

УДК 621.906

Н.Т. Зубовецька*Луцький національний технічний університет***ВИСОКОПРОДУКТИВНА ТА ВИСОКОШВИДКІСНА ОБРОБКА НА ВЕРСТАТАХ**

В статті розглянуто особливості технології високошвидкісної і високопродуктивної обробки на верстатах. Проведено короткий огляд публікацій на цю тему. Наведено основні вимоги до підшипників шпинделів верстатів.

Ключові слова: високопродуктивна обробка (ВПО), високошвидкісна обробка (ВШО), аналіз, верстати, шпиндельні опори, підшипники.

Форм. 5. Літ. 11.

Н.Т. Зубовецкая**ВИСОКОПРОДУКТИВНАЯ И ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ОБРАБОТКА НА СТАНКАХ**

В статье рассмотрены особенности технологии высокоскоростной и высокопроизводительной обработки на станках. Проведен краткий обзор публикаций на эту тему. Приведены основные требования к подшипникам шпинделей станков.

Ключевые слова: высокопродуктивная обработка (ВПО), высокоскоростная обработка (ВСО), анализ, станки, шпиндельные опоры, подшипники.

N.T. Zubovetska**HIGHLY PRODUCTIVE AND HIGH-SPEED PROCESSING ON MACHINES**

The article describes the technology features of high-speed and high-performance processing on machine-tools. A brief overview of publications on this subject was conducted. And the basic requirements for bearings of spindles of machine tools were considered.

Keywords: high-performance processing (HPP), high-speed processing (HSP), analysis, machines, shpindelny support, bearings.

Постановка проблеми. Технологія високошвидкісної обробки і високопродуктивної обробки у даний час є об'єктом пильного вивчення науковців і виробників багатьох розвинутих машинобудівних країн світу. З березня 2003 р. по червень 2004 р. в провідних спеціалізованих виданнях світу зафіксовано понад 100 публікацій, присвячених технології ВШО і ВПО. За період з 2001 по 2004 р.р. проведено близько 20 міжнародних конференцій, колоквиумів і виставок з ВПО і ВШО. Усе це свідчить про надзвичайно високий інтерес верстатобудівників і технологів-машинобудівників щодо перспектив технології ВПО і ВШО.

Підшипникові опори є однією з найвідповідальніших складових, які значною мірою визначають експлуатаційні характеристики верстатів таких як: точність, надійність, продуктивність, економічність. Повна реалізація можливостей нових інструментальних матеріалів та переваг технологій високошвидкісної та високопродуктивної обробки може бути використана на умовах одночасного використання переваг шпиндельних опор різних типів. Тому розвиток технологій високошвидкісної та високопродуктивної обробки є актуальною задачею, яка потребує розробки нових конструкцій як шпиндельних вузлів так і їх опор.

Основний зміст дослідження. Основна ідея, яка покладена в роботу, полягає у тому щоб провести короткий огляд публікацій спрямованих на розробку універсальних і спеціалізованих верстатів для реалізації технології ВШО і ВПО та розглянути основні вимоги, що ставляться до підшипників шпинделів верстатів.

Сучасний розвиток технологій високошвидкісної обробки (ВШО) і високопродуктивної обробки (ВПО) на верстатах зумовлений наступним:

1) необхідністю високопродуктивної і прецизійної обробки деталей з кольорових сплавів, алюмінію, графіту, пластмас та ін., високоміцних легованих і загартованих сталей і сплавів, сплавів з нікелю, титану, керамічних матеріалів, які важко обробляються, та ін.

2) необхідністю високопродуктивної і прецизійної обробки деталей малих розмірів для високотехнологічних машин і приладів (так звана мікрообробка);

3) появою нових інструментальних матеріалів (кермети, кубічний нітрид бору, полікристалічний алмаз, кераміка на базі нітриду кремнію та ін.), стійких до зносу, високих температур та окислення;

4) появою нових конструкцій інструментів з універсальними та спеціалізованими багатощаровими PVD- і PVS- покриттями, а також інструментів з високою міцністю їх корпусів на

згин і розрив, високою стійкістю до дії відцентрових сил, параметри яких оптимізовані до умов ВШО і ВПО.

Сьогодні у виробництві розмежують високошвидкісну і високопродуктивну обробку. Це прогресивні методи, які дозволяють не лише скоротити час виробництва і збільшити точність, а також це є певна стратегія для підвищення продуктивності. За високошвидкісної обробки збільшення швидкості обробки зняття металу з оброблюваного матеріалу відбувається в основному тільки за рахунок підвищення швидкості різання; за високопродуктивної обробки – в основному за рахунок підвищення подачі і (або) глибини різання. В тематичній відбірці журналу *Werkzeuge*, 2002, Nr. 1 “Високопродуктивна обробка” наводяться результати опитування шістьох ведучих германських експертів в області різання і спеціалістів авіаційної промисловості відносно конкуренції ВШО і ВПО. Експерти відмічають, що ВПО (обробка зі значно більш високими подачами і глибинами різання) має значно більший потенціал щодо економії часу обробки. Але, не дивлячись на різницю між ВПО і ВШО, вони все ж мають і спільні підвищені вимоги так званих учасників процесу [1]: системи CAD/CAM, ЧПУ і верифікації його коду, верстата і його шпинделя, затискних механізмів, ріжучих інструментів і інструментальних патронів, змашувальні – охолоджуючої рідини (ЗОР), техніці безпеки і кваліфікації операторів.

У сучасному світі технології ВШО та ВПО знайшли застосування при:

- 1) високошвидкісному зовнішньому і внутрішньому шліфуванні вузьким кругами складних поверхонь прицевійних ріжучих інструментів;
- 2) високошвидкісному фрезеруванні прес-форм і штампів із загартованих сталей фрезами малого діаметру, які дозволяють отримати високоякісні поверхні і уникнути (ліквідувати) ряду операцій, наприклад, електроерозійної;
- 3) мікрофрезеруванні фрезами діаметром 0.25 мм і менше з частотою обертання до 500000 хв⁻¹;
- 4) точінні і фрезеруванні алюмінієвих сплавів;
- 5) нарізанні різьби мітчиками, фрезами;
- 6) внутрішньому і плоскому шліфуванні;
- 7) свердлінні і розточуванні;
- 8) глибинному шліфуванні деталей авіаційних двигунів з нікелевих сплавів та ін.

З методів ВПО і ВШО лезовим інструментом найбільше розповсюдження в наш час має фрезерування кінцевими фрезами, в меншій мірі використовуються інші методи: торцеве фрезерування, точіння, розточування і свердління.

Аналіз досвіду ВПО і ВШО лезовим інструментом показав, що режими обробки для різних методів відрізняються головним чином в залежності від: динамічних характеристик, які визначаються схемою процесу різання; умов теплотворення і охолодження; матеріалу, який обробляється. В загальному випадку потрібний рівень швидкості різання v надзвичайно високий і досягає [2] для заготовок: з кольорових сплавів $v = 7000...9000$ м/хв.; з загартованих сталей $v \leq 2000$ м/хв.; з чавуну $v \leq 4000$ м/хв. В даний час найбільш розповсюджено високошвидкісне фрезерування кінцевими фрезами.

Відрізняють фрезерування з використанням ЗОР і так зване сухе фрезерування (без ЗОР). За результатами опитування 10 німецьких ведучих фірм в роботі [3] зроблений висновок, що найбільший інтерес викликають інструменти для так званої сухої високошвидкісної і твердої обробки, а також обробки спеціальних матеріалів. Відзначається, що відбувається витиснення звичайного фрезерування високошвидкісним при обробці складних деталей з важкооброблених матеріалів. Однак, в багатьох випадках, високошвидкісне фрезерування, при якому є нормою частота обертання шпинделя 40000 хв⁻¹ з крутими моментами більш 6 Н·м, є менш економічне (а іноді значно). На основі досвіду різних підприємств існують границі, частіше умовні, між звичайним і високошвидкісним фрезеруванням. На прикладі високошвидкісного верстата XSM 400 фірми Mikron, вперше показаного на виставці ЕМО [4], доведено, що основною відмінністю високошвидкісного фрезерування від звичайного є збільшення в 5...10 разів швидкості подачі, а в цілому багатократно збільшена швидкість різання, в результаті чого змінюється процес стружкоутворення і напрямок потоку стружки. Відзначається також підвищення стійкості і зменшення зносу інструменту при високошвидкісному чорновому периферійному фрезеруванні (глибина 10 – 20 мм) загартованої штампової сталі AISI H13 твердістю HRC 52 кінцевими твердосплавними фрезами, які мають одношарове покриття (діаметром 10 мм з швидкістю 314 м/хв і подачею на зуб 0,067 мм) шляхом комбінування попутного і зустрічного фрезерування. Було також розглянуто співвідношення і залежності між основними параметрами, які впливають на температуру заготовки за сухого високошвидкісного фрезерування. Виявлено, що температура

падає при збільшенні величини подачі на зуб і досягає мінімуму за максимальної подачі, і є значно менша за температуру відпуску, але при швидкості більше ніж 1000 м/хв температура пропорційно збільшується. Крім того, потужність різання збільшується пропорційно, а при швидкості 1150 м/хв., незалежно від обраної подачі, буде в 3.27 рази вища ніж при швидкості у 300 м/хв.

Одна з основних проблем високошвидкісного фрезерування – виникнення вібрацій інструменту. Наприклад, при частотах 40 – 60 тис. хв.⁻¹, які є типовими для верстатів фірми Mikton, виникають підвищені відцентрові сили, які впливають на шпindelні опори і погіршують точність обробки, через нестабільне положення верхньої точки фрези. Крім того, відбувається теплове розширення шпинделя і його вібрація як результат відцентрової сили, яка діє на будь яку незбалансовану масу в системі “інструмент – інструментальний патрон”. Отже, можна зробити певний висновок відносно підвищених вимог до балансування системи “шпindel – інструмент” і динамічної жорсткості і вібростійкості опор шпинделя для ВШО.

Значного зменшення вібрацій при високошвидкісному фрезеруванні можна добитися не тільки зі збільшенням частоти обертання кінцевих фрез з виходом на визначенні діапазони частот, але і шляхом регулювання їх вильоту з шпинделя в залежності від діаметру, числа канавок, виду кріплення та інших факторів.

За результатами практичних експериментів [5] американського інституту технологічних досліджень (NIST) відносно впровадження на підприємствах ВШО різноманітних матеріалів, а також 9 відомих американських і європейських фірм, досліджено резерви підвищення продуктивності ВШО, а також вказано на застосування недостатньо високих швидкостей різання, та не повне використання потенціалу сучасних інструментів.

В останній час для ВШО і ВПО використовується як існуюче металорізальне обладнання після його модернізацій, так і спеціально розроблене. Основні напрямки модернізації – підвищення потужності, швидкохідності і жорсткості верстатів. Журнальні публікації, матеріали виставок, колоквиумів і симпозіумів вказують на цілеспрямовану розробку універсальних і спеціальних верстатів для реалізації технології ВШО і ВПО як абразивним так і лезовим інструментом. Питома вага верстатів для ВПО і ВШО в загальному парку ведучих світових машинобудівних фірм стабільно зростає.

Високошвидкісні фрезерувальні верстати зазвичай використовуються при обробці алюмінію і легких сплавів, при цьому знижуються сили різання, забезпечується мала шорсткість, безвібраційне різання, підвищується стійкість інструменту, зменшується нагрівання деталі в зв'язку з винесенням тепла стружкою. В останній час фрезерувальні верстати для ВШО і ВПО широко використовуються для обробки штампів замість або в комбінації з електроерозійної обробкою.

Токарні верстати для високошвидкісної обробки менш розповсюджені. В теперішній час вони працюють переважно з частотою обертання шпинделя до 10000 хв.⁻¹.

Високі частоти обертання потрібні також для шпинделів внутрішньо – шліфувальних верстатів, які повинні забезпечувати швидкості шліфування 50...100 м/хв і вище.

Застосовуються як універсальні високошвидкісні верстати для фрезерувальних, токарних, розточувальних, свердлильних і інших робіт, так багатоцільові верстати і обробляючі центри.

На фірмі Fluve Metal [6] узагальнений досвід експлуатації надшвидкісних вертикальних обробляючих центрів Vibra-Free американської фірми Computachine, оснащених шпинделями з частотою обертання 45000 хв.⁻¹ фірми Irag. При цьому відзначено, що фірма вже має досвід застосування верстатів зі шпинделями на 15000 хв.⁻¹. Високошвидкісне фрезерування на гнучких виробничих системах (ГВС) (6 обробляючих центрів мод. А88 японської фірми Makino) деталей вантажівок, в тому числі їх двигунів, відбувається на фірмі Eaton Corporation; вказані економічні і технічні переваги такої обробки. На виставці METAV'2002 були представлені вперше верстати для ВШО німецьких фірм: обробляючі центри з лінійним приводом DMP60V linear і DMF360 linear фірми DMG; високошвидкісної фрезерний верстат мод. RHP800 фірми Rödgers з лінійним приводом, гідростатичними направляючими і шпинделем з частотою обертання 36000 хв.⁻¹; вертикальний токарний верстат VTM-350 фірми Schuster та ін.

Найбільш високі вимоги ставляться до шпindelних вузлів (ШВ) верстатів для ВПО і ВШО відносно потужності, жорсткості і швидкохідності за їх високої точності.

Для роботи з високими швидкостями різання створюють спеціальні ШВ, частота обертання яких досягає 100000 хв.⁻¹ і більше. Підвищення швидкохідності ШВ супроводжується збільшенням його потужності. Швидкохідність шпindelних вузлів прийнято оцінювати так званим

параметром швидкохідності: dn_{max} , де d – діаметр шийки шпинделя, мм; n_{max} – максимальна частота обертання шпинделя, хв.⁻¹ Потужність, яка передається шпинделем, визначається навантажувальною здатністю: N/d , де N – потужність приводу шпинделя, Вт.

ШВ для швидкісного різання в наш час в основному встановлюють на радіально-упорних кулькових підшипниках, які забезпечують швидкохідність до $dn_{max} = (1..1,5)$ мм·хв.⁻¹ і навантажувальну здатність до $N/d = (150..200)$ Вт·мм⁻¹ [2]. Для верстатів середніх розмірів для ВПО в основному заготовок з чорних металів і важкооброблюваних сплавів необхідно забезпечити як мінімум $N/d=(600..800)$ Вт·мм⁻¹ за $dn_{max} > (2..2,5)$ мм·хв.⁻¹

Необхідність підвищення жорсткості вимагається підвищеними вимогами до динамічної якості верстатів в умовах праці на високих швидкостях і до точності обробки.

В ШВ використовують: спеціальні шпиндельні опори кочення, гідравлічні (гідродинамічні й гідростатичні) газові (газодинамічні й аеростатичні). Останнім часом також більш широко використовують електромагнітні опори.

Для опор кочення проблему представляє забезпечення заданого ресурсу за високих швидкостей. В звичайних підшипниках кочення, в яких не прийнято спеціальних мір для досягнення високих швидкостей, параметр швидкохідності $dn_{max} \leq 0,4 \cdot 10^6$ мм·хв.⁻¹. Завдяки спеціальним засобам (удосконалення способів змащування і видів мастил та охолодження, динамічного балансування шпинделя) в підшипниках кочення значення величини dn_{max} може бути збільшене до $2,5 \cdot 10^6$ мм·хв.⁻¹ [7]. Гідростатичні підшипники працюють звичайно при $dn_{max} \leq 1,5 \cdot 10^6$ мм·хв.⁻¹, аеростатичні і газостатичні - при $dn \leq (2,5..3) \cdot 10^6$ мм·хв.⁻¹.

Найбільше поширення отримали ШВ з опорами кочення, як найбільш економічні і надійні, які вимагають меншого догляду. За власною навантажувальною здатністю і жорсткістю вони в цілому мають переваги над опорами інших типів, однак точність обертання в зв'язку з більш суттєвим впливом похибок виготовлення в них, як правило, нижча.

Підшипниковими заводами в нас і за кордоном виготовляються спеціальні шпиндельні підшипники кочення для верстатів: двохрядні і однорядні роликотпідшипники з конічною шийкою, конічні роликотпідшипники, радіально упорні кулькові підшипники з кутом 15° та 25° і упорно-радіальні двохрядні кулькові підшипники з кутом контакту 60° . Роликові підшипники мають більшу вантажопідйомність, на відміну від кулькових. Вдосконалення конструкцій підшипників кочення йде у напрямку підвищення їх точності, створення суперлегких серій оптимізацій умов контакту і використання композиційних матеріалів для тіл кочення. Точність обертання сучасних прецизійних підшипників складає $0,5..3$ мкм, надпрецизійних - доли мікрометрів. Застосування радіально-упорних кулькових підшипників з тілами кочення менших діаметрів і більш тонкими кільцями дало змогу підвищити швидкохідність за однакових діаметрів до 2 разів, а при рівних зовнішніх діаметрах збільшити жорсткість до $60..70\%$. Удосконалюються також вид і спосіб мастила підшипників кочення, рекомендується змащувати мінімальною кількістю мастила, використання пластичного і масляного мастила, масляного туману, використання імпульсної подачі і вприскування мастила.

В гідростатичних опорах з ростом частоти обертання значно збільшуються втрати на тертя, що обмежують їх швидкохідність. В ШВ з діаметром передньої шийки шпинделя 100мм при частоті обертання 4000 хв.⁻¹ за даними фірми FAG потужність тертя холостого ходу в вузлах з опорами кочення складає $0,7$ кВт, гідростатичними - $3,5$ кВт. При частоті обертання 30000 хв.⁻¹ втрати в гідростатичних опорах в $3..4$ рази вищі ніж в опорах кочення.

Аеростатичні і аеродинамічні (газові) опори використовуються в високо швидкісних порівняно мало навантажених ШВ при підвищених вимогах до шорсткості деталей, включаючи верстати для точіння деталей з кольорових металів, алмазного шліфування надтвердих і крихких матеріалів, шліфування і свердління отворів малого діаметру і ін. Частіше ШВ з газовими опорами виконуються у вигляді автономних вузлів (пнеumo- або електрошпинделів). Їх швидкохідність обмежується втратою стійкості (появою напівшвидкісного вихору). Похибка обертання шпинделів на аеростатичних опорах складає десяти, а при оптимальних параметрах і соті доли мікрометра. В теперішній час біля 40% найбільш швидкохідних ШВ (за частотою обертання від 70000 до 100000 хв.⁻¹) виконуються з аеростатичними опорами.

Електромагнітні опори шпинделів найбільш швидкохідні. Цей параметр обмежується тільки механічною стійкістю матеріалу ротора. До їх переваг відносять більш нижчі, ніж для інших опор, вимоги до точності виготовлення і складання електрошпинделя через великі зазори в опорах (від десятків, сотих мм при малих діаметрах, до $0,6..1$ мм при великих значеннях d), можливість

обертання шпинделя навколо осі інерції завдяки спеціальному ланцюгу в системі управління, можливість забезпечення дуже точної врізної подачі за рахунок зміщення шпинделя в межах зазору шляхом подачі сигналів в ланцюгу управління. Точність обертання шпинделя в електромагнітних опорах складає приблизно 1 мкм, жорсткість опор зменшується із збільшенням частоти обертання, так як електромагніт зменшує величину і зсув фази сигналу. Електрошпинделі на електромагнітних опорах потребують спеціального охолодження, як в зазорі між ротором і статором так і з зовні корпусу (сорочка охолодження). В наш час вартість електрошпинделів з електромагнітними опорами суттєво вища, ніж з аеростатичними.

Нагрів шпиндельних опор, зміщення осі шпинделя обмежує підвищення режимів різання. Дуже серйозний характер має зміна температури опор ШВ при розгоні. В опорах кочення нагрів приводить до зміни зазору - натягу, що в свою чергу призводить до зміни таких параметрів, як статична жорсткість, ресурс, динамічні характеристики.

Висновки. Проведений аналіз [8] характеристик усіх типів опор високошвидкісних шпинделів для ВШО та ВПО показав, що підшипники кочення, гідравлічні (гідродинамічні і гідростатичні), газові (аеродинамічні і аеростатичні) та магнітні, які використовуються в якості опор високошвидкісних шпинделів, не забезпечують одночасно повний комплекс вимог, які ставляться до них. Це можливо за умови одночасного використання переваг опор даних типів. На жаль, конструктивні можливості істотного покращення їхніх характеристик практично вичерпані. Існує новий, перспективний спосіб гідро-газового мащення, що дає можливість одночасно збільшити переваги (високу статичну жорсткість, демпфування) і зменшити недоліки (високі втрати потужності на тертя при збільшенні швидкохідності), які властиві гідравлічним та газовим підшипникам [9]. Дослідження [10] радіальних підшипників, та газо-гідравлічних інерційних підшипників [11], які створені за цим принципом, показали, що вони мають суттєві переваги перед усіма типами підшипників по усім технічних параметрам, які впливають на якість обробки за ВШО і ВПО.

1. Burrows S. High-speed processing: the requirements to the participants of process / S. Burrows // Machinery. – 2003. Nr. 4085. – S. 16-18.
2. Баклыков В.Г. Высокоскоростной шпиндельный узел для силового резания / В.Г. Баклыков, А.М. Фигатнер // Станки и инструмент. – 1990. – № 12. – С. 26-28.
3. Fecht N. Die Werkzeuge des morgigen Tages // Fertigung. – 2002. № 8. – S. 108-110.
4. Toh C. Increase of stability and reduction of deterioration of the tool at high-speed draft peripheral milling / C. Toh // Journal of Engineering and Manufacture. – 2003. V. 217. Nr. B9. – S. 1295-1304.
5. Aronson R. The major factors influencing results of high-speed processing / R. Aronson // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2004. V. 126. Nr. 1. – S. 89-96.
6. Zelinski P. Experience of application of the superhigh-speed processing centres in firm Fluve Metal / P. Zelinski // Modern Machine Shop. – 2001. V. 74. Nr. 3. Special release: high-speed cutting. – S. 86-93.
7. Расчётный анализ деформационных, динамических и температурных характеристик шпиндельных узлов при проектировании: Методич. рек. / Сост. Левина З. М., Горелик И. Г., Зверев И. А., Сегида А. П. – М.: ЭНИМС, 1989. – 78 с.
8. Гордеев А.Ф. Конструкции гидравлических шпиндельных опор для высокоскоростной и высокоточной обработки / А.Ф. Гордеев, П.А. Захаров // Материалы 15-й Ежегодной Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в машиностроении (ТЕХНОЛОГИЯ-2000)», Киев: 2000. – С. 59 – 63.
9. Спосіб мащення. Патент України на винахід № 25413А МКВ 6 F16 №15/100.
10. Гордеев О.Ф. Навантажувальні і енергетичні характеристики складових мащення високошвидкісного шпиндельного гідрогазового інерційного підшипника / О.Ф. Гордеев, П.О. Захаров // Промислова гідравліка і пневматика. – 2004, № 3. – С. 21-26.
11. Зубовецька Н.Т. Навантажувальна здатність і енергетичні характеристики високошвидкісних радіальних газо-гідравлічних інерційних підшипників: дисертація кандидата технічних наук: 26.05.10 / Зубовецька Наталія Тарасівна. – Луцьк., – 190 с.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.