

Г.М. Виговський, к.т.н., проф.  
Житомирський державний технологічний університет

## ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУЮВАННЯ ФРЕЗ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ОБРОБКИ

*На основі розглядання особливостей високошвидкісної обробки поверхонь визначено напрями вдосконалення інструментів*

**Вступ. Постановка проблеми.** Вирішення важливої народно-господарської проблеми – підвищення продуктивності та якості обробки плоских поверхонь деталей – призводить до необхідності використання процесів високошвидкісного чистового торцевого фрезерування. Ці процеси характеризуються не тільки збільшенням швидкості різання, але й відмінністю характеристик процесу різання, підвищеною теплонапруженістю та динамікою процесу, зростанням гіроскопічних явищ тощо, що змінює умови: утворення поверхневого шару оброблених поверхонь; зносостійкість застосованих інструментів; динамічний вплив на технологічну оброблювану систему тощо. Якість оброблених поверхонь, зносостійкість чистових торцевих фрез, продуктивність обробки залежить від забезпечення найбільш досконалої технології та режимів обробки, розробки концепції раціональної структури технологічної оброблюваної системи та режимів її експлуатації.

При цьому необхідним є визначення основних напрямів проектування інструментів з врахуванням особливостей процесів високошвидкісної обробки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота пов'язана з виконанням НДР Житомирського державного технологічного університету «Теоретичні і технологічні основи розвитку способів формоутворення плоских поверхонь торцевим лезовим інструментом» 0112U001791.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З метою широкого впровадження процесів високошвидкісного фрезерування багатьма авторами [1–18] запропоновані різні конструкції інструментів та визначені раціональні умови їх експлуатації. При цьому відсутні єдині підходи та рекомендації до проектування різального інструмента.

**Мета роботи.** Полягає в розгляданні існуючих досліджень процесів високошвидкісної обробки плоских поверхонь фрезеруванням та формулювання основних вимог до найважливішої складової технологічної системи – інструмента.

**Викладення основного матеріалу.** Застосування технології високошвидкісної обробки висуває додаткові вимоги до інструмента, верстата і процесу підготовки виробництва. Переважна кількість сучасних конструкцій торцевих фрез виготовляється з механічним кріпленням пластин. Так фірмою *Sumitomo Electric* виготовляються торцеві фрези зі змінними пластинами класу М з чотирма різальними кромками, при цьому низькі сили різання досягаються клиноподібними різальними кромками (рис. 1). Торцеві фрези *Sumitomo* є високоточним і високопродуктивним інструментом для обробки конструкційних матеріалів. Використання пластин *Sumiboron* з кубічного нітриду бору дозволяє збільшити швидкість різання до 1500 м/хв.

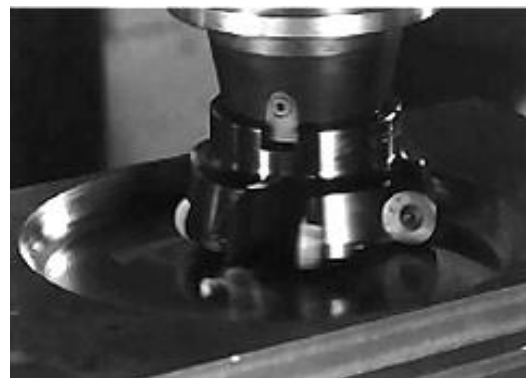


Рис. 1. Торцеві фрези конструкції фірми *Sumitomo Electric*

Фірмою *Widia*, яка займає сьогодні провідне місце з виробництва збірного твердосплавного інструмента (більше 40 марок твердих сплавів), виготовляє збірні торцеві фрези із різального матеріалу на основі карбіду вольфраму (рис. 2).



Рис. 2. Торцеві фрези конструкції фірми Widia

Серія *Future-Mill* – чергова ступінь розвитку виробничої програми *KORLOY* в галузі фрезерування (рис. 3).



Рис. 3. Фрези серії *Future-Mill*

Сфера застосування нових фрез – високопродуктивна, економічна обробка площин, пазів, прямокутних уступів у виробках з різних конструкційних матеріалів на невеликих обробних центрах і фрезерних верстатах із ЧПК. Відмінними рисами нових фрез є: простота конструкції, можливість одержання точних уступів у  $90^\circ$ , використання позитивних передніх кутів і низькі зусилля різання.

Фрези оснащуються міцними платівками з чотирма ефективними різальними кромками. Матеріал і геометрія пластин спеціалізовані за групами оброблюваних матеріалів і типам виконуваних операцій. Фрези виготовляються в двох виконаннях: з циліндричним хвостовиком типу «*Weldon*» (діаметри 25, 32, 40, 50 і 63 мм) і насадними (діаметри 50, 63, 80, 100 і 125 мм).

Базові рекомендації з правильного підбору пластин і призначенню стартових режимів різання залежно від виконуваної операції й оброблюваного матеріалу наведені в таблиці 1 (NCM – твердий сплав з покриттям  $\text{TiCN/Ti/Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  (CVD); PC – твердий сплав з покриттям  $\text{TiAl/Ti}$  (PVD).

Таблиця 1

Вибір режимів різання

Оброблюваний матеріал	Марка сплаву	32–63 (діапазон діаметрів фрез)		80–125 (діапазон діаметрів фрез)	
		$V$ (м/хв.)	$f_z$ (мм/зуб)	$V$ (м/хв.)	$f_z$ (мм/зуб)
		$P$ (ISO)	NCM325	100–250	0,050,3
	NCM335	100–220	0,05–0,25	120–220	0,08–0,25

	PC230	100–220	0,05–0,25	100–220	0,1–0,25
M (ISO)	NCM335	80–180	0,05–0,2	80–180	0,1–0,25
K (ISO)	NCM310K	200–300	0,08–0,25	200–280	0,1–0,25
	NCM320K	180–250	0,08–0,25	180–250	0,1–0,25
	PC215K	150–250	0,08–0,25	150–230	0,1–0,25
Сплави Al	H01	400–1000	0,05–0,4	400–1000	0,1–0,4

Торцеві фрези (*Double Mill*) фірми *KORLOY* дозволяють зменшити сили різання завдяки подвійній позитивній геометрії та мають підвищену жорсткість (рис. 4). Торцеві фрези серії *Mill-Max* виготовляються з механічним закріпленням пластин в касетах (рис. 5).

Твердий сплав з CVD-покриттям NC310 використовується для високошвидкісної обробки сталі і ковкого чавуну, що пояснюється їх високою зносо- і термостійкістю, високою міцністю.

Пластини з алмазним покриттям серії ND гарантують кращу якість оброблених поверхонь, забезпечують, як мінімум, у 10 разів більший термін роботи й у 2–3 рази більш високі швидкості різання, ніж традиційні твердосплавні пластини.

Для високошвидкісної обробки чавунів, а також алюмінію промисловістю широко використовуються як різальний матеріал такі матеріали, як кермети. Кермети – матеріали на основі Ti, мають високу термо- і зносостійкість, малу схильність до дифузії, що дозволяє підвищити розмірну точність і шорсткість обробленої поверхні.

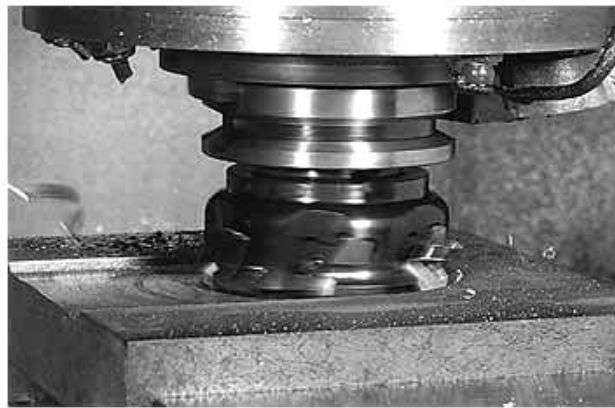


Рис. 4. Процес обробки деталей торцевими фрезами *Double Mill*

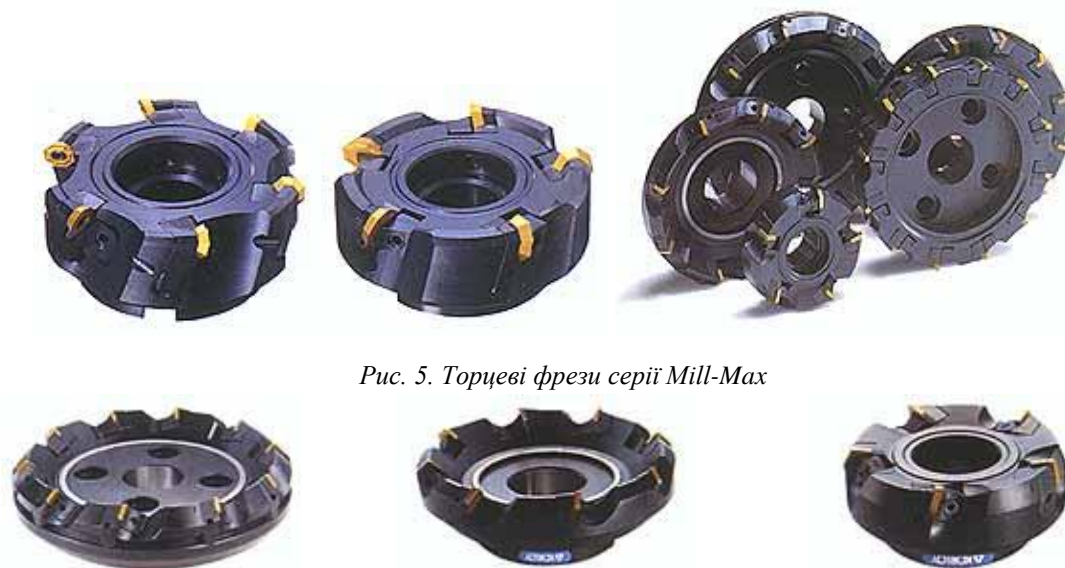


Рис. 5. Торцеві фрези серії *Mill-Max*

AD 4000(ADM), AD5000  
(Ø80–Ø315)  
Для фрезерування  
конструкційної сталі,

AE 4000(AEM), (Ø80–Ø315)  
Для фрезерування  
конструкційної сталі,  
інструментальної сталі і

EF4000(EFM), (Ø80–Ø315)  
Винятково для фрезерування  
алюмінію і легких сплавів

легованої сталі і точного  
чавунного лиття



EP 4000(ЕРМ), EP5000,  
( $\varnothing 80$ – $\varnothing 315$ )  
Для фрезерування легованої  
сталі і ливарного чавуну

нержавіючої сталі



EN4000(ENM), ( $\varnothing 80$ – $\varnothing 315$ )  
Винятково для фрезерування  
ливарного чавуну



PP4000(PPM), ( $\varnothing 80$ – $\varnothing 315$ )  
Для фрезерування сталі,  
легованої сталі і чавунного  
лиття

Фрези *CoroMill 790 Al* використовуються для обробки алюмінію в умовах високошвидкісної обробки (HSM) (рис. 6).



Рис. 6. Фрези *CoroMill 790 Al* для високошвидкісної обробки

Фрези мають підвищену жорсткість закріплення пластин відносно посадкового гнізда фрез, корпуси яких виготовляються термообробленими і з'єднуються з хвостовиками *Coromant Capto*.

Збалансовані кінцеві фрези зі змінними багатограничними пластинами призначені, в першу чергу, для високошвидкісної обробки алюмінію. Фрези випускаються як зі спеціальними, так і з пластинами за стандартом ISO. Спеціальні пластини на фрези встановлюються тангенційно з малою кількістю елементів кріплення пластин. Тангенційне розташування пластин дозволяє створити в твердому сплаві напруження стиску й істотно підвищити стійкість пластин. Передні кути досягають значень до  $38^\circ$ , що у сполученні зі збалансованим корпусом інструмента максимально відповідають високошвидкісній обробці алюмінію і легких сплавів.

Особливостями конструкцій є великі порожнини для розміщення стружки. Конструкція фрези забезпечує мінімальну потужність різання та високу продуктивність, особливо при обробці титану, титанових сплавів і алюмінію. Проведені дослідження показали 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  $38000 \text{ хв}^{-1}$ . Фрези, закріплені на оправках, динамічно збалансовані.

Спеціально для високопродуктивної обробки алюмінієвих сплавів, інших алюмінієвих сплавів і інших абразивних матеріалів була створена гама інструмента із кромками з полікристалічного алмазу [14]. Корпуса всіх фрез виготовляються з високоміцного алюмінієвого сплаву. Завдяки незначним обертовим масам забезпечується плавне обертання, вільне від вібрацій. На алюмінієвий корпус нанесене тверде покриття, у результаті твердість поверхні складає від 64 до 70 HRC. Різальні частини оснащені вставками з полікристалічного алмазу *ПКА*. Фрези забезпечують обробку поверхонь із шорсткістю менше  $Ra = 0,5 \text{ мкм}$ . Застосування фрез із пластинами з *ПКА* призводить до істотного збільшення стійкості та продуктивності обробки, порівняно з традиційними інструментами із пластинами з твердого сплаву. Процес чорнового високошвидкісного фрезерування здійснюється монолітними фрезами з твердого сплаву (*HSC*), або збірними фрезами із вставками з твердого сплаву. Твердість, а отже і стійкість такого інструмента досить

висока, що дозволяє обробляти загартовану сталь. Висока швидкість різання і велика температура в його зоні сприяють зменшенню сил різання. Навіть при малих значеннях осьової і радіальної глибин різання висока швидкість видалення металу (включаючи загартовану сталь) обумовлена високими швидкостями різання і значень робочих подач. При цьому, геометрія сучасного різального інструмента проектується для обробки визначених типів матеріалів з різними параметрами *HSM* обробки.

На ВАТ «АвтоВАЗ», ракетно-космічному заводі імені Хрунічева [13] створені обертові інструменти з корпусами з легких сплавів для високошвидкісної обробки, а також спеціальні оправки і патрони, що відрізняються малим дисбалансом тощо.

Особливо перспективним слід вважати застосування різальних ножів із нітриду бору при лезовій обробці сирих і загартованих чавунів. Для сирих чавунів швидкість різання складає 900–1000 м/хв. При цьому у співставленні з твердосплавним інструментом швидкості різання збільшуються майже на порядок, ресурс інструмента та якість обробки зростає.

Досвід застосування різальних інструментів свідчить, що найбільш ефективним є застосування алмазного інструмента на чистових операціях при обробці деталей із кольорових металів і їх сплавів, а також із полімерних композиційних матеріалів [14]. Алмазне фрезерування застосовують для обробки деталей із кольорових металів і сплавів з величиною припуску не більше 0,1–0,15 мм та високими вимогами до площинності обробки.

Процес фрезерування має специфічні особливості, що накладають певні обмеження на конструкцію різального інструмента. Так фрези зі стандартним виконанням приєднувальної частини рекомендується використовувати до частот обертання, що не перевищують 8000 хв<sup>-1</sup>.

Інструмент, який використовується для високошвидкісної обробки з частотою обертання понад 8000 хв<sup>-1</sup>, повинний мати підвищену точність по радіальному биттю, малий дисбаланс і конструкцію, що гарантує безпеку експлуатації на високих частотах обертання. Як правило, потрібне динамічне балансування такого інструмента.

Менші значення діаметрів фрез обмежуються вимогою переважно симетричного розташування різальних пластин, що особливо важливо для фрез малого діаметра, та як виникають великі відцентрові сили, навіть за умови використання порівняно невеликих платівок.

Для всіх розглянутих вище інструментів при високошвидкісному фрезеруванні необхідно або використовувати для закріплення фрез попередньо збалансований допоміжний інструмент, або балансувати фрези з пластинами в зборі із допоміжним інструментом.

Рядом досліджень торцевих фрез встановлено, що при швидкостях порядку 20000 хв<sup>-1</sup> через дію відцентрових сил у 80 % випадків відбувається розкріплення різальних пластин, або касет із пластинами, а у 11 % випадках руйнуються корпуси фрез. Подібні явища виникають через неправильне силове замикання елементів, що з'єднуються, і їхню недостатню міцність. Істотно важливо, що чим вища твердість корпусів фрез, тим скоріше вони руйнуються. Глибокі радіальні пази, недостатньо великі радіуси переходів, ексцентричні осьові отвори є концентраторами напруг, що призводить до руйнування. Установка пластин і касет повинна здійснюватися тільки за допомогою динамометричних ключів. Наявність забруднення і неправильне змащення елементів затискного клина і гвинта призводять до зниження частоти обертання на 20 %.

Виникнення зазначених вище проблем можна уникнути шляхом застосування суцільних інструментів. Однак і тут можуть виникати явища руйнування інструментів з довгою виступаючою робочою частиною під дією власних коливань. Чим більше співвідношення між довжиною і діаметром інструмента, тим менша частота резонансу. При цьому можуть виникнути вібрації навіть без різання, тільки при обертанні шпинделя, у результаті чого з'являється дисбаланс, що через додатковий вплив згинаючих зусиль продовжує наростати доти, поки не настане руйнування інструмента.

Такі явища можуть виникнути в інструменті, власний резонанс якого знаходиться в діапазоні частот обертання шпинделя. Фреза вже при звичайних частотах обертання під дією власних коливань починає відхилятися від осі обертання і внаслідок виниклого дисбалансу ламається ще до початку роботи. Тому при розробці технологічного процесу потрібно звертати увагу на відповідний підбір операцій механічної обробки й уникати застосування дуже довгих інструментів та створювати оптимізовані конструкції деталей фрез, розрахованих безпосередньо для високошвидкісної обробки, де використання надто довгих інструментів просто не передбачається.

Проект стандарту *DIN* «Фрезерні інструменти для високошвидкісної обробки» передбачає обов'язкове маркування інструмента з вказівкою максимально припустимої частоти обертання, а також додаток спеціальних інструкцій з належного складання, балансування і ремонту інструмента. Дуже важливим є підхід до безпеки використання інструментальних систем так, щоб кожне складання знаходилося в межах частот обертання за показниками найслабших окремих компонентів.

Навантаження, що діють на інструмент при різанні, є вирішальним чинником у технологічній підготовці виробництва і часто визначають практичну доцільність тієї або іншої операції [6]. Ці навантаження визначають інтенсивність зносу різального інструмента і ступінь деформування виробу в

процесі обробки. Інтенсивність зносу інструмента визначає зміну розмірів деталі в процесі обробки, вартість переточувань і питому вартість інструмента в перерахуванні на одну оброблену деталь. Надмірні навантаження викликають великі згинальні деформації, що можуть призвести до поломки інструмента.

Якщо навантаження на інструмент такі, що при різанні перевищується межа пружності матеріалу заготовки, має місце пластична деформація і виявляються обмеження за товщиною стінок виробу. Тому підвищення продуктивності фрезерування обмежується практично припустимими навантаженнями на різальний інструмент. Дослідженнями встановлено, що швидкість різання впливає на сили різання і, відповідно, визначає навантаження на фрезу. Так при підвищенні частоти обертання шпинделя з 4000 до 20000 хв.<sup>-1</sup> при чорновій обробці призводило до зменшення бічного навантаження на 70 %. Для всіх експериментів характерне істотне зменшення навантаження на фрезу при збільшенні швидкостей різання. Виявилось можливим одержати значно більш тонкі стінки на виробі, ніж при традиційних швидкостях різання, кращій прямолінійності поверхонь, більшій глибині різання і більш жорстких допусках. При цьому є можливість змінювати напрямок і величину сил різання, які діють на виріб при фрезеруванні, шляхом вибору швидкості різання, подачі і глибини різання.

Фірмою *KENNAMETAL HERTEL* виготовляються торцеві фрези зі змінними, багатограними пластинами системи *Fix-Perfect* (за стандартами фірми) для обробки уступів з кутом у плані 90° в діапазоні діаметрів від 40 до 125 мм та торцеві фрези з касетами із кромками з полікристалічного алмазу (*ПКА*) у діапазоні діаметрів від 63 до 200 мм. Всі інструменти поставляються в збалансованому виконанні з дозволеною граничною частотою обертання 1/3 від максимальних значень отриманих при сертифікаційних дослідженнях.

Іншим важливим параметром, крім режимів обробки, є спосіб фрезерування. Дослідження показали, що з погляду стійкості і шорсткості, найбільш оптимальним є попутне фрезерування.

Фрези *RPF* фірми *KENNAMETAL HERTEL* – це високопродуктивні інструменти, призначені, в першу чергу, для обробки деталей авіаційної промисловості і для застосування в штампопресформовому виробництві. При торцевому фрезеруванні ці фрези забезпечують високу якість обробленої поверхні і точність обробки. Для всіх розглянутих вище інструментів при високошвидкісному фрезеруванні необхідно або використовувати для закріплення фрез попередньо збалансований допоміжний інструмент, або балансувати фрези з пластинами в зборі з допоміжним інструментом. Останнім часом фірма *KENNAMETAL HERTEL* перевірила і поліпшила конструкцію більшості своїх допоміжних інструментів, які тепер можуть працювати на швидкостях обертання більш 8000 обертів на хвилину. Фірма збільшила ефективні зусилля затиску і посилила вимоги до співвісності, допустимому дисбалансові і безпеці інструмента, зв'язаної з високими швидкостями обертання і відповідно до цих вимог розробила нові конструкції допоміжного інструмента.

Балансують допоміжні інструменти за допомогою кілець і балансування виконується в тих випадках, коли не може бути гарантована точна співвісність балансованого допоміжного інструмента і змонтованого на ньому різального. Відцентрові сили від незбалансованих компонентів викликають вібрації, що призводять до нестабільних умов обробки.

Розвиток процесів високошвидкісної обробки перш за все пов'язаний із застосуванням нових інструментальних матеріалів, у першу чергу, різальної кераміки і полікристалічних надтвердих матеріалів [8].

Найважливішим показником, що визначає інтенсивність і обсяг впровадження високошвидкісного фрезерування в промисловості, є його економічна ефективність.

На московському заводі різальних інструментів «Фрезер» налагоджене виробництво торцевих хвостових і насадних фрез діаметром 20–400 мм (головним чином касетних регульованих) з механічним кріпленням змінних різальних платівок із ПКНБ і кераміки різних марок, розмірів і форм. Основне призначення нової гама фрез – високопродуктивна обробка площин чавунних і загартованих сталевих корпусних деталей на сучасному автоматизованому устаткуванні. Фрези діаметром 125–400 мм оснащені механізмом точного регулювання положення касет в осьовому напрямку, завдяки чому торцеве биття різальних кромки не перевищує 0,005 мм. У результаті поліпшуються умови роботи зубів фрези, зменшується знос пластин і знижується шорсткість обробленої поверхні.

В даний час розроблена і підготовлена до виробництва нова конструкція фрез, оснащена механізмами регулювання як осьового, так і радіального биття різальних кромки, з точністю 0,005 мм. У результаті забезпечення рівномірного навантаження на зуби істотно підвищується надійність роботи фрези і якість обробленої поверхні. Наявність додаткового механізму регулювання кутового положення зачисних різальних кромки дозволяє збільшити подовжні подачі при чистовій обробці фрезами великого діаметра (250–500 мм).

Якість і надійність інструментів багато в чому визначає ефективність процесу торцевого ельборного фрезерування: продуктивність і стійкість фрез, якість обробленої поверхні [10].

Конструювання фрез здійснювалося на базі малогабаритних циліндричних різцевих уставок зі НТМ,

що випускаються вітчизняною промисловістю. В основу розроблених конструкцій багатозубих торцевих фрез, покладений принцип створення універсальних збірних фрез без заточення їх у зборі; різці заточуються окремо від корпусу фрези, а потім за допомогою регульовальних гвинтів точно (до 0,01–0,02 мм) установлюються у фрези. Це дозволяє виключити складну і трудомістку операцію заточення фрез у зборі, а також дає можливість у випадку поломки одного з різців замінити його без переточування всієї фрези. Закріплення різців здійснюється клиновим затиском. Конструкція кріплення різців дозволяє змінювати геометрію різальної частини фрези для обробки матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками.

У зв'язку з малими розмірами кристалів НТМ знімання металу за один прохід при роботі звичайної торцевої фрези не перевищує 0,8–1,0 мм; для обробки деталей з великими припусками доцільно застосовувати торцеві ступінчасті фрези. На базі збірної торцевої фрези створений цілий ряд конструкцій торцевих ступінчастих фрез, що дозволяє оброблювати за один прохід до 3,0 мм.

Працездатність інструментів зі НТМ при переривчастому різанні з наявністю ударних навантажень трохи знижується. Для підвищення ефективності використання торцевих фрез зі НТМ існує ряд конструкцій фрез з пружними елементами, у яких корпус і хвостовик зв'язані між собою пружними елементами, що знижує ударні навантаження. Пружність фрез можна регулювати залежно від умов роботи.

Для швидкісного фрезерування сталей найбільш широке поширення одержали торцеві твердосплавні фрези [9]. Вони прості у виготовленні й експлуатації, мають твердий масивний корпус, міцні вставні різці (зуби) і, що найбільш характерно при фрезеруванні сталей, негативні передні кути.

Процес фрезерування, як відомо, протікає в умовах ударного і змінного навантаження.

Негативний передній кут у сполученні з позитивним кутом нахилу головної різальної кромки є основною умовою успішного застосування торцевих твердосплавних фрез для швидкісного фрезерування сталей. Це сполучення кутів робить різальну кромку більш міцною і охороняє її від сколювання і викришування.

При негативному передньому куті в момент врізання фрези у оброблювану деталь удар сприймає та частина різця, де пластинка твердого сплаву має найбільшу міцність.

При негативному передньому куті пластинки твердого сплаву фрези працюють на стиск, тобто на той вид деформації, при якій твердий сплав працює найкраще. Межа міцності твердих сплавів при стиску винятково висока і досягає 450 кг/мм<sup>2</sup>.

При позитивному передньому куті пластинки працюють на вигинанні, тобто на той вид деформації, якому твердий сплав пручається дуже слабо. Так, наприклад, для сплаву Т5К10 межа міцності при вигинанні дорівнює 115 кг/мм<sup>2</sup>, а для сплаву Т15К6 – 110 кг/мм<sup>2</sup>.

Недоліком фрез з негативним переднім кутом є те, що при їхній роботі виникають більші, ніж при позитивному куті, сили різання, потрібна велика потужність і жорсткість верстатів.

Широке застосування для високошвидкісної обробки торцевих фрез, які оснащені металокерамічними твердими сплавами, пояснюється також їх високою червонотійкістю (до 850–900 °С). Правильне використання твердих сплавів припускає застосування для кожної конкретної умови обробки металів різанням цілком визначеної групи і марки твердого сплаву.

Для обробки сталей тверді сплави групи ВК через їх меншу зносостійкість (порівняно з твердими сплавами групи ТК, як правило, не застосовуються, і тільки в окремих випадках, наприклад, для обробки нержавіючих сталей, сталей, загартованих на високу твердість, і сплавів аустенітного класу застосовують твердий сплав групи ВК.

Менша зносостійкість твердих сплавів групи ВК, порівняно з твердими сплавами групи ТК, при обробці сталей пояснюється більш підвищеними, порівняно зі сплавами групи ТК адгезійними властивостями, тобто підвищеною схильністю твердих сплавів ВК до адгезії з оброблюваною сталлю при високих температурах і тисках, що мають місце при швидкісному різанні.

З цих причин тверді сплави групи ВК не змогли одержати застосування при швидкісній обробці сталей і, зокрема, при швидкісному фрезеруванні сталей торцевими фрезами.

Таким чином, для швидкісного фрезерування сталей торцевими фрезами основним матеріалом частини, що ріже, є тверді сплави групи ТК.

Властивості твердого сплаву Т15К6 за швидкістю різання вищі, ніж для твердого сплаву Т5К10, приблизно на 40 % і твердого сплаву Т14К8 – приблизно на 10–15 %.

До основних вимог, яким повинні задовольняти конструкції торцевих фрез при швидкісному фрезеруванні, належать: надійність і твердість кріплення різців (зубів) у корпусі фрези; надійність і жорсткість закріплення самої фрези в шпинделі фрезерного верстата; простота заточення фрези в зборі; можливість точної установки різців в осьовому і радіальному напрямках у корпусі фрези без наступної заточки; простота виготовлення й експлуатації фрези.

Для високошвидкісного фрезерування алюмінію з великою подачею фірма *ISCAR* розробила різальні пластини з гвинтовими кромками та здійснюється ступінчасте врізання в заготовку, зменшується сила

різання, підвищується стабільність положення інструмента і поліпшується відвід стружки. Полірування передньої поверхні пластини сприяє зменшенню тертя, зниженню тепловиділення в процесі різання і підвищенню стійкості інструмента. Для високошвидкісної обробки поверхонь великих деталей розроблена збірна торцева фреза, у корпусі якої виконані канали, спрямовані до кожної різальної пластини і призначені для подачі МОР і відводу стружки з зони різання. Для забезпечення високої якості складання всі опорні поверхні корпусу шліфують.

Фреза оснащена пластинами типу *LNCR*, що мають дві виступаючі вершини, утворені різальними кромками. Великі позитивні передні кути пластини поліпшують відвід стружки; її опорні ділянки забезпечують точну установку в корпусі у радіальному й осьовому напрямках, а також надійне кріплення. За допомогою гвинтів усувається дисбаланс фрези, що дуже важливо при високошвидкісній обробці. Ця фреза призначена для суперчистої обробки деталей з алюмінію при  $v = 925$  м/хв.,  $S_z = 0,1$  мм/зуб і глибині різання 0,2 мм.

Основними напрямками розробки торцевих фрез є створення конструкцій:

➤ зі ступінчастим розташуванням різальних елементів – для обробки деталей з підвищеними припусками;

➤ з регулюванням і переналаджуванням взаємного положення різальних елементів;

➤ з оснащенням пластинами з різних інструментальних матеріалів та оптимальною для кожного оброблюваного матеріалу геометрією;

➤ з використанням напайних різальних елементів (циліндричні і прямокутні вставки, твёрдосплавні багатогранні пластини з напаяним в одній з вершин *PCBN* або *PCD*), так і змінними круглими або багатограними пластинами суцільної або двошарової конструкції.

Економічний ефект від впровадження інструмента з *PCD* і *PCBN* при високошвидкісній обробці деталей з чорних і кольорових металів, неметалічних матеріалів забезпечується [13]:

➤ за рахунок збільшення швидкості різання в 5–15 і продуктивності обробки в 1,5–10 разів;

➤ за рахунок підвищення якості обробленої поверхні і збільшення стійкості інструмента як мінімум на порядок, а для інструментів з *PCD* – до 100 разів;

➤ за рахунок заміни шліфування високотвердих деталей на лезову обробку.

У сучасному машинобудуванні в зв'язку зі збільшенням використання алюмінієвих сплавів, поширенням високошвидкісної обробки стало питання про визначення максимально допустимої частоти обертання фрез зі змінними різальними пластинами. Це зв'язано з вимогами по безпеці при високих частотах обертання інструмента [11].

Максимальна частота обертання фрези ( $n_{max}$ ) обмежується відцентровою силою, що діє на СМП, що не повинна перевищувати визначеного значення. У більшості фрез зі СМП, що випускаються в даний час для обробки алюмінієвих сплавів, використовується радіальне розташування СМП із кріпленням їх гвинтом через центральний отвір [11].

При використанні однакових СМП, при збільшенні діаметра фрези, а також зі збільшенням маси пластини максимально допустима частота обертання фрези зменшується (рис. 7).

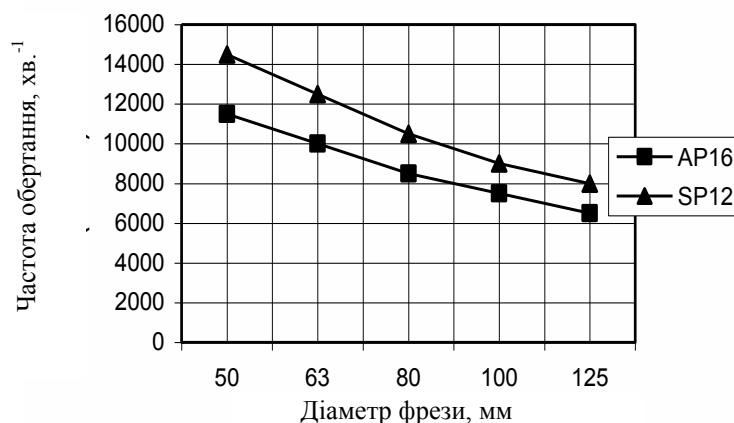


Рис. 7. Графік залежності максимальної частоти обертання фрези від діаметра фрези і типу використовуваної СМП

Необхідність скорочення часу обробки і розвиток нових інструментальних матеріалів, стали однією з головних причин значного прискорення частоти обертання інструментів. В даний час вона знаходиться в інтервалі 15000–40000 хв.<sup>-1</sup>. Конструктивно обумовлена асиметрія інструментів, а також квадратична



залежність між частотою обертання шпинделя і відцентровою силою, що створює дисбаланс, роблять використання незбалансованих різальних інструментів і інструментальних патронів ризикованим, в деяких випадках у зв'язку з виникненням необхідності ремонту більш дорогим і призводить у результаті до недостатньо високої якості поверхні і недотриманню допусків [12].

У принципі балансування стає необхідною вже при середніх частотах обертання, а при більш високих (10000–20000 хв.<sup>-1</sup>) балансування в одній площині необхідне. При подальшому підвищенні частоти обертання вона перетворюється в обов'язкову операцію, причому, якщо необхідно домогтися оптимальної якості поверхні заготовки, максимально можливої стійкості інструментів і підвищення терміну служби шпинделя навіть у двох площинах.

При реалізації задач чистової обробки з високими вимогами до якості одержуваної поверхні і допускам необхідно по можливості звести до мінімуму деформації на вершині інструмента, викликані діючими за наявності дисбалансу силами. Клас точності балансування G 6,3 відповідає, наприклад, при частоті обертання інструмента 10000 хв.<sup>-1</sup> припустимому зсувові його центра на 6 мкм, а при 20000 хв.<sup>-1</sup> – на 3 мкм. Тому тут безумовно необхідно вимагати і забезпечувати дотримання щонайменше класу точності G 6,3. При фінішній обробці не виключені необхідність і більш високих класів точності балансування. У такому випадку необхідно балансування інструментів і інструментальних оправок робити в шпинделі після їхньої заміни [12].

Авторами [15–18] розроблено ряд конструкцій торцевих фрез для чистової, напівчистової та чорнової обробки. В конструкціях враховані особливості процесів швидкісного різання з можливістю обробки деталей зі швидкостями до  $V = 25$  м/с. Фрези дозволяють виконувати обробку чавунних та загартованих сталевих деталей з глибинами різання до  $t = 8$  мм. При цьому враховані можливості створення збалансованих конструкцій та протидії розкріплення різальних елементів у процесі різання. Для забезпечення раціональних умов різаннями фрезами використана косокутна геометрія різальних елементів із надтвердих матеріалів.

Розглядання основних конструктивних елементів спроектованих торцевих фрез [15–18] та умов їх експлуатації дозволяє визначити основні напрями їх подальшого вдосконалення (рис. 8).

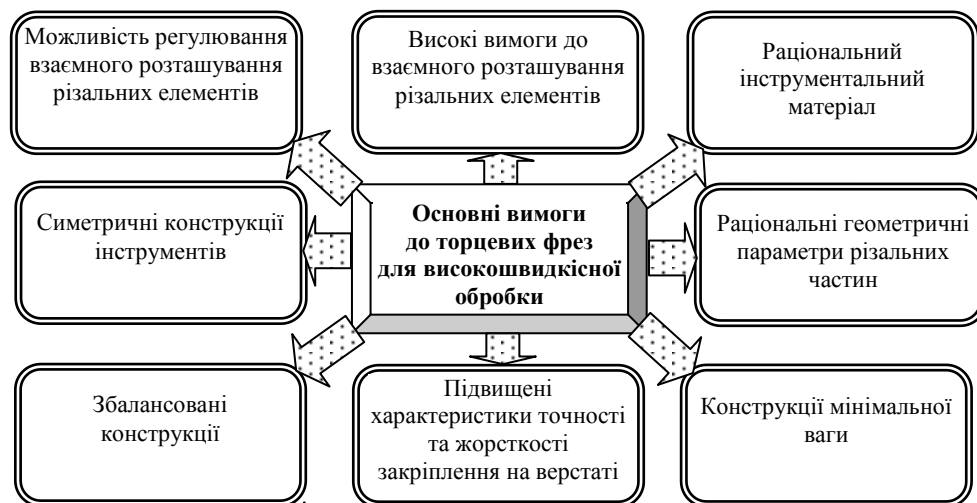


Рис. 8. Основні вимоги до конструкції торцевих фрез для високошвидкісного фрезерування

**Висновки.** При запровадженні високошвидкісного фрезерування основними вимогами до торцевих фрез є:

1. Необхідність оптимізації конструкцій торцевих фрез, геометрії їх різальних ножів, а також режимів різання.
2. Створення надійних засобів контролю стану торцевих фрез (з можливістю заміни зношених елементів) і якості в процесі обробки.
3. Визначення раціональних інструментальних матеріалів для оброблюваних матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками.
4. Застосування конструкцій інструментів з можливістю балансування. При частоті обертання більш 8000 хв.<sup>-1</sup> застосування незбалансованого інструмента може призвести до погіршення якості обробленої поверхні, а при частоті понад 10.000 хв.<sup>-1</sup> балансування є практично обов'язковим.
5. Використовувати інструменти з мінімальними радіальними та осьовими биттями.
6. В процесі експлуатації фрез не перевищувати встановленої для даного інструмента максимальної частоти обертання.
7. Обробляти деталі як можна з меншими вильотами інструментів.

8. Застосовувати фрези з мінімальним вильотом різальних елементів із корпусу інструмента.
9. Мінімізувати зону контакту кромки з деталлю для зменшення небезпеки виникнення вібрацій.
10. Застосовувати по можливості симетричні інструменти.
11. Використовувати збалансований допоміжний інструмент із крутим конусом (силові цангові патрони, гідропластові патрони, патрони для свердл і фрез з циліндричним хвостовиком).

**Список використаної літератури:**

1. *Бакуль В.Н.* Поликристаллические сверхтвердые материалы / *В.Н. Бакуль* // Синтет. алмазы. – 1975. – Вып. 4. – С. 17–22.
2. *Шульженко А.А.* Поликристаллические сверхтвердые материалы в режущем инструменте / *А.А. Шульженко, С.А. Клименко* // Инструм. світ. – 1999. – № 4–5. – С. 14–16.
3. *Лей Б.* Оцінка ріжучої здатності фрезерних інструментів при високошвидкісному різанні / *Б.Лей, Р.Алієв* // Вісник машинобудування. – 1997. – №. 6. – С. 36–38.
4. *Никитин Ю.И.* Порошки из синтетических алмазов / *Ю.И. Никитин* // Инструм. світ. – 1999. – № 4–5. – С. 21–23.
5. *Кельзон А.С.* Новые конструкции внутришлифовальных электрошпинделей / *А.С. Кельзон, Э.Е. Богорад, А.В. Кузьмин* // Станки и инструмент. – 1982. – № 10. – С. 26–27.
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. *Высокоскоростная обработка* // Оборудование: рынок, предложение, цены : приложение к журналу «Эксперт». – Вып. 1 / Технополис 2100.
8. *Боровский Г.В.* Высокоскоростное фрезерование серого чугуна / *Г.В. Боровский, О.Б. Якушева, А.А. Жамолетдинов* // Станки и инструмент. – 1993. – № 2. – С. 29–31.
9. *Маркелов П.А.* Скоростное фрезерование сталей торцевыми фрезами / *П.А. Маркелов.* – М., 1958. – 147 с.
10. *Лищинский Н.Я.* Особенности формирования качества поверхностного слоя при торцовом фрезеровании закаленных сталей инструментами из СТМ / *Н.Я. Лищинский.* – Куйбышев, 1982. – 20 с.
11. *Погонин А.А.* Расчет максимальной частоты вращения фрез со сменными режущими пластинами, закрепленными винтом через центральное отверстие радиально / *А.А. Погонин, А.А. Москвитин* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.techros.ru/text/3167/>.
12. *Потапов В.А.* Оценка реального качества балансировки инструмента / *В.А. Потапов* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.rstanok.ru>.
13. *Боровский Г.В.* Режущие инструменты из синтетических сверхтвердых материалов для высокоскоростной обработки / *Г.В. Боровский* // Электронный дайджест к журналу «Экономика и производство». – 2001. – Вып. 5.
14. *Шмогель Д.* Скоростное фрезерование алюминиевых сплавов — «VDI Zeitschrift» / *Д.Шмогель, В.Арнольд, Д.Шерер.* – 1980. – Т. 122, № 19. – С. 243–245.
15. А. с. 1036475 СССР. Торцовая ступенчатая фреза / *Выговский Г.Н.* ; опубл. 23.08.83, Бюл. № 31.
16. А. с. 1495023 СССР. Торцовая ступенчатая фреза / *Выговский Г.Н.* ; опубл. 23.07.89, Бюл. № 27.
17. Торцовые фрезы для чистовой обработки плоских поверхностей деталей машин / *П.П. Мельничук, Г.Н. Выговский, А.А. Громовой, В.Е. Лоев* // ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS 26th. Jupiter konferencija with foreeign participants. – Beograd, 2004.
18. *Выговський Г.М.* Обробка плоских поверхонь деталей ступінчастими фрезами з косокутною геометрією / *Г.М. Выговський, А.А. Громовой, В.Н. Бушля* // матер. Междунар. научной конф. «Современные проблемы механики и физико-химических процессов резания, абразивной обработки и поверхностного пластического деформирования». – К., 2002.

**ВИГОВСЬКИЙ** Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- обробка металів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Стаття надійшла до редакції 23.10.2012

