

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

З метою визначення проблем застосування високошвидкісної обробки було проаналізовано вимоги до інструменту, металорізального обладнання для можливості застосування високошвидкісної обробки плоских поверхонь деталей торцевим фрезеруванням. Розглянуті питання використання інструментальних матеріалів, що дозволяють виконувати високопродуктивну чистову обробку.

Ключові слова: високошвидкісна обробка; надтверді матеріали; торцеве фрезерування; металорізальне обладнання.

Постановка проблеми. Запровадження процесів високошвидкісної обробки є одним з основних методів інтенсифікації виробництва. Розробка сучасного обладнання, проектування різального інструмента та оснащення сьогодні ґрунтується на використанні високих швидкостей різання та великих швидкостей лінійних переміщень. Разом з тим, використання процесів високошвидкісної обробки, що супроводжується високими тепловими навантаженнями та підвищеною динамікою процесів, вимагає враховувати ці особливості при проектуванні технологічних процесів та обладнання, застосуванні нових інструментальних матеріалів тощо.

Мета роботи: визначити основні проблеми високошвидкісної обробки плоских поверхонь фрезеруванням та шляхи їх вирішення при проектуванні та використанні технологічного оснащення.

Викладення основного матеріалу. У 1931 р. доктором Золомоном був розроблений патент, в якому він визначив надкритичні швидкості обробки кольорових металів ($V = 610 \dots 762$ м/хв.), після перевищення яких температура різання не збільшується, а, навпаки, знижується, що підвищує стійкість різального інструменту. Такий характер залежності температури різання від швидкості можна пояснити тим, що за певної швидкості деформації відбувається легке руйнування матеріалу, що обробляється. Крім того, при високих швидкостях деформування виникає вивільнення накопиченої потенційної енергії, що знижує опір деформуванню внаслідок внутрішнього розігрівання металу [1]. При високошвидкісній обробці спостерігається локалізація деформації в малому об'ємі зони різання, а також інтенсивний розігрів контактних шарів, що зменшує сили тертя [1].

Процес високошвидкісного різання ґрунтовно вивчався рядом відомих вчених, таких як В.Д. Кузнецовим, В.Л. Кривоуховим, Л.І. Кашириним, М.Н. Ларіним, П.П. Грудовим тощо, в результаті досліджень яких була встановлена низка переваг швидкісної обробки та фактори, які обмежують можливості широкого впровадження цих методів [2–6].

Виконані дослідження не дають однозначного трактування меж зон звичайної та швидкісної обробки. Разом з тим, більшість дослідів умовно поділяють наступні зони [7]:

- звичайна обробка – за $V < 500$ м/хв.;
- високошвидкісна обробка – за $500 \leq V \leq 10000$ м/хв.;
- надшвидкісна обробка – за $V > 10000$ м/хв.

Необхідно зазначити, що встановлені зони видів обробки лише за ознакою швидкості не є коректними у зв'язку з тим, що не враховуються основні фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу та особливості обробки.

При обробці алюмінію швидкість 3000...4700 м/хв., для чавуна і сталі – 1500...2500 м/хв. вважаються високошвидкісними.

Незважаючи на відсутність чіткого поняття «високошвидкісне різання», автори досліджень на свій розсуд запропоновані процеси обробки відносять до високошвидкісних процесів.

Згідно з [3], збільшення швидкості обробки при фрезеруванні сталі з 250 до 750 м/хв. вже є переходом в область високошвидкісної обробки в штамповому виробництві. Швидкість у 2500 м/хв. (замість 250 м/хв. у загальноприйнятому розумінні) при фрезеруванні алюмінію є дуже високою.

У той же час, швидкість 10000 м/хв. при суперфінішному фрезеруванні прес-форм сьогодні вже не вважається надвисокою. Швидкість різання 100 м/хв. при обробці алюмінію явище пересічне, а при обробці високотемпературного нікелевого сплаву досягнення такої швидкості є сенсацією. Тому для алюмінію високошвидкісна обробка починається зі швидкості 1500 м/хв., а для нікелевого сплаву ця межа лежить на рівні 50 м/хв.

Високошвидкісне фрезерування дає ряд істотних технічних переваг, порівняно з традиційним. У першу чергу, істотно збільшується питоме знімання матеріалу в одиницю часу, а, отже, продуктивність та ефективність фрезерування. Високошвидкісній обробці властиво значне зменшення зусиль різання, що особливо важливо при обробці нежорстко закріплених і тонкостінних деталей. При високошвидкісному фрезеруванні тепло швидко відводиться стружкою з зони різання, знижуючи нагрів і деформацію деталі. Істотно підвищується якість фрезерованої поверхні і практично відсутні проблеми дроблення стружки.

За даними авторів [8], на даний час швидкість різання при обробці заготовок із сірих чавунів і вуглецевих сталей складає $V = 100\text{--}300$ м/хв., а при обробці заготовок з важкооброблюваних жароміцних нікелевих і кобальтових сплавів, а також загартованих сталей вона на порядок нижча. Ріст швидкості різання обмежується теплофізичними характеристиками традиційних інструментальних матеріалів (твердих сплавів і швидкорізальних сталей).

Однак лише збільшення швидкості різання може реально істотно підвищити продуктивність і знизити собівартість металообробки. Дійсно, завдяки вдосконаленню заготівельних операцій зменшуються припуски, тобто глибина різання має тенденцію до зменшення. Значення подач на один оберт заготовки або інструменту не можуть бути помітно підвищені через ріст вимог до якості обробки деталей машин. Таким чином, продуктивність процесу формоутворення, що обумовлена величиною подачі в одиницю часу, прямо залежить від частоти обертання заготовки або інструменту, тобто від швидкості різання.

В останні роки важливою передумовою для розвитку високошвидкісного різання (у цьому випадку швидкість V у 10 разів і більше вища за рівень швидкостей, прийнятих для даного оброблюваного матеріалу) є інтенсивна автоматизація й електронізація процесів та устаткування. Так сучасні верстати з ЧПУ, багатоцільові верстати й автоматичні лінії дозволяють реалізувати швидкості $V = 500 \div 5000$ м/хв. Однак зазначене збільшення швидкості V на порядок можливо лише при впровадженні якісно нових інструментальних матеріалів, що мають відповідні тепло- і фізико-механічні характеристики. До них належать кераміка на основі Al_2O_3 і Si_3N_4 синтетичні полікристалічні надтверді матеріали на основі BN (ПКНБ) і полікристалічного алмаза.

Інструмент, який використовується при високошвидкісній обробці, є одним із головних складових технологічної системи і від його працездатності залежить можливість реалізації процесу обробки.

Обробка плоских деталей з високими вимогами до якості обробки поверхневого шару здійснюється в більшості випадків торцевим фрезеруванням. Це дозволяє підвищити продуктивність технологічного процесу по відношенню до абразивного шліфування, створити в поверхневому шарі залишкові напруги стиску та усунути небажані дефекти поверхневого шару.

Для високошвидкісної обробки також застосовуються [3]:

- цільні твердосплавні кінцеві фрези в діапазоні діаметрів від 2,5 до 20 мм;
- кінцеві фрези зі змінними, багатограними пластинами діаметрами від 16 до 40 мм;
- радіусні і фасонні фрези для деталей із криволінійними поверхнями і радіусними переходами;
- допоміжний інструмент.

При цьому максимальна частота обертання інструментів не перевищує $1/3$ допустимих максимальних значень частот обертання.

Цільні кінцеві фрези з твердого сплаву і безвольфрамового твердого сплаву (кермету) є прецизійними інструментами для високопродуктивної обробки сталей, легких і кольорових металів, чавунів, титанових сплавів, сплавів на нікелевій основі і пластиків. Кінцеві фрези з двома і трьома кромками мають, як правило, одну кромку з перекриттям центра і можуть бути використані для осевого врізання і для обробки закритих пазів. Кінцеві фрези з керметів рекомендуються, в першу чергу, при чистовій обробці сталей і чавунів при виготовленні штампів і прес-форм. Для різних випадків застосування рекомендуються різні марки твердого сплаву. Основною маркою твердого сплаву без покриття є особливо-дрібний зернистий твердий

сплав з високою сталістю фізичних і металургійних властивостей. Сплав має високу в'язкість, що дозволяє керувати зносостійкістю. Дрібнозерниста структура гарантує наявність гострих різальних кромок.

Найбільш широко застосовуються сплави, що являють собою комбінацію в'язкого твердого сплаву і зносостійкого покриття нітридами титану для обробки конструкційних і інструментальних сталей. Особливими відмінностями є висока якість оброблюваної поверхні і мінімальна схильність до утворення заусенців. Новий інструментальний матеріал – твердий сплав, що складається з осободрібнозернистої основи і дрібнозернистого покриття, нанесеного методом PVD. Це покриття характеризується високою твердістю і зносостійкістю. Воно запобігає викришуванню різальних кромок, особливо при врізанні та виходу фрези із зони різання.

Режими різання залежать від умов застосування, залежно від умов різання та характеристик технологічної системи режими можуть сильно змінюватись. Збалансовані кінцеві фрези зі змінними багатограними пластинами призначені, в першу чергу, для високошвидкісної обробки алюмінію. Значну перевагу щодо жорсткості кріплення пластин мають фрези з тангенціально закріпленими пластинами. Крім простоти кріплення і малої кількості елементів кріплення пластин, таке розташування забезпечує ряд переваг:

- твердий сплав краще працює на стиск, чим на вигин, і реалізація такого розташування істотно підвищує стійкість пластин;
- конструкція пластин дозволяє реалізувати дуже великі передні кути, що дозволяє значно зменшити сили різання і забезпечувати високопродуктивну обробку алюмінію і легких сплавів.

Конструкція фрез для виробництва штампів і прес-форм також базується на високопозитивній геометрії різання (передній кут до 25 градусів). Позитивні передні кути забезпечують вільне виведення стружки із зони різання та мінімальну потужність різання. Ці особливості гарантують високу продуктивність, особливо при обробці титана, титанових сплавів і алюмінію. Оскільки саме в цій області потрібна максимальна продуктивність, усе більш висока швидкість різання і, відповідно, більш висока частота обертання шпинделя. Виробничими дослідженнями доведена можливість використання стандартної конструкції цих фрез на швидкостях, що лежать в області високошвидкісної обробки. Залежно від діаметра, ці фрези можуть бути використані на частотах обертання до 38000 хв.⁻¹ за умови попереднього динамічного балансування інструментів в зборі з пластинами та оправками. Фрези з позитивними передніми кутами дають можливість осьового врізання в метал, що значно скорочує періоди врізання інструмента та машинний час обробки.

Після осьового врізання можна здійснювати обробку торцем інструмента, тобто виконувати торцеве фрезерування. Цей процес дозволяє дуже швидко обробляти закриті порожнини та зрізати значні припуски.

Останнім часом широко впроваджуються у виробництво інструменти, що оснащені надтвердими матеріалами. Так для обробки алюмінієвих сплавів з високим вмістом кремнію та алюмінієвих сплавів використовується інструмент з кромками із полікристалічного алмаза. Корпуса усіх фрез виготовляються з високоміцного алюмінієвого сплаву, що забезпечує мінімальні моменти у період початку обертання. Застосування фрез із пластинами з надтвердих матеріалів збільшує стійкість інструментів, порівняно з інструментами, що оснащені твердими сплавами. Великі швидкості різання, зменшення зусиль різання, можливість обробки тонкостінних і нежорстких деталей, істотне поліпшення продуктивності та якості оброблених поверхонь значно розширюють можливість високошвидкісної обробки.

На даний час ряд фірм використовує обладнання з частотами обертання до 100 000 хв.⁻¹. При цьому для забезпечення безпечної роботи підвищуються вимоги щодо динамічного балансування інструментів.

Причиною дисбалансів інструмента є похибки базування і закріплення у з'єднаннях: пластинки фрез–корпус фрези, фреза–оправка, оправка–шпиндель верстата та биття окремих елементів фрези, оправки, шпинделя верстата тощо. Особливо гостро проблема необхідності балансування виникає при використанні фрез великого діаметра. Для зменшення похибок розташування інструменту відносно оправки використовуються їх спеціальні конструкції. Разом з тим, це не вирішує повністю завдання точного розташування інструменту відносно осі

обертання шпинделя навіть при використанні звичайних методів динамічного балансування інструментів в зборі.

Останнім часом створені конструкції допоміжних інструментів, що тепер можуть працювати на великих швидкостях обертання зі збільшенням ефективних зусиль затиску та збільшеними вимогами до співвісності точкового дисбалансу. Збалансовані допоміжні інструменти застосовуються для швидкостей обертання, що передбачені конструкціями. Труднощі балансування виникають у зв'язку з тим, що, як правило, інструменти мають дисбаланси, які є характерними практично для всіх конструкцій фрез. Тому навіть ідеально збалансовані оправки не забезпечують відсутності дисбалансу у зборі з інструментом. Це призвело до необхідності конструювання оправок з регулюванням мас спеціальними балансованими кільцями.

Іншою проблемою є необхідність створення стабільного зусилля зажиму, щоб попередити розкріплення інструмента в процесі обертання. Існують конструкції з особливо точними цапгами, з гідропластовими затискними патронами або патронами з термозажимом, що мають дуже високу точність затиску і мінімальне биття інструмента щодо хвостовика патрона. Особливо важливим є те, що при зростанні частот обертання зростають відцентрові сили, які здатні деформувати інструмент, змінити траєкторію його руху і навіть зруйнувати елементи системи шпиндель-верстат-інструмент-деталь. Тому рядом фірм створені затискні патрони з можливістю самозакріплення хвостовиків.

Іншою проблемою є те, що при високошвидкісному фрезеруванні відцентрові сили зростають у 3–10 разів і в деяких випадках перевищують сили різання, що може призвести до руйнування різального інструменту. Так дослідження торцевих фрез показали, що при обертанні інструмента з частотами порядку 20000 хв.^{-1} через дію відцентрових сил у 80 % випадків відбувається розкріплення різальних пластин та руйнування корпусів фрез, що є небезпечним для процесу обробки та життя верстатників. Це ставить завдання перед конструкторами інструментів для високошвидкісного фрезерування:

- враховувати напрям дії відцентрових сил і напрям сил затиску окремих пластинок здійснювати в тому самому напрямі, щоб дія відцентрових сил лише збільшувала зусилля зажиму;
- виконувати розрахунки окремих контрукцій зажимних елементів і передбачити їх неруйнування при великих відцентрових силах;
- виконувати розрахунки корпусів фрез, щоб не допустити їх руйнування у процесі різання;
- оптимізувати конструкції фрез, виключити такі концентратори напруг, як глибокі пази, відсутність радіусів переходів, виключити надлишкову кількість отворів тощо;
- затискання окремих різальних елементів здійснювати динамометричними ключами з необхідним оптимізованим зусиллям затиску для запобігання їх розкріплення в процесі різання;
- за можливістю використовувати суцільні різальні інструменти з попереднім їх розрахунком для уникнення резонансних частот у режимі високошвидкісного фрезерування;
- використовувати інструменти на оптимальних режимах різання та забезпечити належну збірку, балансування і ремонт інструмента.

Використання процесів високошвидкісного фрезерування передбачає створення нових конструкцій металорізального обладнання, здатного працювати на частотах обертання, які значно перевищують звичайні. При цьому нові вимоги висуваються до всіх вузлів обладнання, систем керування, механізмів заміни інструменту, методів захисту робочої зони обробки тощо.

Серед найважливіших завдань при проектуванні металорізального обладнання є:

- врахування фізико-механічних характеристик оброблюваних матеріалів, геометрії та параметрів різального інструменту, який буде використовуватись для обробки, необхідних режимів обробки;
- розробка вузлів і механізмів обладнання, здатних надійно забезпечувати високі швидкості робочих рухів (частоти обертання шпинделів до 100000 хв.^{-1} та лінійні швидкості подач до 25 м/хв.);
- створення високошвидкісних верстатів з потужністю до 100 кВт;
- підвищення динамічних характеристик верстатів, оскільки при використанні високих швидкостей шпиндельні вузли можуть стати потужними генераторами вібрацій;

- зменшення значних теплових деформацій вузлів (за даними [9], в шпindelних вузлах 31–40 % потужності головного приводу перетворюється в тепло);
- покращення динаміки процесів пуску та зупинки механізмів верстатів та зменшення інтенсивності силових збурень при перехідних процесах [10, 11];
- проектування систем контролю зносу інструмента в процесі обробки та систем адаптивного управління;
- оснащення верстатів обладнаннями для зміни інструменту і заготовок, а також пристроями для видалення стружки. Останні є досить важливими, оскільки, наприклад, при фрезеруванні алюмінію зі швидкістю різання 3000 м/хв. і при потужності привода 100 кВт знімання стружки складатиме 1,3 т/год. [11];
- підвищення вимог з техніки безпеки, що виключають травмування обслуговуючого персоналу і пошкодження верстата стружкою, уламками різального інструменту тощо. Деякі дослідники вважають, що токарні верстати, призначені для високошвидкісної обробки, повинні бути оснащені патронами, що автоматично змінюють силу затискання заготовки залежно від швидкості різання.

Висновок. Запровадження процесів високошвидкісної обробки дозволяє суттєво підвищити продуктивність та якість обробки деталей, що вимагає від виробництва проектування нових інструментів, обладнання, оснащення для реалізації цього методу. Разом з тим, процеси обробки з високими швидкостями вивчені недостатньо. Існують різні точки зору щодо підходів до проектування технологічного оснащення, раціональних режимів обробки, правильного вибору інструментальних матеріалів тощо, що ставить нові завдання перед дослідниками процесів високшвидкісної обробки.

Список використаної літератури:

1. *Salomon C.* Verfahren zur Bearbeitung von Metallen oder bei einer Bearbeitung durch schneidende Werkzeuge sich ähnlich verhaltende Werkstoffe // *C.Salomon* // «DRP523594», 1925, 27 November.
2. *Потапов В.А.* Высококоростная обработка // *В.А. Потапов, Г.И. Айзеншток.* – М., 1986. – 60 с.
3. Высококоростная обработка // Оборудование: рынок, предложение, цены : приложение к журналу «Эксперт». – Вып. 1 / «Технополис 2100».
4. *Потапов В.А.* Современное оборудование для сверхкоростной обработки // *В.А. Потапов* // Станки и инструмент. – 1993. – № 5. – С. 36–38.
5. *Оксли П.* Скорость деформации при резании металла // *П.Оксли* // Тр. амер. об-ва инженеров-механиков. Сер. Б. Конструирование и технология машиностроения. – 1963. – 85, № 4. – С. 20–24.
6. *King R.I.* Product design implications of new higspeed milling techniques // *R.I. King, J.C. McDonald* // Trans. ASME. – 1976. – № 4. – Pp. 1170–1175. – “Repr”. – “ASME Pap.”. – 1976. – № DE–22.
7. Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні : підручник / *А.І. Грабченко, М.В. Везуб, Ю.М. Внуков* та ін. ; за ред. *А.І. Грабченка.* – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 507 с.
8. *Боровский Г.В.* Гамма торцовых фрез для автоматического оборудования // *Г.В. Боровский, Е.А. Филлипова, С.К. Беляев* // Станки и инструмент. – 1989. – № 9. – С. 20–22.
9. *Орликов М.Л.* Динамика станков // *М.Л. Орликов.* – К. : Выща школа, 1989. – 268 с.
10. High Speed Cutting (HSC). MARWIN cutting tools/ 2001.
11. *Broskea T.I.* Praktical application of PCBN in Industry // *T.I. Broskea* // Schneidstoffe und Werkzeuge: Tagung Dusseldorf. – 19–20 Sept. – Dusseldorf : VDI–Verlag, 1989.

ВИГОВСЬКИЙ Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування, проректор з науково-педагогічної роботи Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обробка металів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2015