованого стану деталі, є простота їх зміни технологом, що дозволяє використовувати вже існуючий технологічний процес шляхом його мінімального коригування. Контроль параметрів пружно-деформованого стану деталі пропонується виконувати методами комп’ютерного моделювання.

В останні роки все більшу популярність для вирішення завдань теорії різання отримує метод кінцевих елементів. Головною перевагою якого є точність обчислень, наочність отриманих результатів і висока гнучкість у виконанні розрахунків. Метод скінченних елементів застосовується для різних завдань механіки деформованого твердого тіла, гідро - і газодинаміки, електромагнетизму тощо.

Однією з основних задач у нашій галузі є задача визначення пружно-деформованого стану конструкцій, деталі після її обробки та в процесі експлуатації при заданих умовах термомеханічного навантаження. Для розв’язання цих задач використовують програмні комплекси FEMAP і MSC / NASTRAN for Windows, що засновані на методі кінцевих елементів і призначені для розрахунку статичних напруг і деформацій, стійкості, визначення власних частот і форм коливань, аналізу теплових сталих і перехідних процесів, а також завдань статики і динаміки в нелінійній постановці для широкого класу машинобудівних і інших конструкцій. Програми поєднують в собі потужні аналітичні можливості процесора і легкість роботи з графічним призначеним для користувача інтерфейсом.

Найбільш загальна блок-схема алгоритму розв'язання задачі із застосуванням комп'ютерних технологій інженерного аналізу на основі методу скінченних елементів в системі FEMAP умовно представлена трьома великими блоками: пре-процесорний, аналітичний і пост-процесорний. Пре-процесорний блок включає в себе підготовку вихідних даних, тобто генерацію повної скінчено - елементної моделі об'єкта проектування в пам'яті комп'ютера. Аналітичний, або процесорний блок – це безпосереднє рішення глобальної системи алгебраїчних рівнянь, отриманої після реалізації варіаційного підходу методу скінченних елементів для вирішення диференціального рівняння розглянутого фізичного процесу. Результатом цього рішення є визначення поля невідомої величини в вузлових точках скінчено-елементної моделі об'єкта. Щодо цієї величини визначаються інші - залежні величини.

За результатами комп'ютерного моделювання засобами системи FEMAP визначаються параметри пружного стану деталей. Якщо ці параметри не задовольняють умовам їх експлуатації, то виконується необхідне корегування режимів різання.

Ю.О. Денисенко, к.т.н.,
В.О. Залога, д.т.н., проф.,
Сумський державний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА ШЛЯХОМ ВДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ

Одним із найважливіших напрямів діяльності машинобудівного виробництва є його інструментальна підготовка (ІПВ), метою якої є забезпеченні усіх (без виключення) процесів, що супроводжують виготовлення і реалізацію продукції необхідними інструментами та оснащенням. Тому вдосконалення нормативного забезпечення управління й оцінки якості ІПВ в умовах функціонування інформаційних технологій є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого забезпечить підвищення ефективності виробництва, включаючи підвищення надійності, зниження витрат і скорочення часу на підготовку машинобудівного підприємства з питань інструментального забезпечення. В умовах сучасних ринкових відносин машинобудівному підприємству ефективне функціонування й конкурентні переваги може забезпечити тільки ефективна система управління його виробничою діяльністю на основі широкого використання сучасних інформаційних технологій, які є важливим джерелом підвищення ефективності рішень, що приймаються, продуктивності й конкурентоспроможності виробництва. Метою даної роботи є підвищення ефективності системи інструментальної підготовки виробництв машинобудівних підприємств

шляхом удосконалення її нормативного забезпечення на основі прогнозування її техніко-економічних показників (ТЕП) в умовах використання сучасних інформаційних технологій. Однією з основних задач дослідження є розробка механізмів й інструментаріїв створення моделі управління якістю ІПВ в умовах інформаційних технологій, що базуються на застосуванні методів прогнозування й оптимізації. Об'єктом дослідження є система управління якістю процесів інструментальної підготовки виробництва. Предметом дослідження є нормативне забезпечення управління якістю ІПВ в умовах впровадження інформаційних технологій. Теоретичні дослідження базуються на використанні принципів TQM при управлінні якістю інформаційної системи ІПВ (ІС ІПВ). Для вирішення наукових завдань були використані фундаментальні положення основ теорії управління якістю, теорії ухвалення рішень, кваліметрії та інші. В роботі розглядається модель інформаційної системи управління якістю ІПВ машинобудівного підприємства на основі аналізу прийнятих у CALS-технологіях інструментаріїв на кожному етапі життєвого циклу відповідної продукції, яка дозволяє ідентифікувати інформаційні потоки з використанням сучасних інформаційних технологій.

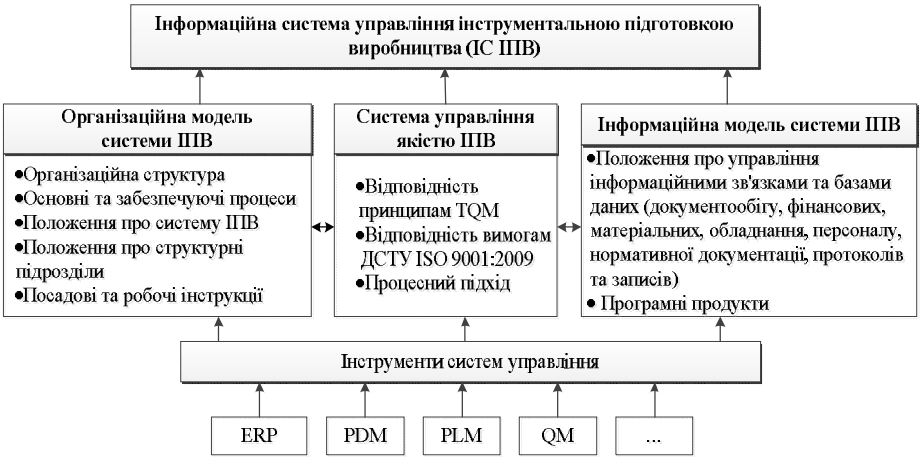


Рис. 1. Концептуальна модель системи управління ІПВ в умовах застосування інформаційних технологій

У роботі визначено ті особливості ІПВ машинобудівних підприємств, які є передумовою до розробки єдиних методів в прийнятті рішень щодо якості її процесів. У роботі представлено розроблену у дослідженні уніфіковану модель прийняття рішень в сфері якості процесів інформаційної системи (ІС) ІПВ з безрозмірною шкалою оцінювання, що дозволяє оцінювати процеси за однією з двох умов, в залежності від техніко-економічних показників (ТЕП) процесів та витрат на якість процесів ІС ІПВ. З врахуванням вимог ІС ІПВ запропоновано систему ТЕП за трьома ознаками оптимальності та розроблено класифікацію витрат на якість процесів ІС ІПВ, що дозволяє суттєво підвищити ефективність

її функціонування.та науково обґрунтовано і розроблено алгоритм впровадження ІС ІПВ на машинобудівному підприємстві. Показано, що запропоноване у роботі нормативно-методичне забезпечення дозволяє на кожному машинобудівному підприємстві розробляти систему управління якістю ІС ІПВ із урахуванням специфіки підприємства, сукупності технологічних процесів, характеру технологічного оснащення, що випускається, та інших виробничих особливостей.

Ю.О. Денисенко, к.т.н.,
В.О. Залога, д.т.н., проф.,
І.Е. Іваненко, студ.,
Сумський державний університет

СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ВІДМОВ ІНСТРУМЕНТУ

Підвищення ефективності процесів механічної обробки деталей, є актуальним питанням для вітчизняних машинобудівних виробництв. Важливу роль у забезпеченні високої ефективності механічної обробки деталей (надійне забезпечення вимог креслень виробів, висока продуктивність, мала собівартість тощо) відіграють процеси впровадження методів раціональнго використання надійного різального інструменту.

Питання працездатності різального інструменту при механічній обробці широко розглянуті, зокрема у роботах Верещаки А.С., Мироненка Є.В., Калініченка В.В., Гузенка Д.Є. Одним із факторів, що спричиняють негативний вплив на працездатність різців, продуктивність та енергоефективність обробки при чорновому точінні автори [1–3] зазначають значні втрати часу на заміну різального інструменту/пластини, що зумовлені невисокою стійкістю та відносно високим відсотком раптових відмов різців і відтак спричиняють значні втрати електроенергії при роботі електродвигуна привода головного руху верстата на холостому ході. В той же час широке впровадження стандарту ДСТУ EN ISO 9001:2018 вимагає, у тому числі, й впровадження системи оцінювання ризиків на підприємстві. Під оцінкою ризиків мається на увазі виявлення виникаючих в процесі оброблення можливих небезпек, а також визначення величини і значущості цих ризиків. Треба мати на увазі, що оцінювання ризиків є одним з найбільш ефективних превентивних заходів, тому що при оцінюванні ризиків враховуються не тільки несприятливих наслідків, пов’язаних, наприклад, з відмовами інструментів, що сталися раніше, але і ті можливі відмови, які поки що не викликали, тобто прогнозні. Відомо, що руйнуванню можуть підлягати (в залежності від конструкції інструменту та процесу оброблення) наступні елементи інструменту: ріжучий клин по перетину (сколювання) або його відносно невеликі ділянки (викришування різальної кромки), різальна пластинка, зуб або вся робоча частина цілісного інструменту, калібруюча або напрямна

частини; паяні з'єднання або елементи механічного кріплення пластинки; державка або корпус біля задньої поверхні під пластинкою (деформація опорної зон); деформація державки різця, наприклад, при розточуванбні й інших. В ході роботи були виявлені найбільш поширені види відмов на прикладі твердосплавних різців з причини руйнування: різальної частини- сколювання та викришування, у т.ч. і за рахунок утворення термічних тріщин; локальної пластичної деформації різальної кромки як в сторону задньої, так і в сторону передньої поверхонь тощо. Оцінювання ризиків, пов'язаних з цими відмовами, пропонується проводити в два етапи. Перший етап – базове (первинне) оцінювання ризику проводиться на основі баз даних процесів обробки, а також даних про враховані відмови. Другий етап – уточнене оцінювання ризику проводиться тільки на тій операції, що розглядається, з врахуванням оброблюваного і інструментального матеріалів, геометричних праметрів інструменту та режимів різання. Розрахунок величини ризику, на відміну від існуючого методу, запропоновано проводити з врахуванням ймовірності виникнення подій за формулою:

$$P = B \cdot П \cdot B_p ,$$

де B – важливість потенційної небезпеки; $П$ – схильність небезпеки; B_p – ймовірність небезпеки.

Такий підхід дозволяє, не чекаючи інцидентів, виявляти (ідентифікувати) можливі небезпеки відмов інструменту, оцінювати ризики проявлення цих небезпек, вести їх розрахунок, і, нарешті, на основі оцінювання приймати оперативні рішення та розробляти плани щодо зниження або усунення ризиків, що може бути використано для: технологічної підготовки виробництва.

В.Ю. Денисюк, к.т.н.,
М.В. Карманський, студ.,
Ю.С. Лапченко, к.т.н.**,**
Р.В. Ніщот, студ.,
В.П. Симонюк, к.т.н.,
Луцький національний технічний університет

ДО ШЛІФУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ У ВІЛЬНОМУ АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

При шліфуванні за допомогою абразивного інструменту при силових методах обробки деталей, виготовлених із металів, часто виникають такі негативні явища, як пригари, підпали. У цих місцях відбуваються температурні та термохімічні негативні явища. Виникає значне підвищення температури, яке сягає критичної межі і, навіть, значно вище. Температурні показники в зоні контакту знаходяться в межах 1000–1500 °С. Це впливає на фізико-хімічні та експлуатаційні властивості оброблюваної поверхні.

Для запобігання виникнення пригарів, часто використовують змащувально-охолоджувальну рідину. Проте, виникнення підвищених температур в зоні шліфування уникнути не завжди вдається. Підвищення температури в зоні контакту, це наслідок силової дії, тобто, взаємного притискання поверхонь деталі та абразивного інструменту і одночасного «царапання» поверхні деталі. Саме, застосування сил притискання, викликає підвищення температури в зоні контакту за рахунок сил тертя, або ж їх можна назвати силами супротиву. Абразивний інструмент, як відомо, виготовлений у вигляді з'єднаних між собою за допомогою спеціальних клеєвих розчинів, при різних щільностях, дрібних абразивних частинок, які в подальшому виступають в ролі ріжучих інструментів.

Натомість, існують інші, альтернативні методи, відомі як методи обробки вільними абразивами. До цих методів відноситься і обробка деталей у бункері із приводом, що спроможний створювати вібрації. Великої уваги заслуговують вібраційні установки спроможні створювати циркуляційний рух, за рахунок якого відбуваються покращені якісні характеристики обробки деталей.

Вібраційні навантаження, що діють на вібробункер при увімкненні зовнішньої рушійної сили, як відомо, призводять до виникнення руху робочого середовища. Даний рух є хаотичним і, як правило, більша його інтенсивність спостерігається у зонах, наближених до дна та стінок бункера. Як показують проведені дослідження, за таких умов, відбувається неоднакова оброблюваність деталей. Із збільшенням перемішування робочої суміші, а саме, частої, а то і постійної зміни режимів циркуляції, цей показник значно покращується.

Циркуляційний рух робочого середовища, як одного цілого в'язкотекучого, полягає у переміщенні елементів згідно певних направлених траєкторій. Елементи робочого середовища мають розміри, які є порівняними із розмірами вібробункера та об'ємом всього робочого середовища. Тому осереднені траєкторії руху робочого середовища не є плавними лініями. Як правило, вони є ламаними, тому що, при переміщенні деталей і гранул абразиву, вони контактують у різних точках і розташування точок контакту змінюється.

На елемент робочого середовища (деталь або гранулу), який знаходиться у вібробункері, діють постійні вібраційні навантаження з частотою, рівною частоті зміни сили віброприводу. Вібраційні навантаження передаються з боку гранул абразиву на деталь і навпаки. Одночасно на деталь діють ударні навантаження. Під дією всього комплексу навантажень деталі і гранули абразиву рухаються в робочому середовищі.

Для визначення характеру циркуляційного руху варто застосовувати закони зміни кількості руху для виділеного контрольного об'єму робочого середовища. Середня швидкість циркуляційного руху залежить від амплітудно-частотних характеристик приводу і, як наслідок, робочої суміші, та її маси.

Обробка деталі, в основному, здійснюється при відносному переміщенні деталі відносно гранул абразиву при вібрації бункера та робочої суміші в цілому. Швидкість переміщення деталі відносно гранул залежить від випадкового положення деталі відносно напряму вектора швидкості деталі при вібрації.

Отже, в загальному напрямі руху робочої суміші відбувається хаотичний рух, який проявляється у вигляді відхилень траєкторії руху окремої складової частинки, тобто, оброблюваної деталі або гранули абразиву, від середньої траєкторії циркуляційного руху. Відхилення траєкторії близьке до гармонічного (синусоїдального) закону. Як показують проведені дослідження, в багатьох випадках, часті зміни циркуляційного руху призводять до покращення якості обробки деталей. Але, дуже важко підібрати оптимальну функцію змушуючої сили приводу.

Один з розв'язків цієї проблеми полягає у збільшенні кількості приводів установки. В цьому випадку зникає нагальна необхідність підбору виду функції змушуючої сили, оскільки спрацювання декількох приводів в різній комбінації (попарно, по-діагоналі, по-одному тощо) забезпечують уникнення застійних зон робочого середовища, які можуть привести до виникнення неоднорідності обробки поверхні деталі. Залишається лише вибрати найефективнішу комбінацію спрацювань даних приводів.

О.В. Дерібо, к.т.н., проф.,
Ж.П. Дусанюк, к.т.н., доц.**,**
Л.Г. Козлов, д.т.н.,
С.В. Репінський, к.т.н., доц.,
Вінницький національний технічний університет

ДОСВІД ВИКЛАДАННЯ ТЕМ «РОЗМІРНИЙ АНАЛІЗ КОСТРУКЦІЙ» І «РОЗМІРНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ» У ВІННИЦЬКОМУ НАЦІОНАЛЬНОМУ ТЕХНІЧНОМУУНІВЕРСИТЕТІ

Теорія розмірних ланцюгів є ефективним сучасним засобом для якісного і кількісного аналізу наявних і синтезу нових машинобудівних конструкцій та технологій. Саме тому у навчальному процесі підготовки бакалаврів і магістрів кафедри технологій та автоматизації машинобудування Вінницького національного технічного університету програма дисципліни «Основи технології машинобудування» (ОТМ) вже досить тривалий час містить теми «Розмірний аналіз конструкцій» і «Розмірний аналіз технологічних процесів механічної обробки».

Студенти вивчають тему «Розмірний аналіз конструкцій» під час лекцій і практичних занять у першій частині курсу ОТМ. Практичні навички виконання розмірних розрахунків студенти отримують в процесі виконання індивідуального домашнього завдання, яке передбачає розв'язання прямої (проектної) задачі розрахунку лінійного або кутового розмірного ланцюга. Початковими даними для виконання завдання є складальне креслення або конструктивна схема нескладного машинобудівного виробу із заданими

вимогами точності до лінійних або кутових розмірів, які є ланками замикання відповідних розмірних ланцюгів. Розрахунком потрібно визначити показники точності всіх складових ланок і вибрати метод забезпечення точності ланки замикання під час складання виробу. Розв'язання задач розмірного аналізу частина студентів виконує також в бакалаврських дипломних роботах (БДР) і магістерських кваліфікаційних роботах (МКР), але вимоги до показників точності ланок замикання студенти мають сформулювати самостійно, виходячи із службового призначення аналізованого виробу.

Тема «Розмірний аналіз технологічних процесів механічної обробки» розглядається в другій частині курсу ОТМ. Практичні навички виконання технологічних розмірних розрахунків студенти отримують під час курсового проектування з дисципліни «Технологія машинобудування». Початковими даними є креслення деталі і попередньо розроблений маршрут механічної обробки її заготовки. В результаті виконання розмірного аналізу мають бути визначені номінальні значення і граничні відхилення всіх лінійних технологічних розмірів і розмірів вихідної заготовки, а також перевірена правильність призначення допусків технологічних розмірів і визначені максимальні припуски на обробку плоских поверхонь.

Розділ «Розмірно-точнісне моделювання технологічного процесу» є складовою всіх БДР і МКР технологічного спрямування.

Частина студентів з використанням розмірного аналізу як конструкцій, так і технологічних процесів виконують наукову чистину МКР.

І.В. Дощечкіна, к.т.н., проф.,
Н.О. Лалазарова, к.т.н., доц.,
І.С. Татаркіна, к.т.н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ЕПІЛАМУВАННЯ ПОВЕРХНІ ЯК АКТИВАТОР ПОКРАЩЕННЯ ШТАМПУВАННЯ ХОЛОДНОКАТАНИХ ЛИСТОВИХ СТАЛЕЙ

Від загальної кількості металургійної продукції значну частку становить тонколистова сталь. Холоднокатані тонколистові маловуглецеві сталі широко використовуються у всіх галузях народного господарства. Їх виробництво складає більше 50 % загального обсягу прокату, і, незважаючи на застосування нових конструкційних матеріалів, ці сталі як і раніше займають провідне місце в автомобілебудуванні, в сільськогосподарській, електротехнічній, побутовій техніці, будівництві та ін.

Деталі виготовляють холодним листовим штампуванням, яке є одним з основних видів обробки металу тиском. Так вага штампованих деталей з листа, наприклад, в автомобілебудуванні становить близько 65–70%, а у виробництві товарів народного споживання – 95–98%. На виробництві у цехах холодного

штампування близько 90% продукції складають тонколистові холоднокатані низьковуглецеві сталі 08кп, 08пс, 08Ю. Їх здатність до витягування визначається за максимальною глибиною лунки без утворення тріщини при випробуваннях на видавлювання за Еріксеном (ГОСТ 10510-80). За цим показником тонкий лист (товщиною до 2 мм) згідно ГОСТ 9045-93 поділяється на 4 групи: вельми особливо складного (ВОСВ), особливо складного (ОСВ), складного (СВ) і вельми глибокого (ВГ) витягування. З урахуванням вимог міжнародного стандарту ISO / 3674-86 додана ще одна група – ВОСВ-Т з підвищеною технологічною пластичністю. При цьому слід підкреслити, що здатність до витяжки ВОСВ і ВОСВ-Т забезпечується тільки для сталі 08Ю.

У практиці машинобудівних підприємств нерідко спостерігається недостатня штампуємість листових заготовок, що пов'язано з відсутністю методів підвищення здатності до витяжки вже готового листа і призводить до відчутних економічних втрат. Це визначає актуальність робіт, спрямованих на пошук нових рішень, що забезпечать збільшення технологічної пластичності сталі для отримання необхідного ступеня деформації без руйнування. При цьому дуже важливо збереження достатньої міцності після штампування для зниження металоємності готової продукції.

У даній роботі запропонований метод поліпшення штампування шляхом зміни стану поверхні заготовок холоднокатаної листової сталі – нанесенням нанорозмірної мономолекулярної плівки епілама. Основою структури всіх епіламучих композицій є фтор поверхнево-активні речовини (фтор ПАР), які являють собою фторполімери, що не мають аналогів в природі і синтезовані штучно.

Нанесення фторПАР на поверхню виробів здійснюється різними способами: пензлем, тампоном, розпиленням в камерах, зануренням у розчин, вручну або в автоматизованих установках. Вибір способу нанесення визначається властивостями і розмірами виробів.

Епіламування (ЕП) є одним із сучасних видів нанопокриттів, які мають багатофункціональне призначення. Вони широко застосовуються для зниження тертя і зносу контактуючих поверхонь, підвищення стійкості різального інструменту і штампового оснащення, захисту металевих поверхонь від корозії. Сфери застосування епіламів не вичерпуються наведеними прикладами. Що ж стосується впливу ЕП на деформаційну поведінку виробів та їх механічні і технологічні властивості, то такі дослідження до нас не проводилися.

Експерименти виконані на листових маловуглецевих холоднокатаних сталях 20 (товщина прокату 1,2 мм) і 08кп (товщина 0,5 мм) в стані поставки. ЕП проводили зануренням листових зразків на 10 хв в ванну з епіламом марки СФК-05. Температура ванни дорівнювала 50–55 °С.

Шорсткість і профіль поверхні вивчали за допомогою профілометра-профілографа TRa200, відповідно стандарту ISO 4287-97. Чутливість датчика аналізатора становила 0,002 мкм. Це дозволяє оцінити топографію поверхні від 0,005 мкм. Діапазон вимірювань був від 0,01 до 160 мкм. Похибка вимірювання Ra не перевищувала 10%.

Випробуванню на розтяг підлягали плоскі зразки розміром 100×20×1,2 мм на розривній машині UIT-STM-50 згідно зі стандартом. Здатність до витягування у початковому стані (поставка) та після ЕП визначали на зразках зі сталі 08кп розміром (90×50×0,5 мм) на підставі результатів випробувань за Еріксеном.

Дослідження показали, що після ЕП шорсткість поверхні *Ra* значно зменшується – від 1,6 мкм до 0,21 мкм (рис. 1). На загальному згладженому тлі реєструються лише незначні окремі виступи (рис. 1, *б*). Це пояснюється тим, що епіламам притаманний низький поверхневий натяг. За рахунок цього відбувається його затікання в найдрібніші нерівності поверхні (западини, субмікроскопічні тріщини, пори) і здійснюється заліковування поверхневих дефектів, що подовжує область пружно-пластичного деформування металу.

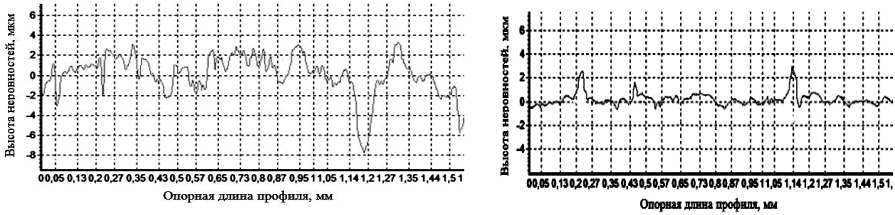


Рис. 1. Профілограми зразків сталі 20: а – вихідний стан; б – після епіламування

Випробування на розтяг плоских зразків зі сталі 20 (табл. 1) дозволяють зробити висновок, що ЕП при незначному зниженні характеристик міцності ($\sigma_в$, $\sigma_{0.2}$ і $S_к$ зменшуються на 4, 8 і 10% відповідно) приводить до істотного збільшення відносного подовження δ (на 44%) і відносного звуження (на 57%). У той же час, дійсне напруження руйнування $S_к$ в зв'язку з виключно високою пластифікацією зростає на 12%. Таким чином, справжня міцність листових заготовок, незважаючи на таке велике збільшення пластичності, вище, ніж у листа в стані поставки.

Таблиця 1 – Результати випробувань плоских зразків сталі 20 в різному стані

Стан	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$S_к$, МПа	δ,%	ψ,%
Вихідний	375	290	480	25	21
Після епіламування	370	275	540	36	33

Істотне підвищення пластичності має впливати на штампування сталі. Щоб підтвердити це припущення сталевий холоднокатаний лист зі сталі 08кп товщиною 0,6 мм після ЕП був випробуваний на видавлювання за методом Еріксена. Результати наведені в табл. 2.

Треба зазначити, що отримана після ЕП сталі 08кп глибина лунки навіть перевищує вимоги ГОСТ ГОСТ 9045-93 для здатності до ВОСВ та ВОСВ–Т навіть сталі 08Ю (при товщині листа 0,6 мм глибина лунки 10 мм), в якій

міститься менша кількість шкідливих домішок (особливо кисню) в порівнянні зі сталлю 08кп. Таке суттєве підвищення пластичності і здатності до витягування сталі дозволить різко збільшити ефективність процесу її холодного штампування – скоротити кількість переходів, знизити витрату штампового інструменту, підвищити продуктивність праці. При цьому слід очікувати поліпшення якості виробів і помітного зменшення браку.

Таблиця 2 – Дані випробувань на видавлювання за методом Еріксена листа сталі 08кп товщиною 0,6 мм

Стан	Глибина лунки, мм	Категорія витягування
Вихідний	9,05	ВГ
Після епіламування	11,7–11,85	ВОСВ–Т

З огляду на дуже широке поширення холодного штампування в сучасному виробництві, отримані результати при практичному використанні принесуть значний економічний ефект. Нагадаємо, що до цих пір не існувало способів поліпшення технологічної пластичності вже готового листа холоднокатаної сталі.

К.О. Дрозд, студ.,
Р.В. Соболевський, д.т.н., проф.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

ОПТИМАЛЬНА ШВИДКІСТЬ ПЕРЕМІЩЕННЯ АЛМАЗНОГО ЗЕРНА ПРИ ШЛІФУВАННІ КАМЕНЮ

Природний камінь – це гірські породи і мінерали, які використовуються у будівництві, декоративному архітектурному будівництві, прикрасі інтер'єрів, декоративно-прикладних і культурно-побутових виробах. Під художньою обробкою природного каменю розуміється сукупність технологічних процесів, спрямованих на зміну об'єму, фізико-технічних і декоративних властивостей матеріалу, з метою отримання фактури оброблених поверхонь і форми виробу, котрі відкривають красу каменю, і що володіють не лише функціональними, але і естетичними якостями.

Шліфування є прадавнім процесом обробки природного каменю. Ще в глибокій давнині людина стала застосовувати природні шліфувальні матеріали при виготовленні знарядь праці. З науковим прогресом процес шліфування твердих матеріалів вдосконалювався і перейшов до автоматизованого алмазного шліфування.

У дослідженнях процесів алмазно-абразивної обробки природного каменю відсутня єдина точка зору на механізм алмазно-абразивного руйнування при обробці природного каменю. Аналіз робіт показав, що поставлене завдання не

може бути вирішене в загальному вигляді, якщо продовжувати дослідження тільки на експериментальному рівні, оскільки їх результати дозволяють визначити вплив, лише тих або інших технологічних чинників, для яких проводяться експерименти.

Ефективність і якість алмазного шліфування визначається не сумарною товщиною шару (глибиною шліфування), що зрізується усіма зернами, діючими в межах кривої контакту інструменту з матеріалом, що оброблюється, а деякою оптимальною товщиною шару ("стружки"), що руйнується одиничним алмазним зерном. Саме цією оптимальною товщиною шару визначаються значення раціональних технологічних параметрів алмазного шліфування природного каменю. У свою чергу значення товщини шару ("стружки") залежать від фізико-технічних властивостей матеріалу, шліфувального круга і параметрів дії алмазного інструменту на природний камінь – кінематики і динаміки процесу круглого зовнішнього алмазного шліфування. Максимальна продуктивність одиничного циклу при шліфуванні каменю досягається при оптимальній потужності трансформації енергії одиничним алмазним зерном в матеріал, що обробляється.

Дослідивши процес шліфування було встановлено, що швидкість переміщення алмазного зерна за оброблюваним матеріалом прямо пропорційна кореню квадратному з діаметру плями контакту алмазного зерна в третьому ступені і обернено пропорційна часу одиничного циклу руйнування і кореню квадратному з межі міцності оброблюваного матеріалу при розтягу і оптимальній товщині шару, що руйнується одиничним алмазним зерном.

Оптимальна швидкість переміщення алмазних зерен по природному каменю v_p і оптимальна товщина шару, що руйнується алмазними зернами, є основними параметрами, виходячи з яких встановлюються раціональні кінематичні параметри режиму пружного шліфування, які забезпечують величину раціональної силової взаємодії шліфувального круга на виріб.

На рис. 1 приведені залежності оптимальної швидкості переміщення алмазних зерен від товщини зруйнованого шару для головинського лабрадориту, при постійному діаметрі плями контакту зерен з каменем.

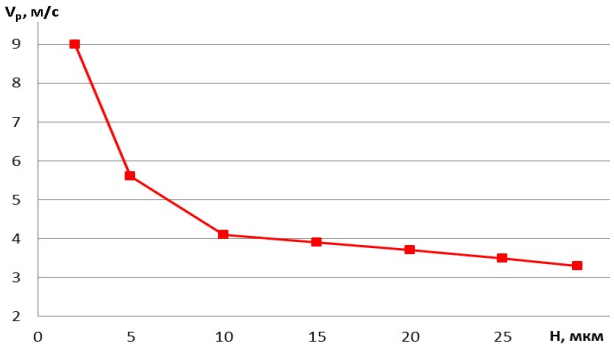


Рис. 1. Залежність оптимальної швидкості переміщення алмазного зерна по головинському лабрадориту від товщини шару, який руйнується

Висновки:

1. Від величини силової дії алмазного зерна на оброблюваний матеріал залежать глибина порушеного шару і мінімальна товщина виробів;
2. Оптимальна товщина стружки прямо пропорційна квадратному кореню з третьої міри межі міцності алмазного зерна при роздавлюванні, силі руйнування і обернено пропорційна до межі міцності каменю при розтягу.

К.О. Заставский, студ.,
В.С. Майборода, д.т.н., проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ З ОБРОБЛЮВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ В УМОВАХ КІЛЬЦЕВОЇ ВАННИ

Магнітно-абразивне оброблення (МАО) це один з перспективних методів фінішного оброблення деталей як простої, так і складної форми. Але активне впровадження методу МАО у виробництво стримується відсутністю достатньої кількості даних про особливості взаємодії магнітно-абразивного порошку, сформованого при МАО в магнітно-абразивний інструмент (МАІ), величину зусиль, які виникають в процесі оброблення і їх природу. Саме ця інформація дозволяє виконувати цілеспрямоване керування ефективністю процесу.

Експериментальні дослідження виконували на установці типу кільцева ванна при швидкостях обертання робочої головки V, яка встановлена в шпиндель верстата в діапазоні 100–300 об/хв., магнітній індукції в робочих зонах коаксіальної магнітної системи 0,17 та 0,24 Тл, та швидкості обертання мінішпінделя з контрольним зразком, встановлених на корпусі робочої головки, яку змінювали від 100 до 1000 об/хв. Процес МАО виконували в умовах формування стабільного МАІ. Зміна швидкості обертання мінішпінделя забезпечувалась за рахунок зміни напруги U на двигуні постійного струму, який є індивідуальним приводом мінішпинделя в діапазоні від 3 до 15 В з кроком 1 В. Для дослідження використовувались циліндричні зразки діаметром 16 мм та довжиною 30 мм встановлені паралельно осі головки і магнітної кільцевої ванни, виготовлені з алюмінію, бронзи, титанового сплаву (парамагнітні матеріали) та сталі 40Х13 (феромагнітна). При МАО зразки встановлювали таким чином, щоб відстань від їх поверхні до полюсних наконечників , які формують кільцеву ванну була однаковою.

Методика досліджень полягала в визначенні ефективного моменту – $M_{еф}$ через напругу U, силу струму I, та швидкість обертання деталі навколо своєї осі ω. На першому етапі було визначено момент холостого ходу за формулою (1):

$$M_{xx} = \frac{U_{xx} \cdot I_{xx} - I_{xx}^2 \cdot r_{дв}}{\omega} \quad (1),$$

де M_{xx} – момент холостого ходу, U_{xx} – напруга холостого ходу (В), I_{xx} – сила струму холостого ходу (А), $r_{дв}$ – опір двигуна (Ом), ω – швидкість обертання зразка (об/хв). За формулою (2) розраховували безпосередній момент на двигуні при обробленні деталей.

$$M_{дв} = \frac{U_{роб} \cdot I_{роб} - I_{роб}^2 \cdot r_{дв}}{\omega} \quad (2),$$

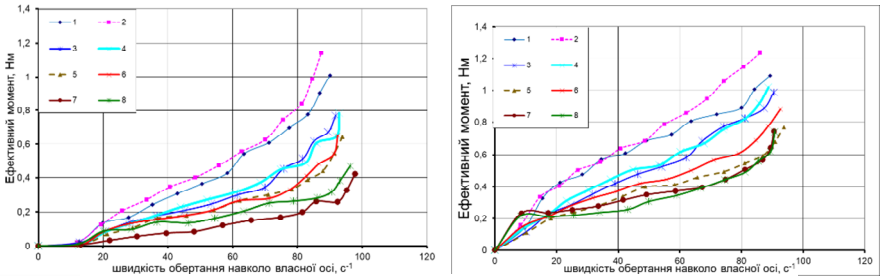
де $M_{дв.}$ – робочий момент, $U_{роб.}$ – робоча напруга, $I_{роб.}$ – робоча сила струму. Ефективний момент – $M_{еф}$ визначали як

$$M_{еф} = M_{дв} - M_{xx} \quad (3).$$

Зусилля , що виникають при МАО залежать від особливостей взаємодії оброблюваної деталі з МАІ. При цьому важливим параметром є магнітні властивості оброблюваного матеріалу. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при МАО сталевих – феромагнітних зразків має місце майже лінійне зростання величини $M_{еф}$ до частоти обертання мінішпинделя з зразком 60–70 $с^{-1}$. Збільшення частоти обертання призводить до активного зростання ефективного моменту, який характеризує умови взаємодії в парі МАІ-оброблювана поверхня. Показано, що при обробленні феромагнітної сталі спостерігається зниження величини $M_{еф}$ при збільшенні швидкості обертання навколо осі ванни (рис. 1). Це може бути пов'язано зі зменшенням площі активного контакту МАІ з оброблюваними поверхнями. Процес зростання величини $M_{еф}$ при частотах обертанні мінішпинделя більших за 60–70 $с^{-1}$ відбувається за рахунок зміни механізму взаємодії частинок МАІ з поверхнею деталей, який пов'язаний з зміною кутів різання і активним провертанням частинок в безпосередній близькості до оброблюваних поверхонь. Встановлено, що зі збільшенням величини магнітної індукції присутнє незначне збільшення ефективного моменту. Зазначені закономірності мають місце при використанні порошків різної зернистості.

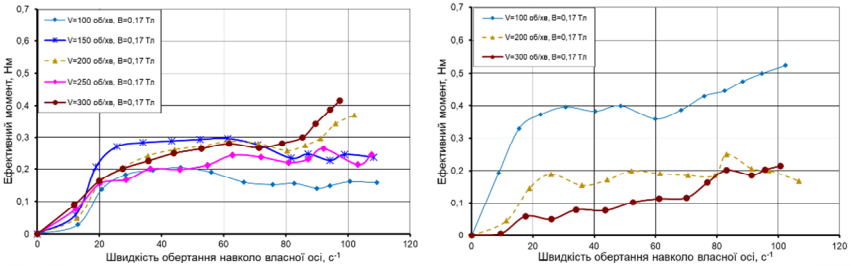
Для парамагнітних матеріалів, таких як титан (рис. 2), алюміній (рис. 3) та бронза (рис. 4), при обробці порошком зернистістю 400/315 мкм спостерігаються такі самі залежності як і для сталі. А саме, зменшення $M_{еф}$ при збільшенні швидкості обертання навколо осі ванни, та незначний вплив зміни величини магнітної індукції. При обробленні парамагнітних матеріалів порошком зернистістю 200/100 мкм має місце аномальна зміна ефективного моменту при зміні швидкості обертання навколо осі ванни. Це може бути зумовлено дією пондеромоторних сил, а саме формуванням локальних мікрополів між окремими зернами порошку що збільшують або зменшують загальну величину магнітного поля в робочій зоні. Для всіх парамагнітних матеріалів при збільшенні швидкості обертання деталі навколо власної осі більше 80 $с^{-1}$ спостерігається різке підвищення величини $M_{еф}$. Це відбувається за рахунок переорієнтації частинок і мікрооб'ємів МАІ в зоні контакту з оброблюваною поверхнею, тобто зміна положення зерна відносно поверхні

деталі та зміна величини площини реального контакту частинок з поверхнею. Такого різкого зростання моменту при обробленні сталевих деталей не спостерігається, оскільки сили магнітної взаємодії між порошком і деталлю перевищують сили, які приймають участь при формуванні МАІ не дозволяючи зернам активно переорієнтовуватися.



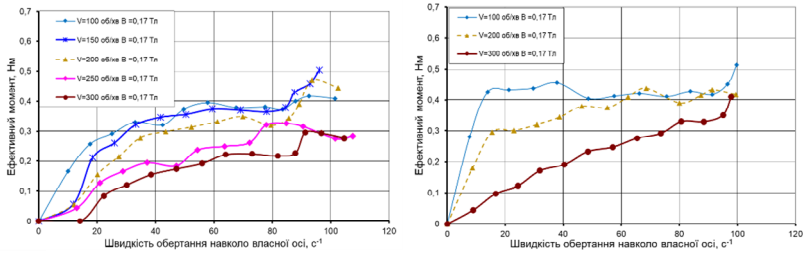
Полімам Т 200/100 мкм Полімам Т 400/315 мкм

Рис. 1. Залежність ефективного моменту від швидкості обертання зразків зі сталі навколо власної осі. 1 – V=100 об/хв, B=0,17 Тл; 2 – V=100 об/хв, B=0,24 Тл; 3 – V=150 об/хв, B=0,17 Тл; 4 – V=150 об/хв, B=0,24 Тл; 5 – V=200 об/хв, B =0,17 Тл; 6 – V=200 об/хв, B =0,24 Тл; 7 – V=300 об/хв, B =0,17 Тл; 8 – V=300 об/хв, B = 0,24 Тл



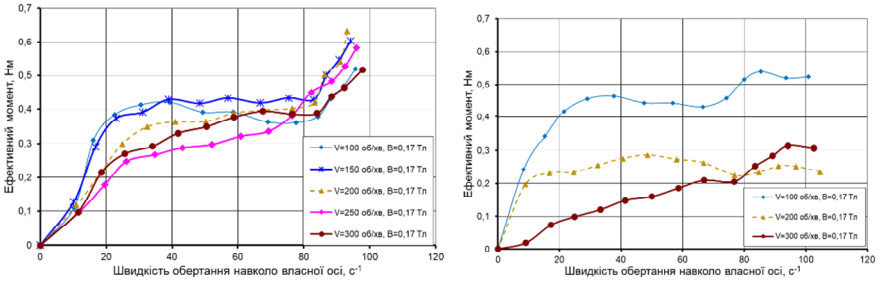
Полімам Т 200/100 мкм Полімам Т 400/315 мкм

Рис. 2. Залежність ефективного моменту від швидкості обертання зразків з титану навколо власної осі



Полімам Т 200/100 мкм Полімам Т 400/315 мкм

Рис. 3. Залежність ефективного моменту від швидкості обертання зразків з алюмінію навколо власної осі



Полімам Т 200/100 мкм Полімам Т 400/315 мкм

Рис. 4. Залежність ефективного моменту від швидкості обертання зразків з бронзи навколо власної осі

Л.И. Ивщенко, д.т.н., проф.,
Н.В. Сахнюк, к.т.н., доц.,
Национальный университет «Запорожская политехника»

СНИЖЕНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ХВОСТОВИКОВ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

Хвостовики рабочих лопаток компрессора являются высоконагруженными элементами конструкции лопатки. В процессе эксплуатации на них действует динамически изменяемые нагрузочные параметры (амплитуда и частота взаимных перемещений хвостовика и паза диска, давление в контакте, температура). Кроме того, они подвержены коррозии из-за различной влажности воздуха, температуры, скорости потока воздуха и попаданий воды. Эти и другие факторы, прежде всего, влияют на состояние поверхностного слоя рабочих поверхностей хвостовика, а их состояние в значительной мере определяет долговечность лопатки в целом.

Технологический процесс изготовления лопаток компрессора предусматривает окончательную отделочную обработку хвостовиков – ультразвуковое упрочнение, которое значительно снижает уровень концентрации напряжений во впадинах профиля; наносится гальваническое покрытие, способствующее замедлению процессов изнашивания и коррозии, однако, при длительной наработке на хвостовиках рабочих лопаток возникают повреждения. Повышенный износ на крайних участках хвостовика является следствием значительно больших контактных давлений и амплитуд взаимного перемещения и вызывает увеличение зазора в замковом соединении, что способствует росту вибрационных напряжений в пере лопатки и, в конечном счете, увеличивает вероятность усталостного разрушения последних.

Целью исследования являлось устранение повреждений несущих поверхностей хвостовика лопаток компрессора. Объектом исследований служили лопатки II-й ступени КВД двигателя Д-36 из титанового сплава ВТ8, в частности повреждения и отклонения от плоскостности партии хвостовиков рабочих лопаток до и после эксплуатации.

Исследованиями повреждений установлено, что имеется неравномерный износ поверхности по длине хвостовика, покрытие отсутствует, видны следы изнашивания основного материала хвостовика лопатки и повреждения в виде питтингов. У входной и выходной кромок повреждения большие, отклонение их неплоскостности рабочих поверхностей хвостовика до эксплуатации составило 0,004-0,006 мм, а после – увеличилось на порядок. Ранее, при капитальном ремонте двигателей, лопатки, имеющие такой износ, заменялись новыми, что не является рациональным.

Предложенный метод устранения повреждений несущих поверхностей хвостовика позволяет решить не только вопросы исправления его геометрических размеров, но и восстанавливает поверхностный слой. Суть метода заключается в доводке рабочих поверхностей хвостовика, контроле геометрии и качества поверхности, наведении сжимающих напряжений в поверхностном слое методом ультразвукового упрочнения с дальнейшим нанесением покрытия.

Финишную обработку (доводку) выполняли специальными притирами одновременно двух поверхностей. Притиры изготавливали из чугуна перлитной структуры твердостью 140–200 НВ, а в качестве рабочей среды использовали абразивные пасты на основе карбида кремния (SiC) средней зернистости (до 50 мкм). Рабочей жидкостью служил керосин. Через каждых 12–15 обработанных лопаток выполнялось принудительное восстановление геометрии притира.

Благодаря такой обработке достигается высокая точность формы, необходимая шероховатость, снижается разброс размеров в пределах одной партии деталей.

С увеличением времени доводки в сопряжении рабочей поверхности с радиусом образуется уступ, величина которого зависит от глубины повреждения, а в итоге от величины снимаемого материала. Для уменьшения негативных последствий уступ устраняется.

В месте сопряжения выполняется поднутрение (выкружка). Глубина поднутрения не превышает 0,1 мм.

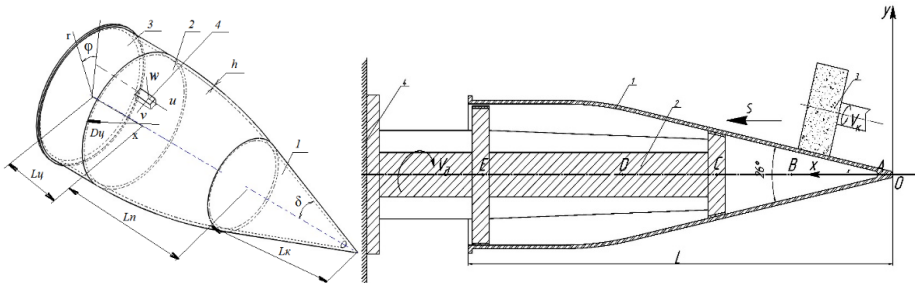
Предложенный метод снижения повреждаемости контактных поверхностей хвостовиков лопаток компрессоров из титановых сплавов позволяет продлить срок их службы, восстанавливать их форму, не нарушая динамической прочности. Проверка прочности соединения типа “ласточкин хвост” после ремонта обеспечивает исходные характеристики и параметры соединения.

Л.П. Калафатова, д.т.н, проф.,
О.О. Рева, студ.,
Донецький національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ОБОЛОНОК СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ ІЗ КРИХКИХ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Тонкостінні складнопрофільні оболонки обертання із важкооброблюваних крихких неметалевих матеріалів (КНМ) типу технічних керамік і ситалів використовуються в різних конструкціях авіакосмічної, ракетної техніки, а також у якості корпусних елементів апаратів, призначених для глибоководних досліджень. Споживацькі властивості цих виробів визначаються умовами експлуатації і пов'язані з особливостями їх конструкції, характеристиками матеріалу і технологією виготовлення. До виробів цього класу (наприклад, антенних обтічників літаків і ракет, рис. 1) пред'являються високі вимоги за точністю форми (відхилення розміру товщини стінки ± 0,02 мм), якістю поверхні, що формується (шорсткість по параметру $Ra \leq 0{,}1$ мкм), і відсутністю дефектності обробленої поверхні, внесеної під час механічної обробки.

Тому метою досліджень є обгрунтування і вибір ефективних технологічних способів формоутворення точних і якісних фасонних поверхонь у тонкостінних виробах – оболонках складної форми з важкооброблюваних крихких неметалевих матеріалів.



а *б*

Рис. 1. Схеми деталі-представника – тонкостінної оболонки обертання з ситалу АС-418 (а) і операції шліфування її зовнішнього контуру (б), де 1 – заготовка; 2 – затискне пристосування; 3 – шліфувальний круг; 4 – шпиндельний вузол верстату

На рис. 1, *а* позначені наступні параметри деталі: 1 - конічна частина з кутом конусу 2δ і довжиною $L_к$; 2 – криволінійна частина, за формою наближена до квадратичної параболи, довжиною $L_п$; 3 – циліндрична частина довжиною $L_ц$, діаметром $D_ц$; 4 – елемент оболонки з вказанням напрямку переміщення точки серединної поверхні в радіальному (w), тангенціальному (v)

і осьовому(u) напрямках; h -товщина стінки деталі. Розглядалися умови оброблення деталей типорозміру L/D_u = 3–4, де L – загальна довжина оболонки до 1000 мм, D_u – до 350 мм, товщина стінки готового виробу h до 6 ± 0,02 мм при товщині стінки заготовки $h_з$ = 15–20 мм.

Якість виробів забезпечується на етапах отримання заготовки (відцентрове лиття), механічної обробки (алмазне шліфування і доводка абразивними брусками) і хімічної обробки (стравлювання в розчині концентрованих кислот залишків дефектного шару обробленої поверхні, що утворився після механічної обробки, з наступним її іонним зміцненням). Технологічний процес (ТП) механічної обробки передбачає багатоопераційну алмазно-абразивну обробку зовнішнього (див. рис. 1, *б*) і внутрішнього контурів виробів на універсальних токарних верстатах, оснащених агрегатною шліфувальною головкою і системою прямого копіювання.

Із-за недосконалостей технології заготівельних операцій механічна обробка оболонок включає операції чорнового і чистового шліфування, на яких здійснюється попереднє (видалення за кілька проходів основного припуску, що досягає 10–15 мм на сторону) і остаточне формоутворення виробу; операції фінішної абразивної обробки, на яких забезпечується необхідний рівень шорсткості обробленої поверхні при мінімально можливій дефектності. При шліфуванні КНМ з метою збільшення продуктивності обробки в умовах видалення нерівномірного припуску застосовують глибинне шліфування з глибиною різання до 2 мм. Операції чорнового і чистового шліфування здійснюються алмазними кругами здебільшого з природних алмазів і зернистістю 315/250–200/160 і 125/100–63/50 відповідно, при досягненні шорсткості обробленої поверхні від *Ra* 3,2–1,25 (чорнове шліфування) до *Ra* 0,63–0,32 (на стадії чистового шліфування). Фінішна обробка включає операції доведення або притирання алмазними брусками або пастами, які реалізуються вручну, при забезпеченні шорсткості поверхні виробу *Ra* 0,08–0,04 .

До основних технологічних проблем, що виникають на операціях алмазного шліфування оболонок обертання з КНМ, відносяться: нерівномірна жорсткість заготовки по довжині її обробки, що негативно впливає на сталість технологічної системи обробки і призводить до нерівномірності сил різання в процесі шліфування на різних ділянках профілю виробу; швидкий знос шліфувальних кругів (протягом 5–10 хв. роботи різальна здатність круга зменшується більш ніж в 10 разів); биття і огранка шліфувального круга; неприйнятний рівень вібрацій; наявність періодичної похибки обробленої поверхні – хвилястості, а також дефектності в підповерхневому шарі виробу після шліфування; низька продуктивність процесу механічної обробки, необхідність використання ручного труда.

Встановлено, що при шліфуванні великогабаритних порожнистих деталей – оболонок із КНМ виникають коливання двох видів: вимушені і автоколивання. Причини появи вимушених коливань це зовнішні збурення системи ВПІД. Прикладами таких зовнішніх впливів можуть бути інерційні сили, що виникають внаслідок дисбалансу елементів верстату, оброблюваної заготовки, інструменту, а також недостатньою жорсткістю пристосувань, в тому числі

системи копірів, що забезпечують переміщення алмазної шліфувальної головки поздовж заготовки згідно з профілем деталі, як це відбувається в умовах виробництва. Заходи боротьби з вимушеними коливаннями - це усунення причин, що викликають силу, яка обурює їх. А саме: вибір раціональної схеми базування заготовки; конструкцій затискного пристосування і шпиндельного вузла агрегатної силової головки; забезпечення відсутності дисбалансу алмазних кругів; надійна ізоляція фундаменту верстатів і т.д.

Другий вид коливань - автоколивання, або вібрації, які самозбуджуються. При коливаннях такого типу джерело збудження знаходиться в самій системі, збудження носить постійний характер, і частота автоколивань визначається властивостями самої коливальної системи. Формування якісних показників поверхневого шару КНМ при механічній обробці визначається умовами контакту зерен алмазних інструментів і деталі, які супроводжуються різним ступенем силового і динамічного впливів на сформовану поверхню. Змінюючи схему обробки та режими шліфування, можна істотно впливати на характер взаємодії робочої поверхні круга з оброблюваною поверхнею заготовки за рахунок збільшення площі їх контакту і, як наслідок, змінювати демпфірування в системі інструмент – заготовка, а також в необхідному напрямку перерозподіляти припуск, що видаляється, уздовж твірної інструменту. Це дозволяє належним чином формувати силовий вплив на оброблювану поверхню за рахунок зміни умов роботи алмазних зерен, характеру їх зносу.

Виконані дослідження показали, що удосконалені підходи щодо забезпечення високої якості (зменшення шорсткості і дефектності оброблюваних поверхонь) виробів – оболонок із КНМ при обгрунтуванні раціональних умов їх обробки: належного верстатного обладнання, схем і режимів шліфування, характеристик інструментів, дають можливість комплексного технологічного керування точністю обробки і дефектністю сформованої поверхні за рахунок зміни рівня силового впливу на неї при різанні, сприятливих динамічних характеристик процесу (мінімум вібрацій при взаємодії інструменту і деталі). Це особливо важливо для забезпечення експлуатаційних характеристик виробів, наприклад, деталей літальних апаратів, при мінімальних витратах. Для зниження негативного впливу зносу алмазного круга на процес шліфування, який викликає збільшення похибки при профілюванні виробу, виникнення вібрацій за рахунок явищ дисбалансу круга і розвитку дефектного шару, рекомендовано здійснювати періодичну правку алмазних кругів, особливо перед реалізацією операцій чистового шліфування.

Незважаючи на отримані позитивні результати, подальше вдосконалення процесу механічної обробки обтічників, яке б повністю виключило наявність у ТП ручної праці і вплив людського фактору на забезпечення потрібних точності і якості обробки виробів, можливо в умовах роботи на автоматизованому обладнанні.

Виходячи з цього, було запропоновано змінити принцип обробки оболонок за рахунок використання сучасних верстатних систем з ЧПК, які дозволять відмовитися від принципу використання копірів для формоутворення виробу і тим самим підвищити жорсткість системи. Для цього система ЧПК верстату

повинна мати можливість сканувати внутрішній і зовнішній профілі заготовки перед обробкою для автоматичних розрахунків припуску на обробку і відповідних режимів різання. Також обов'язковими є наявність: системи зворотного зв'язку для відстеження відповідності реально отриманих розмірів і профілю виробів із заданими; системи автоматизованої правки алмазних кругів у залежності від їх зносу; системи автоматичної зміни шліфувальних кругів при переході на обробку ділянки профілю з наступними необхідними геометричними розмірами виробу (особливо при обробці внутрішнього контуру деталі).

Висновок. Обгрунтований вибір вхідних параметрів технологічного процесу механічної обробки деталей складного профілю з КНМ дозволяють зменшити зусилля різання, направлені на поверхонь, що формується, стабілізувати динаміку процесу і через це зменшити глибину і покращити структуру порушеного обробкою шару. Автоматизація процесів механічної обробки таких деталей при використанні верстатів з ЧПК позитивно відіб'ється на точності і якості обробки, а також на її загальній трудомісткості, дозволить повністю відмовитися від операції ручної доробки, яка в умовах виробництва займає значну частину технологічного процесу і залежить від кваліфікації верстатника.

В.А. Кирилович, д.т.н., проф.,
А.Р. Кравчук, асп.,
П.П. Мельничук, д.т.н., проф.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

АТЕСТАЦІЯ МЕТРИКИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ ЯК НАПРЯМ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ РОБОТИЗОВАНИХ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ВИРОБНИЦТВ

Одним із напрямків підвищення ефективності використання промислових роботів (ПР) при технологічній підготовці (ТПг) роботизованих механоскладальних виробництв (РМСВ) різних технологічних структур, наприклад, гнучких виробничих комірок (ГВК), є атестація метрики ПР.

Стисло *сутність* процесу атестації метрики ПР зводиться до визначення певних кількісних та якісних параметрів геометричних характеристик робочих зон (РЗ) ПР, в яких забезпечується аналізований параметр.

Процедурно атестація метрики ПР передбачає багаторазове розв'язування зворотної задачі кінематики на множині ланок МС ПР із збереженням заданої користувачем орієнтації ЗП із або без ОМ в ньому в системі координат (СК) ПР з використанням програмних продуктів Solid Work та RoboDK.

Кінцевим *результатом* атестації метрики ПР є параметри геометричних характеристик робочих зон ПР, в яких технологічний роботизований комплект

(ТРКт) (ЗП+ОМ) зберігає задану (досліджувану) користувачем орієнтацію ТРКт в кінцевій точці позиціонування ЗП ПР.

Візуально результати атестації представляються у вигляді частини робочої зони аналізованого ПР з геометрично визначеними параметрами.

Отримані результати атестації метрики ПР дають можливість проектантам на етапі ТПг РМСВ враховувати такі апріорі *важливі дані* як:

– визначення можливої орієнтації ТРКт в певній точці його позиціонування в РЗ ПР;

– аналіз можливості розміщення та планування технологічного обладнання в РЗ ПР з врахуванням необхідного забезпечення певної орієнтації ТРКт в точці технологічного обслуговування ПР відповідної робочої позиції (технологічного обладнання);

– можливість синтезувати апроксимовані траєкторні переміщення ТРКт при реалізації роботизованих механоскладальних технологій з врахуванням координат точок технологічного обслуговування РП;

– можливість використовувати результати атестації метрики як при проектуванні нових ГВК, так і щодо можливості перепланування робочих позицій в існуючих ГВК.

Як приклад працездатності тестову атестацію метрики в сенсі викладеного вище проведено для робота моделі Tinker Kit Braccio.

Отримані результати використовуються в навчальному процесі кафедри А та КІТ ім. проф. Б.Б. Самотокіна, ДУ "ЖП", при виконанні лабораторного практикуму з навчальної дисципліни "Мехатроніка та робототехніка".

В.А. Кирилович, д.т.н., проф.,
Є.В. Слюсар, студ.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

МОДЕРНІЗАЦІЯ МЕХАТРОННОГО ПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНОГО ПРИСТОСУВАННЯ ТИПУ "ПРИЗМА"

Відомою є конструкція пристрою, в якому забезпечується взаємне переміщення базувальних призм в осьовому та діаметральному напрямках щодо горизонтальної осі об'єктів маніпулювання (ОМ), що базуються в ньому (пристрої), для збереження цього положення. Вказане є необхідним для подальшої технологічної взаємодії захватних пристроїв (ЗП) промислових роботів (ПР) з ОМ. Такий пристрій умовно названо мехатронним переналагоджуваним пристосування (МПП) типу "рухома призма" (РП), тобто МПП РП.

Мета пропонованої модернізації – розширення функціональних можливостей базового МПП РП для збільшення інтервалу діаметральних параметрів ОМ, що базуються в пристосуванні.

Основна ідея, що закладена в процес модернізації базового МПП РП, полягає в тому, що розширення функціональних можливостей базового МПП РП досягається за рахунок автоматизації процесу переналагодження шляхом використання керованих взаємно рухомих в горизонтальному напрямку напівпризм (РНП). Останні отримані шляхом симетричного розрізання кожної із базувальних призм вздовж осі симетрії поздовжнього пазу, що розділяє базувальні поверхні призм.

Таким чином, модернізована конструкція МПП з рухомими напівпризмами (РНП) (в подальшому МПП РНП) містить дві рухомі в горизонтальному та вертикальному напрямках призми (характерна конструктивна особливість МПП РП), що складаються з двох рухомих напівпризм (характерна конструктивна особливість МПП РНП) з можливістю взаємного відносного горизотального переміщення базувальних напівпризм. Рух РНП забезпечується кроковими двигунами через проміжні кінематичні елементи. В якості останніх обрано модулі лінійного переміщення, що випускаються серійно, прямолінійний рух кареток в яких здійснюється за допомогою шарико-гвинтових передач. До лінійно переміщуваних гайок останніх конструктивно кріпляться РНП. Відмітною конструктивною особливістю МПП РНП, що має місце і в конструкції МПП РП, є використання двох кареток лінійного приводу переміщення призм вздовж горизонтальної осі ОМ, що забезпечується одним кроковим двигуном, та використання двох кареток лінійного приводу переміщення РНП в радіальному щодо осі ОМ напрямку. Їх робота в залежності від напрямку обертання ротора приводного двигуна кінематично забезпечує або переміщення призм одна до одної (взаємне зближення), або в протилежному напрямку (взаємне віддалення).

Для контролю положення та величин переміщення призм та напівпризм використовуються оптичні датчики. Загалом система керування переміщенями базувальних елементів МПП РНП є триконтурною, а саме такою, що забезпечує: вертикальні та горизонтальні переміщення призм (два контури для МПП РП та МПП РП) та горизонтальні переміщення напівпризм (один контур тільки для МПП РП).

Зміст процесу переналагодження МПП РНП для забезпечення базування різнорозмірних деталей типу “вал” полягає в керуванні автоматичною зміною відносного положення двох призм та їх складових – напівпаризм. Таке конструктивне рішення шодо керованого вертикального переміщення базувальних призм та керованого горизонтального переміщення базувальних поверхонь напівпризм дозволяє базувати в призмах ОМ значних діаметрів, а горизонтальні переміщення базувальних призм забезпечують певні лінійні параметри базування ОМ в них.

МПП РНП та процес його переналагодження забезпечує гнучкість МПП РНП за рахунок автоматизованого регулювання положення базувальних елементів МПП РНП при базуванні в ньому ОМ в межах попередньо визначених інтервалів їх діаметральних та лінійних розмірів.

О.О. Клочко, д.т.н., проф.[1],
О.А. Охріменко, д.т.н., доц.[2],
В.О. Поліщук, студ.[2],
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»[1],
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»[2]

АРОЧНІ ЗУБЧАСТІ КОЛЕСА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ЇХ ПОБУДОВИ В CAD СИСТЕМАХ

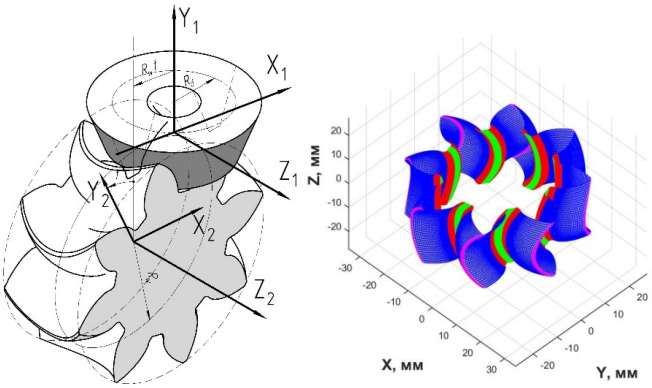
Використання арочних зубчастих коліс замість прямозубих, косозубих чи шевронних коліс є ефективним способом, що забезпечує підвищення навантаження, працездатності, плавності роботи та зменшення рівня шуму зубчатих передач. Про те на даний час є ряд невирішених проблем в області, як з проектування, синтезу арочного зачеплення так і технології їх виготовлення. Для розширення області застосування таких передач необхідно було автоматизувати проектний розрахунок таких передач із застосуванням сучасних можливостей CAD програмного забезпечення з побудовою трьох вимірної моделі, що значно могло би розширити область застосування таких передач. Відомі роботи де описується така задача, проте вона не автоматизована і потрібно проводити підготовку до побудови трьох вимірної моделі в ручному(діалоговому) режимі, тому для зменшення часу на підготовку було розроблено програмне забезпечення, що автоматично розраховує координати точок повного профілю поверхні і записує його певним чином у файл, який використовується найбільш розповсюдженими системами CAD типу SolidWorks, NX Siemens, Catia, Компас 3D та інші, і за командою «побудова поверхні по точкам» автоматично будується поверхня повного профілю западини такого колеса.

Для вирішення цієї задачі було розглянуто спосіб формоутворення таких зубчастих коліс, як круглою різцевою головкою так і інструментом який реалізує траєкторію різців при якій вони завжди паралельні торцевій площині колеса. Розрахункова схема формоутворення покладена в основу показана на рис.1, *а*, і ґрунтується на схемі кочення без ковзання початкової площини пов'язаної з різцевою головкою, система координат $S_1(X_1,Y_1,Z_1)$ по початковому циліндру пов'язаному з зубчастим колесом, система координат $S_2(X_2,Y_2,Z_2)$, результат повного розрахунку профілю показано на рис. 1, *б*.

Для такої схеми формоутворення рівняння контакту буде наступне:

$$t_p = \frac{-Y_1 \cdot N_{X1} - X_1 \cdot N_{Y1}}{R_\omega \cdot N_{Y1}}, \qquad (1)$$

де t_p – кут повороту колеса при якому відбувається контакт точки поверхні різцевої головки з координатами X_1,Y_1,Z_1 з поверхнею колеса, N_{X1},N_{Y1},N_{Z1} – проекція вектора нормалі до поверхні різцевої головки.



а *б*

Рис. 1. Результат повного розрахунку профілю: а – схема формоутворення арочних коліс, б – результат розрахунку поверхні арочного колеса, де R_d – ділильний радіус різцевої головки, R_w – радіус обкату, t – кут повороту колеса навколо своєї осі при обкаті

При використанні розробленого програмного забезпечення було розроблено варіант заміни стандартного прямозубого зачеплення шестерінчастих насосів на зачеплення з арочними зубами (рис. 2). Можливі переваги використання зубчастого зачеплення з арочною формою лінії зуба в шестеренних гідронасосах такі: за рахунок плавного входу в зачеплення зубів при перекритті нагнітаючої порожнини і плавного виходу із зачеплення при відкритті защемленого міжзубного об'єму рідини зменшуються явище кавітації, що покращує експлуатаційні характеристики насосу та зменшує шум в процесі роботи, на відміну від косозубих коліс – врівноваження осьових зусиль в передачі та більш плавна робота, не потребує змін інших конструктивних елементів насоса.

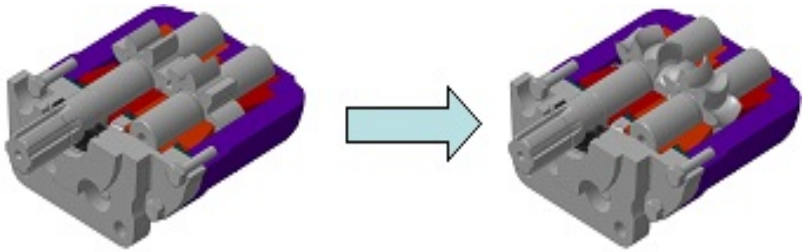


Рис. 2. Заміна прямозубого зачеплення в шестерінчастих насосах на арочне

Для прикладу, для заміни зачеплення насосу НШ10 було розраховано та виготовлено експериментальну пару зубчастих коліс з арочною формою зуба з наступними параметрами: m = 3, z = 10, x = +0,355 (рис. 3).



Рис. 3. Експериментальна пара зубчастих коліс з арочною формою зуба

Для виготовлення поверхні таких зубчастих коліс використовувався верстат з ЧПК, що є не продуктивно у порівнянні з виготовленням звичайних прямозубих зубчастих коліс і тому питання технології виготовлення таких коліс потребує подальших досліджень у цьому напрямку одним із перспективних варіантів, є процес накатки таких коліс методами пластичної деформації, що потребує розрахунку спеціального профілю накатника який буде спряжений з профілем арочного колеса. Також використовуючи у дослідженнях розроблене програмне забезпечення, це дозволяє розширити область застосування зубчастих коліс з арочним зубом, що є перспективно для покращення експлуатаційних характеристик машин і механізмів.

Ю.І. Коваленко[1],
В.С. Антонюк, д.т.н., проф.[2],
Черкаський державний технологічний університет[1],
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»[2]

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ОПТИЧНИХ ВИРОБАХ ПІСЛЯ ЇХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО МОДИФІКУВАННЯ

Сучасний рівень розвитку науки та техніки ставить низку вимог до елементів виробів наукомісткого обладнання, серед яких: висока надійність, мініатюрність, прецизійність та точність їхнього виконання. Особлива увага при цьому приділяється виробам із сучасних діелектричних матеріалів (оптичного скла, кераміки, композиційних метаматеріалів тощо), як надійних, а іноді і безальтернативних замінників традиційних конструкційних матеріалів. В той же час застосування таких діелектриків вимагає високоякісної підготовки їх поверхонь, одним з перспективних методів такої поверхневої обробки цих матеріалів є метод низькоенергетичної електронно-променевої мікрообробки.

Після електронно-променевого модифікування зносостійких покриттів, осаджених термовакуумним методом на поверхнях оптичних виробів, обов‘язковою контрольною процедурою є дослідження їх адгезійної міцності.

В залежності від характеру навантаження виробів, адгезійну міцність доцільно визначати за допомогою методів, в яких силу відриву викликають внутрішні напруження в покритті та на підкладинці. Самий простий метод отримання такого напруженого стану це – деформування підкладинки з покриттям. Підкладинку з покриттям піддають вигину, скручуванню, повздовжньому розтягу, ударним деформаціям тощо. Також внутрішні напруження можна викликати за рахунок терморозширення.

Відривні напруження визначаються за формулою:

$$\sigma_{‰\mu} = E\cdot(\Delta T(\alpha_1 - \alpha_0) - \varepsilon)\cdot(1 - \mu),$$

де E – модуль пружності, α_1, α_0 – коефіцієнти терморозширення покриття та підкладинки, ΔT – градієнт температури, μ – коефіцієнт Пуасона, ε – деформація, пов`язана з релаксацією напружень.

Для дослідження адгезійної міцності зносостійких покриттів використовували метод здуття. Перевага цього методу в тім, що він дає змогу визначати величину рівноважної адгезії покриття, коли інші методи дають змогу визначати тільки адгезійну міцність.

Здуття покриття здійснюється подачею газу до границі між покриттям та підкладинкою, в результаті чого покриття відшаровується, утворюючи порожнину (пухир), геометричні розміри якої вимірюються.

На основі цих вимірювань одержують значення адгезійної міцності. Газ може подаватися за допомогою трубки, а потім через цю ж трубку може подаватись ртуть для фіксування розмірів порожнини. Порожнина також може бути утворена завдяки адсорбованому газові у підкладинці, який піднімається до поверхні внаслідок нагріву.

При використанні цього методу адгезійна міцність обчислюється за формулами:

$$W = \varepsilon\cdot d\cdot(\sigma_0 + E\cdot\varepsilon^2/(6 - 6\mu));$$

$$f_{‰\mu} = {}^3/_2\cdot\varepsilon^2\cdot d\cdot(\sigma_0 + E\cdot\varepsilon^2/(6 - 6\mu));$$

$$\varepsilon = {}^r/_R,$$

де W – енергія адгезії, d – товщина покриття, r – радіус пухиря, R – радіус кривизни пухиря, σ_0 – внутрішні напруження в покритті, E – модуль пружності, μ – коефіцієнт Пуасона.

Окрему групу складають методи оцінки адгезійної міцності, які ґрунтуються на дослідженні твердості покриттів [3]. Ці методи використовують для оцінки адгезійної міцності тонких покриттів з матеріалів, які мають достатню твердість. При цьому, при вивченні поверхні покриття оцінюються площа відколення та тріщини по відношенню до площі подряпини або відбитку. Для методу дряпання, де різець робить подряпину шириною 0,2 мм з силою притиску P після визначення адгезійної міцності методом відриву був виявлений зв`язок, який має вигляд:

$$F_{від} = k_1 + k_2\cdot P,$$

де k_1 та k_2 – коефіцієнти лінійної апроксимації, для покриттів на склі з титановим підшаром $k_1 = 14\cdot10^5$ Па, $k_2 = 7{,}6\cdot10^{-4}$ Па.

Результати досліджень зносостійких вуглецевих покриттів, які проводилися за вищевказаними методами зазначили високу збіжність результатів

(коефіцієнт кореляції $k > 0,89$) і в залежності від товщини покриттів показали такі значення адгезійної міцності:

$f_{\text{‰ц}}|_{h = 2.5\text{-}3.5\ \text{мкм}} = 0,8$ МПа; $f_{\text{‰ц}}|_{h = 5\text{-}8\ \text{мкм}} = 3,0$ МПа; $f_{\text{‰ц}}|_{h = 8\text{-}12\ \text{мкм}} = 3,2$ МПа.

В той же час, встановлено, що внаслідок електронно-променевого модифікування цих покриттів їх адгезійна міцність збільшилася у 1,8...3,2 рази, а гнучке керування режимами електронно-променевого впливу дозволяє отримувати зносостійкі покриття на прямокутних пластинах з оптичного скла з високою адгезійною міцністю ≈ 8,3 МПа.

Висновок. Таким чином, результати експериментального дослідження адгезійної міцності зносостійких покриттів з вуглецевого покриття на оптичних виробах з оптичного скла сорту «крони» після їх електронно-променевого модифікування підтвердили високу якість поверхні і повторюваність результатів модифікування таких покриттів, а також значне (у 1,8–3,2 рази) збільшення їх адгезійної міцності.

В той же час показано зростання адгезійної міцності таких покриттів зі збільшенням їх товщини, що пов‘язано з більш упорядкованим формуванням кристалічної (квазіалмазоподібної) структури вуглецевого покриття внаслідок термічного впливу стрічкового електронного потоку низької енергії (до 6 кеВ).

Я.П. Коваленко,
П.П. Мельничук, д.т.н., проф.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ОТВОРІВ НА БАГАТОЦІЛЬОВИХ ВЕРСТАТАХ

Подальший розвиток машинобудівної промисловості передбачає широке застосування нового технологічного обладнання у виробництві, яке має високі техніко-економічні показники. Це впровадження могло б забезпечити значне підвищення продуктивності технологічних процесів обробки, високий ступінь автоматизації обладнання і швидке переналагодження устаткування на різні технологічні цикли. Використання багатоцільових верстатів дозволяє успішно вирішувати ці задачі, особливо в умовах серійного, дрібносерійного та індивідуального виробництв, де необхідна частина переналагодження обладнання на обробку різних деталей.

Багатоцільові верстати – це верстати з ЧПК, які забезпечують виконання великої номенклатури технологічних операцій без перебазування виробів, здійснюють автоматичну заміну інструменту та контроль за його станом і якістю обробки. Ефективність багатоцільових верстатів досягається за рахунок скорочення часу транспортування деталей і в результаті зменшення підготовчо-заключного часу. Найбільша ефективність багатоцільових верстатів забезпечується

при повній обробці деталі на одному верстаті без переустановлення та перебазування. Підвищення ефективності обробки на багатоцільових верстатах може бути досягнуто за рахунок покращення технічних характеристик верстата. Вихідні показники верстата можна одержати як експериментальним, так і розрахунковим шляхом. Проте розрахунковий шлях є більш економним − він може застосовуватись ще на стадії проектування конструкції і не потребує виготовлення та випробування верстата для оцінювання його якості. При динамічних розрахунках верстатів можна отримати такі показники, як жорсткість (статичну і динамічну), спектр власних частот коливань, форми коливань й інші. Це дозволяє знайти "слабкі місця" конструкції, усунути недоліки й оптимізувати її ще на стадії розроблення. Тому задача динамічного розрахунку верстата з метою оптимізації конструкції є актуальною.

Невирішеною також залишається проблема обґрунтованого призначення оптимальних режимів обробки з врахуванням конструктивно-технологічних характеристик обладнання та виробничих умов. Зважаючи на те, що останнім часом у машинобудівних підприємств стає така проблема, як підвищення ефективності при використанні багатоцільових верстатів тому можна вважати доцільним розробку науково-обґрунтованих методів розрахунків оптимальних режимів обробки, з врахуванням умов сучасної економічної ситуації та створення високопродуктивних допоміжних інструментів.

При аналізі конструктивних особливостей та технологічних можливостей сучасних багатоцільових верстатів свердлильно-фрезерно-розточувальної групи, а також технологічних особливостей обробки основних і допоміжних отворів на цих верстатах можна відокремити два основних напрямки підвищення ефективності роботи верстата. Перший напрямок – параметричний, що полягає у підвищенні продуктивності обробки за рахунок інтенсифікації режимів різання, та другий напрямок – структурний, який пов'язаний з використанням прогресивного допоміжного інструменту, який дозволяє скоротити число технологічних переходів та різальних інструментів. При поєднанні таких принципів роботи з'являється можливість практично за один установ заготовки отримати готову деталь складної просторової форми з необхідною точністю і якістю поверхні, скорочення циклів виготовлення виробів, скорочення виробничих і складських площ.

Важливим етапом у проектуванні ефективного процесу обробки деталі є вибір допоміжного інструменту. На багатоцільових верстатах свердлильно-фрезерно-розточувальної групи не використовуються допоміжні інструменти, які здійснюють додаткове спрямування осьового різального інструменту під час обробки, не в повній мірі використовуються також допоміжні інструменти для багаторізцевого розточування отворів, тоді як їх застосування дозволить скоротити число технологічних переходів і різальних інструментів, підвищити продуктивність та якість обробки. Незважаючи на значну кількість робіт, спрямованих на забезпечення ефективної експлуатації БВ, проблема підвищення продуктивності обробки отворів залишається остаточно не вирішеною і актуальною. Виходячи з цього в роботі сформульовані мета і задачі дослідження, спрямовані на підвищення продуктивності та якості обробки отворів на багатоцільових верстатах свердлильно-фрезерно-розточувальної групи.

Ю.О. Коваль, студ.,
В.Д. Головня, к.пед.н.**,**
Державний університет «Житомирська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Аналіз сучасних технологій ливарного виробництва та факторів, що впливають на них, показав, що для допомоги інноваційному розвитку ливарного виробництва необхідне використання комп'ютерних, нанотехнологій та технологій прототипування. Використання адитивних технологій в ливарному виробництві дозволяє «вирощувати» ливарні моделі та форми, які не можливо було виготовити традиційними способами, а також значно скорочує терміни виготовлення модельної оснастки.

Використання в процесі вакуумного лиття форм і моделей, отриманих за допомогою адитивних технологій, дає можливість зменшити час виготовлення пілотних, дослідних зразків, і в ряді випадків серійної продукції – в десятки разів.

Перехід на цифровий опис виробів – CAD та адитивні технології призвели до кардинальних змін в ливарному виробництві, що особливо проявилось в високотехнологічних галузях – авіаційній та аерокосмічній області, атомній індустрії, медицині та приладобудуванні, в галузях, де характерним є дрібносерійне, одиничне виробництво.

Основною перевагою використання адитивних технологій перед іншими – короткий термін виготовлення виливків з моменту отримання креслення литої деталі. Виливок простої форми можна виготовити протягом доби. Ці технології знаходять все більш широке використання в таких галузях промисловості, як авіація та машинобудування при виготовленні виливків з алюмінієвих та магнієвих сплавів.

Використання методів отримання ливарних синтез-форм та синтез-моделей за рахунок технологій пошарового синтезу дозволили радикально скоротити час створення нової продукції. Наприклад, для виготовлення першого дослідного зразка деталі, характерної для автомобілебудування – блоку циліндрів, – традиційними методами потрібно не менше 6 місяців, при цьому основні часові затрати йдуть на створення модельної оснастки для лиття.

Використання для цих цілей технології Quick-Cast (вирощування ливарної моделі з фотополімеру на SLA-машині з наступним литтям по випалюваній моделі) скоротило термін отримання першої виливки до 2 тижнів. Цю ж деталь можна отримати менш точною, але повністю придатною для використання за допомогою технології лиття в вирощувані піщані форми на машинах типу S-Max. Значна частина виливок, що не має спеціальних вимог до точності лиття чи структури, може бути отримана в вигляді готової продукції протягом 3–4 днів з врахуванням підготовчого часу: пряме вирощування воскової моделі (Quick-cast-моделі) (1 день); формування та сушіння форми (1 день); прокалювання форми та, власне, лиття (1 день).

Розвиток тривимірних CAD/CAM/CAE-технологій призвів до суттєвої модернізації сучасного ливарного виробництва і, в першу чергу, дослідного виробництва. Ціль цієї модернізації – в створенні умов для повноцінної реалізації принципу адитивних технологій протягом всього процесу створення нового виробу, від проектування та розробки CAD-моделі, до кінцевого продукту, що є невід'ємною частиною проектування та виготовлення виробів різноманітного призначення з широкою номенклатурою використовуваних матеріалів.

Впровадження нових матеріалів і технологій для виготовлення комплектів модельного оснащення, ливарних форм і стрижнів дозволить значно підвищити якість виливок і їх точність. Перехід на цифровий опис виробів (CAD) і, відповідно, адитивних технології зробили справжню революцію в ливарній справі. Відхід від традиційних технологій і використання нових методів отримання ливарних форм і моделей із застосуванням технологій пошарового синтезу дасть можливість радикально скоротити час запуску литих заготовок в серійне виробництво, зменшити їх собівартість за рахунок підвищення точності геометрії лиття та зменшення припуску на механічну обробку, а головне – поліпшити якість продукції, що випускається.

Л.Г. Козлов, д.т.н., проф.,
А.В. Коломійчук,
Д.О. Лозінський, доц.,
Вінницький національний технічний університет

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА ПМР-0,5-200КВ

Роботизовані технологічні комплекси є однією з ланок автоматизованого виробництва, основним елементом таких комплексів є технологічне устаткування, а допоміжним – роботизовані одиниці, автоматизоване оснащення тощо.

Сучасні автоматизовані та роботизовані комплекси в більшості випадків досить складні та дороговартісні і їх використання з економічної точки зору не завжди може бути доцільним. На сьогодні існує ряд промислових роботів, які є застарілими з точки зору елементів керування проте з достатнім залишковим ресурсом механічної частини. Саме тому модернізація промислових роботів є досить актуальною задачею.

Метою роботи модернізація системи керування промислового робота робот ПМР-0,5-200кв за рахунок використання програмованого контролера.

До розгляду в роботі взято промисловий робот ПМР-0,5-200кв (рис. 1), який складається з стійки *1*, руки *2*, поворотного пристрою *3* та захватного пристрою *4*. Тип приводу робота – пневматичний.

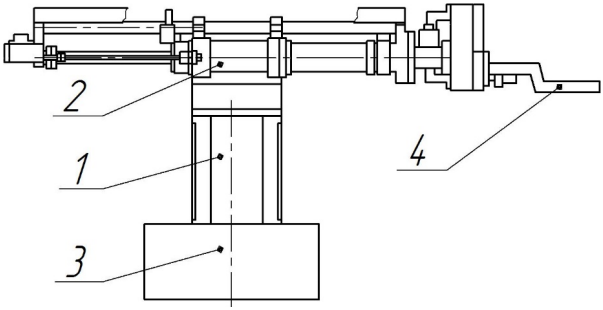


Рис. 1. Промисловий робот ПМР-0,5-200кв

Конструкція робота та механічні характеристики дозволяють, в цілому, виконувати велику кількість необхідних завдань, проте система керування є морально та фізично застарілою, до основних її недоліків можна віднести наступні:

– завищені масово габаритні характеристики;

– ускладнений процес програмування та, особливо, перепрограмування;

– складність (та в деяких випадках неможливість) групового контролю у складі більш складних комплексів.

– вузькі функціональні можливості.

Для покращення характеристик системи керування запропоновано застосувати сучасну систему керування на базі програмованого контролера Arduino. Система Arduino - це комплекс апаратно-програмних засобів для створення відносно простих роботизованих електронних систем. Система має відкриту архітектуру і широкий спектр додаткових елементів. Програмування (Arduino) виконується з інтегрованого програмного середовища (IDE), що дозволяє писати, компілювати програми, а також завантажувати їх в апаратуру.

Arduino на відміну від інших систем надає ряд переваг:

1. Просте і зручне середовище програмування.
2. Розширюване програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом.
3. Розширюване відкрите апаратне забезпечення.
4. Низька вартість.

Запропонована система керування дозволить значно розширити функціональні можливості робота, забезпечить покращені можливості налагодження та програмування та дозволить використовувати робот та комплекс в цілому як елемент більш складних систем.

Висновки. Модернізація системи керування промислового робота ПМР-0,5-200кв за рахунок використання програмованого контролера дозволить значно розширити функціональні можливості робота, а також спростити його програмування та переналагодження без суттєвої зміни його структури.

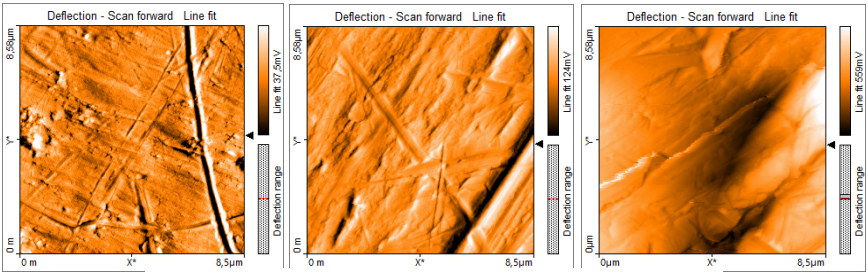
Л.Г. Козлов, д.т н.,проф.,
О.В. Сердюк, к.т.н.,
С.І. Сухоруков, к.т.н., доц.,
Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПІСЛЯ ОБРОБКИ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

Підвищення експлуатаційних швидкостей і навантажень зумовлює необхідність підвищення надійності машин. Більша частина деталей піддається одночасному впливу знокозмінних навантажень, що значно зменшує втомну міцність матеріалу.

Основні види деформації – згин і кручення спричиняють максимальні напруження саме на поверхні деталі, яка має, зазвичай, знижену втомну міцність, внаслідок того, що в результаті попередньої обробки порушена цілісність кристалічної ґратки металу поверхні. Поверхня металу, оброблена різанням, відрізняється від внутрішніх шарів не тільки зруйнованою і деформованою кристалічною ґраткою, але й своїми механічними властивостями. Дрібні риски і подряпини, утворені під час механічній обробки, є концентраторами напружень, що спричиняють невеликі тріщини, які поступово збільшуються. Це, в подальшому, призводить до руйнування деталі. Гази і пар води, які є у повітрі, діючи на поверхню деталі, спричиняють корозію, інтенсивність якої залежить від якості й стану поверхні.

В процесі поверхневого пластичного деформування (ППД) формується поверхня з досить малою шорсткістю і великим радіусом впадин нерівностей. ППД забезпечує значне підвищення характеристик деталей, виготовлених зі сталей та сплавів кольорових металів: утомної міцності, контактної витривалості, контактної жорсткості, зносостійкості, корозійної стійкості та низки інших показників. Разом з тим, різні способи ППД дозволяють отримати й різні значення показників якості обробленої поверхні. За допомогою програмного продукту Nanosurf Easyscan 2 AFM досліджено стан поверхні деталі після точіння (рис. 1, *а*) з подальшим обкочуванням циліндричним роликом (рис. 1, *б*) та роликом, що має тороїдальну форму робочої поверхні (рис. 1, *в*).



а *б* *в*

Рис. 1. Стан поверхні після обробки (а – точінням, б – обкочуванням циліндричним роликом, в – обкочуванням тороїдальним роликом)

Отримані результати свідчать, що поверхня з мінімальною шорсткістю та максимальним радіусом западин та виступів забезпечується обкочуванням саме тороїдальним роликом. Оскільки попередні дослідження підтвердили підвищення такою обробкою зносостійкості і твердості поверхні, то можна стверджувати, що таким інструментом можна досягнути високої чистоти поверхні, твердості поверхневого шару і зносостійкості.

Ю.М. Кузнєцов, д.т.н., проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЯВЛЕННЯ ЗАКОНІВ ЕВОЛЮЦІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

В процесі еволюції Людиною створюються більш ефективні технічні системи, яких називають антропогенними системами, як результат цілеспрямованної діяльності. Можна умовно виділити наступні етапи розвитку засобів праці, що створені Людиною: – перші знаряддя праці у вигляді простійших пристосувань (палки, каміння, сокири, ножі, списи і т.п.); – простійші механізми (важелі першого і другого роду, клини і т.п.); – складні механізми (зубчасті передачі, пасові передачі, гвинтові передачі, …); – машини з ручним і ножним приводами, з використанням води, пара і повітря, насоси і т.п.); – машини з електричним приводом; – машини із штучним інтелектом, мехатронні системи.

В історії розвитку техніки з появою машин почали вести розмови про промислові революції і сьогодні людство опинилося перед викликами четвертої промислової революції «Індустрія 4.0» з широким проникненням автоматизації, роботизації, інформатизації, комунікації і всього, що стосується суспільства, бізнесу, виробничих технологій і освіти. Наступив час масового впровадження кіберфізичних систем у виробництво, які ліквідують кордони між фізичними, цифровими і біологічними сферами. З'явилися інтелектуальні роботи, дрони, розумні будинки, розумні міста, дослідження голового мозгу, а товар в процесі випуску став спроможним самостійно визначити обладнання для свого вироблення.

Пояснити все, що відбувається в 21-ому столітті можливо з використанням законів еволюції систем різного походження. Це буде проілюстровано в доповіді на прикладах обчислювальної техніки, електромеханіки, автобудування, авіабудування, робототехніки, верстатобудування – серцевині машинобудування, тощо. Жодне явище Природи, як основного творця, не може бути до кінця зрозуміло без уяснення його механічної сторони і жодну нову техніку не можна створити, не використовуючи при аналізі і синтезі ті чи інші об'єктивні закономірності. Тому механіка є однією з основ прогресу природознавства і техніки вчора, сьогодні, завтра. Логічно розмірковуючи, можна стверджувати, що всі науки, де мова іде про механіку, доцільно об'єднати під загальною назвою

(поняттям) «*генетична механіка*», де в залежності від середовища, інформаційної мови опису (моделювання) вихідним на генетичному рівні може бути мільчайша (проста) частиця (ген у вигляді електрона, електричного заряда, атома, молекули, біта, однієї хвилі, тощо), котра в загальному випадку для переноса інформації, абстрактного уявлення, синтезу, передбачення може бути об'єднана під узагальненою назвою «*матеріальна точка*» і «*матеріальне тіло*». Вже зараз ми маємо такі поняття, як: механіка твердого тіла, гідромеханіка, аеромеханіка, будівельна механіка, електромеханіка, механіка плинного (пластичного) тіла; термомеханіка, квантова механіка, біомеханіка, механіка плазми, оптична механіка, небесна механіка, акустична механіка, механіка хімічних процесів (горіння, синтез нових хімічних продуктів), механіка сипучого середовища, кріогена механіка, вібраційна механіка, тощо. Попереду нас чекають нові відкриття на стику різних наук, що зайвий раз підтверджує актуальність *міждисциплінарного підходу*, реалізованого в КПІ ім. Ігоря Сікорського при синтезі різних об'єктів, описаних на єдиній інформаційній мові**.**

В.І. Лавріненко, д.т.н., проф.[1],
В.Ю. Солод, к.т.н., доц.[2],
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України[1],
Дніпровський державний технічний університет[2]

ПРОЦЕС АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ЯК ФРИКЦІЙНА ВЗАЄМОДІЯ: ОСОБЛИВОСТІ ТА ЕЛЕМЕНТНИЙ СКЛАД ЧАСТИНОК ШЛАМУ НА РІЖУЧІЙ ПОВЕРХНІ АЛМАЗНИХ КРУГІВ

Авторами показано[3], що процес абразивної обробки слід розглядати як фрикційну взаємодію різнорідних матеріалів і, при цьому, ця взаємодія може визначатися контактом зерна і оброблюваного матеріалу, а також у переважній більшості процесів абразивної продуктивної обробки, існують інші контактні процеси: взаємодія зв'язки кругу зі стружкою (шламом), взаємодія шламу з оброблюваним матеріалом. Крім того, масопереніс при фрикційному контакті кругу в процесі шліфування викликає інтерес для оцінки зміни характеристик фрикційного контакту і формування відповідного стану робочого шару шліфувальних кругів. Разом з тим, яка саме частка шламу затримується на ріжучій поверхні алмазного кругу для різних оброблюваних матеріалів в літературі майже не досліджена.

Тому, в даній роботі нами наведені дослідження по наявності шламу на ріжучій поверхні алмазних кругів при обробці різних інструментальних матеріалів та за різних умов їх обробки. Методично це оцінювалося по аналізу

[3] Лавріненко В.І., Солод В.Ю. Процес абразивної обробки як фрикційна взаємодія різнородних матеріалів // Сверхтвердые материалы. – 2018. – № 2. – С. 82–88.

елементного складу обробного матеріалу, що затримується при шліфуванні на ріжучій поверхні кругу. Для цього, алмазний круг після процесу шліфування розташовували у камеру рентгенівського мікроаналізатора «Camscan-4DV» і аналізували склад елементів інструментального матеріалу на його ріжучій поверхні. Досліджувалися процеси алмазної обробки керамік (ВОК60, ВОК71, Si_3N_4+B_4C, ВОК85С) та твердих сплавів: вольфрамових (Т15К6, ВК6) і безвольфрамових (ТН20, КНТ16).

Нашими дослідженнями за допомогою гранулометра «CILAS» було встановлено, що розміри частинок шламу розподіляються наступним чином: основна маса шламу складається з дрібних частинок від 1 до 3 мкм і з більш крупних частинок, які коливаються для різних матеріалів від зернистості 32–48 до 96–128 мкм. Наведене вище свідчить про те, що дрібний шлам, який утворюється при шліфуванні, проходячи шлях від утворення до повторного надходження в зону шліфування разом з охолоджувальною рідиною, перетворюється, і частина його може компактуватися в більш крупні частинки.

Аналіз даних по розподілу величини частинок шламу свідчить, що він реалізується у вигляді частинок різної зернистості. Причому зустрічаються достатньо крупні частинки шламу, які є наслідком як виколок оброблюваного матеріалу, так і компактування шламу. Тверді сплави, чисто нітридні або оксидні кераміки дають переважно частинки від 32 до 128 мкм, причому із зміщенням в бік більшого діапазону – 96–128 мкм. Змішані оксидно-карбідні кераміки також переважно фіксуються в цьому ж діапазоні, але пік зернистості компактів зміщується тут вже в бік менших діапазонів. Звернемо увагу на те, що шлам змішаних нітридно-карбідних керамік (Si_3N_4+B_4C) фактично не компактується.

Відомо, що знос алмазних кругів при шліфуванні інструментальних матеріалів переважно визначається абразивною дією шламу на зв'язку круга[4]. Враховуючи вказаний вище поділ шламу на різну крупність, можливо припустити, що на поверхні робочого шару кругу можуть залишатися вказані вище дрібні частинки шламу і відбувається своєрідне шаржування зв'язки та затримка частинок шламу у нерівностях алмазних зерен. Виникають питання: а скільки власне затримується частинок шламу на робочій поверхні при різних умовах обробки, чи є це саме оброблюваним матеріалом, і де більше затримується, на зв'язці чи зернах?

Спробуємо відповісти на ці питання для різних інструментальних матеріалів, умов обробки і зв'язуючих алмазних кругів. Нашими дослідженням встановлено, що при обробці з охолодженням твердого сплаву ВК6 кругами на металополімерній зв'язці за різних умов на ріжучому шарі кругу затримується від 18,1 до 48,5% за масою твердого сплаву. При шліфуванні твердого сплаву Т15К6 кругами на полімерних зв'язках без охолодження на поверхні кругу затримується 10,5% за масою, а при шліфуванні з охолодженням – 12,7%

[4] Лавріненко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / Під загальною ред. академіка НАНУ М.В. Новікова. – К.: ІНМ НАН України, 2013. – 456 с.

твердого сплаву. При шліфуванні безвольфрамового твердого сплаву (БВТС) КНТ16 без охолодження кругами на полімерній зв'язці на поверхні кругу затримується біля 15% за масою шламу сплаву. Як бачимо, реально на ріжучій поверхні алмазного кругу при шліфуванні затримується в межах від 10 до 20% за масою шламу.

Експерименти проводили при шліфуванні кругом 11V9 100×2×10 сплаву ВК6 з двома основними компонентами W та Co, щоб уникнути похибок від впливу інших компонентів, які могли би бути у складі зв'язки кругів. У якості основних показників враховували вміст W та Co, на ріжучій поверхні кругу і співвідношення W до Co. Базовим експериментом виявлено, що при середніх режимах шліфування сплаву ВК6, коли нема переваги силового або теплового факторів, співвідношення W до Co складає приблизно 18. Це значення і вважали за базове. Була сформульована робоча гіпотеза про те, що відхилення від цього базового значення є небажаним, оскільки перевищення величини цього співвідношення вказує на переважання карбіду вольфраму, або те, що кобальт зв'язується з елементами зв'язки або алмазом і видаляється зі шламом. Це може бути пов'язане з підвищеними механічними навантаженнями у зоні різання, що призводять до «відколок» WC з твердого сплаву. Викладений вище підхід дозволяє оцінювати характеристику кругу по мірі впливу на елементний стан шламу. Оскільки у реальному сплаві ВК6 співвідношення W/Co≈16, то на наш погляд, при шліфуванні необхідно прагнути таких умов, при яких співвідношення W/Co буде знаходитись у діапазоні 16–18. Проілюструємо це наступним. Були застосовані три круги форми 11V9 100×2×10×32–АС6М 125/100–100 на металополімерній зв'язці МО2 і двома її модифікаціями, які мали на порядок підвищений знос у порівнянні із базовим складом. Дослідження при продуктивності обробки твердого сплаву ВК6 у 500 мм^3/хв. виявили, що на базовій зв'язці МО2, круг має відносні витрати алмазів у 5,4 мг/г, а співвідношення W/Co на поверхні зв'язки дорівнює 17,9. В той же час на поверхні модифікованої зв'язки МО2-1 співвідношення дорівнює 9,7, а знос кругу – 46,1 мг/г, на поверхні зв'язки МО2-2 – W/Co = 47,8, а знос кругу 53,0 мг/г і спостерігається руйнація робочого шару. Таким чином, як мале значення W/Co, так і велике, є індикатором, що відбиває роботу кругу. При малих значеннях відношення W/Co спостерігається підвищений знос кругу, але аналогічний ефект спостерігаємо і при великих значеннях співвідношення, але у даному випадку відбувається і руйнування алмазовмісного шару, що викликане тепловою деструкцією полімерів, які входять до складу зв'язки МО2.

Тепер розглянемо це і для твердих сплавів з наявністю в них карбіду титану. На наступному етапі нами досліджувався елементний склад поверхні алмазного кругу при шліфуванні твердого сплаву Т15К6 та безвольфрамового твердого сплаву КНТ16, які саме і містять карбід титану. Як засвідчили наші дослідження, при шліфуванні твердого сплаву Т15К6 із застосуванням алмазного кругу на полімерній зв'язці із алмазними зернами D70 спостерігається наступний розподіл складових твердого сплаву (табл. 1). Як бачимо фактично на ріжучій поверхні кругу залишається шлам твердого

сплаву. Єдина тенденція, яка може вгадатися, це те, що при шліфуванні без охолодження карбід титану затримується у меншій мірі, аніж при шліфуванні з охолодженням.

Таблиця 1 – Розподіл складових оброблюваного твердого сплаву Т15К6 на робочій поверхні кругу

Контролюєма поверхня	Розподіл складових твердого сплаву (% за масою)		
	WC	TiC	Co
Вихідні дані по сплаву Т15К6	79,0	15,0	6,0
Шліфування з охолодженням			
На зв'язці	77,2	15,7	7,1
На алмазному зерні	75,4	16,9	7,7
Шліфування без охолодження			
На зв'язці	79,0	13,0	8,0

На наступному етапі вияснимо де більше затримується шлам, на зв'язці чи зернах. Розберемо це питання на прикладі алмазної обробки шаруватої кераміки ВОК85, що є поєднанням трьох шарів ВОК60–ТН20–ВОК60, та окремо обробки кераміки ВОК60 і безвольфрамового твердого сплаву ТН20. Спектральний аналіз різальної поверхні круга при роздільній обробці кераміки та сплаву ТН20 дозволив виявити, що нікель та оксид алюмінію у меншій мірі затримуються на поверхні зерна, карбід титану – в більшій. Якщо умовно прийняти наявність всіх елементів шламу, що знаходяться на ріжучій поверхні кругу за 100%, то методом рентгенівського мікроаналізу з цих 100% на алмазних зернах виявлено 14% алюмінію, 16% – нікелю та від 26 до 40% титану. У цілому ж, від 60 до 86 % титану, нікелю та алюмінію від загального 100%-го вмісту елементів на ріжучій поверхні круга при роздільному шліфуванні утримується на поверхні зв'язки. Шліфування трьохшарового композиту ВОК85С перпендикулярно перехідним зонам, коли алмазні зерна проходять при різанні послідовно кераміку – твердий сплав – кераміку, відрізняється тим, що практично весь титан (від 50 до 70%) його вмісту на ріжучій поверхні круга знаходиться на алмазних зернах, в свою чергу, алюміній розподіляється більш рівномірно. При цьому слідів нікелю у спектрі алмазу не виявлено.

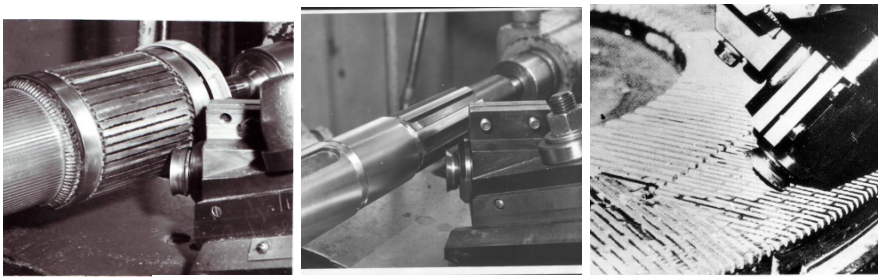
Таким чином, наведені дослідження дозволяють стверджувати, що за рахунок масоперенесення змінюється стан контактних поверхонь і по аналізу елементів шламу матеріалу, що піддається обробці, на ріжучій поверхні кругу можливо, в певній мірі, оцінювати працездатність алмазних кругів.

В.Я. Лебедев, к.т.н., с.н.с.,
Физико-технический институт НАН Беларуси

ПРОГРЕССИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ РОТАЦИОННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Проблемы обеспечения точности геометрической формы и качества поверхностного слоя крупногабаритных деталей являются актуальными для многих отраслей промышленности, и особенно для тяжелого машиностроения, обеспечивающего техникой горнорудный и металлургический комплексы, транспортную и бумагоделательную отрасли. Решаться они должны комплексно путем создания надежного и точного оборудования и разработки высокопроизводительного инструмента с высокой технологической стойкостью. Одним из перспективных видов режущего инструмента для таких условий обработки являются ротационные резцы.

Особенности кинематики, высокие динамические и термические нагрузки, возникающие при обработке крупногабаритных деталей, предъявляют высокие требования к инструменту, его технологической надежности и долговечности. Важное значение имеют технологические возможности инструмента в реализуемом диапазоне режимов обработки, так как ввиду особенностей конструктивной схемы ротационные инструменты чаще применяются для обработки «напроход», а при точении и фрезеровании необходимо иметь зону выхода инструмента размером более диаметра лезвия. В Физико-техническом институте НАН Беларуси развитие исследований в области ротационного резания началось в 60-х годах прошлого века и наиболее активно развивалась в 80–90-х годах. Разработано ряд конструкций ротационных инструментов для операций точения и фрезерования, развитие продолжается и в настоящее время в интересах ряда отраслей. Примеры реализации ротационного инструмента приведены на рис. 1.



а *б* *в*

Рис. 1. Ротационные резцы ФТИ на токарных операциях

Наибольшее распространение получили конструктивные схемы резцов с неподвижным корпусом и вращающимся шпинделем с закрепленной режущей чашкой. Высокими скоростными и динамическими характеристиками обладает ротационный резец, шпиндель которого монтируется на спаренных радиально-упорных подшипниках, установленных тандемом по схеме «Х». Наружные кольца подшипников замыкаются на распорную втулку, жестко зафиксированную относительно корпуса. В опорах создают предварительный натяг путем затяжки гайкой внутренних колец подшипников. Более технологичен вариант установки между внутренними кольцами подшипников втулки, обеспечивающей заданный натяг в опорах при затяжке гаек до упора.

Широкие технологические возможности имеет ротационный резец (а.с. СССР № 1054999) с возможностью регулировки соотношения жесткости передней и задней опоры. Скоростные характеристики при высокой жесткости обеспечивают резание при скоростях до 16 м/с.

Для работы с повышенной глубиной резания разработан резец, шпиндель которого смонтирован на паре радиальных подшипников, установленных в корпусе и паре упорных, замкнутых на торцы распорной втулки. В передней радиальной опоре посредством пружины, а в упорных подшипниках посредством затяжки гайки создается предварительный натяг. Полость с подшипниками закрывается крышкой. На консоли шпинделя закрепляется режущая чашка. Разработанный резец позволяет снимать припуск до 1,5–2 мм на скорости до 7,5 м/с при обработке гарнитуры конических мельниц МКН-03 ∅ 525 мм из стали 65Г твердостью НВ285.

В электротехнике точение ротационными резцами внедрено на операциях обработки бочки роторов и расточки статоров асинхронных и с коротко-замкнутым ротором электродвигателей. Обработка ротационным резцом ведется на токарно-винторезных станках, оснащенных державками, позволяющими реализовать вторую одно- или двухповоротную схему ротационного резания. По критериям безвибрационной работы и параметру шероховатости обработанной поверхности $Ra < 2{,}5$ мкм определены рациональные режимы обработки: $V = 7–7{,}5$ м/с; $S = 0{,}21$ мм/об при глубине резания 0,2–0,35 мм. Инструмент с диаметром режущей чашки 46 мм из твердого сплава ВК6 или ВК8 имеет углы заточки $\alpha = 18^{o}$, $\gamma = 30^{o}$. Штучное время на операции сокращается в 5–8 раз. Для точения магнитопроводов асинхронных электродвигателей из высококремнистых электротехнических сталей разработаны резцы, работающие на полуавтоматах DXR по первой схеме. Шпиндель собирается на роликовых радиальных подшипниках без внутреннего кольца., что обеспечивает высокую радиальную жесткость и обеспечивает обработку с глубиной резания до 1,5–2 мм. Заточка режущей части выполняется алмазными кругами на собранном инструменте. Заточка по передней поверхности (по вогнутой сфере в торце чашки) выполняется кругом формы 1FF1(см. рис. 1, *а*).

Результаты выполненных исследований использованы в технологии ротационной обработки каландровых валов. Высокая размерная стойкость ротационных резцов обеспечивает эффективное технологическое решение при

изготовлении и ремонте валов суперкаландров диаметром 400–800 мм при длине до 8600 мм. Ротационным точением достигаются параметры некруглости и нецилиндричности обработанного вала не более 10 мкм. Достигаемая шероховатость поверхности и подкатка задней поверхностью резца обработанной поверхности вала позволяют снизить в 2–4 раза время «прикатки» вала на машине. На рис. 2, *в* показан ротационный резец на операции обточки вала суперкаландра на высокоточном круглошлифовальном станке, оборудованном специальным резцедержателем.



а *б* *в*

Рис. 2. Ротационные резцы для точения: а – на полуавтомате DXR для обточки роторов, б – с регулируемой жесткостью опор, в – для обточки каландров

В разработанных конструкциях ротационных резцов применяется в основном прессовая посадка режущей чашки на шпиндель. Заточка выполняется в собранном виде. Обычно допускается 10–15 переточек на чашках диаметром 46 мм. Для получистовых операций разработана конструкция резца со сменной чашкой на коническом хвостовике. Материал режущей чашки выбирается по аналогии с призматическими резцами.

При заточке должен быть обеспечен параметр шероховатости $Ra < 1$ мкм по передней и задней поверхностям лезвия, радиальное биение режущей кромке до 5 мкм, на чистовых операциях – до 3 мкм. Опыт разработок показал преимущество применения подшипников качения в шпиндельных узлах ротационного инструмента. В большинстве случаев достаточный уровень обеспечивают подшипники 6 или 5 классов точности с применением пластичной смазки. Наработка на отказ шпиндельных узлов превышает 1000 час. При обработке крупногабаритных деталей зачастую требуется применение СОТС. При ротационном резании подача СОТС осуществляется поливом в зону контакта или подачей через полый шпиндель. Достаточно эффективно при обработке неметаллических материалов обдув воздухом.

А.И. Лещенко, к.т.н., доц.,
Приазовский государственный технический университет

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОЩАДЕЙ СРЕЗА И СИЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

Одним из основных средств достижения заданной точности путем лезвийной обработки является стабилизация сил резания. Особую важность этот фактор приобретает при обработке сложно-профильных поверхностей фрезерованием, когда их переменная кривизна является возмущающим воздействием процесса резания. В этом случае нивелирование возникающих погрешностей от упругих деформаций системы достигается путем коррекция режимов резания или стратегии формообразования. Появившиеся возможности непрерывной коррекции условий обработки на современных станках с УЧПУ делают актуальными дальнейшие исследования, задачей которых является прогнозирование изменения сил резания на различных участках, что особенно важно при обработке поверхностей двойной кривизны.

Расчет силовых параметров фрезерования на протяжении длительного периода являлся предметом многочисленных исследований. Наиболее часто силы резания при фрезеровании рассчитывается по известной формуле, недостатком которой является то, что она отражают и обобщают результаты экспериментальных данных, соответствующих конкретным условиям механической обработки. Изменение этих условии принято учитывать поправочными коэффициентами и показателями степени. В математическом смысле это означает пропорциональное масштабирование нелинейных уравнений, что может привести к значительным погрешностям аппроксимации. Кроме этого данная формула выведена из выражения, которое фактически описывает скорость удаления объема материала с заготовки, и никак не учитывает форму и размеры сечения срезаемого слоя.

Предложенная M. Weck и K Teipel (1977 г.) модель расчета сил резания, в которой силовая зависимость определяется выражением $F = K \cdot a_p \cdot h$, где a_p – осевая глубина, h – толщина срезаемого слоя, при этом константа К - зависит от обрабатываемого материала, скорости резания и определяется экспериментально. Y.Altintas использовал и расширил этот подход, предложив выражение для расчета силы резания: $F = K \cdot a_p \cdot h + K_e \cdot a_p$, в котором второе слагаемое учитывает влияние формы режущей кромки инструмента.

S.A. Tobias. G. Stepan предложили нелинейную степенную функцию силы от толщины срезаемого слоя $F = K \cdot a_p \cdot h^x$. где x – экспериментальный параметр.

R.P.H. Faassen использовал комбинацию ряда моделей для тангенциальной F_t и радиальной F_r составляющих силы в виде:

$$F_t = K_t \cdot a_p \cdot h^x + K_{ta} \cdot a_p; \qquad F_r = K_r \cdot a_p \cdot h^x + K_{ra} \cdot a_p.$$

В настоящее время наиболее перспективным развитием изложенных подходов является предложенная рядом Европейских фирм методика расчета сил резания через удельную силу, значение которой для различных условий и материалов приведено в справочнике GARANT. Удельным давлением резания называется сила резания, которая приходится на единицу площади поперечного сечения срезаемого слоя и выражается в кГ/мм^2. Согласно этой методики для любого вида лезвийной обработки тангенциальная составляющая силы резания может быть определена как:

$$F_t = b \cdot h \cdot K_c \cdot K_f = b \cdot h^{(1-m)} \cdot K_c \cdot K_f$$

где b, h – ширина и толщина срезаемого слоя соответственно, K_f – поправочный коэффициент, K_C – удельная сила, приходящаяся на единицу площади среза, m – показатель степени. Значения удельной силы и показателя степени приведены для групп обрабатываемых материалов в справочной литературе.

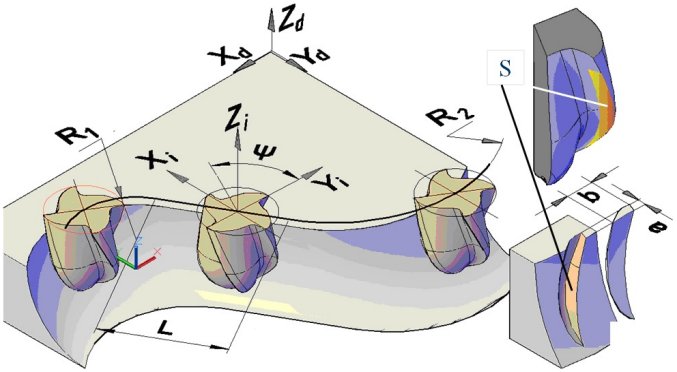
Для расчета сил резания при продольном сечении среза ограниченном кривыми была предложена методика, в основу которой положены различные способы разбиения сечения срезаемого слоя на участки. Такой способ подходит для фрез с винтовым зубом, однако, при его анализе выясняется необходимость целого ряда допущений, влияние которых на конечный результат даст погрешность.

Одной из задач чистового фрезерования является обеспечение способности инструмента генерировать поверхности сложного профиля максимально близкие к теоретически заданным. В этом случае концевые фрезы с радиусной частью являются инструментом первого выбора. При фрезеровании возникает сила трение задней поверхности зуба фрезы об обработанную поверхность. Поэтому данный фактор нуждается в уточнении, однако форма и размеры поверхности трения для фрез данного типа трудно воспроизвести путем абстрактного мышления.

Средств современной 3D графики позволяют создавать («клеймить») оттиски форм одного объекта на другом, при условии контакта (или пересечении) этих объектов. В результате на 3D гранях образовываются дополнительные области, к характеристикам которых (площади, граничные кривые и точки) и их редактированию (выдавить, придать толщину) можно получить доступ. После «клеймения» цвет оттиска принимает установленный цвет контактируемого 3D тела, на которое он наносится, что облегчает построение программного «фильтра» доступа к элементу с необходимыми характеристиками.

С помощью 3D графики (рис. 1, *а*) программно смоделировано в координатной системе детали $X_dY_dZ_d$ последовательное перемещение твердотельной модели фрезы и связанной с ней ее координатной системой $X_iY_iZ_i$ по траектории R_1, L, R_2, с учетом ее углового положения при обработке заготовки с заданной подачей. Тогда на передней поверхности винтового зуба фрезы можно получить «оттиск» (например, инструмент AutoCAD, Imprint «Клеймить») в виде области S (рис. 1, *б*). Данная область представляет не что иное, как проекцию сечения среза $a \times b$ в текущий момент времени и при

текущем угле поворота фрезы Ψ. Разработанное программное приложение «отдает» через дискретно изменяющийся угол поворота фрезы «оттиск» на переднюю поверхность зуба фрезы поперечного сечения среза – его имя в виде шестнадцатеричного кода при текущем угле контакта Ψ_i. Можно сказать, что программное приложение формирует массив проекций площадей среза S и соответствующие им углы контакта.



а *б*

Рис. 1. 3D макет процесса фрезерования концевой радиусной фрезой

ВЫВОДЫ. Именно сила резания с ее классической зависимостью от параметров среза являются основной причиной возникающих погрешностей в процессе лезвийной обработки, т.к. оказывают доминирующее влияние на величины упругих деформаций на различных участках траектории перемещения. Поэтому необходим инструментарий, позволяющий оценить это влияние уже на этапе проектирования технологической операции. Если площадь поперечного сечения среза, снимаемого одним зубом цилиндрической фрезы при обработке плоскости, определяется с достаточной точностью треугольником, то для обработки поверхностей переменной кривизны радиусными фрезами, этот известный метод не подходит. В этом случае применение аппарата аналитической геометрии для определения параметров среза крайне трудоемкая задача. Поэтому именно инструментарий 3D графики может дать не только численные значения параметров среза, но и при известном удельном давлении силы резания, визуально показать геометрию срезаемого слоя, его ширину и толщину, отличие формы среза в процессе обработки для поверхностей выпуклых, вогнутых или поверхностей с прямолинейной образующей.

О.В. Ліщінер-Іващенко, асп.,
О.В. Шевченко, д.т.н., проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УМОВ ВІБРОСТІЙКОЇ ОБРОБКИ РОЗТОЧУВАЛЬНИМИ ОПРАВКАМИ НА ТОКАРНОМУ ВЕРСТАТІ

Найбільш ефективним способом обробки отворів на токарному верстаті є розточування однолезовими консольними оправками. Важливим з точки зору забезпечення стабільності процесу розточування є вибір конструктивних параметрів розточувальної оправки. В процесі відпрацювання конструкції оправки необхідно враховувати наступні особливості: – розміри поперечного перерізу консольної частини оправки вибирають максимальними із врахуванням обмеження по діаметру отвору, забезпечення безперешкодного відведення стружки і достатнього радіального ходу різця; – виліт консольної частини оправки вибирається мінімально необхідним для заданої глибини отвору; – якщо довжина консольної частини оправки є більшою за її чотири діаметри, то рекомендовано в оправку встановлювати демпфер; – при розточуванні малих діаметрів задній кут різця збільшують та вибирають із умови відсутності затирання ним обробленого отвору внаслідок відтискання консолі оправки тангенціальною складовою сили різання нижче вісі центрів верстата. Вказані особливості конструювання обумовлюють необхідність детального відпрацювання конструкції розточувальної оправки для заданих умов обробки.

При розточуванні на токарному верстаті до виникнення надмірних вібрацій найбільше схильна саме консольна оправка, як найменш жорстка ланка технологічної системи верстата, яка здійснює поздовжні, поперечні та крутильні коливання, що мають домінуючий вплив на рівень відносних коливань між інструментом і деталлю. Тому, зниження рівня інтенсивності коливань розточувальних оправок є одним із важливих шляхів підвищення продуктивності, точності та якості оброблених поверхонь. Коливання, які виникають при розточуванні, визначається жорсткістю та коливаннями самої оправки, а втрата вібростійкості виникає в основному на формі її коливань.

Для теоретичного аналізу процесу розточування при обробці консольними оправками розроблено принципову схему домінуючої коливальної системи (рис. 1) та математичну модель.

В математичній моделі в якості домінуючої коливальної системи розглядається консольна оправка з різцем, що встановлена в різцетримачі верстата і здійснює обробку деталі. Модель побудована з використанням головних координат, що дозволяє повністю розділити змінні, які визначають рух інструменту в довільній в площині yOz. Маса коливальної системи m приведена до вершини різця і рухається тільки в напрямках головних осей координат $O\eta_1$ і $O\eta_2$. На масу m діє сила різання $P(t)$, прикладена до вершини різця. Модель пружної системи інструменту представлена як система з трьома

степенями вільності. За початок координат прийнято вершину різця (т. *O*). Вісь *Oy* направлено по нормалі до оброблюваної поверхні, а вісь *Oz* – перпендикулярно до неї. Сила різання $P(t)$ прикладена під кутом α до осі *Oz,* а головні координати $O\eta_1$ і $O\eta_2$ розвернуті під кутом β до узагальнених координат *Oy* і *Oz* . Розроблена математична модель процесу розточування дозволяє визначити вплив конструктивних параметрів консольних оправок на рівень та запас сталості пружної системи інструменту та визначити режими вібростійкої обробки. Для визначення коефіцієнтів математичної моделі та обґрунтування необхідності врахування кута розвороту β головних осей жорсткості пружної системи інструменту при моделюванні процесу розточування проведені експериментальні дослідження на важкому токарно-гвинторізному верстаті мод.1М63. На рис. 2, *а* наведено схему вимірювання кругової податливості супортної групи верстата. Особливістю схеми вимірювання є те, що навантаження здійснюється на вильоті консолі $L = 250$ мм закріпленої в різцетримачі достатньо жорсткої розточувальної оправки діаметром консольної частини 85 мм.

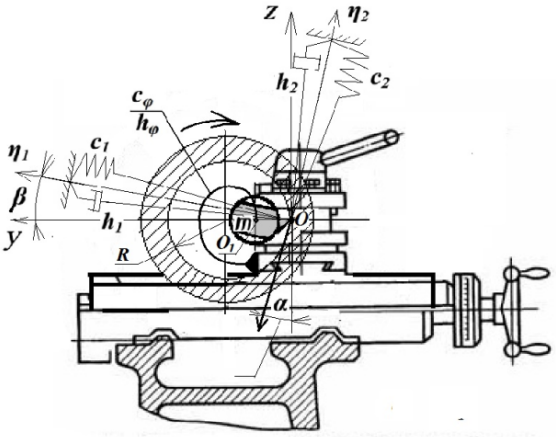
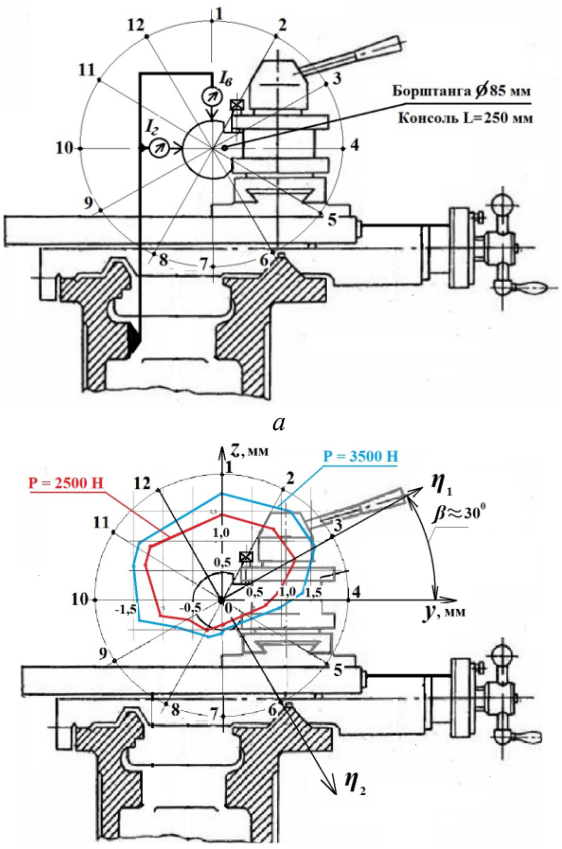


Рис. 1. Принципова схема процесу розточування на токарному верстаті традиційної компоновки

Силова дія на оправку здійснюється навантажувальним пристроєм у вигляді Г-подібного кронштейну з гвинтовим домкратом та динамометром, що встановлені в затискному патроні шпинделя верстата. Напрямок дії сили змінюється поворотом кронштейну разом зі шпинделем через 30°, забезпечуючи 12 напрямків навантаження супортної групи (поз.1–12). Переміщення оправки на вильоті консолі внаслідок дії навантаження фіксується індикаторами часового типу $I_г$ та $I_в$ ціною поділки 0,002 мм, які контролюють переміщення оправки в горизонтальному та вертикальному напрямках відповідно. Положення індикаторів є незмінним при зміні напрямку дії навантажувальної сили. Переміщення консольної частини оправки вимірювалось при двох рівнях

навантаження $P = 2500$ Н та $P = 3500$ Н. Аналіз графіків кругової діаграми податливості (рис. 2, *б*) дозволив визначити положення головних осей жорсткості супортної групи, а саме, η_1 – вісь найменшої жорсткості та η_2 – вісь найбільшої жорсткості і кут їх розвороту $\beta \approx 30^0$ відносно довільної системи координат yOz. Визначене положення головних осей жорсткості супортної групи забезпечує сталий процес різання при зовнішньому точінні внаслідок того, що сила різання є близькою за напрямком до осі найбільшої жорсткості η_2 (напрямок 0–6) і статична характеристика пружної системи інструменту $K_{ПС} > 0$. Разом з тим, при розточуванні з правим обертанням шпинделя напрямок дії сили різання буде наближеним до напрямку 0–8 і $K_{ПС}$ може бути <0, що призведе до втрати сталості процесу різання внаслідок можливого затягування різця в матеріал деталі.



а

б

Рис. 2. Схема вимірювання (а) кругової податливості та графіки деформацій (б) в площині yOz пружної системи інструменту токарно-гвинторізного верстата мод. 1М63

Одним із способів уникнення затягування різця при розточуванні може бути обробка з лівим обертанням шпинделя, при якій напрямок дії сили різання відносно головних осей жорсткості буде аналогічним процесу зовнішнього точіння. Таким чином, для забезпечення умов вібростійкої обробки розточувальними оправками на важких токарних верстатах бажано враховувати при проектуванні оправок наступні рекомендації: – максимально підвищити радіальну жорсткість оправки в зоні встановлення різця за рахунок форми поперечного перерізу консольної частини та в зоні кріплення на верстаті; – забезпечити умову, при якій збільшення сили різання викликає відтиск інструменту від оброблюваної деталі.

Ще одним ефективним способом підвищення вібростійкості процесу розточування є підвищення демпфіруючої здатності розточувальних оправок. У більшості відомих конструкцій оправок для встановлення демпфера використовується порожнина значного діаметру в консольної частини оправки. Недоліком такої оправки є зниження радіальної жорсткості в точці розміщення різця саме внаслідок наявності порожнини. Разом з тим, якщо конструктивно забезпечити умову, при якій діаметр порожнини d не перевищував би половини зовнішнього діаметра D консольної частини оправки, а саме: $d/D \leq 0{,}5$, то радіальна жорсткість консольної частини оправки з порожниною буде близькою до жорсткості суцільного тіла консольної частини. При виконанні цієї умови втрачається не більше 5% радіальної жорсткості консольної частини оправки і є можливість встановлення демпферу в порожнині для підвищення її демпфіруючої здатності і, як наслідок, підвищення вібростійкості при розточуванні, що підтверджено результатами експериментальних досліджень дослідних зразків розточувальних оправок.

В.С. Майборода, д.т.н., проф.[1],
И.В. Слободянюк, к.т.н.[1],
Д.Ю. Джулий, к.т.н.[1],
А.И. Зелинко, [2]
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»[1],
Отто-фон-Герике университет[2]

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ГОЛОВКАМИ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Актуальной задачей при обеспечении финишной обработки как плоских поверхностей, так и поверхностей с малой кривизной является разработка методов и устройств, которые достаточно мобильны и могут быть использованы на универсальном металлорежущем оборудовании. Одним из перспективных направлений при решении данной проблемы является

применение метода магнитно-абразивной обработки (МАО), у которого для формирования магнитно-абразивного инструмента (МАИ) применяют сменные магнитные головки, изготовленные с использованием постоянных магнитов с высокой степенью намагниченности.

Для обеспечения эффективного процесса МАО необходимо выполнение трех основных условий:

– обеспечение равномерного прижима элементов МАИ к обрабатываемым поверхностям,

– наличие достаточной и равномерно распределенной относительно обрабатываемых поверхностей тангенциальной составляющей скорости относительного движения элементов МАИ и обрабатываемой поверхности,

– способность МАИ к постоянному перемешиванию, восстановлению рабочей формы, нивелированию процессов, приводящих к выбрасыванию и вытеснению порошка из зон активной обработки.

При МАО плоских поверхностей реализация выполнения первого условия будет обеспечиваться за счет использования энергии магнитного поля магнитов, особенностей формирования заданного градиента магнитной индукции в рабочем зазоре между обрабатываемой поверхностью и рабочей поверхностью магнитной головки, величиной зазора.

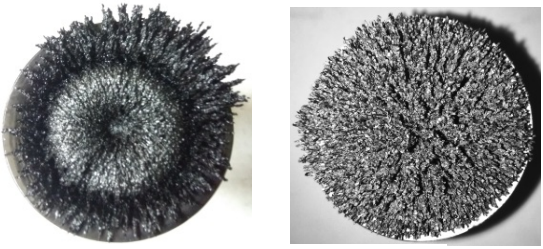
Реализация второго и третьего условий может быть связана с характером движения головки, видом градиента магнитной индукции в зоне обработки, конструкцией и формой рабочих поверхностей корпуса головки, которые принимают непосредственное участие в формировании МАИ и способствуют активному перемещению и перемешиванию частиц МАИ относительно обрабатываемых поверхностей.

Исследования, выполненные в данной области, показали перспективность применения постоянных магнитов для финишной обработки методом МАО. Общим недостатком известных работ является отсутствие конкретной информации о технологическом процессе и рекомендаций по использованию предлагаемых схем и конструкций.

Целью работы было разработать реальные конструкции магнитных головок и выполнить проверку их работоспособности. В качестве базовых элементов рабочих головок рассматривали возможности использования высокомощных неодимовых магнитов в виде цилиндра диаметром 40 мм и высотой 18 мм и двумя кольцевыми цилиндрам с аналогичной высотой, вставленными друг в друга так, чтобы они были ориентированы к рабочей поверхности противоположными полюсами. Характерный вид расположения магнитно-абразивного порошка на рабочей поверхности рабочих головок типа торцевых фрез представлен на рис. 1. Условно, головки были названы по внешнему виду формируемого на рабочей поверхности МАИ как полутор и щетка.

На первом этапе было исследовано изменение величины магнитной индукции – B в зависимости от расстояния от рабочей поверхности головок. Полученные результаты приведены на рис. 2. Показано, что с увеличением расстояния от рабочей поверхности величина магнитной индукции снижается по зависимостям близким к линейным. Причем скорость уменьшения величины B

для головки типа щетка составляет 0,0228 Тл/мм, а для полутора – 0,0335 Тл/мм. Подобная разница в характере снижения магнитной индукции связана как со степенью намагниченности магнитов, так и с особенностями распределения силовых магнитных линий вблизи торцевой поверхности головок.



полутор щетка

Рис. 1. Расположение порошка на рабочих поверхностях рабочих головок после цикла МАО ферромагнитных деталей

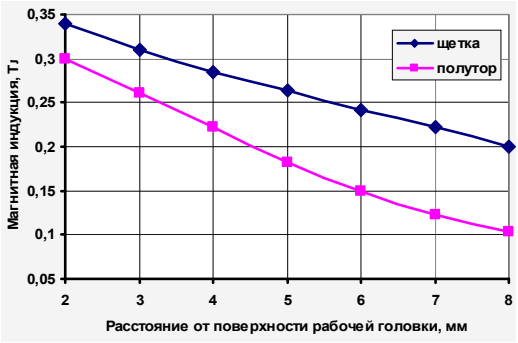


Рис. 2. Изменение величины магнитной индукции в зависимости от расстояния от рабочей поверхности головок

На втором этапе проведены испытания головок с гладкой рабочей поверхностью с МАИ вида полутор и щетка при рабочих зазорах (высоте МАИ) 2 и 3 мм. Оценку эффективности процесса МАО выполняли по величине абсолютного $\Delta Ra = Ra_{исх} - Ra_{кон}$ и относительного $\delta Ra = Ra_{исх}/Ra_{кон}$ изменения параметра *Ra*.

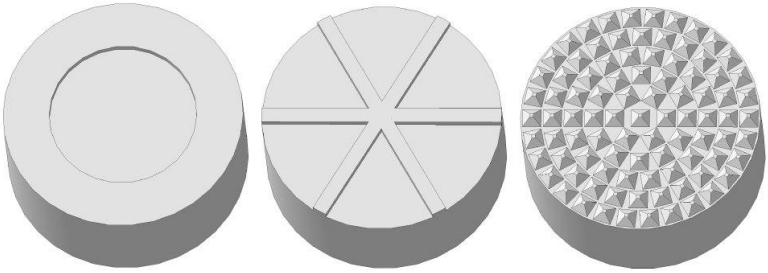
Испытания рабочих головок выполняли при частоте вращения головок 900 об/мин, величине подачи 10 мм/мин. В качестве магнитно-абразивного порошка использовали Ферромап с размером частиц 630/400 мкм. В качестве обрабатываемого материала использовали предварительно фрезерованную Сталь 45 до *Ra* 0,9–1,0. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Наблюдения за особенностями поведения МАИ при реальной обработке показали, что не выполняется второе основное условия для обеспечения эффективного МАО – отсутствует достаточное относительное перемещение

МАИ и обрабатываемой поверхности. Для обеспечения выполнения второго основного условия эффективного МАО предложено использовать различные формы рабочей поверхности магнитных головок (рис. 2). Результаты экспериментальных испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 1 – Изменение параметра Ra после МАО головками с МАИ различной высоты и разной магнитной индукцией в рабочем зазоре

Тип МАИ	Высота МАИ, мм	Магнитная индукция в зазоре, Тл	$Ra_{исх}$, мкм	ΔRa,мкм	δRa
полутор	3	0,26	0,95	0,17	1,22
	2	0,30	0,90	0,16	1,22
щетка	3	0,305	1,00	0	1,00
	2	0,34	0,99	0,02	1,02



Тип 1 Тип 2 Тип3

Рис.3. Конструкции рабочих поверхностей магнитных головок

Таблица 2 – Изменение параметра Ra после МАО различными магнитными головками

Тип рабочей поверхности головок	Тип МАИ	Высота МАИ, мм	$Ra_{исх}$, мкм	ΔRa,мкм	δRa
1	полутор	4	0,89	0,75	6,36
		3	0,95	0,85	9,50
	щетка	4	0,83	0,74	9,00
		3	0,72	0,57	4,80
2	полутор	4	1,24	0,62	2,00
	щетка		1,29	1,10	6,80
3	полутор		0,67	0,19	1,39
	щетка		1,57	1,42	10,50
			0,77	0,70	9,60

Полученные результаты показали, что наиболее перспективным направлением в создании конструкций головок будут головки с нанесенными на рабочую поверхность выступов различной формы. При этом такие головки будут эффективны в случае когда $\delta Ra > 5$.

А.С. Максимчук, м.т.н.,
Н.Н. Попок, д.т.н., проф.,
Полоцкий государственный университет

ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ

В настоящее время у ведущих производителей торцовых фрез прослеживается тенденция создания режущих инструментов, которые состоят из взаимозаменяемых конструктивных элементов. При этом во многих таких конструкциях предусматривается возможность регулировки точностных и геометрических параметров режущего инструмента за счет дополнительных взаимозаменяемых конструктивных элементов и модулей.

Но стоит отметить то, что в зарубежных инструментальных системах затруднено применение межтиповой модульности, которая позволяет использовать одни и те же блоки и модули не только во фрезах, но и в других типах инструментов, таких как резцы, зенкеры, сверла и др.

В связи с этим актуальным является создание модульных режущих инструментов, в частности торцовых фрез, состоящих из унифицированных для разных типов инструментов блоков и модулей, и обладающих технологичной конструкцией для условий любого инструментального производства, которые, несмотря на недостаточную точность изготовления отдельных элементов, за счет регулировки геометрических параметров блоков и модулей обеспечивает достижение заданной точности режущего иснтрумента и, следовательно, заданных параметров изготавливаемых изделий. При этом стоимость таких сборных фрез может быть гораздо ниже современных зарубежных аналогов.

Были разработаны конструкции блочно-модульных режущих инструментов, в основе которых лежит унифицированный резцовый блок; и проведены экспериментальные исследования надежности и жесткости закрепления режущих пластин и блоков резцовых.

Для уменьшения номенклатуры блочно-модульных торцовых фрез предложено использовать инструмент с регулировкой геометрических параметров лезвий в торцовом и радиальном направлениях.

Для n направлений регулировки и m вариантов точностного исполнения можно получить:

$$K = n \cdot m$$

вариантов регулировочных механизмов.

Если рассматривать варианты для торцового (Т), радиального (Р) и торцово-радиального (Т–Р) направлений регулировки и грубого (Гр), точного (Т) и повышенной точности (ПТ) вариантов точностного исполнения, то можно получить различные варианты регулировочных механизмов в зависимости от направления и точности регулировки. Такие возможные варианты представлены на схеме (рис. 1):

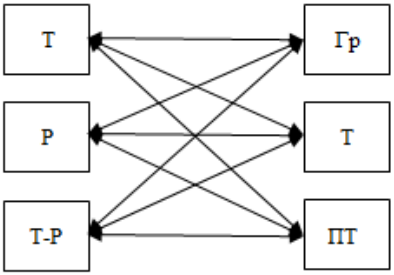


Рис. 1. Возможные варианты сочетаний регулировочных механизмов

Принимая следующие обозначения:
ПР – тип (геметрическая форма) пластин режущих,
БР – конструкция блоков резцовых,
МЗ – конструкция модулей зажимных,
МР – конструкция механизма регулировки, которая делится на *МРТ* (конструкция механизмов регулировочных для регулировки торцового биения), *МРР* (конструкция механизмов регулировочных для регулировки радиального биения) и *МРТР* (конструкция механизмов регулировочных для регулировки торцового и радиального биений),
МК – конструкция модулей корпусных,
БМТФ – конструкция блочно-модульных торцовых фрез,
были получены:

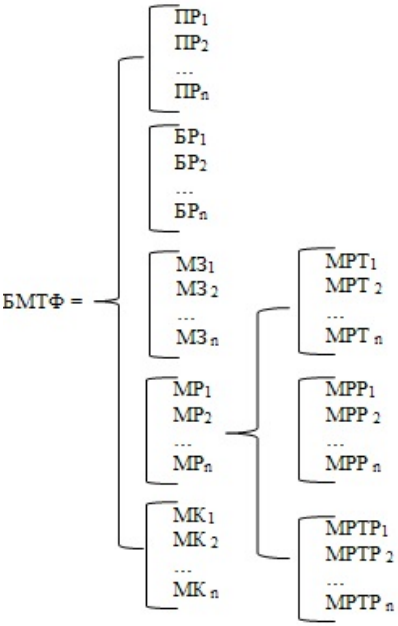


Рис. 2. Схема формирования регулируемых блочно-модульных торцовых фрез

1. Обобщенный код формирования регулируемых блочно-модульных торцовых фрез:

$$ПР \cup БР \cup МЗ \cup МР(МРТ \cup МРР \cup МРТР) \cup \cup МК \rightarrow БМТФ$$

2. Схема формирования регулируемых блочно-модульных торцовых фрез в табличном виде (рис. 2).

На основании предложенных кода и схемы формирования блочно-модульных торцовых фрез были разработаны конструкции блочно-модульных торцовых фрез с различными вариантами регулировки геометрических параметров.

В.В. Медвєдєв, к.т.н., доц.,
М.М. Шихалєєв, асп.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ РОЗТОЧУВАННІ ОТВОРІВ У КОРПУСНИХ ДЕТАЛЯХ

Запропоновано метод забезпечення якості поверхневого шару при обробленні отворів в корпусних деталях розточуванням за умов значних осьових вильотах шпинделя через технічну діагностику технічної обробляючої системи. В якості сигналів використано інтерференцію двох акустичних датчиків – п'єзомікрофонів. Порівняння інтерференції сигналів запропоновано виконувати з використання алгоритму штучних нейронних мереж. Також запропонована укрупнена схема діагностичної системи.

Діагностування технологічних процесів, стану різального інструменту є важливим завданням промисловості, оскільки дозволяє підвищити продуктивність оброблення різанням на машинобудівних підприємствах, а також підвищити ресурс роботи різального інструменту, знизити рівень браку, недостатньої якості поверхневого шару та геометричних параметрів оброблюваних деталей.

Наскільки відомо, вібрації при обробленні різанням є одним з основних факторів, що визначають продуктивність і точність оброблення на верстатах на ЧПУ. Вимушені коливання системи утворюються при фрезеруванні та інших операціях. Багато уваги дослідники приділяють моніторингу таких вібрацій в режимі он-лайн та активному контролю.

Метою роботи є розроблення та представлення алгоритму та методу забезпечення якості поверхневого шару та геометричної точності при розточування при зменшенні жорсткості системи через технічну діагностику і подальше корегування технологічного процесу.

Діагностика стану обробляючої системи має відбуватись в автоматизованому режимі, без безпосередньої участі людини-контролера та, за можливості, автоматично обробляти отриману інформацію з системи для прийняття рішень з роботи верстата. Тобто, діагностична система, що складається з датчиків, комп'ютерної системи оброблення інформації, мікроконтролерів тощо, має бути інкорпорована (включена) в процес різання. З урахуванням багатьох фізичних явищ у зоні різання, у системі технічної обробляючої системи (ТОС), діагностування є комплексним процесом і включає в себе багато каналів інформації – за виникненням електрорушійної сили в зоні різання, силові явища, теплові, вібраційні тощо. Отже, можна проводити комплексну діагностику по багатьом каналам інформації про стан ТОС або якість поверхневого шару. Особливістю технологічного процесу розточування є кінематична схема різання, тобто можливе ускладнення монтування датчиків в елементи технічної обробляючої системи з причини обертання шпинделя, заготовки чи інструменту.

Особливо відчутно на якість і продуктивність оброблення впливають коливання, що за визначенням є самовиникаючими вібраціями пружної технологічної обробляючої системи. Така система є нестабільною з точки зору оброблення, що призводить до зменшення продуктивності оброблення і якості поверхневого шару. Коливання впливають на якість поверхневого шару, а саме на шорсткість та відхилення форми.

Розточування в корпусних деталях є поширеним методом оброблення, оскільки є операцією високої точності а також забезпечує малу шорсткість поверхні. А також є достатньо продуктивним. Розточування можна проводити як на токарних обробляючих центрах, так і на фрезерних (як горизонтальної, так і вертикальної групи). Діагностика розточування може відбуватись по вібраційним, акустичним, силовим каналами. Також, важливою є динамічна модель розточування, оскільки вона дозволяє оцінити фізичні явища, що протікають у ТОС при розточуванні, а також врахувати зміну жорсткості при значному вильоті шпинделя. Задача полягає в забезпеченні якості оброблених поверхонь за умов малої жорсткості ТОС, зумовленою значним ходом шпинделя, із одночасним забезпеченням продуктивності оброблення на достатньому рівні. Ця задача є багатокритеріальною. Також є багато критеріїв самої якості поверхні. Тому ще однією задачею є встановлення відносин між критеріями процесу обробки та критеріями якості.

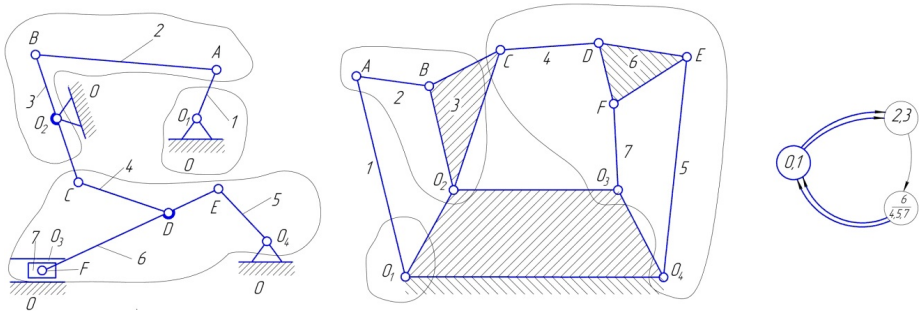
По проведеному аналізу діагностичних каналів бачимо, що одним з кращих датчиків з точки зору наладки операції розточки є датчики акустичної емісії. Методика визначення вібраційних характеристик технологічної системи за акустичними сигналами може бути построєна на основі декілька однакових датчиків, встановлених у різних місцях системи. Аналіз даних з цих датчиків запропоновано використати методом інтерференції сигналів. Оцінку даних можливо виконувати в автоматичному режимі з використанням штучних нейронних мереж. Запропонований метод можна використовувати для діагностики стану технологічного процесу при розточуванні глибоких отворів в корпусних деталях.

С.В. Мельничук, к.т.н., доц.[1],
А.М. Шостачук, к.т.н., доц.[2],
Житомирський агротехнічний коледж[1],
Державний університет «Житомирська політехніка»[2]

ГРАФИ СТРУКТУРНИХ ГРУП (ГРУП АССУРА) II ТА III КЛАСІВ ПЛОСКИХ ВАЖІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ

Теорія графів – розділ математики, присвячений дослідженню дискретних структур. Механізм, який складається з ланок, з'єднаних в кінематичні пари, і є однією з таких структур. Задача теорії механізмів і машин, в рамках якої розглядають дискретні структури механізмів, називається задачею

структурного аналізу механізмів. Розв'язання цієї задачі дає відповідь на наступні запитання: чи є можливим існування такого механізму в принципі; які методи необхідно застосувати при розв'язанні задач кінематичного та силового аналізу; яка існує можливість синтезу інших механізмі з даною структурною схемою. Зазвичай виділення структурних груп та механізму *I* класу здійснюють на кінематичній схемі механізму, після чого будують структурну схему, як це показано на рис. 1, *а* та 1, *б*. Набагато більш компактним і досить інформативним є, на наш погляд, зображення структурної будови механізму у вигляді плоского графу (рис. 1, *в*), вершинами якого зображують механізм *I* класу та структурні групи, а ребрами є дозволені відносні рухи ланок різних структурних груп. Жирною лінією виділено вершину, яка зображує механізм *I* класу та рухи стояка та вхідної ланки відносно ланок структурних груп. Вершини графу мають вигляд кіл, в які вписані номери ланок, що утворюють дану структурну групу або механізм *I* класу. Граф механізму, показаний на рис. 1, *в*, є орієнтованим, оскільки механізм утворюється послідовним приєднанням структурних груп.



а *б* *в*

Рис. 1. Структурний аналіз плоского важільного механізму: плоский важільний механізм (рис.а), його структурна схема (б) та його граф (в)

Розглянемо порядок утворення механізму, зображеного на рис. 1, *а*. До механізму *I* класу, в першу чергу, в кінематичних парах *A* і O_2 приєднується структурна група *II* класу, утворена ланками *2* та *3*. На графі механізму (рис. 1, *в*) це зображено стрілками на кінцях ребер, які з'єднують вершини (*0*, *1*) та (*2*, *3*). Далі приєднуємо структурну групу *III* класу, яка складається з ланок *4*–*7*. Ця структурна група приєднується до структурної групи (*2, 3*) в кінематичній парі *C,* що показано стрілкою, якою закінчується ребро, що з'єднує вершини (*2*, *3*) та (*6*/*4*, *5*, *7*). Приєднання структурної групи *III* класу до стояка в кінематичних парах O_3 та O_4 показано двома ребрами зі стрілками, які закінчуються в вершині (*0, 1*). Звичайно, зображений порядок приєднання структурної групи *III* класу не означає, що вона приєднується спочатку до структурної групи (*2, 3*), а лише після цього – до механізму *I* класу (*0, 1*). В дійсності структурна група *III* класу буде приєднуватись одночасно до механізму *I* класу та до структурної групи *II* класу. Показані стрілки на кінцях ребер, що з'єднують

структурну групу *III* класу та механізм *I* класу, показують лише неможливість приєднання до механізму *I* класу структурної групи *III* класу раніше за структурної групи *II* класу. Тобто, оскільки будь-яка структурна група приєднується всіма ланками, що утворюють кінематичні пари з іншими ланками механізму одночасно, то вказані стрілки не суперечать дійсності.

Таким чином, даний граф містить всю необхідну інформацію про структуру механізму, за виключенням, можливо, відомостей про саму структурну групу. Очевидно, останню також можна представити у вигляді графу, в якому вершинами будуть ланки, а ребрами – дозволені відносні рухи ланок. Найбільш поширеними в сучасних плоских механізмах є структурні групи *II* класу. Розглянемо їх основні типи та відповідний граф. На рис. 2, *а* представлено структурні групи *II* класу, які використовуються відповідно у кривошипно-шатунному, кривошипно-повзунковому та кулісному механізмах. На графі механізму кожна структурна група буде показана як вершина у вигляді кола, від якого виходять два ребра, що означають дозволені рухи кожної з ланок групи відносно нерухомої (стояка) та рухомої (вхідної) ланок. В середині кола записують через кому номери ланок, що утворюють дану структурну групу (рис. 1, *в* та 2, *в*). Кожній з цих структурних груп буде відповідати один граф, який показано на рис. 2, *в*. Дві вершини у вигляді кіл відповідаю ть ланкам структурної групи, а ребро між ними – дозволений відносний рух цих ланок.

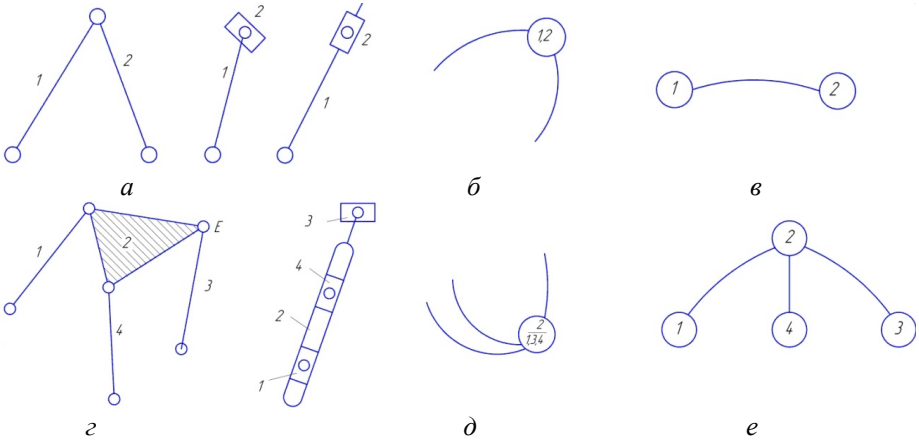


Рис. 2. Графи структурних груп: конструктивне виконання структурних груп II (а) та III (г) класів, зображення структурних груп II та III класу на графі механізму (відповідно б і д), графи структурних груп II (в) та III класу (в, е)

Більш складними, як з точки зору структурного аналізу, так і особливо з точки зору кінематичного та силового розрахунків, є структурні групи *III* класів, два типи яких показано на рис. 2, *г*. В обох випадках ланка 2 є базовою, тобто вона утворює три кінематичні пари *V* класу з іншими трьома ланками. На графі механізму така структурна група показана у вигляді кола, від якої

відходить три ребра, що характеризують можливі рухи трьох небазових ланок даної структурної групи відносно інших ланок механізму (рис. 2, *д*). Граф структурної групи *III* класу представлено на рис. 2, *е*. Як видно, він представляє собою три вершини, одна з яких, що відповідає ланці 2, зв'язана з іншими трьома ланками ребрами, які представляють рухи базової ланки відносно трьох інших ланок структурної групи. Ребра, які б зв'язували ці три вершини, відсутні, оскільки відповідні ланки утворюють кінематичні пари тільки з іншими ланками механізму. Більше того, очевидно, що існування ребер між трьома вершинами, які зображують небазові ланки структурної групи *III* класу, є неможливим, оскільки в протилежному випадку замість кінематичного ланцюга з чотирьох ланок утворюється одна жорстка ланка. На відміну від графу механізму, граф структурної групи не є орієнтованим, оскільки вона є окремою структурною одиницею, яка приєднується до механізму всіма небазовими ланками одночасно.

В.Ф. Молчанов, к.т.н., доц.,
Дніпровський державний технічний університет

ЕФЕКТИВНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ РІДИНИ ВІД ТВЕРДИХ ЧАСТОК В СИСТЕМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОР МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Сучасний етап розвитку машинобудування характеризується вдосконаленням процесів механічної обробки. Механічна обробка деталей – складний технологічний процес, що протікає при високих швидкостях, температурах і тиску. Обробка різанням забезпечує отримання деталей із заданою точністю і якістю оброблюваної поверхні. У зв'язку з підвищеними вимогами до якості поверхні оброблюваних деталей на фінішних операціях важливе значення набуває застосування мастильно-охолоджуючих рідин (МОР). Мастильно-охолоджуючі рідини одночасно і взаємопов'язано забезпечують мастильну, адсорбційну, хімічну, охолоджуючу та миючу дію на процес механічної обробки деталей машин Однією з умов підвищення якості поверхні деталей машин при шліфуванні є застосування мастильно-охолоджуючих рідин (МОР). Аналіз впливу рідин на поверхневий шар показує, що застосування МОР значною мірою знижує сили тертя в парі інструмент - деталь, зменшує зношування і затуплення різальних кромок шліфувального круга, підвищує якість шліфованих поверхонь.

Проте в процесі експлуатації мастильно-охолоджуючі рідини безперервно і інтенсивно забруднюються твердими частками металообробки, які зменшують зносостійкість інструменту, збільшують припалювання поверхонь, знижують термін експлуатації МОР. Для підвищення якості оброблюваних поверхонь механічні домішки з МОР необхідно видаляти.

Найбільш ефективними для очищення МОР від твердих часток являються очисні пристрої з використанням фільтрації. У Дніпровському державному технічному університеті розроблені установки для очищення рідин від твердих часток фільтрацією. У розроблених пристроях застосовано очищення з використанням фільтрації через шар сипких пористих матеріалів. Особливістю фільтрувальної установки є фільтруюча перегородка у виді об'ємної пористої камери, обмеженої нескінченними фільтрувальними сітками, між якими розміщений шар сипкого пористого матеріалу. В якості фільтрувального матеріалу використовуються утворені тверді частки металообробки або інші широко розповсюджені сипкі пористі матеріали.

Для забезпечення високоякісної очистки мастильно-охолоджуючих рідин від забруднення твердими частками, утвореними металорізальними верстатами при обробці металів різанням запропоновано і розроблено нове очисне обладнання. Очисний пристрій (рисунок) складається із корпусу *1*, нагнітальної камери *2* з підвідним патрубком *3* і розвантажувальним вузлом *4*, фільтрувальної перегородку 5, зливної камери 6 з відвідним патрубком 7. Фільтрувальна перегородка *5* виконана у виді пористої камери, обмеженої двома нескінченними сітками *8* і *9*, що приводяться в рух системою блоків нижніх *10* і верхніх *11* барабанів, які мають незалежні приводи. Між нескінченними сітками *8* і *9* рівномірним шаром розташовується сипкий пористий матеріал *12* з живильника *13*. Під розвантажувальним вузлом *4* встановлений гравітаційний бак-відстійник *14* з скребковим конвеєром *15* і переливною трубою *16*.

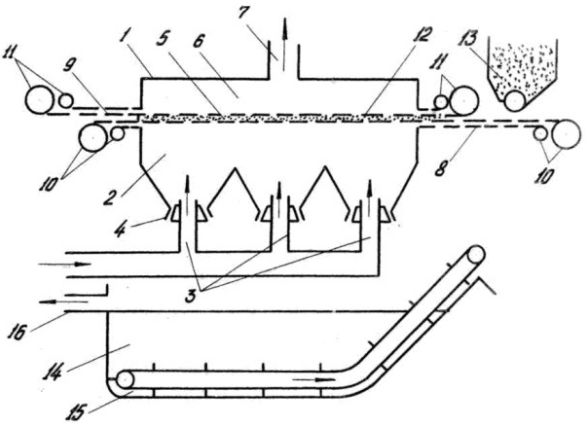


Рис. 1. Очисний пристрій

Пристрій працює таким чином. Забруднена рідина поступає по підвідному патрубку *3* в нагнітальну камеру *2*. Рідина фільтрується через фільтрувальну перегородку *5* і із зливної камери *6* через патрубок *7* відводиться з пристрою. Тверді частки, швидкість витання яких більше швидкості потоку рідини, направляються на фільтрувальну перегородку *5*. Оскільки розмір чарунки

нижньої сітки *8* і діаметри капілярних каналів, утворених шаром сипкого пористого матеріалу *12*, відповідні з діаметром твердих часток, то останні проникаючи у всередину фільтрувального шару *12*, зависають і затримуються в ньому. Крупні тверді частинки швидкість витання яких менше швидкості рухомого вгору потоку рідини, опускаються під дією сил тяжіння вниз до розвантажувального вузла *4*. Між циклами фільтрації рідини під час очищення нижньої сітки *8* від твердих частинок і утворення нових капілярних каналів у фільтрувальному шарі *12*, що відокремилися і осіли тверді частки разом з частиною рідини через розвантажувальний вузол *4* потрапляють в гравітаційний бак-відстійник *14*, звідки їх видаляють скребковим конвеєром *15*, а рідина досягши певного рівня переливається через переливну трубу *16* в бак для подальшого очищення.

Процес очищення нижньої сітки *8* від твердих часток і утворення капілярних каналів у фільтрувальному шарі *12* здійснюється поперемінною зміною напряму руху двох нескінченних сіток *8* і *9*, в протилежні сторони при обертанні системи блоків нижніх *10* і верхніх *11* барабанів. Подача і розміщення фільтрувального шару з сипкого матеріалу *12* проводиться живильником *13*. Зміна фільтрувальної перегородки *5* здійснюється автоматично шляхом переміщення двох незалежних нескінченних сіток *8* і *9* в одному напрямі з подальшим вивантаженням сипкого пористого матеріалу із завислими твердими частками в спеціальну ємність для очистки сипкого матеріалу і подальшого його використання. В якості сипкого пористого матеріалу використовуються волокна текстилю, подрібнений піщаник, тверді частки шліфування.

Запропонований пристрій дозволяє автоматизувати процес очищення забрудненої рідини від твердих часток. Механізм очищення нижньої сітки від твердих часток з утворенням нових капілярних каналів у фільтрувальному шарі простий і надійний в роботі, забезпечує відновлення фільтрувальної системи по всій її площині, що дозволяє збільшити продуктивність в 3–5 рази, а ступінь очистки підвищити в 1,1–1,2 рази. Використання в якості фільтрувальної перегородки сипучих пористих матеріалів дає можливість відмовитися від дорогих фільтрувальних тканей і фільтрувального паперу, що дозволяє отримати значний економічний ефект.

Розроблений пристрій запропоновано для високоякісного очищення технологічних рідин від механічних включень і повного видалення цінної вторинної сировини із рідин (МОР) при мінімальних експлуатаційних витратах.

Поставлена мета досягається виконанням фільтрувальної перегородки у виді об'ємної пористої камери, обмеженої двома нескінченними фільтрувальними сітками, між якими рівномірним шаром розміщається сипкий пористий матеріал, і які приводяться в рух системою блоків нижніх і верхніх барабанів, що мають незалежні приводи.

Розроблений очисний пристрій доцільно застосовувати для очистки МОР металорізальних верстатів від дрібної стружки і шламу, в якості фільтрувального шару використовувати тверді частинки металообробки або інші широко поширені фільтрувальні матеріали.

Пристрій дозволяє повністю автоматизувати процес очистки МОР від твердих часток практично будь-якої в'язкості.

Висновки. Використання пристрою забезпечує повне освітлення МОР і глибоке видалення твердих часток цінної вторинної сировини металообробки, зокрема для порошкової металургії, створює умови для організації безвідходного виробництва, підвищує рівень екологічної нешкідливості на ділянці експлуатації МОР.

В результаті впровадження розробки відпадає необхідність в придбанні дорогих фільтрувальних матеріалів, збільшено термін експлуатації МОР в технологічному ланцюзі на 3%, збільшена стійкість різального інструменту на 6–8%, підвищена якість оброблюваних поверхонь.

В.В. Отаманський,
Я.А. Степчин, к.т.н., доц.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

АНАЛІЗ УМОВ ЗНИЖЕННЯ ВІБРОАКТИВНОСТІ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

Постійне зростання продуктивності процесів механічної обробки вимагає застосування нових інструментальних матеріалів, схем різання, конструкцій інструментів та інтенсифікації параметрів режиму різання. Суттєву роль у процесах обробки різанням плоских поверхонь деталей машин займає торцеве фрезерування. Одним із основних обмежень використання інтенсивних режимів обробки при торцевому фрезеруванні сучасними інструментальними матеріалами є зростання рівня самозбуджуваних автоколивань у зоні різання. Автоколивання не тільки знижують продуктивність та період стійкості фрези, але і погіршують якісні показники оброблених поверхонь.

Загалом, рівень коливальних процесів у зоні різання визначається різними джерелами, походженням та інтенсивністю коливань. Але саме автоколивання є особливо важко прогнозованими. Це обумовлено особливостями характеристик робочих процесів різання та тертя, нелінійністю самої технологічної обробної системи (ТОС), зовнішніми джерелами енергії неколивального характеру.

Причини виникнення автоколивань визначені на основі багатьох досліджень. А саме: запізнення сили різання відносно зміни товщини зрізуваного шару, координатний зв’язок пружних деформацій обробної системи і процесу різання, падіння сили різання при підвищенні швидкості руху різального леза.

Важливим є аналіз умов зниження віброактивності для більш вузької області процесів обробки різанням, а саме процесу торцевого фрезерування, яке додатково ускладнює теоретичний аналіз обробної системи з багатолезовим інструментом.

Процес торцевого фрезерування вносить в ТОС періодичні імпульсні впливи при вході та виході різальних лез, вплив непостійної сили різання як по напрямку, так і величині, в залежності від кута повороту фрези, дійсної кількості робочих різальних лез та сумарного поточного зрізуваного шару.

Шляхи протидії вібраціям включають в себе підвищення вібростійкості та динамічної якості верстатів; застосування методів та засобів управління рівнем коливальних процесів у обробній системі з метою підвищення стійкості інструментів та продуктивності обробки різанням; використання вібростійких різальних інструментів та оснащення, вибір вібростійких сполучень параметрів режиму різання та інших умов обробки; застосування різного виду гасителів вібрацій.

Розглядаючи умови протидії вібраціям, важливим є визначити парціальний вплив на продуктивність, якість обробки та стійкість торцевої фрези виду та напрямку коливань домінуючої підсистеми ТОС.

Для випадку фрезерування комбінованою (масивною) фрезою, що суміщає чистову та напівчистову обробку і групову схему різання в якості домінуючої підсистеми, можна прийняти систему інструмента – шпиндель-фреза. Якщо розглянути одномасову коливальну систему (рис. 1), то загалом, вона може виконувати коливання, що розкладаються на поперечні вздовж осей *x* та *y*, поздовжні по осі *z*, та крутильні Q_z навколо осі *z*.

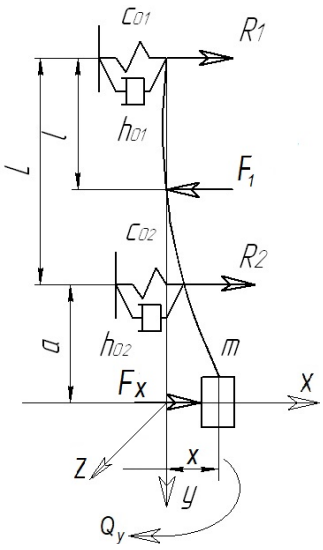


Рис. 1. Еквівалентна динамічна модель поперечних коливань підсистеми інструмента фрезерного верстата

Ймовірність виникнення, амплітудні та частотні характеристики кожного з вказаних видів коливань суттєво різні. Також неоднаковим є вплив їх на продуктивність, якісні показники обробки та стійкість фрези:

1. Ймовірність виникнення та вплив на процес обробки поперечних коливань вздовж осі *x* обумовлений співвідношенням характеристик коливальної системи та величини складової сили різання F_x у напрямку поздовжньої подачі. Поперечна жорсткість шпиндельного вузла відносно поздовжньої суттєво нижча, а зміщення фрези при коливаннях безпосередньо впливають на зміну розмірів зрізуваного шару, що запускає процес «розхитування» обробної системи (втрата усталеності за рахунок координатного зв'язку). У крайньому випадку це може приводити до втрати контакту лез фрези з поверхнею різання. Але навіть тоді вплив поперечних коливань на точність обробки (на розміри деталі по осі *y*) менш помітний. Він

залежить від величини перекосу площини фрези (площини розташування вершин різальних елементів) відносно площини оброблюваної поверхні деталі – в першу чергу погіршується площинність та шорсткість обробки. Суттєве зростання амплітуди коливань може призводити до значного зниження стійкості фрези внаслідок зростання дійсного шляху різання кожного різального елемента та його втомлювального руйнування.

2. Можливість виникнення та вплив на процес обробки поперечних коливань вздовж осі z, зазвичай не розглядається, за рахунок їх сумування з крутильними коливаннями навколо осі y.

3. Крутильні коливання шпинделя з фрезою Q_z, завдяки більшому абсолютному значенню складової сили різання F_z та меншим крутильній жорсткості і демпфуванню коливальної системи в порівнянні з поперечними є домінуючими. Ймовірність їх виникнення також визначається співвідношенням характеристик коливальної системи та величиною і змінами складової сили різання F_z. Але амплітуда цих коливань практично не впливає на зміну розмірів зрізуваного шару, і відповідно, на «розхитування» обробної системи. Також зростання крутильних коливань практично не впливає на якісні показники обробки, але як і поперечні зменшує стійкість інструмента за рахунок зростання шляху різання та процесів втомлювального руйнування інструментального матеріалу.

4. Ймовірність виникнення та вплив на процес обробки поздовжніх коливань суттєво відрізняється від усіх раніше розглянутих. Більша осьова жорсткість шпиндельного вузла, а особливо стрибкоподібне зростання складової сили різання F_v, при випадковому поздовжньому зануренні інструмента в заготовку за рахунок участі великої кількості різальних елементів у процесі обробки, практично унеможливлює «розхитування» обробної системи у напрямку осі y. Це є суттєвою відмінністю розвитку автоколивального процесу при точінні однолезовим інструментом і торцевому фрезеруванні багатолезовим. Відповідно, суттєво менша амплітуда осьових коливань фрези менше впливатиме на зниження її стійкості, ніж поперечні коливання, але безпосередньо погіршуватиме параметри точності та шорсткості обробки, відображаючись на обробленій поверхні у співвідношенні 1:1.

На підставі виконаного аналізу ймовірності та причин виникнення автоколивань у підсистемі інструмента, можна зробити висновки щодо умов зниження віброактивності процесів торцевого фрезерування:

– для підвищення продуктивності та показників якості обробки (перш за все – геометричної точності розмірів, шорсткості та хвилястості) основною умовою є максимальне демпфування за всіма осями підсистеми інструмента; жорсткість по осі y повинна бути найбільшою;

– для підвищення стійкості інструментів обов'язковою умовою є максимальне демпфування і мінімізація узагальнюючого параметра:

$$C = \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot A_i \,, \qquad (1)$$

де f_i – частота і-тих коливань, A_i – їх амплітуда.

– збільшення амплітуди крутильних коливань фрези (навколо осі y) є найбільш прийнятним у порівнянні з коливаннями поперечними (по осі x) чи поздовжніми, тому що вони поглинають енергію, що надходить у коливальну систему, не "розхитуючи" останню, і відповідно, сприяють підвищенню її вібростійкості.

В.В. Пастернак, к.т.н,
Л.М. Самчук, к.т.н, доц.,
Н.І. Ільчук, к.т.н, доц.,
Н.М. Гулієва, к.т.н,
Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ ПОРОШКІВ

Одним з основних напрямків розвитку технології машинобудування на сьогодні є вдосконалення відомих і розроблення нових матеріалів. Визначне місце в цьому процесі займають технології порошкової металургії. При отриманні таких матеріалів з гарантованими властивостями доцільно контролювати параметри їх структури в процесі виготовлення, до яких відносяться: щільність прес-форми, якість контактів, розміри зерен, вміст компонентів, і т.д. Аналіз структур та результати їх комп'ютерного моделювання показують, що отримані за традиційною технологією порошкової металургії заготовки мають суттєві недоліки. Особливо це стосується процесу засипки порошків, який супроводжується утворенням додаткових пустот – «арочний ефект». Поява «арочного ефекту», призводить до неоднорідності властивостей всередині матеріалів, і не дає можливість отримувати структурні характеристики на якісному рівні. Таким чином, прогнозування структурних характеристик матеріалів які отримуються в результаті сукупності технологічних операцій з відомими характеристиками є актуальним завданням матеріалознавства.

Для кращого заповнення прес-форми порошком, підвищення фізико-механічних властивостей отриманих виробів, а також отримання порошкових пористих матеріалів з якісними структурними властивостями можливо за допомогою «вібраційних коливань», які необхідні для додаткового ущільнення заготовки. Алгоритм заповнення бункера часточками із застосуванням вібраційних коливань враховує вплив вертикальних та горизонтальних вібрацій, як окремих чинників, а також ефект взаємодії між часточками та їх переміщення стосовно одна одної. На рис. 1 наведено вікно розробленої нами імітаційної програми для дослідження впливу вібраційних коливань на структурні зміни полідисперсної засипки.

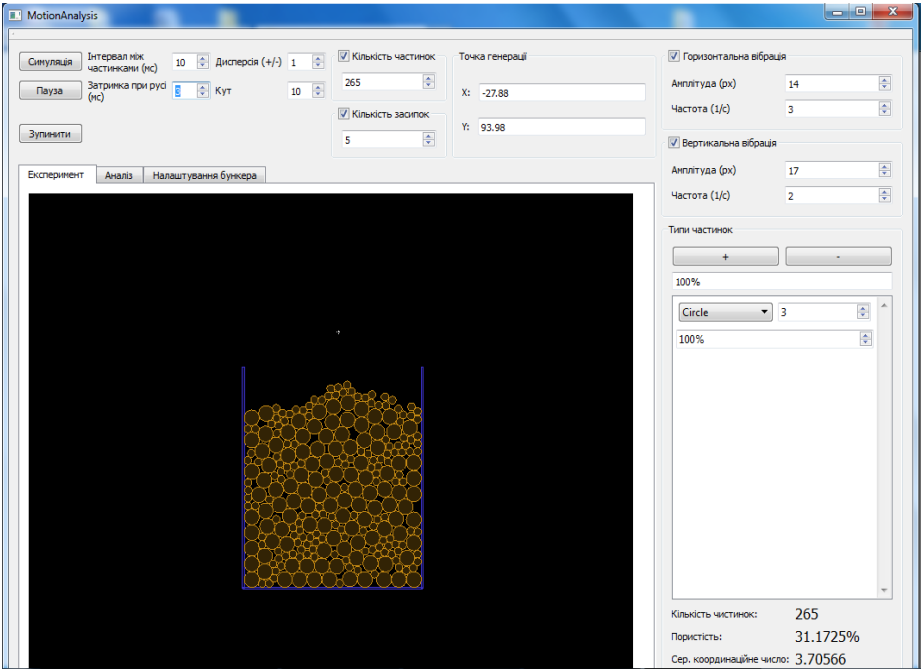


Рис. 1. Заповнення частинок із застосуванням вібраційних коливань на базі розробленого програмного забезпечення

У свою чергу, алгоритм заповнення часточками із застосуванням вібраційних коливань реалізовує вертикальні та горизонтальні вібрації як окремі процеси, а також полягає в руйнуванні початкових зв'язків між частинками та їх переміщенням одна відносно одної. Величинами, що характеризують віброколивання в алгоритмі є амплітуда та частота коливань. Структурні характеристики засипок визначаються величиною амплітуди коливань A, частотою коливань ω, розмірами часток та їх процентним співвідношенням в шихті. Змінним параметром виступає також період накладання вібрацій. Розміри часток задаються в довільних одиницях довжини системи СІ (мкм, мм, см тощо) і не залежать від роздільної здатності монітора. Параметри віброколивань можуть бути змінені за допомогою панелі керування вібраціями.

Алгоритм моделі (рис. 2) передбачає, що процедури накладання горизонтальних та вертикальних віброколивань аналогічні. Відмінність між ними полягає в тому, що основною для реалізації горизонтальних коливань є X-координата, а для вертикальних – Y-координата. Модель передбачає можливість одночасної реалізації горизонтальних та вертикальних коливань. Співвідношення горизонтальних та вертикальних коливань, які прикладаються одночасно, дає можливість дослідити етапність процесу засипки. Схема алгоритму роботи з використанням вібраційних коливань зображена на рис. 2.

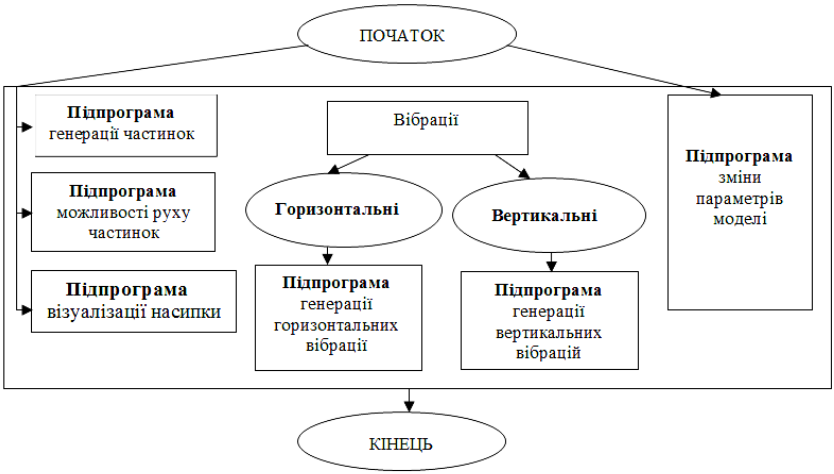


Рис. 2. Схема алгоритму роботи з використанням вібраційних коливань

Таким чином, розроблена комп'ютерно-імітаційна модель дозволяє суттєво зменшити матеріальні та грошові затрати на проведення натурних експериментів. Слід відмітити, що додатковою перевагою розробленої програми є те, що ефекти ущільнення вібраційних коливань можуть бути незалежно ввімкненими або ж вимкненими у будь-який момент роботи програми.

М.П. Пелех, к.т.н., доц.,
О.С. Петрученко, к.т.н., доц.,
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

МЕХАНІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА

В даний час для добування корисних видобувних широко використовується буровий інструмент з породоруйнуючими елементами з твердого сплаву, коли для обробки на металорізальних верстатах часто використовують різці, в яких різальна частина виконана з пластинок із твердого сплаву.

Кожний інструмент має свій термін експлуатації. Однією з основних причин виходу з ладу породоруйнівного інструмента гірничої машини являється спрацювання його твердосплавного оснащення. Поява дрібних тріщин, перпендикулярних до різальної кромки, які впливають на її викришування. Це приводить до надмірного зношування, а у випадку з металорізальними пластинками – до погіршування якості оброблюваної поверхні. Надмірне

лункоутворення на тілі твердого сплаву призводить до ослаблення різальної кромки. Наслідком може стати дифузійний знос в результаті дуже високої температури в ділянці контакту. У випадку поломки одного із зубків, відбувається перерозподіл навантаження на інші твердосплавні елементи, що зменшує термін експлуатації і призводить до швидкого виходу з ладу всього інструмента. Зміцнення термічним окисленням твердосплавних елементів і наступною вібраційною обробкою (ВО) подрібнює карбіди вольфраму, зміцнює кобальтову зв'язку і створює стискаючі залишкові напруження в поверхневих шарах твердого сплаву. В результаті стійкість інструмента підвищується у два рази.

Тверді сплави вольфрамокобальтової (WC) групи володіють високою працездатністю в різних умовах експлуатації, однак їх висока твердість стає причиною розтріскування та викришування. Тому постає проблема підвищення механічних характеристик твердосплавних виробів при одночасному збереженні вже існуючих.

Розроблена методика визначення параметрів режиму технологічного процесу високотемпературного окислення. Визначені константи швидкостей хімічних реакцій окремих складових твердого сплаву і показано, що окислення карбіду вольфраму протікає у 38 разів швидше, ніж окислення кобальту (Co).

Металографічний і електронномікроскопічний аналізи дали можливість виявити структурні зміни в результаті високотемпературного окислення. Магнітометричний і рентгенофазовий аналізи підтвердили результати металографічного і електронномікроскопічного аналізів і виявили додаткові зміни в структурі, такі як подрібнення зерен WC, додаткове розчинення WC і Co один в одному, а також утворення інтерметалідів.

Спосіб високотемпературної окислювальної обробки, на відміну від термічної об'ємної обробки, дозволяє змінювати структуру як на окремих частинах поверхні, так і в об'ємі, шляхом дії окислювального середовища на оброблювану частину поверхні при ізоляції поверхонь, що залишилися за допомогою спеціальних покрить. Регулюючи температуру і час термоокислення можна змінювати мікротвердість. Час і температура мають вплив на величину границі міцності при згині і ударну в'язкість. Границя міцності сплаву ВК8ВК при поперечному згині зростає на 44%, ударна в'язкість в середньому на 76% і мікротвердість в приповерхневих шарах на 43%.

Розроблена математична модель тепломасопереносу при високотемпературному окисленні твердих сплавів і знайдено теоретичні залежності для визначення температур на поверхні і в середині твердого тіла і відносного коефіцієнта термодифузії, які дозволяють прогнозувати розподіл концентрацій кобальтової фази в твердосплавному виробі. Причинами зміни механічних характеристик сплаву WC-Co при високотемпературному окисленні є перерозподіл кобальтової фази як на поверхні в результаті різних швидкостей окислення окремих складових сплаву, так і в об'ємі за рахунок явища термодифузії, а також подрібнення зерен карбіду вольфраму, що визначено металографічним, електронномікроскопічним і рентгеноструктурним аналізом структури і фазового складу сплавів.

Порівняльні промислові випробування дезінтеграторів і металорізального інструмента, які армовані твердосплавними пальцями і пластинками після високотемпературного окислення і шліфування показали, що відносна стійкість пальців в результаті їх зміцнення зросла в 3,87 раза, а проходка бурових доліт, які армовані твердосплавними окисленими зубками підвищилась на 30% у порівнянні із серійними.

К.Р. Перевозник, студ.,
В.К. Фролов, к.т.н., доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НЕОДНОЗНАЧНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СТІЙКОСТІ КОНСОЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ОПРАВОК

Відомо, що під час розточування та шліфування глибоких отворів консольним інструментом виникає часткова або повна втрата його поперечної стійкості, зумовлена власною вагою інструментальної оправки та відцентровими силами інерціями, що на неї діють.

Метою даною роботи є порівняння результатів двох методів розрахунку величини лінійної деформації, яка виникає під впливом ваги та сил інерції інструментальної оправки.

Принциповою різницею між методами розрахунку є те, що у першому методі лінійна деформація розраховується за допомогою загального неоднорідного диференційного рівняння 4-го порядку, а в другому – із застосуванням правила Верещагіна, при якому розподілене навантаження від сил інерції замінюється зосередженою силою інерції.

Розглядається циліндрична оправка з довжиною консольної частини L та діаметром D, виготовлена з легованої сталі (модуль пружності $E = 2{,}1 \cdot 105$ МПа, густина $\rho = 7800$ кг/м^3).

У першому методі розрахунку припускається, що вага оправки q_B є лінійно-розподіленою та однаковою по всій її довжині, а величина відцентрової сили інерції $q_{ін}$, яка діє на оправку, змінюється. Вводиться система координат, початок якої знаходиться в точці консольного закріплення, вісь абсцис x є горизонтальною та напрямлена вздовж оправки, а вісь ординат y співпадає з напрямком деформації (рис. 1). Сила інерції $q_{ін}$ представляється як функція від змінної y, де y – величина лінійної деформації оправки, яка у свою чергу залежить від x.

Можна записати диференційне рівняння вигнутої осі балки 4-го порядку з врахуванням власної ваги оправки та відцентрових сил інерції:

$$EIy^{IV}(x) = q_B + q_{ін}(y(x)),$$

де I – момент інерції поперечного перерізу (для круглого перерізу $I = \pi \cdot D^4/64$).

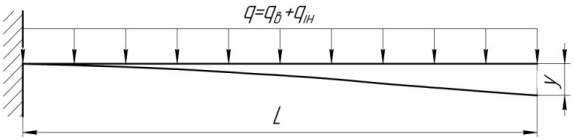


Рис. 1. Схема навантаження оправки лінійно-розподіленими силами q_B та $q_{ін}$

При цьому розподілена вага оправки становить $q_B = \pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot 9/4$, а відцентрові сили інерції – де $\omega = \pi n/30$ – кутова швидкість обертання оправки, n – частота обертання.

З диференційного рівняння можна визначити максимальне значення лінійної деформації оправки y при $x = L$ з врахуванням власної ваги та відцентрових сил інерції оправки.

У другому методі розрахунку для визначення максимальної лінійної деформації y необхідно просумувати деформації від статичного та динамічного навантажень:

$$y = y_B + y_{ін},$$

де y_B – деформація від статичного навантаження – від ваги; $y_{ін}$ – деформація від динамічного навантаження – від сил інерції.

Величина відцентрової сили інерції $y_{ін}$, яка діє на оправку, змінюється по довжині й представляється як функція від змінної x, де x – відстань від точки консольного кріплення:

$$y_{ін}(x) = \frac{q}{2EI}\left(L^2\frac{x^2}{2} - L\frac{x^3}{3} + \frac{x^4}{12}\right).$$

Сили інерції, що діють на елементарні ділянки оправки довжиною dx:

$$dF_{ін} = dm \cdot a = = \frac{\pi D^2}{4} dx \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot y(x).$$

Інтенсивність розподіленого навантаження від сил інерції по довжині оправки можна представити функціональною залежністю:

$$q_{ін} = \frac{dF_{ін}}{dx} = \frac{\pi D^2 \cdot \rho \cdot \omega^2 \left[\frac{q}{2EI}\left(L^2\frac{x^2}{2} - L\frac{x^3}{3} + \frac{x^4}{12}\right)\right]}{4}.$$

Замінимо розподілене навантаження зосередженою силою, що прикладена до центру ваги площі, обмеженою оправкою та кривою з координатою $x = (13/18)L$ (рис. 2):

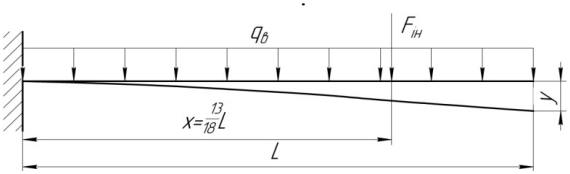


Рис. 2. Схема навантаження оправки лінійно-розподіленою q_B та $F_{ін}$ зосередженою силами

Тоді максимальна величина лінійної деформації, яка зумовлена діями відцентрових сил інерції, розраховуватиметься за формулою:

$$y_{ін} = \frac{6929}{34992EI} F_{ін} \cdot L^3 = \frac{886912L^8 \cdot \rho^2 \cdot n^2 \cdot g \cdot \pi^2}{314928000E^2 \cdot D^4}.$$

На рис. 3 наведено графіки залежності лінійної деформації оправки *y* довжиною $L = 0{,}3$ м під дією власної ваги та відцентрових сил інерції від частоти обертання оправки *n*, отримані за допомогою обох методів розрахунку.

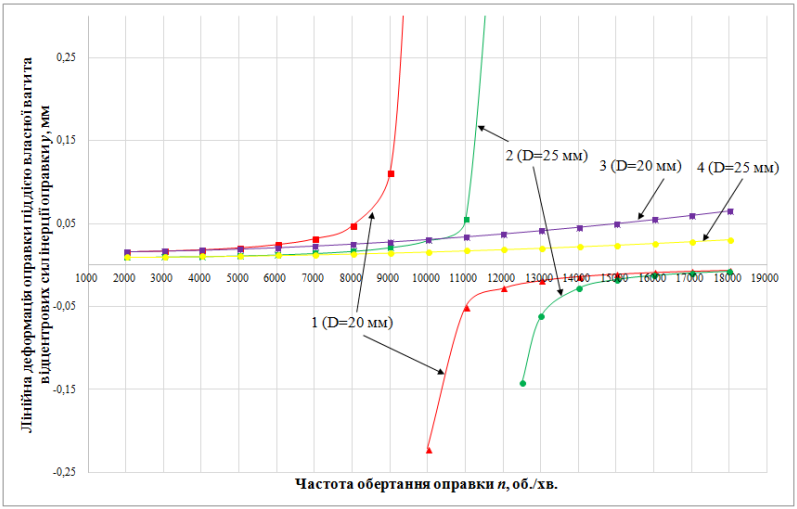


Рис. 3. Графіки залежності лінійної деформації оправки у довжиною L = 0,3 м під дією власної ваги та відцентрових сил інерції від частоти обертання оправки n (1, 2 – графіки, отримані за допомогою першого методу розрахунку; 3, 4 – графіки, отримані за допомогою другого методу розрахунку)

Вочевидь, що при збільшенні частоти обертання оправки величина лінійної деформації також збільшується. Однак, при розрахунку за першим методом, при наближенні частоти обертання до якогось «критичного» значення (тим меншого, чим більше співвідношення *L*/*D*), величина деформації асимптотично прямує до нескінченності; після «критичної» частоти деформація приймає нескінченно від'ємні значення, що є неможливим в реальних умовах. В той же час, при частотах обертання оправки, на 10–15% менших за «критичні», величини лінійних деформацій, отримані за допомогою обох методів розрахунку при одних і тих же геометричних параметрах оправки майже не відрізняються.

Висновки. В роботі розглянуто два методи розрахунку величини лінійної деформації, спричиненої діями ваги та відцентрової сили інерції консольної інструментальної оправки. Виявлено, що результати розрахунків суттєво відрізняються при великих значеннях частоти обертання оправки (для оправки

довжиною L = 0,3 м та діаметром D = 0,02 м розбіжності починаються від частоти обертання, що перебільшує n = 7000 об./хв.). На жаль, через відсутність високошвидкісного обладнання виконані теоретичні дослідження наразі неможливо підтвердити або спростувати експериментально.

Ю.В. Петраков, д.т.н., проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИ УСУНЕННЯ ВІБРАЦІЙ ПРИ ОБРОБЛЕННІ РІЗАННЯМ

Процес різання завжди супроводжується вібраціями, рівень амплітуди яких визначає його ефективність. В основному всі дослідники вважають, що коливання в технологічній обробній системі (ТОС) відбуваються в результаті взаємодії пружної обробної системи з процесом різання, причому кількість публікацій, присвячених цій проблемі стрімко зростає, що ще раз свідчить про особливу її актуальність. Розглядаються різні причини виникнення вібрацій при різанні, однак в основному приймається одномасова модель з одним ступенем свободи, а математичний опис в основному базуються на використанні аналітичних методів розв'язання диференціальних рівнянь системи не вище другого порядку, а визначення умов стійкості ґрунтується на аналізі коренів характеристичного рівняння, що не завжди дає адекватні результати.

Останнім часом стрімко впроваджуються технології активного усунення вібрацій. Всі такі технології, так чи інакше побудовані на використанні принципів автоматичного управління систем зі зворотним зв'язком, коли сигнал від датчика вібрацій використовується для придушення самих вібрацій. Серед них можна виділити застосування пьезо- і магнітострикційних приводів, вібраційних магнітних пристроїв, що встановлюються на шпинделі. Відзначається, що такі технології дозволяють підвищити на 50% граничної глибину різання. У дослідженнях частотної області вібрацій і стійкості при різанні із застосуванням «*lobes-diagram*», незважаючи на широкий експеримент, все ж відсутня математична модель, що дозволяє прогнозувати виникнення вібрацій. Про актуальність проблеми свідчить поява на ринку високих технологій CNC-системи забезпечення безвібраційної обробки. Однак цей метод передбачає проведення складних комплексних досліджень і вимагає значних витрат.

На кафедрі технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського запропонований новий підхід до створення математичних моделей ТОС при різанні, логістика якого пояснюється на рис. 1.

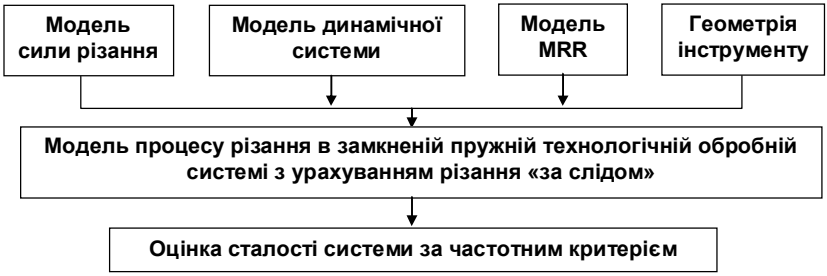


Рис. 1. Структура дослідження

Створені теоретичні засади з розроблення нових критеріїв оцінювання сталості процесів різання, що базуються на нових підходах до математичного опису процесів, які відбуваються в пружній замкненій ТОС. Закладені математичні основи з прогнозування вібраційної сталості при токарному оброблені деталей машин. Продовження таких досліджень має привести до інноваційних результатів зі створення систем і засобів гасіння коливань на верстатах з ЧПУ для різних видів оброблення різанням: точіння, фрезерування, шліфування тощо. Зроблені пошукові дослідження з пасивних (Passive Chatter Control) та активних (Active Chatter Control) технологій гасіння коливань довели перспективність такого управління в плані суттєвого підвищення продуктивності при повному забезпеченні якості оброблення різанням.

Серед пасивних методів гасіння коливань при різанні були розроблені технології проектування динамічних компенсаторів коливань, закладені основи до проектування адаптивних компенсаторів коливань з автоматичним підналаштовуванням власної частоти компенсатора. Окремо розглянута технологія управляння швидкістю різання при фрезеруванні з використанням алгоритму управління Spindle Speed Variation).

Було показано, що визначення оптимальних параметрів пасивних і активних технологій можливо при моделюванні процесів різання, де необхідно враховувати замкнутість пружної технологічної системи, її динамічні характеристики, геометричну і силову взаємодію інструменту і заготовки, обробку за слідом. Попередньо розроблені математичні моделі, що ураховують наведені вище фактори дозволяють застосовувати чисельні методи для отримання характеристик системи як у часі, так і в частотному діапазоні і таким чином прогнозувати сталість. Адекватність таких моделей була доведена експериментально, що свідчить про вірність обраного напряму досліджень.

При пошуку інноваційних рішень активного гасіння коливань при різанні з застосуванням кіберфізичної системи з алгоритмом автоматичного пошуку оптимальних параметрів управляючого сигналу (амплітуди і фази) (Coordinate Descent Algorithm) буде використаний метод управління через привод формоутворюючого руху верстату з ЧПК. Таким чином, спрощується реалізація такої технології. Планується перевірка ефективності та встановлення адекватності при проведенні відповідних експериментальних досліджень.

Р.В. Пичак, студ.,
С.П. Вислоух, к.т.н., доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОГО ХІРУРГІЧНОГО СТЕПЛЕРА ДЛЯ З'ЄДНАННЯ ТКАНИН З ТЕХНОЛОГІЄЮ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ЗВАРЮВАННЯ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ «SOLIDWORKS»

Використання хірургічного степлера для з'єднання тканин з технологією високочастотного зварювання значно підвищує швидкість хірургічного втручання та знижує травматичність тканин і ризик виникнення інфекційно-запального процесу, також післяопераційна реабілітація проходить набагато швидше та легше. Розробка та вдосконалення апаратів і інструментів для високочастотного зварювання є одним з провідних напрямків розвитку в сучасній медичній сфері.

Поставлена задача створення моделі багаторазового, доступного, вітчизняного лінійного хірургічного степлера для зварювання живих тканин в середовищі SolidWorks .

У лінійному хірургічному степлері роль електродів (проводять струм та фіксують тканину) виконують корпус з опорною частиною та штовхач. Вони повинні мати велику теплопровідність та бути міцними. За допомогою панелі керування системи SolidWorks створено ескіз та після цього отримано твердотільну модель корпусу з опорною частиною (рис. 1).

Також за допомогою панелі керування системи проектування зроблено ескіз та отримано твердотільну модель штовхача, що представлена на рис. 2.

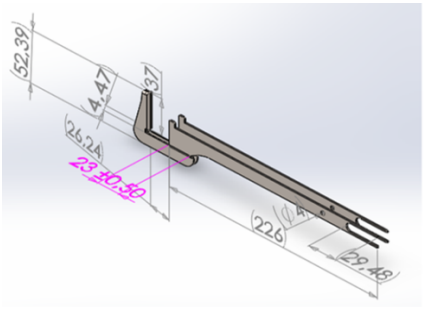


Рис. 1. Твердотільна модель корпусу з опорною частиною

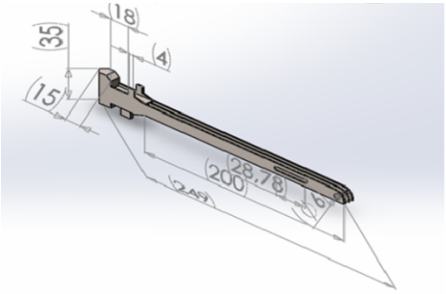


Рис. 2. Твердотільна модель штовхача

Твердотільна модель корпусу з опорною частиною (рис. 1) та твердотільна модель штовхача (рис. 2) представлено в вигляді складальної одиниці (рис. 3).

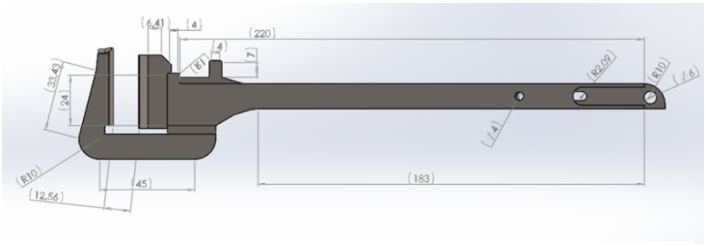


Рис. 3. Корпус з опорною частиною та штовхачем в складі

Отримана складальна одиниця використана для повного складання хірургічного степлера для з'єднання тканин з технологією високочастотного зварювання.

Функцію стиснення двох електродів для зварювання тканин виконує механізм штовхання. Він має бути міцним та зручним для тримання та стиснення за допомогою руки. Засобами системи SolidWorks створено ескіз, після чого змодельовано механізм штовхання (рис. 4).

Для фіксації всіх деталей степлера виконано моделювання корпусу, що складається з 2 кришок верхньої та нижньої. За допомогою панелі керування системи SolidWorks зроблено ескіз та отримано твердотільну модель корпусу (рис. 5). Для фіксації робоча частини степлера (див. рис. 3) до складання додано корпус (див. рис. 5) та отримано повне складання хірургічного степлера для з'єднання тканин з технологією високочастотного зварювання без кабелю живлення (рис. 6).

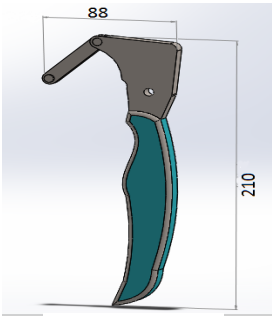


Рис. 4. Механізм штовхання

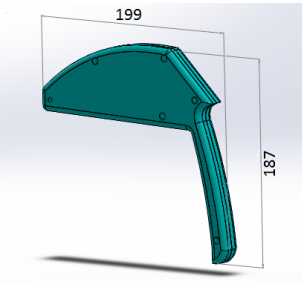


Рис. 5. Твердотільна модель корпусу

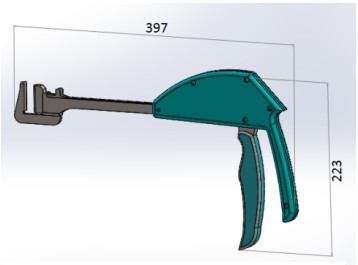


Рис. 6. Хірургічний степлер для з'єднання тканин

Таким чином, згідно з поставленою задачею отримано моделі корпусу з опорною частиною та штовхача лінійного хірургічного стиплера, які виконують функцію електродів. Змодельованио механізм штовхання лінійного хірургічного стиплера для стиснення двох електродів. На основі створених деталей отримано моделі хірургічного степлера для з'єднання тканин з технологією високочастотного зварювання, який є багаторазового використання та доступний для застосування в вітчизняній медичній практиці.

М.В. Пікула,
О.С. Стадник, к.т.н.,
С.В. Морозюк,
Національний університет водного господарства та природокористування

РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ БАГАТОСТАДІЙНОЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ

Основним завданням сучасного машинобудування є створення, освоєння і впровадження у виробництво високоефективних техніки і технології, що забезпечує зростання продуктивності праці, зниження матеріало- та енергоємності, поліпшення якості та експлуатаційних характеристик продукції, підвищення її конкурентоспроможності в умовах ринку.

При виконанні оздоблювальних операцій зростання продуктивності праці з одночасним поліпшенням якості продукції забезпечує обробка вільними абразивами. Широкі технологічні можливості методів вібраційної обробки деталей різної конфігурації, з різних матеріалів, високі техніко-економічні показники, можливості механізації і автоматизації дозволяють їм займати важливе місце при виконанні оздоблювальних операцій.

При вирішенні складних технологічних завдань в області оздоблювальної обробки, коли необхідно отримати високу якість оброблюваної поверхні деталі при грубій вихідній шорсткості застосовується багатостадійна обробка деталей вільними абразивами. Це дозволяє істотно скоротити час обробки деталей, тобто підвищити її продуктивність, забезпечує необхідну якість деталей, дозволяє поліпшити їх експлуатаційні характеристики. Для багатьох випадків багатостадійна обробка вільними абразивами є єдиною можливістю отримання заданої шорсткості поверхні.

Однак проектування багатостадійних технологічних процесів обробки деталей вільними абразивами ускладнене відсутністю як теоретичних моделей такої обробки, так і відповідного устаткування. Тому розробка устаткування для реалізації процеса багатостадійної обробки, наразі є актуальною задачею.

Авторами запропоноване технічне рішення, яке дозволить виконати процес багатостадійної обробки вільним абразивом у багатокамерній установці. На станині установок встановлений на пружних опорах робочий контейнер з вібратором, причому робочий контейнер розділений вертикальними перегородками на секції, оснащені транспортувальними вібролотками-сепараторами та перевантажувальними вібролотками, орієнтованими вздовж осі робочого контейнера. Транспортувальні вібролотки-сепаратори оснащені приводами з програмним управлінням. Виконання робочого контейнера багатосекційним з механізмами перевантаження до кожної наступної секції забезпечує безперервне проведення складного технологічного процесу з використанням трьох і більше робочих середовищ в одному пристрої.

Пристрій працює наступним чином. Кожна секція робочого контейнера завантажується робочим середовищем з різними характеристиками – абразиви, стальні кульки, органічні речовини тощо. Деталі завантажують у першу секцію, після чого протягом певного часу виконується вібраційна обробка деталей. Після закінчення обробки за допомогою програмно-керованого приводу транспортувальний вібролоток-сепаратор першої секції встановлюється в горизонтальне положення і по ньому починають переміщатися деталі разом з робочим середовищем. Інгредієнти робочого середовища відділяються через перфоровану поверхню транспортувального вібролотка-сепаратора і повертаються у відповідну секцію робочого контейнера. А деталі перевантажуються з вібролотка-сепаратора через перевантажувальний вібролоток у наступну секцію робочого контейнера. Після вивантаження деталей з першої секції транспортувальний вібролоток-сепаратор керованим програмним приводом повертається у вертикальне положення. Послідовність дій повторюється у кожній секції робочого контейнера крім останньої. Після вивантаження деталей з першої секції робочого контейнера до неї можна завантажити нову партію деталей. А з останньої секції робочого контейнера деталі, які пройшли увесь цикл обробки, розвантажуються транспортувальним вібролотком-сепаратором у тару.

При дослідженнях запропонованої установки для вібраційної обробки деталей вільним абразивом організовано технологічний процес вібраційної обробки деталей у трьох робочих середовищах – абразив природній «Байкаліт», абразив формований ПТС-8 та бій абразивних кругів. Це дозволило скоротити тривалість технологічного процесу у порівнянні з почерговою обробкою аналогічних зразків в однокамерній установці і підвищити якість обробки. Запропоновані технічні рішення захищені патентом України на корисну модель.

Н.С. Равська, д.т.н., проф.,[1]
О.О. Клочко, д.т.н., проф.,[2]
Л.І. Ковальова, к.т.н., доц.,[1]
О.А. Івановський, к.т.н.[1],
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»[1],
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»[2]

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ТЕОРІЇ РІЗАННЯ В АЛГОРИТМАХ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ

Процесс різання відноситься до технічних систем, які визначаються великою множиною багатьох факторів, мають складну структуру, супровождуються різними явищами. До основних явищ ,які супроводжують процес різання є пластичні деформації, тертя, вібрації, теплові та хімічні явища та інші.

Для дослідження складних систем та оптимізації їх параметрів використовують детерміновані методи засновані на теорії вірогідності та методи еврестичної самоорганізацію. Перших два методи відносяться до так званому детермінистичному напрямку. Вони засновані на аналізі причинно-наслідкових зв'язків і забезпечують визначення моделей зв'язаних на основі експеременальних даних. Ці методи являють собою емпірічні залежності між вхідними факторами та вихідними парметрами. Сучасна теорія різання, та її рекомендації, щодо прогнузування, та управління процессом різання базуються саме на дослідженнях цих моделей. Вони не розкривають, сутті явищ супроводжуючих процесс різання.

Разом з тим, знання механізму явищ виникаючих в процессі різання дозволяє більш ефективно керувати ними. Це може бути виражено на основі методів теорії еврестичної самоорганізації, а саме, методів групового вирахування аргументів (МГВА) та методу штучних нейронних мереж (МШНМ).

Теорія самоорганізації заснована на принципах самоорганізації та неостаточних рішень (масової селекції).

Принцип самоорганізації встановлює інсування мінімума ряда критеріїв володіючих властивостями зовнішнього доповнення при постійному удосконаленні математчної моделі.

Принцип массової селекції визначає поступове ускладнення моделі в процессі пошуку мінімума крітерія селекції.

МШНМ та МГВА засновані на спільної теорії еврестічної самоорганізації та її принципах, та відрізняється за способами визначення. Як правило, штучні нейронні мережі дозволяють вирішувати задачі класіфікації/кластеризації/ категорізації, апроксимацій, функцій (імітації процеса), одиничного прогнозу, оптимизації та управління. Нейронні мережі завдяки своїй структурі дозволяють вирішувати задачі неформалізовані або важко формалізовані простіше ніж стандартні методи. Проте їх використання для вирішення задач механічної обробки – потрібні великі навчальні вибірки для створення алгоритмів радіально базісних функцій.

Разом з тим нейронні мережі дозволяють замінити складні аналітичні та емпіричні залежності за якими можливо керувати процесом різання, вони не спроможні моделювати процес з метою прогнозування явищ, що його супроводжує. Для вирішення подібних задач застосовують алгоритми МГВА.

Алгоритм МГВА призначений для побудови моделей за експерементальними даними. Особливості роботи цих алгоритмів розглянуті в загальному вигляді в багатьох роботах науковців та аспірантів механіко-машинобудівного інституту НТУУ «КПІ»[5]. В першій роботі при моделюванні роботи різального інструмента в алгоритмах МГВА було запропоновано

[5] Родин П.Р., Равская Н.С., Касьянов А.И. Монолитные твердосплавные концевые фрезы. – К. : Выща школа. 1985. – 64 с.; Равсвкая Н.С., Ковалева Л.И. Применение методов самоорганизации для идентификации процессов и объектов./ INGINERIE MECANICA -2002

використовувати розширення простору вхідних даних за рахунок додавання до основного вектору $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ від його перетворення x. Це дало можливість одержувати більш компактні моделі.

Незважаючи на те, що алгоритм МГВА працює на невеликих вибірках (5–6 експерементів на один аргумент) їх проведення потребує значних витрат. Для їх зменшення запропонованно для побудови моделі використання залежностей та рекомендацій теорії різання в алгоритмах при реалізації нейронних мереж. В цьому випадку при зміні аргументів вихідні параметри розраховується за залежностями наведеними в теорії різання. Нами були проведенні порівняння моделей одержаних раніше на базі експерементальних даних з моделями одержаними при тих же значеннях аргументів, вихідні параметри яких розраховуються за залежностями з теорії різання.

Аналіз такого порівняння показав, що структура моделей одержана на експерементальних даних в порівнянні з моделями де параметр розраховується за теоретичними залежностями розраховується майже співпадає. Кількісні значення параметрів між моделями різних процесів різання різняться в межах 30–50%. Такий результат пояснюється як порівняння моделей різних процесів так і різницею умов проведення експерементів.

Результати цього аналізу дають можливість використовувати моделі на основі розрахункових даних одержаних за рекомендацією теорії різання в якості активаціонних функций штучних нейронов в нейронних мережах. Таким чином використання залежностей та рекомендацій теорії різання для побудови моделей з використанням МГВА прі реалізації нейронних мереж забезпечує їх ефективне керування процесом різання при малих вибірках значно знижує витрати та підвищує ефективність використання ресурсів. Для такого підходу управління процесів різання потрібні подальші дослідження.

В.Д. Рудь, д.т.н., проф.,
І.В. Савюк, асп.,
Луцький національний технічний університет

ДО МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Серед наявних різноманітних способів обробки металів порошкова металургія займає своє особливе місце, тому що дозволяє не тільки робити вироби різних форм і призначень, але і створювати принципово нові матеріали, одержати які іншими шляхом украй важко або взагалі неможливо.

У разі потреби порошкові вироби піддають ще додатковій обробці. Різання (точіння) застосовують тоді, коли пресуванням не можна виготовити вироби потрібної форми та розмірів. У процесі різання користуються інструментами, виготовленими згідно діючих стандартів. Однією з основних передумов

підвищення якості і точності обробки конструкційних порошкових матеріалів є оптимізація процесів механічної обробки у тому числі і зменшення сил різання. Відомо, що силові параметри процесу різання залежать не тільки від режимів різання, але і від геометрії ріжучого інструменту.

Силу різання Р, прийнято розділяти на складові сили, направлені по осях координат верстату, (тангенціальну P_z, радіальну P_y та осьову P_x).

Науковцями Луцького НТУ запропоновано вдосконалений токарний динамометр з використанням тензорезисторів, який здатний фіксувати зусилля прикладені до різця в трьох напрямках одночасно та передавати до комп'ютера через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) дані вимірів в режимі реального часу. Особливість запропонованої конструкції полягає в тому, що динамометр чутливий до мінімального коливання силових параметрів.

Для фіксації показів тензодатчиків використовувалась спеціально розроблена програма dunamo.

Принцип роботи динамометра. Динамометр встановлюється на верстат замість різцетримача. Різець закріплюється на балку, яка в свою чергу через кульки передає зусилля на пластинки з датчиками. З метою зменшення тертя між балкою та корпусом, балка з верху і знизу з'єднана з корпусом через кульки, які відігравають роль шарнирів. При роботі тиск який створюється на пластинках, тензодатчики передають через АЦП на комп'ютер. Оскільки при точінні відбуваються динамічні навантаження, то з метою встановлення середнього значення сили по кожній з осей, програма фіксує значення сили з інтервалом 1 секунда та висвітлює на моніторі або записує у пам'ять комп'ютера середнє значення сили за визначений проміжок часу. На вертикальні опори, що сприймають навантаження, які діють уздовж осей Y і X (для вимірювання сил P_y і P_x при точінні) – наклеєні по два тензометричні датчики. У процесі деформації опор під дією відповідних навантажень, внаслідок зміни опору датчиків, відбувається розбалансування мосту. Різниця потенціалів підсилюється у модулі LTR-212 та перетворюється у цифровий вигляд за допомогою АЦП.

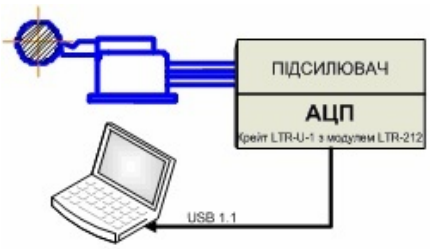


Рис. 1. Принципова схема вимірювання сил різання

Вимірювальний комплекс для заміру сил різання при точінні (рис. 1), який включає динамометр з тензодатчиками, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) та ЕОМ, що реєструє дані. За допомогою комплексу можна одночасно незалежно вимірювати сили P_z, P_y, P_x. Миттєве значення сил різання реєструється ЕОМ та представляється на екрані у вигляді графіків (рис. 2).

За допомогою запропонованої конструкції динамометра проведені досліди на зразках, які були виготовлені методом ізостатичного формування, із порошків заліза марки ПЖР-3.315 ГОСТ 9849- 86 [2].

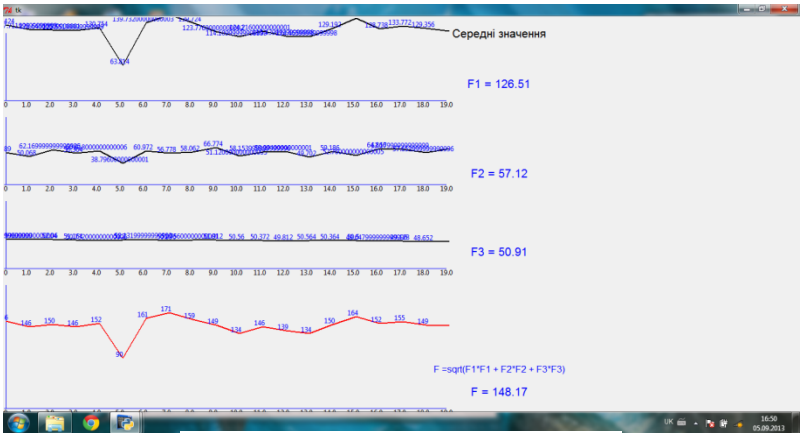


Рис. 2. Приклад реєстрації сил різання

Дослідивши працездатність тензометричного динамометра і порівнявши отримані результати з іншими методами вимірювання сил різання прийшли до висновку: даний динамометр придатний для використання з метою експериментальних досліджень сил різання при точінні. Експериментально підтверджено малу інерційність реєстрації та високу точність показів.

С.В. Рябченко, к.т.н.,
Я.Л. Сильченко,
В.Т. Федоренко,
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины

ШЛИФОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЧАШЕЧНЫМИ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

Способ доводочного шлифования цилиндрических поверхностей до высоких классов чистоты кругами из синтетических алмазов известен сравнительно давно. Он заключается в том, что чашечный алмазный круг с помощью пружины поджимают к обрабатываемой детали с постоянным усилием и устанавливают так, что оси вращения круга и детали взаимно перекрещиваются под прямым углом (рис. 1). Это позволяет получить высокий класс чистоты обработанной поверхности.

Актуальность данной работы состоит в том, что до настоящего времени существует проблема финишной обработки валков большого диаметра (диаметром 400 мм и длиной 2000 мм) из нержавеющей стали, используемых в технологических процессах получения тонких органических пленок. Эта задача

стимулировала нас переосмыслить и попытаться развить представления об этом процессе, взглянув на контактирующую пару заготовка – инструмент, как на динамическую систему.

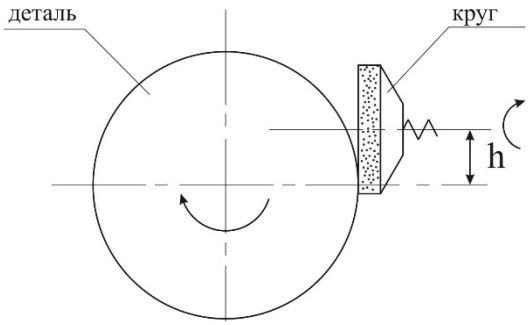


Рис. 1. Метод шлифования цилиндрической поверхности чашечным кругом (h – расстояние между осями)

Из-за сложности процессов, происходящих в данном случае шлифования, мы не ставили перед собой задачу сформулировать условия получения наперед заданного класса шероховатости, а лишь дать объяснение эффективности данного способа обработки.

Шероховатость обработанной поверхности при шлифовании в общем случае зависит от многих факторов. В частности, от величины продольной подачи, скорости вращения круга, формы и характеристики рабочего слоя, физических и химических свойств обрабатываемого материала, жесткости системы СПИД, температурного режима, степени пластической деформации срезаемого и поверхностного слоев материала. В данной работе мы не рассматриваем глубоко процесс финишного шлифования, с учетом вышеперечисленных факторов, а только ограничиваясь фактическим материалом, полученным из практики.

Он заключается в том, что при обработке барабанов диаметром 400 мм из нержавеющей стали, наименьшая шероховатость (*Ra* 0,025) получается при скорости шлифования порядка $V_{кр}$ = 13–15 м/с, продольной подаче круга порядка S_n = 0,2–0,3 мм⁄об, скорости вращения обрабатываемого барабана порядка $V_{вр}$ = 12 об/мин, при использовании специальной органической связки и алмазов АСМ, зернистостью 40/28 и использовании СОТС. Это, с одной стороны, ведет к сужению рамок исследований, определенной потере универсальности и общности выводов, их привязке к конкретному технологическому процессу.

Такой подход не дает возможности, в принципе, сформулировать условия для получения наперед заданной шероховатости поверхности. Однако, с другой стороны, он вполне дает возможность, исследуя процесс, установить, объяснить, и теоретически обосновать наиболее благоприятное относительное расположение осей вращения обрабатываемой цилиндрической поверхности и

чашечного шлифующего круга с точки зрения получения наименьшей шероховатости поверхности. При этом предоставляется возможность отказаться от рассмотрения факторов, установление влияния которых сопряжено с определенными методологическими трудностями.

В результате проведенной работы получило дальнейшее развитие теория доводочного шлифования цилиндрических поверхностей алмазными кругами. Уточнено условие обеспечения оптимального контакта алмазного чашечного круга и обрабатываемого вала. Это условие позволяет обеспечить получение минимальной шероховатости цилиндрической поверхности валков.

А.О. Скоркін, к.т.н., доц.[1],
О.П. Старченко, асп.[2],
Українська інженерно-педагогічна академія[1],
Харківський радіотехнічний коледж[2]

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ОБРОБЦІ СКЛАДНИХ ФАСОННИХ ПОВЕРХОНЬ НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНОГО УЗГОДЖЕННЯ ФОРМОТВОРНИХ РУХІВ

Кінематичні схеми обробки поверхні, конструкції різального інструменту, вихідні інструментальні поверхні безпосередньо впливають на стійкість матеріалу різального інструменту, а, отже, і на продуктивність обробки.

Так, наприклад, при обробці сталі 20Х13 твердосплавним інструментом, перехід від кінематичних схем з безперервним процесом різання (точіння різцем) до переривчастого процесу обробки (точіння фрезою) зменшує сумарний шлях інструменту до 50 разів.

Це свідчить про те, що на зношування інструмента дуже великий вплив виявляють його тип, геометрія й конструкція, спосіб врізання в заготовку, тип устаткування і т.п. Як відомо, фрези, що працюють в умовах переривчастого різання, у момент торкання із заготовкою одержують удар. При торцевому фрезеруванні із прямими зрізами чавуну, а також вуглецевих і малолегованих сталей, стійкість фрез виявляється більшою, коли врізання здійснюється з мінімальною товщиною зрізу.

Оброблена поверхня деталі, кінематична схема формоутворення, однозначно функціонально взаємопов'язані між собою.

Елементами поверхні деталі, щодо яких відбувається орієнтація формотворчих рухів інструменту, можуть бути: лінії, розташовані на даній поверхні; лінії, утворені перетином поверхні і січними площинами і т.д. Існують різні підходи при розробці нових методів обробки, наприклад, для складних фасонних поверхонь основне завдання моделювання зводиться до встановлення траєкторії руху інструменту.

Знос ріжучого інструменту є одним з основних чинників, що перешкоджають підвищенню режимів різання і обмежують продуктивність лезвійной обробки. Прогнозування розмірного зносу ріжучого інструменту є необхідною умовою забезпечення необхідної якості деталі і підвищення продуктивності процесів.

На зносостійкість впливають багато параметрів процесу різання: швидкість різання, подача інструменту (заготовки), геометрія, матеріал ріжучої частини інструменту, матеріал оброблюваної заготовки, температурний режим обробки і ін.

При аналізі характеру зношування інструменту при фрезеруванні на основі нелінійного узгодження формотворних рухів, можна зробити висновок, що знос зуба інструмента по периметру, в зв'язку з постійним зміщенням ріжучої крайки щодо поверхні різання, буде приблизно однаковий. За характеристику зносостійкості дискового інструменту можна прийняти знос по задній поверхні. При кожному оберті інструменту, ріжуча крайка переміщується в межах відрізка, укладеного між кутом активного контакту $v = v_1 + v_2$. В межах цього кута і відбувається знос ріжучої крайки. На решті ж частини кута повороту ділянки робочих поверхонь контактують з охолоджуючим середовищем і, природно, не зношуються. У нашому випадку, величина зносу, накопичена ріжучої крайкою за час T, буде визначатися за формулою:

$$h_{\text{и}} = L_P \times n_{\text{з}} \times S_z \times h_{\text{З.В}} \times T \qquad (1)$$

де $h_{\text{З}}$ – знос інструменту, мм; L_P – довжина шляху різання точки ріжучої крайки за один оберт фрези, мм; $n_{\text{з}}$ – частота руху подачі, хв$^{-1}$; S_z – подача на зуб, мм/зуб; $h_{\text{З.В}}$ – поверхневе відносне зношування, мкм/10^5 мм^2; T – час роботи інструменту, хв.

Визначається шлях різання L_P, пройдений точкою різальної крайки фрези за час, який відповідає одному оберту інструмента.

За один поворот точка ріжучої крайки стикається зі зрізаними шаром протягом часу τ, що визначається за формулою:

$$\tau = \frac{r \cdot \varphi_{\max}^{i}}{100 \cdot V_{BK}}, \qquad (2)$$

де r – радіус профілю інструмента, мм; $\varphi_{\max}^{i}$ – максимальний кут контакту інструменту із заготівлею; V_{BK} –швидкість відносного руху, м/хв.

Час одного оберту інструменту визначається за формулою:

$$\tau_{И} = \frac{\pi \cdot D_{Ф}}{100 \cdot V_{p}}, \qquad (3)$$

де $D_{\text{Ф}}$ – діаметр інструмента, мм; V_P – швидкість різання, м/хв.

Швидкість відносного руху виражається наступним чином:

$$V_{BK} = \frac{V_p \cdot r \cdot \varphi}{180 \cdot D_{Ф}} \cdot \qquad (4)$$

Таким чином,

$$\tau = \frac{9 \times \varphi^{i}_{\max} \times D_{\text{ф}}}{50 \times V_p \times \varphi}. \quad (5)$$

Шлях, пройдений точкою ріжучої крайки за один оберт інструменту протягом часу τ, визначається за формулою:

$$L_p = \tau \times V_e = \frac{9 \times \varphi^{i}_{\max} \times D_{\text{ф}}}{50 \times V_p \times \varphi} \times V_e, \quad (6)$$

де *Ve* – дійсна швидкість різання, м/хв.

Висновок: Запропонована методика розрахунку зносу інструменту в процесах лезвійної обробки зі складною кінематикою дозволяє прогнозувати і визначати знос ріжучих лез, і на цій основі визначати період розмірної стійкості всього інструменту.

О.А. Соколова, студ.,
С.П. Вислоух, к.т.н., доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРІОДУ СТІЙКОСТІ ТВЕРДОСПЛАВНИХ РІЗЦІВ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Титанові сплави є важливими конструкційними матеріалами, які відзначаються великою міцністю, корозійною стійкістю і невеликою питомою вагою. Це визначає їх використання для виготовлення відповідальних деталей в приладо- та машинобудуванні. В даний час встановлено, що низька оброблюваність титанових сплавів пояснюється високою міцністю, низькою теплопровідністю, підвищеним нахилом до наклепу та великим питомим тиском, що пов’язаний з малою площею контакту стружки з різальним інструментом.

Тому важливою задачею технологічної підготовки виробництва є дослідження процесу обробки титанових сплавів з точки зору визначення їх оброблюваності. Розв’язати дану задачу можливо шляхом виконання експериментальних досліджень з метою прогнозування вихідних параметрів процесу різання, що дозволять визначити оптимальні режими обробки. Основним параметром, що визначає оброблюваність титанового сплаву відповідним різальним інструментом є період стійкості різального інструменту.

Перспективним методом обробки результатів експериментальних досліджень є метод евристичної самоорганізації моделей, що запропонований академіком А.Г. Івахненком. Для розв’язання математичних задач метод самоорганізації реалізовано як метод групового врахування аргументів (МГВА). Даний метод має певні недоліки, тому інтерес представляє

застосування інших сучасних методів моделювання. Для моделювання періоду стійкості титанових сплавів в даній роботі запропоновано використовувати штучні нейронні мережі. Нейронна мережа дозволяє розв'язувати складні задачі на апроксимацію або екстраполяцію. Похибка розрахунків залежить від кількості даних, на яких ця мережа навчається, тобто точність можна підвищити за рахунок збільшення кількості даних та прихованих шарів навчання.

Для прогнозування періоду стійкості різального інструменту в даній роботі застосовано інструменти програми MatLab, а саме: модуль NeuralNetwork Toolbox. Вбудовані штучні нейронні мережі пакету MatLab дозволили навчити та використати вже існуючу нейронну мережу.

В даних дослідженнях використана багатошарова мережа передачі вперед із сигмоподібними нейронами та лінійними вихідними нейронами. Мережа навчалася за алгоритмом зворотного розповсюдження Левенберга-Марквардта. Тренування проходило на 70% даних, перевірка – на 15% та тестування також на 15%. Кількість прихованих шарів – 50. Нейронна мережа навчалася на 27 вимірах, в які входить швидкість різання, подача, глибина різання та стійкість різців, що оснащені твердосплавними пластинками ВК4 при обробці заготовок зі сплаву ВТ6.

При проведенні досліджень швидкість різання V варіювалась в межах від 18 до 200 м/хв., подача S від 1 до 4 мм/хв., а глибина різання t – від 0,08 до 0,4 мм. При цьому період стійкості інструменту T був в межах від 1,8 хв. до 27,1 хв.

Результати прогнозування періоду стійкості різального інструменту при різних режимах різання за допомогою навченої штучної нейронної мережі наведено в табл/ 1.

Таблиця 1 – Результати прогнозування періоду стійкості різального інструменту

V, м/хв	*t*, мм	*S*, мм/хв.	*T*, хв.
18	0,2	2	16,30
160			20,24
140		1	5,62
160			3,00

За отриманими результатами дослідження періоду стійкості різального інструменту із твердого сплаву ВК4 при токарній обробці титанового сплаву ВТ6 можна зробити висновок, що використання штучних нейронних є ефективним засобом моделювання технологічних параметрів.

М.С. Степанов, д.т.н., проф.[1],
Л.П. Іванова, асп.[1],
П.І. Літовченко, доц.[2],
Навчально-науковий інститут «Механічна інженерія і транспорт»
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»[1]
Національної академії Національної гвардії України[2]

ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ ШЛІФУВАННЯ З ДОДАТКОВИМИ ПРОМІЖНИМИ ПРАВКАМИ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА

Найбільш актуальною проблемою при обробці заготовок шліфуванням є підтримання максимальної ріжучої здатності інструмента протягом максимального періоду часу шляхом застосування ефективних методів правки шліфувальних кругів. Витрата шліфувальних кругів на правку складає 90–95% від загальної їх витрати, а витрати коштів на правку досягають 40–70% від собівартості всієї шліфувальної операції.

У роботі ставилась мета створення технологічних засобів зниження інтенсивності тепловиділення у зоні різання при шліфуванні шляхом удосконалення технології правки шліфувального круга.

Аналіз літератури показав, що найбільш поширеною є схема правки А, відповідно до якої обробку здійснюють практично до повної втрати ріжучої здатності шліфувального круга, при цьому сила різання P_z, ефективна потужність $N_{\text{еф}}$ та кількість теплоти Q зростають до критичного значення. Критичне значення потужності $N_{\text{еф кр}}$ в момент часу $t_{\text{кр}}$ визначається за формулою

$$N_{еф\,кр} = P_{z\,кр} \cdot V_к, \tag{1}$$

де $V_{\text{к}}$ – швидкість шліфувального круга; $P_{z\,\text{кр}}$ – критичне значення тангенціальної складової сили різання.

Відповідно до схеми А, кількість теплоті, що еквівалентна роботі різання за період часу $t_{\text{кр}}$ визначиться за залежністю

$$Q_A = \int_0^{t_{кр}} N_{еф}(t) \cdot dt = V_к \int_0^{t_{кр}} P_z(t) \cdot dt \tag{2}$$

Після настання моменту $t_{\text{кр}}$ виконують правку круга, відновлюючи його вихідну ріжучу здатність.

Якщо продуктивність шліфування та витрати абразивного матеріалу не є абсолютно лімітуючими факторами, то вважаться раціональним застосовувати схему В з проміжними правками для збереження ріжучої здатності круга на певному заданому рівні [3]. За рахунок правки значення параметрів процесу шліфування P_z, $N_{\text{еф}}$ та Q періодично відновлюються і набувають початкових значень.

Схема В обробки визначається, як схема з додатковими проміжними

правками (ДПП). Для кожної з точок B_i (i = 1,2,3,…,n), в яких переривається процес шліфування для додаткових правок, виконується співвідношення:

$$N_{Beфi} = P_{zBi} \cdot V_к, \tag{3}$$

де n – кількість циклів обробки за схемою В, після кожного з яких виконується проміжна правка, $N_{Beфi}$,P_{zBi} – значення ефективної потужності для i-тої точки.

Для відновлення ріжучої здатності шліфувального круга через інтервали часу 0–t_1, t_2 –t_3, t_4 –t_{n-1}, t_n –t_{n+1} виконується додаткова правка.

Потужність, що витрачається на правку круга, розраховується за залежністю

$$N_{пр} = P_{z\,пр} \cdot V_к + P_{пер} V_{пр}, \tag{4}$$

де $P_{z\,пр}$ – тангенціальна складова сили різання при правці; $P_{пер}$ – сила опору переміщенню елементів технологічної системи при правці; $V_{пр}$ – швидкість переміщення інструмента, що править круг.

За рахунок відновлення ріжучої здатності круга в результаті правки складова сили різання при шліфування зменшується на величину $\Delta P_{z\,пр}$

$$\Delta P_z = P_{z\,кр}(A) - P_{z\,кр}(B), \tag{5}$$

Теплота, еквівалентна роботі різання при обробці за схемою В, визначиться на кожній ділянці циклу обробки залежністю:

$$Q_{Bi} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} N_{Beфi}\,(t) \cdot dt = V_к \int_{t_{i-1}}^{t_i} P_{zB\,i}\,(t) \cdot dt, \tag{6}$$

Теплота, еквівалентна роботі правки круга при обробці за схемою В, визначиться на кожній ділянці циклу обробки залежністю:

$$Q_{прBi} = \int_{t_{i-1}}^{t_i} N_{ефпр}\,(t) \cdot dt = \int_{t_{i-1}}^{t_i} (P_{z\,пр}\,(t) V_к + P_{пер}(t) \cdot V_{пр}) \cdot dt \tag{7}$$

Повна теплота, еквівалентна роботі різання за повний цикл обробки за схемою В:

$$Q_{B\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} (Q_{Bi} + Q_{прBi}) =$$

$$\sum_{i=1}^{n} \left(V_к \int_{t_{i-1}}^{t_i} P_{zB\,i}\,(t) \cdot dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} (P_{z\,пр}\,(t) V_к + P_{пер}(t) \cdot V_{пр}) \cdot dt \right) \tag{8}$$

Застосування схеми В є доцільним при виконанні умови

$$Q_A > Q_B, \tag{9}$$

тобто умовою застосування ДПП є обов'язкове зниження теплоти, що виділяється при різанні.

За результатами дослідження запропоновано використовувати схему шліфування з додатковими проміжними правками (ДПП). Побудовано математичну модель теплових процесів при круглому шліфуванні з ДПП та визначено залежності для розрахунку основних параметрів, що характеризують теплові процеси під час правки шліфувального круга, в тому числі, критичної сили різання при шліфуванні до повної втрати шліфувальним кругом різальної

здатності. Крім того, запропоновані залежності для визначення часу шліфування між суміжними проміжними правками та кількості правок при обробці з ДПП; теплоти, що еквівалентна роботі, яка витрачається на різання до повної втрати кругом ріжучої здатності; теплоти, що еквівалентна роботі, яка витрачається на різання між двома суміжними додатковими правками при обробці з ДПП. Математична модель шліфування з ДПП реалізовано у вигляді алгоритму і окремого функціонального модуля програми Heat розрахунку теплових параметрів при круглому шліфуванні. Отримано результати розрахунково-аналітичних досліджень шліфування за схемою правки після повної втрати ріжучої здатності круга та шліфування з ДПП. На основі вказаних досліджень встановлено, що застосування ДПП дозволяє зменшити кількість теплоти, що виділяються при круглому шліфуванні на 25–75% в залежності від кількості правок за час обробки деталі.

В.Б. Струтинський, д.т.н., проф.,
О.Я. Юрчишин, к.т.н., доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МАТЕМАТИЧННЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ З ВРАХУВАННЯМ СКЛАДНИХ ДОРОЖНІХ УМОВ

Наземні роботизовані комплекси (НРК) мають незначну масу та габарити. НРК працюють без участі людини в складних і невизначених дорожніх умовах. Дія дорожніх умов впливає на працездатність та функціональні можливості комплексу. Тому дослідження динамічних процесів у рухомих НРК є актуальним.

В останніх дослідженнях і публікаціях значну увагу приділено питанням динамічних переміщень в мобільних роботах. Досліджені процеси в шасі та динамічні процеси в маніпуляторах. Однак в літературних джерелах відсутні дослідження впливу складних дорожніх умов на динамічні переміщення основних вузлів НРК. Тому метою досліджень поставлено узагальнення видів складних дорожніх умов, їх математичний опис та встановлення статистичних характеристик динамічних переміщень НРК. Основним методом дослідження впливу дорожніх умов на роботизований комплекс прийнято математичне моделювання.

Здійснено аналіз дорожніх умов для побудови математичних моделей. Виділені типові дороги різного виду, пересічена поверхня, бездоріжжя, міська забудова та робота комплексу в середині приміщень. Дорожні умови розділені на дві групи. До першої віднесені квазістаціонарні умови, при яких дорожнє покриття має плавно змінні в часі характеристики. До другої групи віднесені

умови бездоріжжя із різко змінними нестаціонарними змінами параметрів. Зокрема, це долання перешкод у вигляді виступів, траншей, сходинок, тощо. Виділено характерні перешкоди одиничного виду та перешкоди у вигляді сходинок (рис. 1).

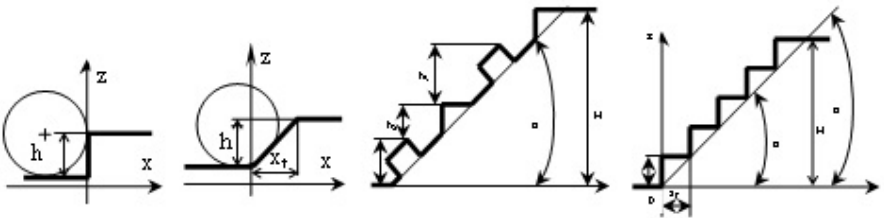


Рис. 1. Характерні види ступінчастих нерівностей по яким рухається комплекс

Математичний опис ізольованих нерівностей описано сумою одиничних ступінчастих функцій:

$$z(x)=\sum_{i=1}^{N} z_{mi}\,1(x-x_i).$$

Для раціоналізації процесу математичного моделювання запропоновані математичні моделі профілів у вигляді рядів складених із кусково-постійних ортогональних функцій Уолша:

$$x^*(t)=k=1\sum^{N} a_k^* cal\left(k,\frac{t}{T}\right)+b_k^* sal\left(k,\frac{t}{T}\right).$$

Опис профіля колії ортогональними функціями Уолша оптимізує процедуру обчислень при забезпеченні необхідної точності розрахунків.

Проведено моделювання другої групи дорожніх умов характерних для бездоріжжя. Побудовані математичні моделі ізольованих та періодичних нелінійних профілів колії. Ізольовані гладкі виступи описані косинусоїдою та кривою Гауса:

$$z(x)=\pm\left[1-\cos\left(2\pi\frac{x}{x_T}\right)\right]h_m\ ,\qquad z(x)=\pm h_m e^{\frac{-(x-x_T)^2}{2\sigma_x^2}}\ .$$

де h_m – амплітуда нерівності; x_T, σ_T – характерні розміри ізольованої нерівності.

Опис нелінійних періодичних та квазіперіодичних ізольованих нерівностей також здійснено полігармонічними функціями. Для цього використані ряди Фур'є. При описі ступінчастого профіля колії рядом Фур'є враховано явище Гібса, що полягає у штучному введенні високочастотних осциляцій процесу. При цьому некоректно постановлена задача стосовно нескінченного ряду Фур'є регуляризується. Математичний опис однієї колії узагальнено на математичний опис двох взаємопов'язаних колій. Розглянуті особливості взаємодії двох паралельних колій дороги по яким рухається роботизований комплекс (рис. 2).

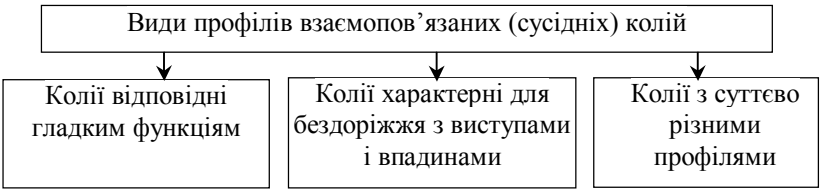


Рис. 2. Елементи класифікації пар колій по яким рухається НРК

Розглянуті особливі випадки поєднання профілів взаємопов'язаних сусідніх колій. Зокрема, коли одна із колій є прямолінійною. Досліджено поєднання колії, які забезпечують резонансні коливання комплексу у поздовжньому та поперечному напрямках. Проведено взаємний кореляційний аналіз випадкових профілів двох колій. Встановлено умови виникнення статистичних резонансних режимів руху комплексу.

При моделюванні дії дорожніх умов враховано взаємодію колісного або гусеничного шасі НРК із дорожнім покриттям (рис. 3).

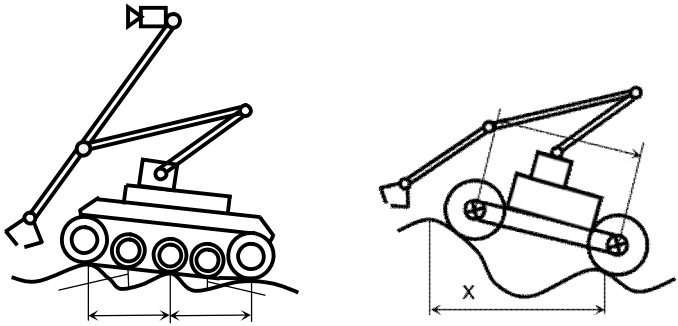


Рис. 3. Схема постійного контакту (а) шасі із дорожнім покриттям та періодичного контакту (б)

В процесі досліджень визначено статистичні характеристики випадкового вібропришвидшення шасі. Встановлено особливості випадкових вібропереміщень комплексу. Знайдено осереднений спектр потужності випадкових коливань (рис. 4).

Встановлено, що випадкові коливання шасі мають високочастотну та низькочастотну і резонансні області відповідні власним частотам динамічної системи шасі НРК.

В результаті математичного моделювання визначена динамічна дія різноманітних дорожніх умов на наземний роботизований комплекс.

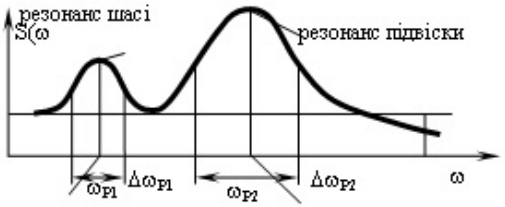


Рис. 4. Розрахункова спектральна щільність вібропришвидшень шасі наземного роботизованого комплексу

В.М. Тіхенко, д.т.н., проф.,
С.О. Сущинська, асп.,
Одеський національний політехнічний університет

ПРОБЛЕМИ СТАНДАРТИЗАЦІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ СПОРЯДЖЕННЯ ДЛЯ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Відповідно до прийнятого Україною курсу на європейську інтеграцію в даний час здійснюється перехід від сертифікації продукції згідно системі УкрСЕПРО до підтвердження її відповідності технічним регламентам. Існуюча раніше система обов'язкової сертифікації захищала ринок від неякісної продукції, а з іншого боку – гальмувала розвиток технологій і промисловості. У розвинених країнах давно зрозуміли, що державний контроль сфери сертифікації не може наздогнати сучасні технології, які швидко розвиваються. Профільними технічними комітетами велася робота по переходу вітчизняної системи сертифікації на більш сучасну та гнучку систему – модульну систему оцінки відповідності технічним регламентам. Перелік продукції, що підлягає обов'язковій сертифікації, затверджений 1 лютого 2005 р. наказом Держспоживстандарту України № 28 з початком введення технічних регламентів поступово почав скорочуватися до тих пір, поки не був скасований зовсім. Скасування державної системи сертифікації не позбавило можливості підтвердити якість продукції сертифікатом, а навпаки, полегшила виробникам можливість його отримання. В першу чергу до переліку обов'язкової сертифікації входили обладнання, пристрої, вироби, від яких прямим або непрямим способом може залежати життя або здоров'я людини.

За останні роки дуже сильно почали розвиватися сфери виробництва (наприклад, високошвидкісні технології механічної обробки, будівельні роботи на висоті) і дозвілля (наприклад, екстремальний туризм), для яких притаманні особливі вимоги безпеки. У ній використовується спеціальне спорядження, яке ми звикли бачити тільки в сфері будівництва (захисні екрани, окуляри, каски, мотузки, спускові пристрої, системи безпеки, та інше).

Зростання популярності спортивного альпінізму, підкорення раніше здавалися неприступними, гірських схилів і маршрутів стало можливим завдяки розвитку альпіністського спорядження і екіпірування. Окремо виділилося напрям обладнання для льодового альпінізму, адже для подолання таких непростих маршрутів були потрібні складні пристосування і елементи екіпіровки – кішки, льодоруби, спускове обладнання, закладки, гаки та інше. Виділився також «стінний альпінізм», він припускав підкорення стрімких схилів (стін) гір.

Спорядження для використання в екстремальних умовах, стали ділити на групи, в залежності від навантажень і завдань, які ставили перед собою виконавці. Будь-яка невідповідність спеціального спорядження стандартам і нормам технічних регламентів загрожує летальним результатом.

В Європі є два види стандартів – промислові та спортивні. Наприклад, у випадку з карабіном для скелелазіння та альпінізму, відповідно EN 362 і EN12275. Маркування на карабіні CE1015 EN12275 означає, що він сертифікований в Чехії в лабораторії SZU на відповідність європейській нормі 12275. Карабіни за конструктивними особливостями бувають абсолютно різними, але якщо ви дорожите своїм життям, то обов'язково купуйте тільки ті карабіни, які мають дві сертифікації EN і UIAA. Європейський стандарт EN – стандарт, прийнятий CEN, CENELEC або ETSI з правом застосування в якості ідентичного національного стандарту зі скасуванням суперечливих національних стандартів.

В європейських країнах існує велика кількість сертифікаційних лабораторій, в які виробник може звернутися. Для порівняння – у РФ така лабораторія одна. Відповідно до європейських правил сертифікації на виріб наноситься маркування, знак CE, номер сертифікаційної лабораторії, норма, на відповідність якої сертифіковане виріб, а також додаткове маркування в залежності від виду спорядження. Такі норми є практично на все спорядження для екстремальних видів використання, і воно підлягає обов'язковій сертифікації. Продаж несертифікованого спорядження неможливий, а використання такого спорядження однозначно позбавляє вас страховки, в разі якщо сталося щось через відмову даного спорядження. Інструктор або керівник виробництва буде мати великі проблеми при виникненні нещасного випадку, пов'язаного з несертифікованим спорядженням.

На даний момент в Україні діють європейські стандарти, що стосуються спорядження для виконання робіт на висоті методом промислового альпінізму. На жаль, до цього часу не адаптовано та не введено в дію стандарти, що стосуються багатьох видів спорядження для ектремального використання, зокрема, промислового та спортивного альпінізму та скелелазіння. При продажу такого спорядження деякі продавці стверджують, що воно не підлягає обов'язковій сертифікації. На наш погляд, поняття «не підлягає обов'язковій сертифікації» у випадку такого спорядженням є абсурдним, і, незважаючи на проблеми, вітчизняні виробники повинні шукати шляхи сертифікації свого спорядження, а його користувачі – прагнути купувати і використовувати тільки сертифіковану продукцію.

Ю.Д. Філатов, д.т.н., проф.[1],
В.І. Сідорко, д.т.н., доц.[1],
В.А. Ковальов, к.т.н., доц.[2],
С.В. Ковальов, к.т.н.[1],
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України[1],
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»[2]

ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СКЛА ТА СИТАЛІВ

У відповідності до кластерної моделі зняття оброблюваного матеріалу під час полірування продуктивність полірування та шорсткість оброблених поверхонь визначаються концентрацією частинок шламу, що видаляються із оброблюваної поверхні під час обробки, яка суттєво залежить від відстані між поверхнями оброблюваної деталі та притиру, тобто товщини проміжку між елементарними ділянками контактних поверхонь, в якому знаходиться дисперсна система (полірувальна суспензія). Ця товщина визначається реологічними властивостями та поверхневими явищами в дисперсній системі та залежить від динамічної в'язкості суспензії, коефіцієнту поверхневого натягу, кутів змочування нею поверхонь оброблюваної деталі та притиру. Разом з тим, процеси взаємодії зерен полірувального порошку з оброблюваною поверхнею під час полірування деталей електронної техніки та оптичних систем із оптичного скла, кераміки, ситалів, оптичних та напівпровідникових кристалів за допомогою полірувальної суспензії вивчені недостатньо, а причини впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники процесу полірування остаточно не з'ясовані.

Метою даного дослідження є вивчення закономірностей впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування плоских поверхонь підкладок із оптичного скла та ситалів.

В'язкість суспензії при різних концентраціях дисперсної фази визначалась за допомогою віскозиметра мод. ВЗ-246, густина – за допомогою «Density Meter DMA 35N», коефіцієнт поверхневого натягу – крапельним методом та за висотою підняття рідини к капілярі, кути змочування дисперсним середовищем поверхонь оброблюваної деталі та притиру – за допомогою мікроскопу «Мир-12».

В результаті вивчення закономірностей полірування оптичних поверхонь встановлено наступне. Залежність густини дисперсної системи від концентрації дисперсної фази є лінійною функцією, що має вигляд $\rho = \rho_0(\alpha_1 k + \beta_1)$ (де ρ_0 = 1,028 г/см^3 – густина дисперсного середовища; $\alpha_1 = 1{,}582 \cdot 10^{-3}$, $\beta_1 = 1{,}017 \approx 1$ – коефіцієнти).

Залежність кінематичної в'язкості дисперсної системи від концентрації дисперсної фази можна апроксимувати лінійною функцією вигляду $\nu = \nu_0(\alpha_2 k + \beta_2)$ (де $\nu_0 = 0{,}93 \cdot 10^{-6}$ м^2/с – коефіцієнт кінематичної в'язкості дисперсного середовища; $\alpha_2 = 0{,}018$, $\beta_2 = 0{,}857$ – коефіцієнти). Залежність динамічної в'язкості дисперсної системи $\eta(k) = \nu(k) \cdot \rho(k)$ від концентрації дисперсної фази

можна апроксимувати лінійною функцією вигляду $\eta = \eta_0(\alpha_3 k + \beta_3)$ (де $\eta_0 = 0{,}956 \cdot 10^{-3}$ Па·с – коефіцієнт динамічної в'язкості дисперсної системи; $\alpha_3 = 0{,}02$, $\beta_3 = 0{,}87$ – коефіцієнти).

Залежність динамічної в'язкості дисперсної системи від об'ємної долі частинок дисперсної фази може бути представлена у відповідності до рівняння $\eta = \eta_0(\beta_4 + \alpha_4\varphi)$ (де $\alpha_4 = 7{,}28$, $\beta_4 = 0{,}87$ – коефіцієнти). Це рівняння значно відхиляється від рівняння Ейнштейна для колоїдних систем ($\beta \neq 1$), яке дає завищенні приблизно на 10 % результати розрахунку по відношенню до даних експерименту, а коефіцієнт форми $\alpha_4 > 2{,}5$ свідчить про значне відхилення форми порошку від сферичної. За формулою Куна коефіцієнт форми для частинок полірувального порошку, що мають вигляд еліпсоїдів обертання з осями $a = 556$ нм та $b = 262$ нм, складає $\alpha_k = 2{,}5 + (a/b)^2/16 = 7{,}68$, що співпадає з $\alpha_4 = 7{,}28$ (відхилення не перевищує 5%).

Залежність коефіцієнту поверхневого натягу дисперсної системи від концентрації дисперсної фази незначно зменшується у відповідності до залежності $\sigma = \gamma k + \delta$ (де $\gamma = -0{,}384$ мН/м, $\delta = 59$ мН/м – коефіцієнти). Середнє значення коефіцієнту поверхневого натягу дисперсної системи складає $\sigma_m = 53 \pm 2$ мН/м (відхилення від середньої величини не перевищує 4%).

Величина проміжку l між поверхнями оброблюваної деталі та притиру, в якому знаходиться полірувальна дисперсна система, визначається з врахуванням концентраційних залежностей коефіцієнтів динамічної в'язкості та поверхневого натягу. При збільшенні концентрації дисперсної фази в'язкість дисперсної системи підвищується, що призводить до незначного зменшення величини проміжку між елементарними ділянками контактуючих поверхонь. При збільшенні концентрації дисперсної фази коефіцієнт поверхневого натягу дисперсної системи зменшується, що призводить до зменшення товщини її прошарку між поверхнями оброблюваної деталі та притиру, а значить і до підвищення продуктивності зняття оброблюваного матеріалу під час полірування.

Дослідження впливу реологічних характеристик полірувальної дисперсної системи на продуктивність полірування відбувалось при поліруванні деталей із оптичного скла марки К8 (зразки діаметром 60 мм), ситалу марки СТ-50-1 (підкладки розміром 60х48х0,6 мм) та ситалу марки СО115М (зразки діаметром 30 мм – 3 шт.) на верстаті мод. 2ШП-200М при використанні притиру із пінополіуретану при зусиллі притискання 50,5 Н, частоті обертання притиру 90 об./хв., концентрації дисперсної фази в дисперсній системі 21 мас.%. Коефіцієнт динамічної в'язкості – $1{,}23 \cdot 10^{-3}$ Па·с, коефіцієнт поверхневого натягу – 0,051 Н/м, кут змочування поверхні притиру – $38{,}8^{\circ}$, кути змочування оброблюваної поверхні скла марки К8, ситалу СТ-50-1 та ситалу СО115М (град.) – 25,5; 51,0 і 21,5 відповідно.

Аналіз впливу реологічних характеристик полірувальної дисперсної системи на продуктивність полірування оптичного скла та ситалів показав, що при збільшенні товщини проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром сумарний об'єм частинок шламу, який визначається як добуток концентрації частинок шламу на їхній об'єм, лінійно зменшується, що призводить до зменшення коефіцієнту об'ємного зносу та відповідно продуктивності полірування (табл. 1).

Таблиця 1. Результати визначення продуктивності полірування та шорсткості оброблених поверхонь деталей зі скла та ситалів

Параметри	Оброблюваний матеріал		
	К8	СТ-50-1	СО-115М
Продуктивність полірування 10^{-13} м^3/с	6,9	7,3	13,3
Експеримент: 10^{-13} м^3/с	6,6	8,0	13,6
мкм/год.	0,8	1,0	2,3
Похибка розрахунку, %	5	8	2
Шорсткість поверхні:			
Ra, нм	6,7±0,1	6,8±0,1	7,4±0,2
Rq, нм	7,2±0,1·	7,2±0,2	7,9±0,4
R_{max}, нм	12,8±0,4	13,6±0,9	13,8±1,1

Дослідження впливу реологічних характеристик поліруваьної дисперсної системи на шорсткість полірованих поверхонь деталей із оптичного скла та ситалів здійснювалось також на основі кластерної моделі за допомогою методу комп'ютерного моделювання нанопрофілю оброблюваної поверхні.

Аналіз показав, що при збільшенні товщини проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром найбільш ймовірний розмір частинок шламу зменшується по гіперболічному закону, що призводить до зменшення параметрів шорсткості полірованих поверхонь (табл. 1).

При експериментальній оцінці шорсткості полірованих поверхонь деталей із оптичного скла та ситалів за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографу «Micron-alpha» було показано, що результати теоретичних розрахунків з достатнім ступенем точності підтверджуються дослідними даними (середня величина відхилення результатів розрахунку параметрів шорсткості від експериментальних даних менше 10 %). Наприклад, параметри шорсткості полірованої за даних умов поверхні підкладки з ситалу марки СТ-50-1 за даними вимірів складали: *Ra* = 6,6±1,0 нм, *Rq* = 8,8±1,7 нм, що відрізняються від розрахункових значень відповідно на 3% та 20%.

Таким чином, в результаті аналізу впливу реологічних властивостей дисперсної системи на показники полірування оптичного скла та ситалів встановлено, що коефіцієнти поверхневого натягу та динамічної в'язкості полірувальної дисперсної системи, а також кути змочування нею поверхонь оброблюваної поверхні та притиру впливають на товщину проміжку між ними, а відповідно на ефективність взаємодії частинок дисперсної фази з оброблюваною поверхнею та процес утворення та видалення із неї частинок шламу, розміри яких суттєво впливають як на продуктивність зняття оброблюваного матеріалу, так і на параметри шорсткості оброблених поверхонь. При аналізі нанорельєфу обробленої поверхні встановлено, що збільшення товщини проміжку між оброблюваною поверхнею та притиром приводить до зменшення розміру частинок шламу та поліпшення шорсткості полірованих поверхонь.

Ю.А. Харламов, д.т.н., проф.[1],
Л.Г. Полонский, д.т.н., проф.[2],
Восточноукраинский национальний университет им. В. Даля[1],
Государственный университет «Житомирская политехника»[2]

СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Контактное взаимодействие твердых тел при трении сопровождается сложным комплексом взаимосвязанных явлений и получает все более широкое практическое использование для выполнения разнообразных операций обработки в машиностроении.

Трение сопровождает и процессы обработки деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). Поверхностный слой при обработке ППД формируется под воздействием многократно повторяющихся в очаге деформирования и прилегающих зонах упругих и пластических деформаций, трения, тепловых процессов и сопутствующими изменениями микро- и макроструктуры, микрогеометрии и пр. Однако к фрикционным методам обработки следует относить процессы обработки, в которых определяющую роль играют явления, протекающие в зоне фрикционного контакта инструмента с деталью или соединяемых деталей при сварке.

По функциональному назначению разработаны и получили применение разнообразные способы фрикционной обработки.

1. Обработка металлов давлением: 1.1. фрикционная экструзия расходуемых прутков; 1.2. фрикционная экструзия при плакировании прутков и проволоки; 1.3. фрикционная переработка сплавов из расходуемых прутков для улучшения микроструктуры и механических свойств, в том числе литых сплавов; 1.4. фрикционная формовка полых и сплошных заготовок без предварительного нагрева; 1.5. фрикционное микроформирование.

2. Порошковая металлургия: 2.1. фрикционная экструзия порошков; 2.1. фрикционное консолидирование и спекание порошковых материалов и отходов обработки.

3. Обработка резанием: 3.1. фрикционная резка вращающимся диском; 3.2. фрикционное фрезерование диском трения; 3.3. резка фрикционными ленточными пилами; 3.4. фрикционное (пластическое) сверление; лезвийная обработка с фрикционным подогревом зоны резания

4. Модифицирование поверхностных слоев деталей: 4.1. фрикционная обработка при нагреве высокоскоростным диском трения; 4.2. фрикционное высокоскоростное выглаживание; 4.3. фрикционное наноструктурное выглаживание; 4.4. модифицирование поверхностных слоев трением с перемешиванием; 4.5. получение дисперсно упрочненных композиционных слоев трением с перемешиванием.

5. Наплавка и нанесение покрытий: 5.1. фрикционное припекание порошковых покрытий; 5.2. наплавка расходуемым вращающимся прутком;

5.3. фрикционное латунирование (бронзирование, меднение); 5.4. фрикционное натирание пленок; 5.5. ротапринтное смазывание узлов трения; 5.6. фрикционное нанесение износостойких покрытий эластичным инструментом.

6. Сварка, разъемные соединения: 6.1. ротационная сварка трением; 6.2. инерционная сварка трением; 6.3. орбитальная сварка трением (для соединения некруглых деталей); 6.4. радиальная сварка трением (соединение труб); 6.5. линейная сварка трением с перемешиванием (СТП) (различные модификации вращающегося нерасходуемого инструмента); 6.6. фрикционная шовная сварка вращающимся расходуемым прутком; 6.7. фрикционная приварка шпилек и стержней; 6.8. сварка трением с погружением (для приварки стержней к относительно мягким материалам); 6.9. сварка трением с промежуточным телом (разновидность сварки трением с погружением); 6.10. прерывистая фрикционная коническая сварка (для заделки трещин, устранение дефектов в конце сварных швов при сварке трением с перемешиванием и сварке со сквозным проплавлением); 6.11. фрикционная шовная сварка вращающимся диском; 6.12. реверсивная линейная сварка трением (частота колебаний до 75 Гц с амплитудой до ±3 мм); 6.13. ультразвуковая сварка; 6.14. ротационная пайка трением; 6.15. фрикционная обработка при сборке.

7. Комбинированные методы обработки с использованием явлений на фрикционном контакте.

Эти способы могут быть также классифицированы по ряду других признаков: характеру контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью; кинематике процесса обработки; использованию при обработке дополнительных источников энергии; применению смазочно-охлаждающих сред и способах их подачи; методам отвода или сохранения фрикционного тепла в зоне контакта; конструкции и материала обрабатывающего инструмента и др.

По физической природе воздействия на обрабатываемый материал следует различать три категории способов фрикционной обработки: 1. обработка с отводом фрикционного тепла из зоны контакта инструмента с деталью; 2. обработка с использованием фрикционного тепла в зоне контакта; 3. термомеханическая обработка. В первом случае решаются задачи изменения состояния поверхностного слоя деталей главным образом его пластической деформацией и сопутствующими явлениями. Обработка материала детали сопровождается механически активированными процессами. Для поддержания необходимого теплового режима должны быть обеспечены минимальная генерация и эвакуация избыточного тепла. Во втором случае обработка осуществляется преимущественно тепловым воздействием фрикционного источника нагрева и сопровождается преимущественным влиянием термически активированных процессов в обрабатываемом материале. Здесь характерно обеспечение замедленного теплоотвода из зоны контакта. К термомеханическим следует отнести способы с использованием дополнительных механических источников энергии.

Разработка новых способов фрикционной обработки с отводом тепла из зоны контакта связана с необходимостью совершенствования физико-механического

процесса наноструктурирующего выглаживания при высоких скоростях скольжения индентора. Отвод фрикционного тепла из контактной зоны инструмента необходим для поддержания оптимального температурно-скоростного режима пластической деформации. Ведущую роль при поверхностной упрочняющей обработке при таких способах обработки играет процесс интенсивной пластической деформации, вызываемой трением. Следует ожидать дальнейшего развития процессов наноструктурирующего выглаживания и других методов с теплоотводом, а также дальнейшего совершенствования их для более существенного повышения степени и скорости деформации, увеличения толщины слоя с нанокристаллической структурой и в обеспечении комплекса новых уникальных эксплуатационных свойств.

К второй категории можно отнести способы модифицирования поверхностных слоев деталей за исключением наноструктурирующего выглаживания.

Большинство применяемых способов фрикционной обработки относится к третьей категории с использованием фрикционного источника тепла для предварительного нагрева зоны контакта и последующего силового воздействия. Это прежде всего перечисленные выше способы обработки давлением, порошковой металлургии, обработки резанием, большинства фрикционных способов наплавки и нанесения покрытий и пленок, способы сварки, использующие фрикционный нагрев деталей с последующим их сдавливанием, и пр.

Ряд способов обработки ППД при соответствующем контроле явлений, протекающих в поверхностном слое детали, могут быть отнесены к поверхностной фрикционной обработке. Условием этого является определяющая роль процессов в фрикционном контакте на формирование поверхностного слоя детали. Силовое взаимодействие инструмента с деталью происходит на пятнах фактического контакта, малые размеры которых являются причиной высоких фактических давлений. В процессе обработки в зоне фрикционного контакта находится активный поверхностный слой толщиной от долей до десятков микрометров, а нижележащий подповерхностный слой достигает толщины до нескольких миллиметров. Активный поверхностный слой испытывает пластическую деформацию и участвует в физико-химических трибореакциях. Поведение активного поверхностного слоя в процессе трения может происходить в условиях и закономерностях, свойственных интенсивным пластическим деформациям.

Основные принципы проектирования технологии и оборудования фрикционных способов обработки включают: 1. рациональный выбор материала инструмента с учетом совместимости с материалом обрабатываемой детали и физико-механическими свойствами; 2. обеспечение допустимого температурно-скоростного режима обработки в соответствии с целями выполняемой операции, т.е. надлежащего контроля и регулирования теплового режима в зоне фрикционного контакта инструмента с деталью; 3. обеспечение правила положительного градиента механических свойств в зоне фрикционного контакта инструмента с деталью; 4. рациональный выбор вида контакта инструмента с деталью (точечного, линейного или контакта по площади); 5. рациональный выбор микрогеометрии рабочей поверхности

инструмента и вида предварительной обработки поверхности детали; 6. выбор оптимального значения коэффициента взаимного перекрытия поверхностей трения инструмента и детали.

Под совместимостью материалов инструмента и обрабатываемой детали понимается возможность обеспечения оптимального состояния в принятых режимах работы по выбранным критериям. Это прежде всего поддержание высокого и стабильного коэффициента трения при незначительном износе. Особое значение имеет исключение износа за счет схватывания с сопутствующими вырывами и переносом материала с одной поверхности на другую.

При положительном градиенте механических свойств внешнее трение возможно только в определенном интервале значений нагрузки или критерия Крагельского h/R, где h – глубина внедрения неровностей инструмента, R – радиус микронеровностей.

М.Л. Хейфец, д.т.н., проф.[1],
А.Г. Колмаков, чл.-кор. РАН, д.т.н., проф.[2],
С.А. Клименко, д.т.н., проф.[3],
Державне науково-виробниче об'єднання «ЦЕНТР» НАН Білорусі[1],
Інститут металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова РАН[2],
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України[3]

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ

Основне завдання проектувальників і виробників – максимальною мірою задовольняти вимоги до якості продукції, що пред'являються глобальним міжнародним ринком. У умовах зростаючої конкуренції якість продукції має зростати випереджаючими темпами, а це можливо забезпечити лише на основі наукового аналізу, з урахуванням результатів всебічних досліджень формування показників якості виробів в технологічних комплексах сучасного виробництва. Однією з ключових проблем машинобудування є забезпечення безвідмовності і довговічності деталей і вузлів машин технологічними методами. Надійність деталей багато в чому визначається станом їх поверхневого шару, параметри якого формуються протягом усього технологічного процесу і стадій експлуатації.

Серед комплексу технологічних методів, що підвищують безвідмовність і довговічність деталей, у виробництві на заключних операціях технологічних маршрутів широко використовуються методи механічної, суміщеної та комбінованої обробки. Практика показала, що при правильно обраних маршрутах і операціях, призначених режимах обробки і керованих впливах можна збільшити надійність виробів в десятки разів. У той же час невірно призначені режими і відсутність обліку накопичення дефектів на попередніх

операціях можуть привести до руйнування поверхневого шару вже при виготовленні деталі або до передчасної відмови при її експлуатації.

Сьогодні не викликає сумніву необхідність урахування технологічного успадкування при вдосконаленні існуючих і проектуванні нових технологічних процесів, засобів оснащення для їх реалізації і комплексів технологічного обладнання. Наукові основи вивчення і використання технологічної спадковості в виробничих процесах закладені в дослідженнях П.І. Ящеріцина, А.М. Дальського, Е.В. Рижова, їх колег та учнів.

Під спадковістю у технології машинобудування мається на увазі явище перенесення властивостей оброблюваного об'єкта від попередніх операцій і переходів до наступних, що надалі позначається на експлуатаційних властивостях виробів. Носіями спадкової інформації служать оброблюваний матеріал і поверхневий шар деталі з усім різноманіттям параметрів, які їх описують. Носії інформації активно беруть участь в технологічному процесі, проходячи через різні операції і переходи, відчуваючи впливу технологічних факторів.

Сукупність властивостей виробів, кожний з яких може характеризуватися безліччю показників якості, є проявом пов'язаних складним чином технологічних показників при формуванні якості виробу. Властивості виробу формуються при його виготовленні взаємопов’язано.

В результаті в сучасних умовах потрібно з єдиних позицій успадкування параметрів якості функціональних елементів розглядати проектні і виробничі етапи життєвого циклу виробів в технологічних комплексах і при експлуатації їх в машинах. Тому на основі синергетичної концепції запропоновано при проектуванні методів обробки виробів з конструкційних матеріалів враховувати домінування властивостей притаманним технологічним рішенням, які описують забезпечення контрольованих параметрів технічної системи. Саме з цих позицій потрібно розглядати проектування механічних і термічних процесів, для яких характерні різноманітні впливи на зміцнення та розмірність поверхонь виробів з конструкційних матеріалів.

Застосування синергетичної концепції дозволяє формувати комплексну математичну модель технологічного успадкування експлуатаційних показників якості, яка описує різні режими поведінки при виробництві і експлуатації виробів. Використання такої математичної моделі при комп'ютерному проектуванні надає широкі можливості для скорочення витрат при виготовленні і використанні конструктивно-складних деталей.

В даний час вивчені особливості управління процесами механічної, суміщеної і комбінованої обробки, що формують комплекс механічних і геометричних параметрів якості виробів. На основі статистичного аналізу запропоновано метод управління багатофакторними процесами, який використовує комплексні діаграми. Показано, що проектування систем управління технологічними комплексами базується на використанні структурного аналізу і полягає у виконанні послідовних етапів: – визначення класу вирішуваних завдань розробки програмних модулів; – моделювання динамічних об'єктів; – розрахунок параметрів математичної моделі; – аналіз результатів моделювання; – рішення про доцільність застосування розробленої моделі.

Відзначено, що поєднання статистичного та структурного аналізу і синтезу забезпечує моделювання і управління багатофакторними технологічними операціями по комплексу параметрів, дозволяє визначити і оптимізувати чинники, через які ефективно здійснюється процес управління в технологічних комплексах, і вказує основні параметри для контролю в режимі реального часу при обробці.

Технологічна спадковість при виконанні операцій багатофакторної обробки визначається впливами, які формують структуру матеріалу поверхневого шару і рельєф поверхні виробу. В результаті досліджень визначена складно-формалізована, але необхідна, умова структурного аналізу при виборі маршрутів і деталізацій операцій технологічного процесу – виділення з численних впливів керуючих технологічних факторів обробки. При використанні структурного аналізу маршрутів, операцій, дій в процесі обробки, для деталізації на структурній діаграмі технологічної операції слід розділяти групи, що формують параметри якості виробів. Регулювання технологічних впливів потрібно здійснювати в результаті виконання заходів з оперативного управління процесами, а також довготривалого статистичного контролю визначальних параметрів якості виробів.

На основі синергетичного підходу розроблено математичну модель успадкування показників якості в життєвому циклі виробу, що описує різні режими поведінки при виробництві і застосуванні технічних систем.

Технологічне успадкування потрібно розглядати як сукупність складних явищ переносу параметрів якості виробу, що залежать один від одного. Потрібно враховувати, що технологічне успадкування не може бути описано одновимірними моделями, а потрібно розглядати технологічний ланцюжок режим обробки-стан поверхневого шару-експлуатаційні властивості, що передбачає наявність складних зв'язків у вигляді функціоналів. Розробка моделей технологічного успадкування у вигляді системи функціоналів визначає характер опису фізичних закономірностей формування поверхневого шару деталей машин. Наявність такого опису дозволяє не тільки простежити закономірності технологічного успадкування, але і застосувати їх, як для пооопераційного контролю з використанням фізичних методів, так і для проектування технологій, що забезпечують високу довговічність деталей і безвідмовність машин.

Спадкоємність рішень для технологічних комплексів при математичному моделюванні, конструкторсько-технологічному проектуванні, виробництві і застосуванні складних технічних систем базується на принципах самоорганізації фізичних явищ і уявлень щодо життєвого циклу виробів.

Сучасний рівень цифровізації промислового виробництва забезпечує перехід до використання інформаційних технологій створення, підтримки і застосування загального інформаційного простору в часі на всіх етапах життєвого циклу виробів: від їх проектування до експлуатації та утилізації. Єдиний інформаційний простір дозволяє інтегруватися розрізненим частинам технологічного комплексу в віртуальне підприємство, що створюється з різних просторово віддалених підрозділів, для використання комп'ютерної підтримки етапів життєвого циклу виробів.

О.В. Чернишов,[1],
Д.Г. Музичка, к.т.н., доц.[1],
В.А. Тищенко, студ.[1],
В.А. Яновський, доц.[2],
Дніпровський державний технічний університет[1],
Державний університет «Житомирська політехніка»[2]

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СУШКИ БРИКЕТІВ ІЗ ШЛАМІВ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Проблема використання металовідходів є частиною формування економічних умов створення безвідходного виробництва. Одним з важливих резервів економії металу є використання відходів металообробки в якості сировини для металургійного виробництва. Основним видом відходів металообробки є металева стружка, шлами шліфувальних верстатів та обрізь, які є цінною сировиною для металургії. При відповідній обробці відходів можна повернути у виробництво значну кількість цінних матеріалів.

В основному усі металеві відходи підлягають подальшій переробці. Але особливу проблему представляють шлами шліфувальних верстатів (а це на сьогодення майже 4% від металевих відходів), які не переробляють, а вивозять на спеціальні звалища, оскільки вони є важкоруйнівним конгломератом металевих частинок із вкрапленнями абразиву і зв'язування, просоченими МОР (мастильно-охолоджуючою рідиною).

Перед використанням у металургійній промисловості шлами необхідно очистити від МОТС (мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ). Для цього існують різні методи, найбільш розповсюдженим з яких є миття. Сутність методу полягає у видаленні МОТС зі шламу шляхом промивання у спеціальних мийних розчинах. Після очистки зі шламів шляхом пресування отримують брикети, які у подальшому повинні бути висушені, оскільки при брикетуванні для розрідження у суміш додається рідина. Допустимий вміст вологи у готовому брикеті для використання у подальшій переробці не повинен перевищувати 1%. Крім цього, для ефективного застосування у металургійному переплаві брикети повинні мати певну щільність і чистоту.

Аналіз існуючих способів і пристроїв, які можна застосувати для підготовки шліфувальних шламів до металургійного переділу показує, що вони не вирішують проблему, оскільки всі розроблялися для інших цілей і тому погано працюють на шламах у зв'язку з особливими властивостями останніх, більшість з них енергоємні. Крім того, технологічні параметри і режими роботи існуючих пристроїв, застосовуваних у різних галузях промисловості, не мають достатніх теоретичних і експлуатаційних обґрунтувань. У зв'язку з цим необхідно розробити нове обладнання і технологію для підготовки шламів до переробки. В літературних джерелах такі дані відсутні.

Метою роботи є проведення дослідження кінетики сушки брикетів зі шламів шліфувальних верстатів.

Дослідження проводились на експериментальній сушильній установці, представленій на рис. 1. Сушилися декілька партій брикетів відібраних після брикетування. Теплофізичні характеристики брикетів перед сушкою:

– хімічний склад: інструментальні сталі та електрокорунд Al_2O_3;

– щільність брикету 1–2,25 кг/дм^3;

– початкова вологість: W_o = 4–8%.

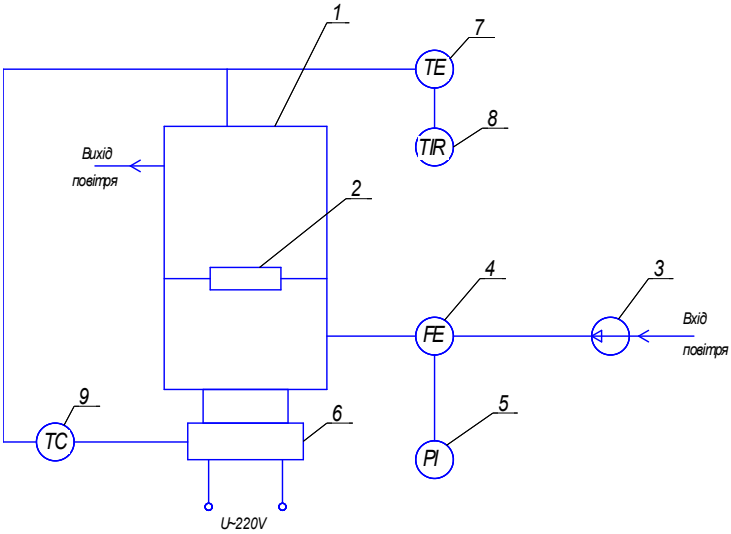


Рис. 1. Принципова схема камерної сушильної установки: 1 – сушильна камера; 2 – пакет із стружки; 3 – вентилятор; 4 – вимірювальна діафрагма; 5 – дифманометр; 6 – комутуючий устрій; 7 – термометр опору; 8 – мілівольтметр універсальний; 9 – регулятор температури в сушильній камері

Брикети із шламу 2 з початковою вологістю W_o і температурою t розташовувався в сушильній камері установки 1. В камері підтримувалась постійна температура. Підтримування необхідної температури здійснювалось шляхом попереднього нагріву камери до необхідних температурних умов. Подача повітря в камеру сушильної установки здійснювалась за допомогою вентилятора 3. Для вимірювання витрат повітря використовувалась вимірювальна діафрагма 4, вимірювання перепаду тиску здійснювалось диференціальним манометром 5. Регулювання температури в сушильній камері проводилось комутуючим пристроєм 6 та регулятором температури в сушильній камері 9. На протязі сушки кожні 4 хвилини вимірювалась маса пакета за допомогою електронних вагів типу MW-150. Похибка вимірювання маси ±0,005 г. Процес сушки вважався завершеним, коли маса зразка не мінялася після чергового зважування.

Вимірювання температури проводилось за допомогою комплекту приборів – мідного термометра опору 7 та вимірювача–регулятора технологічного

ИРТ5920НПП НЛЕМЕР ТС-1388/450М мілівольтметра універсального 8. Основна похибка вимірювання температури не перевищувала ± 0,5 ºС. Процесу сушки піддавалися зразки, що мали щільність 1,6 кг/дм^3; 1,87 кг/дм^3; 1,9 кг/дм^3; 1,97 кг/дм^3; 2,06 кг/дм^3; 2,126 кг/дм^3 та 2,184 кг/дм^3.

Експеримент проводився наступним чином: сушильна камера розігрівалася до температури 100 ºС. Зразки завантажувалися в камеру по одному, витримувались при даній температурі 4 хв., потім виймались, зважувались і знову сушились. Експеримент проводився поки після двох зважувань підряд маса пакета не змінювалась. Це говорило про те, що зразок висушений повністю. Потім камера розігрівалась до температури 150 ºС і 200 ºС і експеримент знову повторювався.

Обробка результатів досліджень проводилась методами математичної статистики.

Результати досліджень показали, що швидкість сушки в брикетах з меншою щільністю більша, а зі зростанням щільності брикету в середині процесу сушки швидкість сушки уповільнюється. Це свідчить про те, що щільні шари шламу стримують випаровування вологи з середини пакета. Для сушки пакетів великої щільності необхідно інтенсифікувати процес за рахунок продувки брикету гарячим повітрям та, крім конвекції, інтенсифікувати процес інфрачервоним випромінюванням.

Е.Я. Чонка, студ.[1],
О.Г. Новаковський, асп.[1],
В.В. Сєров, к.т.н., доц.[2],
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»[1],
Державний університет «Житомирська політехніка»[2]

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ МОДЕЛЕЙ НА 3D-ПРИНТЕРІ

Підвищення ефективності сучасного виробництва потребує нових підходів, врахування додаткових факторів при виборі обладнання та технологій. Так, крім звичайних показників продуктивності, якості та безпеки, необхідно враховувати додаткові вимоги до оптимізації виробництва. Це можливо втілити за рахунок пошуку нових рішень, зокрема впровадження адитивних технологій.

Використання адитивних технологій є одним з найкращих прикладів того, як нові розробки і пристрої можуть значно покращити традиційні методи виробництва деталей та моделей і задати стрімкий розвиток сучасних галузей машино- та приладобудування. Впровадження 3D-принтерів в сучасні галузі промисловості дозволить значно зменшити витрати на виробництво.

Одним з ефективних напрямків розвитку адитивних технологій є методи виготовлення деталей на 3D-принтерах. При цьому точність та якість

виготовлення моделей та деталей залежить від вибору методу друку і використовуваного матеріалу.

Для аналізу точності виготовлення моделей на 3D-принтерах проаналізовано метод FDM (Fused deposition modeling) роздільна здатність якого в залежить від розміру сопла і точності горизонтальних рухів екструдера.

На рис. 1 приведена схема принципу роботи 3D-принтера, який реалізує метод FDM, де: 1. – корпус (відіграє роль скелету для монтажу конструкційних елементів); 2.– направляючі (елементи конструкції принтера, що здійснюють порівняно вільне переміщення друкуючої головки у заданому напрямку); 3.– екструдер (група частин, що виконує подачу, нагрівання та видавлювання (екструзію) витратного матеріалу через сопло на робочу поверхню); 4 – крокові двигуни (елементи конструкції принтера, що забезпечують рівномірне переміщення друкуючої головки у заданому просторі). 5 – робочий стіл (будівельна платформа 3D-принтера, на якій відбувається безпосереднє створення тривимірного об'єкта); 6 – електроніка (набір елементів, що здійснює керування та координацію дій принтера у процесі друку).

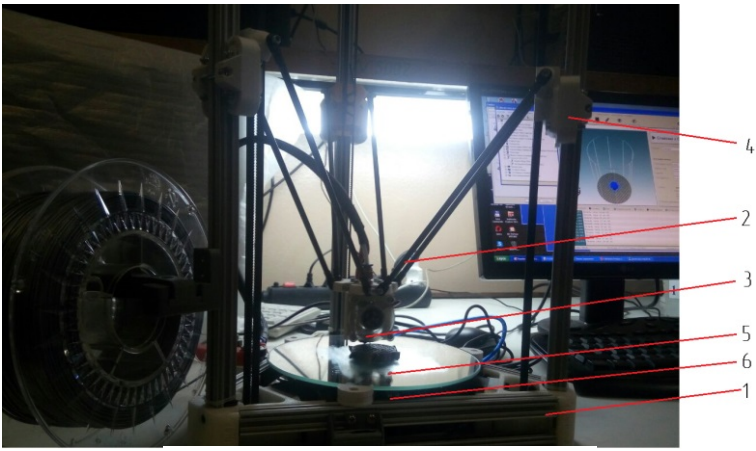


Рис. 1. Загальний вигляд 3D-принтеру

При використанні технології FDM друк виконується за рахунок поступової подачі матеріалу з картриджів з матеріалом в екструдер, де пластик нагрівається і утворюється капля, яка виходить з сопла.

На рис. 2 показано схеми похибки позиціювання головки екструдера відносно платформи робочого стола.

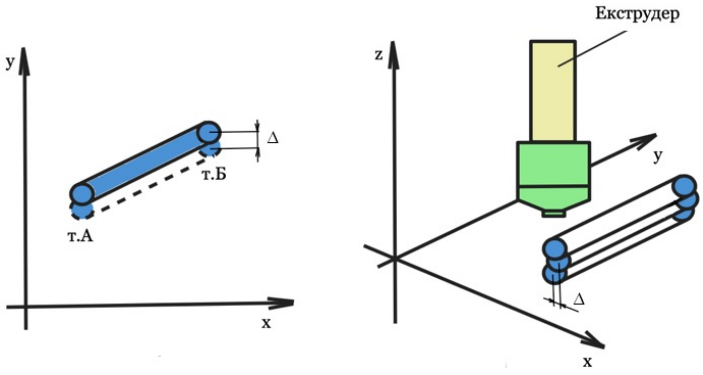
В процесі накладання шарів один за одним, створюється певна фактура 3D-друку, вона визначає параметри шорсткості поверхні моделі, при цьому шорсткість після друку визначається такими основними факторами:

1. Точність позиціонування екструдера відносно платформи. Тобто якщо програмно задати переміщення екструдера з точки А в точку Б з певною

відстанню, то похибка буде визначатись як відхилення від заданої позиції точок (рис. 2, *а*).

2. Точність позиціонування стола відносно осей визначається аналогічно визначенню точності позиціонування екструдера відносно платформи, тільки в вертикальній площині.

3. Повторюваність. Цей параметр показує наскільки попередній шар буде відрізнятись від наступного.



а *б*

Рис. 2. схеми похибки позиціювання головки екструдера відносно платформи робочого стола

Як показав проведений аналіз позиціонування екструдера, похибка відхилення Δ створює додаткову рифлену поверхню, яку можна зменшити програмно, чим забезпечити клас шорсткості і задовольняти технічні умови виробу.

Висновок: Дослідження якості поверхонь при виготовленні моделей на 3D-принтерах дозволить зменшити кількість похибок при друкуванні та покращити точність та шорсткість поверхні.

А.О. Шахрай, студ.,
А.О. Криворучко, к.т.н., доц.,
Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДСТАНІ МІЖ ПРОПИЛАМИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ ТІЛ ОБЕРТАННЯ

Природній камінь широко застосовується як у будівництві, так і при виробництві виробів ритуального призначення. Прекрасним доповненням до них є вази, кулі і лампади, які користуються на сьогоднішній день величезним

попитом. В сучасних умовах розвитку потужної каменеобробної промисловості України, поки ще не досягнуто значних обсягів виробництва складно профільних деталей та деталей тіл обертання з природного каменю, які б відповідали потужному потенціалу вітчизняних родовищ каменів, що довели свою конкурентоздатність на світовому ринку.

Існує клас деталей з природного каменю тіл обертання: вази, балясини, колони, кулі і ін. складнопрофільні поверхні яких складаються з декількох спряжених плоских, конічних, сферичних поверхонь з різними радіусами кривизни. Сучасна технологія формоутворення складнопрофільних поверхонь реалізується на токарних верстатах з використанням алмазної дискової фрези. Такий процес забезпечує формоутворення поверхні деталі тіл обертання з природного каменю, але має суттєві недоліки, що пов'язані, насамперед, з різною лінійною швидкістю подачі інструмента на ділянках з неоднаковими радіусами деталі і, як наслідок, втрата загальної продуктивності, нерівномірний знос робочого інструменту і інш.

Виходячи з вищенаведеного, оптимізація продуктивності виробництва деталей тіл обертання із природного каменю в умовах малих каменеобробних підприємств на токарних верстатах, розробка на цій основі рекомендацій технології фрезерування, що забезпечить підвищення продуктивності виготовлення складнопрофільних деталей тіл обертання з природного каменю – є актуальною задачею.

Відстань між пропилами визначатиме нерівність зколу поверхні тіла обертання, витрату алмазного інструменту на виготовлення виробу та працемісткість виготовлення виробу.

Для дослідження була використана заготовка розміром 150×150×300 мм з Букинського габро. Методика експеременту полягала в наступному:

1) На даній заготовці алмазним сегментним відрізним кругом діаметром 315 мм, ширина алмазних сегментів 4 мм виконувались різи на глибину 55 мм (відповідає максимально потрібній глибині різання при виточуванні виробу з даної заготовки), відстань між якими становила 3–20 мм (рис. 1). Кожна відстань між пропилами відтворювалась послідовно три рази (рис. 2).

2) За допомогою молоткак і зубила збивались нерівності.

3) За допомогою штангенциркуля виконувалось вимірювання максимальної нерівності.

При виконані прпилів відстань між якими становила 3 мм було відмічене енеодноразові відламування гребнів в процесі різання на різних глибинах, що створювало вкрай несприятливі умови експлуатації алмазного інструменту, і тому на основі отриманих даних прийнято рішення про визнання недоцільним виконувати пропили на цій відстані, а також на менших відстанях за вищезазначену.

В результаті проведених досліджень були отримані наступні результати (табл. 1)

Графічна залежність нерівності зколу від відстані між прорізами наведена на рис. 3.



Рис. 1. Заготовка, підготовлена до зколювання

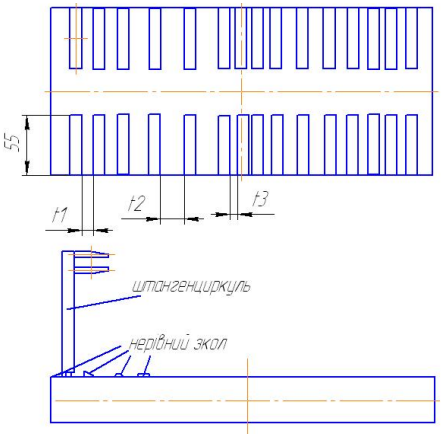


Рис. 2. Методика визначення впливу відстані між різами на нерівності зколу

Таблиця 1 – Результати дослідження

Відстань між прорізами, мм	Середня нерівність зколу, мм
5	0,9
7	1,2
9	1,4
11	1,3
13	1,6
15	1,68
17	1,8
19	2

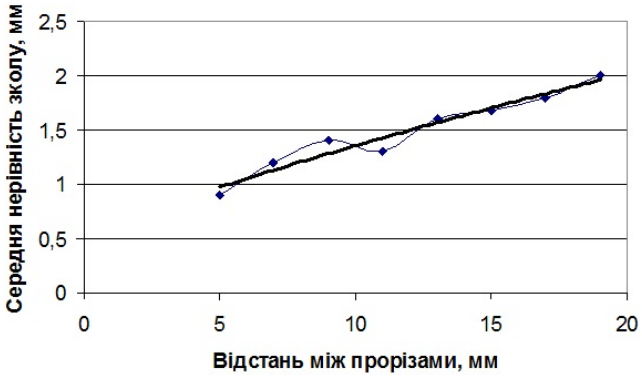


Рис. 3. Графічна залежність нерівності зколу від відстані між прорізами

Аналітично залежність нерівності зколу від відстані між прорізами можна представити у вигляді нищенаведеного поліному другого порядку:

$$y = -0{,}0007x^2 + 0{,}0862x + 0{,}5588 \quad (1)$$

Коефіцієнт детермінації отриманої залежності 0,8489.

Аналіз отриманих результатів свідчить прте, що найбільш оптимальним з позицій рівності форми поверхні заготовки є відстань між пропилами рівна 5 мм.

Висновки:

1. Велике різноманіття способів і стадій виготовлення об'ємних виробів з конусоподібною поверхнею або з поверхнею форми еліптичного параболоїда обумовлює необхідність як детального вивчення різних стадій, так і порівняльного аналізу техніко-економічних показників різних способів виготовлення.
2. Відстань між пропилами визначатиме нерівність зколу поверхні тіла обертання, витрату алмазного інструменту на виготовлення виробу та працемісткість виготовлення виробу.
3. При виконані пропилів відстань між якими становила 3 мм було відмічене неодноразові відламування гребенів в процесі різання на різних глибинах, що створювало вкрай несприятливі умови експлуатації алмазного інструменту, і тому на основі отриманих даних прийнято рішення про визнання недоцільним виконувати пропили на цій відстані, а також на менших відстанях за вищезазначену.
4. Аналіз отриманих результатів свідчить проте, що найбільш оптимальним з позицій рівності форми поверхні заготовки є відстань між пропилами рівна 5 мм.

І.В. Шепеленко, к.т.н., доц.,
Я.Б. Немировський, д.т.н.,
А.М. Артюхов, к.т.н., доц.,
Чернявський О.О.,
Центральноукраїнський національний технічний університет

ВПЛИВ МІКРОРЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ ОСНОВИ НА ФОРМУВАННЯ ПЛІВОЧНОГО АНТИФРИКЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ

Відомо, що якість нанесення антифрикційного плівочного покриття фрикційно-механічним методом в значній мірі залежить від таких факторів: адгезійна здатність матеріалів покриття і попередньо обробленої поверхні основи; структурного і фазового стану; якості поверхні під покриття та інш. Якість обробленої поверхні перш за все оцінюють параметрами шорсткості, але вони не дають повної характеристики мікрорельєфу поверхні, який в значній мірі залежить від виду обробки (абразивна, лезова та інш.). На практиці під антифрикційне плівочне покриття широко застосовують токарну обробку, яка забезпечує утворення регулярного мікрорельєфу із закономірним чередуванням залишкових *гребінців* і западин мікронерівностей. При цьому на форму і

розміри залишкових *гребінців* і западин впливають геометрія різальної частини різця, параметри режиму різання, жорсткість технологічної системи (верстат – інструмент – деталь), змащувально-охолоджувальна рідина тощо. Із названих факторів найбільший вплив на показники мікронерівностей має геометрія різця в плані (головний і допоміжний кути, радіус закруглення різального леза) та величина подачі інструмента, які можна змінювати залежно від вимог нанесення покриття.

Нами проведені дослідження впливу форм і розмірів мікронерівностей, попередньо обробленої точінням, поверхні на формування антифрикційної металевої плівки при попередньому переміщенні антифрикційного бруска (інструменту) відносно напрямку утворення вихідного мікрорельєфу.

Форма і розміри мікронерівностей доповнюють характеристику мікрорельєфу поверхні утвореної токарною обробкою. При цьому, форма залишкових *гребінців* і западин визначається окресленням формоутворюючої частини вершини різця, яка може бути, наприклад, гострою, притупленою, частково з радіусом і прямими відрізками, тільки з радіусом. Розміри *гребінців* і западин, їх площа залежать від величини кутів різця в плані φ, φ_1, радіуса r і величини подачі S різця. Так для розрахунку площі западин між сусідніми гребінками, окрім величини подачі S, достатньо знати глибину западини H.

Нижче наведені формули для розрахунку H для двох випадків:

– вершина різця гостра:

$$H = S\frac{tg\varphi \cdot tg\varphi_1}{tg\varphi + tg\varphi_1}, \text{ мм}, \tag{1}$$

– мікропрофіль утворений тільки радіусним перехідним лезом:

$$H = r - \sqrt{r^2 - \frac{S^2}{4}}, \text{ мм}. \tag{2}$$

Залежності (1, 2) показують, що чим менші S, φ, φ_1 і більший r, тим менша глибина западин і їх площа і навпаки. Тому, можна зробити наступні висновки:

- оскільки залишкові гребінці незалежно від форми робочої частини різця в плані завжди мають клиновидну форму із гострою окрайкою, то кожний із них можна розглядати як окремий різальний клин;

- простір між залишковими гребінцями (западини) слід вважати канавками для розташування стружки, що утворюється в процесі взаємодії інструмента із антифрикційного матеріалу з поверхнею основи.

Отримати якісне покриття на поверхні, яка має грубий регулярний мікрорельєф, складно. Це пояснюється особливостями заповнення міжгребінцевих западин антифрикційним матеріалом. При нанесенні плівки покриття фрикційно-механічним методом, між окремими частинками антифрикційного продукту виникають пустоти. Таке явище негативно впливає на якість покриття, а саме на щільність і суцільність антифрикційної плівки. Для усунення таких недоліків, на наш погляд, доцільно в якості фінішної операції використати один із відомих процесів холодного пластичного деформування - деформуюче протягування.

На наш погляд, використання деформуючого протягування дозволить суттєво підвищить якість покриття, а саме: забезпечить пакетування окремих елементів антифрикційного продукту в суцільну масу; підвищить якість зчеплення антифрикційного матеріалу з основою; забезпечить зміцнення матеріалів покриття основи шляхом поверхневої пластичної деформації; створить мікрорельєф з великою несучою здатністю поверхні.

В.А. Яригін, студ.,
С.П. Вислоух, к.т.н., доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДОЛОГІЯ ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ДЕТАЛІ, ЩО ВИГОТОВЛЕНА МЕТОДОМ 3D ДРУКУ

На сьогодні день найбільш прогресивним способом виготовлення деталей машин і приладів, а також їх моделей, що швидкими темпами заходить на ринок, є технологія 3D друку. Деталі та вузли, котрі отримані за цим принципом, за своїми якісними характеристикам майже не поступаються аналогічним елементам виготовленими іншими способами, а інколи навіть перевершують їх. Наприклад деякі нероз'ємні з'єднання, що отримані за допомогою цієї технології, при виконанні решти доступних методів виробництва потребують значних трудовитрат або виготовити їх в такому виді неможливо. Також до переваг 3D друку можна додати відносну дешевизну виготовлення та простоту технологічного процесу, адже технологу потрібно вибрати лише відсоток заповнення, товщину шару матеріалу, варіант позиціонування готової деталі та швидкість друку (подачу). Практично всі моделі 3D принтерів, які зараз можна знайти на ринку, використовують G-код для керування соплом. Проте програмне забезпечення (ПЗ) при перетворенні 3D моделі деталі у вигляді керуючих кодів для відповідного верстату не враховують характеристику міцності конструкції і встановлюють заповнення рівномірним для всієї довжини (об'єму). Одним із варіантів рішення цієї проблеми є використання більшого відсотку заповнення, що задовольнить вимоги міцності деталі, але це призводить до відчутного збільшення маси, вартості та швидкості виготовлення елементів приладу або вузла.

Одним із найкращих методів рішення задачі отримання потрібних характеристик є пост обробка моделі деталі, що представлена у вигляді G-коду за допомогою штучних нейронних мереж (ШНМ). Шляхом використання сучасного ПЗ методологія роботи з такими мережами є досить простою. Перш за все для навчання ШНМ треба підготувати великий масив даних, у нашому випадку 3D моделей деталей, у вигляді STL-файлів. Після чого за допомогою спеціального програмного забезпечення, наприклад, Repetier Host, перетворити

моделі в код для 3D-принтера. Отримавши файли із моделями, що описані G-кодом, потрібно видозмінити ті частини файлу, які відповідають за ділянки, для яких усереднені характеристики міцності недостатні, та провести їх видозміну в ручному режимі. Після виконання цих дій для всього масиву отриманих файлів, потрібно передати на входи ШНМ початкові файли, а отримані результати порівнювати із обробленими файлами.

Програмне забезпечення, що обробляє 3D-модель, розбиває її на велику кількість шарів, товщина яких задається в налаштуваннях програми (зазвичай 0.2 мм), додаючи до початкової моделі так звані “підтримки”, що створюють точку опори для елементів, які при виготовленні не мають під собою твердої підкладки, або по іншому – “висять” в повітрі. Кожен шар має наступну структуру: опис підтримок (там де це потрібно); опис форми внутрішніх стінок деталі; опис форми зовнішніх стінок деталі; опис сітки заповнення.

У самому файлі також містяться автоматично згенеровані коментарі, котрі позначають номери шарів, а також місця початку структурних блоків, що описано вище. Всі коментарі розпочинаються із знака "крапка з комою" і можуть розміщуватися в будь-якому місці файлу. Програма керування верстату ігнорує всю інформацію, яка міститься після символу початку коментаря і до символу переходу на новий рядок, що робить зміст інформації, яка описана в таких файлах, більш зрозумілим і дозволяє швидко віднайти потрібне місце у коді. Виходячи з цього, створено програмне забезпечення для напівавтоматичної зміни сітки заповнення у місцях, де товщина деталі є найменшою, а жорсткість, котру забезпечує стандартне заповнення, є недостатньою. Алгоритм роботи основної частини програми можна описати наступним чином. Перш за все оператор вводить в програму інформацію про області, в яких будуть виконані зміни, вказуючи діапазон шарів та координат по одній із осей, що будуть обмежувати зони, в яких потрібно змінити заповнення. В такому випадку оператор повинен мати знання у області опору матеріалів для визначення оптимального значення об’єму деталі, внутрішню структуру якого буде змінено. На наступному кроці програма поітераційно, використовуючи наперед заданий шаблон, замінюватиме стандартне заповнення на нове. Данні, що будуть змінюватися на кожній ітерації, вилучатимуться з початкового файлу в пам’ять програми, і в місцях, які відповідають введеним на початку координатам, будуть переписані. Мітками для виділення шарів та ключових місць використовуються коментарі, що наявні у вхідному файлі, наприклад: ";LAYER:150" – позначає номер шару; ";TYPE:WALL-INNER" – внутрішня стінка; ";TYPE:WALL-OUTER" – зовнішня стінка; ";TYPE:FILL" – мітка що відповідає площині заповнення [2]. Після виконання структурних змін, файл знову збирається зворотно і зберігається з новою назвою. Також для налагодження і для перевірки правильності роботи програми додана функція, що порівнює початковий і кінцевий файли і виводить блоки, в яких було проведено зміни у сусідніх вікнах. В даному варіанті оператор в ручному режимі обирає діапазон шарів, а також місця, в котрих буде змінюватися сітка заповнення, а для перевірки результатів роботи має обробити великий масив, досить однотипної та важко-

читабельної інформації. Така підготовка деталі до виготовлення, хоча і включає в себе елементи автоматизації процесу, проте є досить трудомісткою і складною в технічному плані. Адже оператор, який вводить данні в програму, має визначити діапазон координат та шарів, в якому потрібно буде провести зміну внутрішньої структури деталі. В реаліях сучасного виробництва час, що витрачається на підготовку до виробництва, відіграє дуже важливу роль, тому що інколи виготовлення складних деталей має бути виконане в строки, що вимірюються тижнями, а то і днями. Отже такий варіант вирішення проблеми жорсткості слабких складових частин деталі не завжди придатний для використання.

Рішенням поставленої вище задачі є використання штучних нейронних мереж (ШНМ), їх швидкодія та простота взаємодії з ними дозволяє в досить короткий час змінити внутрішнє заповнення деталі на необхідне. Описане вище програмне забезпечення можна використати на етапі створення бази матеріалів для навчання ШНМ. Саме для цих цілей дописано функціонал програми, а саме, можливість збереження введених користувачем даних в окремий файл-таблицю. Для початкового тестового навчання нейронної мережі використано сто деталей, одного формфактору та виду. Найбільш простим варіантом деталей для цих цілей є вал.

Зараз 3D-друк дозволяє легко і швидко виготовити об'єкти практично з будь-яких матеріалів, що використовуються в промисловості для виготовлення деталей, в тому числі металу. Це означає, що перед підприємствами відкрилися великі можливості для випуску нової продукції. При використанні даної технології можна покращити конструктивні властивості деталей, що вже виготовляються на підприємстві. У реаліях сучасності та економічної ситуації в нашій країні велику нішу виробництва займають саме невеликі заводи та підприємства. Виходячи з цього, у таких виробництв є два шляхи розвитку – налагодження технічного процесу для виготовлення великих однотипних замовлень (виконання яких не потребує суттєвого переналаштування і заміни обладнання) або виготовлення широкого спектру невеликих замовлень, що потребує використання універсального обладнання, наприклад 3D-принтерів. Таким чином, в динаміці сучасного ринку 3D-друк зайняв достойну нішу та значно полегшив ряд задач виробництва. Це переломний момент для виробників в плані економії та пришвидшення виготовлення своєї продукції. Саме тому, питання оптимізації процесу 3D-друку з отриманням максимальних характеристик міцності з мінімальними витратами часу та людського ресурсу є найбільш актуальне в ньому. Значне прискорення при виборі такої методики виробництва забезпечують саме ШНМ, які при мінімальних витратах ергатичного комплексу "людина-машина" для свого навчання в подальшому виключають людину зі цієї схеми і самостійно корегують вхідну інформацію для роботи 3D-принтера з метою отримання бажаного результату.

Процеси механічної обробки, верстати та інструмент

Матеріали X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю
6–9 листопада 2019 року, м. Житомир

Компьютерная верстка:
Балицька Н.О.

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 17,0.

Державний університет «Житомирська політехніка»,
вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005