

МАШИНОБУДУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА ТА ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

MANUFACTURING ENGINEERING AND AUTOMATED PROCESSES

УДК 621.941.2-229.323

Ю. Кузнецов¹, докт. техн. наук; І. Луців², докт. техн. наук;
В. Волошин², канд. техн. наук

¹Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

²Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

СИЛОВИЙ АНАЛІЗ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПАТРОНІВ ІЗ ТЕРМОЗАТИСКОМ

Наведено основні вимоги до інструментальних патронів для високошвидкісної обробки. Запропоновано методику розрахунку максимального передавального моменту в статичі та під час усталеного обертання, виведено залежність для визначення критичної частоти обертання. Наведено динамічні силові характеристики інструментальних патронів з термозатиском.

Yu. Kuznetsov, I. Lutsiv, V. Voloshyn

FORCE ANALYSIS OF SHRINK FIT TOOL HOLDERS FOR HIGH-SPEED CUTTING

Main demands to tool holders for high-speed cutting are show. Methods of calculating of maximum passing moment in static and during fixed turning are suggested. Dependence for defining critical frequency of turning is drawn out. Dynamic power characteristics of shrink fit tool holders are given.

Високошвидкісна обробка (High Speed Cutting) – одна із сучасних технологій, яка в порівнянні із звичайним різанням дозволяє підвищити продуктивність, точність та якість механічної обробки. Завдяки таким перевагам вона все ширше впроваджується на підприємствах авіакосмічної, автомобільної та верстатобудівної промисловості. Вирішальним фактором при оцінці процесу високошвидкісної обробки є продуктивність верстатів, які визначають собівартість виробництва і таким чином, амортизацію інвестованих коштів.

Важливою системою верстата є система "шпиндельний вузол-затискний патрон-різальний інструмент", яка повинна забезпечити високу швидкість різання, що у порівнянні із звичайною обробкою зростає в 10 раз і більше (наприклад, для алюмінієвих сплавів – до 10000 м/хв.).

Затискний патрон служить ланкою, яка зв'язує шпиндель та різальний інструмент, і від нього в значній мірі залежить збалансованість всієї системи. Тому затискні патрони для високошвидкісної обробки повинні відповідати ряду вимог, структура яких наведена на рис.1 [1]. Висока швидкість обертання шпинделя збільшує вплив вібрації інструмента на процес різання. Для того, щоб забезпечити стійкість інструмента та якість оброблюваної поверхні необхідно забезпечити високу жорсткість та хороші демпфуючі властивості системи "затискний патрон-інструмент". У порівнянні із звичайною обробкою при високошвидкісній у декілька разів зростають відцентрові сили. Тому тут велику роль відіграє величина дисбалансу, що залежить від

радіальної точності встановлення інструмента в патроні, маси патрона з інструментом, дисбалансу інструментального затискного патрона та точності обертання шпинделя. За даними [2], биття різальної кромки інструмента не повинно перевищувати 10 мкм. Кожні додаткові 10 мкм биття зменшують стійкість інструмента на 50%. У зв'язку з цим інструментальні патрони для високошвидкісної обробки повинні мати конструктивні елементи для забезпечення балансування до оптимальної величини, при якій забезпечується задана точність та шорсткість оброблюваної поверхні.

На сьогоднішній день існує ряд інструментальних затискних патронів з механічним та гідравлічним затиском інструментів різних видів. Відносно новими в порівнянні з ними є патрони, в яких затиск інструмента проводиться методом теплової посадки з натягом [1, 3], та патрони із силовим запресуванням, при якому закріплення інструмента проходить виключно за рахунок зусиль повернення матеріалу у вихідне положення [3, 4].

Широке застосування в умовах високошвидкісної обробки інструментальних патронів з термозатиском (рис.2) пов'язане із рядом переваг, таких як: можливість роботи на високих частотах обертання, швидкий затиск-розтиск, висока стійкість інструмента, висока жорсткість при згині, простота конструкції, локальне нагрівання в області затиску, що мінімізує витрати енергії. Крім того, завдяки застосуванню теплостійких спеціальних сталей та особливого процесу обробки такі затискні патрони мають високу довговічність та забезпечують протягом тривалого часу стабільність форми.



Рисунок 1 - Вимоги до конструкції інструментальних затискних патронів для високошвидкісної обробки.

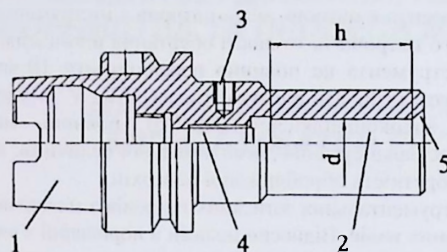


Рисунок 2 - Конструкція затискного патрона із тепловою посадкою інструмента: 1 – конус HSK-A; 2 – отвір для посадки інструмента; 3 – отвори для балансувальних гвинтів; 4 – установочний гвинт; 5 – західна фаска.

патрона. Частота зміни магнітного поля повинна бути такою, щоб швидко нагріти поверхневу зону області затиску. Через градієнт температур внутрішній діаметр патрона збільшується, і у збільшений отвір встановлюється інструмент. При охолодженні отвір звужується і хвостовик інструмента міцно фіксується. Весь процес затиску у сучасних комбінованих нагрівально-охолоджувальних пристроях триває біля 1 хв.

Метою даної роботи є встановлення критичних частот обертання інструментальних патронів з термозатиском та їх динамічних силових характеристик, виходячи із параметрів теплової посадки хвостовика інструмента.

Величина контактного тиску запресованого інструмента у патрон з циліндричною частиною (рис.4) залежить від величини натягу δ , яка дорівнює різниці між діаметром хвостовика інструменту та діаметром отвору. Визначити контактний тиск p можна, використовуючи методику розрахунку з'єднаних циліндрів [6].

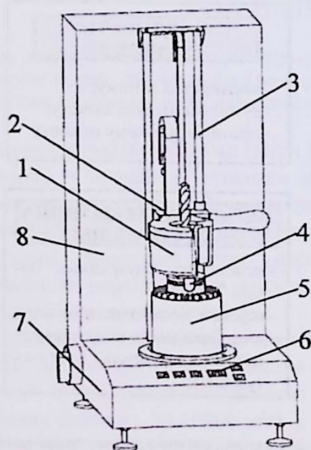


Рисунок 3 - Спеціальний пристрій для термозатиску інструмента ISG2000 фірми Bilz: 1 – котушка індукційного нагрівання; 2 – каретка; 3 – напрямні; 4 – затискний патрон; 5 – пристрій для закріплення затискного патрона; 6 – пульт керування; 7 – основа; 8 – стійка.

Принцип термозатиску відносно простий. Отвір затискного патрона виготовляється менший від діаметра хвостовика інструмента. Затискний патрон встановлюється у спеціальний пристрій (рис.3) [5], у якому за допомогою котушки з інтегрованим повітряним охолодженням та індукційного генератора створюється концентроване змінне магнітне поле в області затиску, що, в свою чергу, породжує вихрові струми у матеріалі

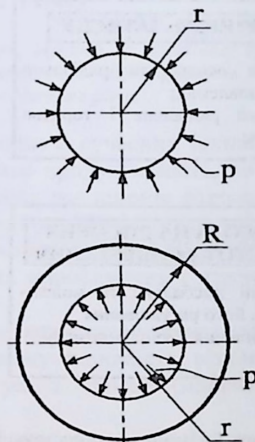


Рисунок 4 - Схема дії тиску, який виникає в з'єднанні патрона із інструментом при теплової посадці з натягом.

Так як після посадки інструмента в отвір патрона зовнішній радіус хвостовика інструмента та внутрішній радіус циліндричної затискної частини патрона стають однаковими, то очевидно, що сума абсолютних величин їх радіальних переміщень на радіусі поверхонь контакту, викликаних контактним тиском, повинна бути рівна половині натягу, тобто:

$$\Delta r + \Delta R = \frac{\delta}{2}, \quad (1)$$

де Δr – абсолютна величина радіального переміщення хвостовика інструмента на поверхні контакту; ΔR – абсолютна величина радіального переміщення установочної циліндричної частини затискного патрона на контактній поверхні.

Абсолютна величина радіального переміщення хвостовика інструмента на поверхні контакту [6]:

$$\Delta r = \frac{r}{E_1}(1 - \mu_1)p, \quad (2)$$

де r – зовнішній діаметр інструмента; E_1 – модуль пружності для матеріалу хвостовика інструмента; μ_1 – коефіцієнт Пуассона для матеріалу хвостовика інструмента.

Абсолютна величина радіального переміщення установочної циліндричної частини затискного патрона, виготовленого із теплостійкої сталі, на контактній поверхні [6]:

$$\Delta R = \frac{r}{E_2} \left(\frac{1 + k^2}{1 - k^2} + \mu_2 \right) p, \quad (3)$$

де E_2 – модуль пружності для теплостійкої сталі; μ_2 – коефіцієнт Пуассона для теплостійкої сталі; $k = r/R$ – відношення радіуса контакту хвостовика інструмента до зовнішнього радіуса затискної частини патрона.

Підставивши залежності (2) і (3) в (1), отримаємо:

$$\frac{r}{E_1}(1 - \mu_1)p + \frac{r}{E_2} \left(\frac{1 + k^2}{1 - k^2} + \mu_2 \right) p = \frac{\delta}{2}. \quad (4)$$

При затиску інструмента із швидкорізальної сталі можна прийняти, що $E_1 \approx E_2 \approx E$ та $\mu_1 \approx \mu_2 \approx \mu$. Тоді після перетворень отримаємо:

$$\frac{pr}{E} \left(\frac{2}{1 - k^2} \right) = \frac{\delta}{2}. \quad (5)$$

Із залежності (5) величина контактного тиску у з'єднанні при $d = 2r$:

$$p = \frac{1 - k^2}{2} \cdot \frac{\delta \cdot E}{d}. \quad (6)$$

За визначеним контактним тиском можна знайти максимальний крутний момент в статії, який можна передати затискним патроном з термозатиском:

$$M = \frac{f\pi d^2 h p}{2}, \quad (7)$$

де f – коефіцієнт тертя; h – довжина контактної ділянки циліндричного хвостовика інструмента із затискним патроном.

Під час обертання затискного патрона із затиснутим інструментом виникає відцентрова сила, яка приводить до зменшення контактного тиску у зоні затиску. Величину зменшення тиску p_n у зоні контакту можна знайти із умови рівності радіальних переміщень хвостовика інструмента u_i та циліндричної частини патрона u_n , тобто:

$$u_i = u_n. \quad (8)$$

Радіальні переміщення циліндричної частини патрона та інструмента у зоні контакту визначаються за залежностями [6]:

$$u_n = A_1 r + \frac{B_1}{r} - \frac{1-\mu^2}{8E} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^3, \quad (9)$$

$$u_i = C_1 r - \frac{1-\mu^2}{8E} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^3, \quad (10)$$

де γ – густина матеріалу оправки та інструмента, виготовлених із сталі;
 g – прискорення вільного падіння; ω – кутова швидкість; $A_1 = A(1-\mu)/E$,
 $B_1 = -B(1+\mu)/E$, $C_1 = C(1-\mu)/E$ – постійні інтегрування, що визначаються із граничних умов.

Підставивши (9), (10) у залежність (8) та здійснивши перетворення, отримаємо:

$$(1-\mu)A - (1+\mu)B \frac{1}{r^2} = (1-\mu)C. \quad (11)$$

Постійні інтегрування визначимо із граничних умов. Радіальне напруження на зовнішньому контурі циліндричної частини патрона $(\sigma_r)_{\rho=R} = 0$, а на внутрішньому контурі – $(\sigma_r)_{\rho=r} = -p_\omega$. Із залежностей для визначення радіальних напружень [6] отримаємо постійні інтегрування, які будуть мати вигляд:

$$A = \frac{r^2}{R^2 - r^2} p_\omega + \frac{3+\mu}{8} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 (r^2 + R^2), \quad (12)$$

$$B = \frac{r^2 R^2}{R^2 - r^2} p_\omega - \frac{3+\mu}{8} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^2 R^2. \quad (13)$$

Для хвостовика інструмента радіальні напруження на його зовнішньому контурі $(\sigma_r)_{\rho=r} = -p_\omega$. Тоді постійна інтегрування буде мати вигляд:

$$C = -p_\omega + \frac{3+\mu}{8} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 r^2. \quad (14)$$

Підставивши отримані залежності (12), (13), (14) у залежність (11) та зробивши перетворення, отримаємо залежність для визначення втрати тиску у зоні контакту хвостовика інструмента із затискним патроном:

$$p_\omega = \frac{3+\mu}{8\mu} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 R^2 (1-k^2). \quad (15)$$

Сумарний тиск у зоні контакту хвостовика інструмента та циліндричної частини затискного патрона в процесі його усталеного обертання при вираженні R через k і d :

$$p_\Sigma(\omega) = p - p_\omega = \frac{1-k^2}{2} \left(\frac{\delta E}{d} - \frac{3+\mu}{16\mu} \cdot \frac{\gamma}{g} \omega^2 \frac{d^2}{k^2} \right). \quad (16)$$

Критична частота обертання, при якій відбувається розпресування інструмента під дією відцентрових сил, визначається з умови $p_\Sigma(\omega) = 0$. Виразивши критичну частоту обертання через критичну кутову швидкість із залежності (16), отримаємо:

$$n_{кр} = \frac{120k}{\pi} \sqrt{\frac{\delta E \mu g}{(3+\mu) d^3}}. \quad (17)$$

Максимальний крутний момент, який може передати затискний патрон в процесі обертання, визначиться за сумарним тиском у зоні контакту:

$$M_{\max}(\omega) = \frac{f \pi d^2 h}{2} p_\Sigma(\omega). \quad (18)$$

Отримані за залежністю (17) значення критичних частот обертання для затискних патронів чотирьох розмірів при двох величинах натягу наведені на рис.5.

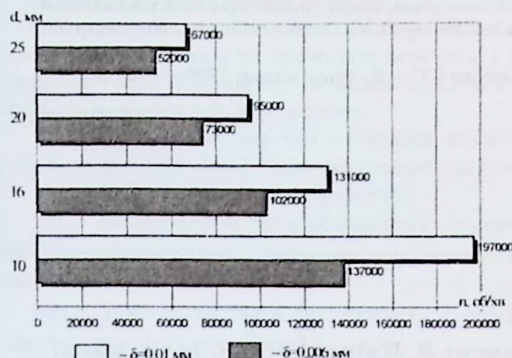


Рисунок 5 - Значення критичних частот обертання інструментальних патронів з термозатиском.

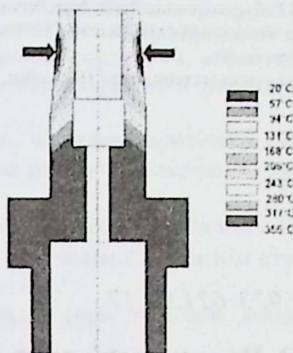


Рисунок 6 - Температурне поле циліндричної частини затискного патрона при індукційному нагріванні.

Як видно із залежності (17) та рис.5, збільшення натягу веде до збільшення критичної частоти обертання, але при цьому також необхідно збільшувати температуру поверхневої зони в області затиску. Моделювання температурного поля при локальному нагріванні методом скінченних елементів (рис.6) показує, що різниця температур у зоні нагрівання та на поверхні затиску складася $\approx 150^{\circ}\text{C}$. Тому при виборі величини натягу слід враховувати максимально-можливу температуру локального нагрівання, яка не приводить до структурних змін у матеріалі патрона.

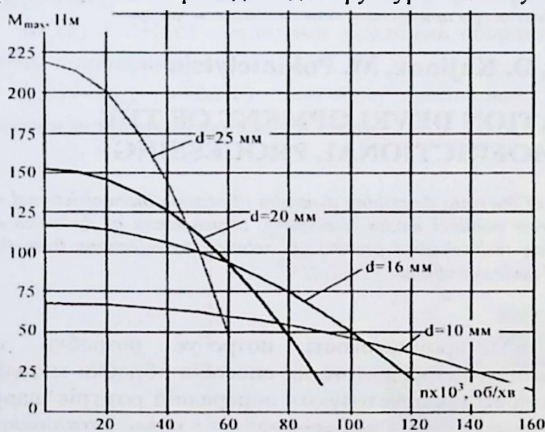


Рисунок 7 - Динамічні силові характеристики інструментальних патронів з термозатиском.

Користуючись побудованими динамічними силовими характеристиками інструментальних патронів з тепловою посадкою інструмента різних розмірів (рис.7), можна знайти необхідні значення крутних моментів, які передаються інструменту в статичі та при різних частотах обертання. Крім того, вони дозволяють встановити, виходячи з вимог безпечної роботи, допустимі частоти обертання патронів з термозатиском різних розмірів.

Висновки:

1. Здійснено аналіз вимог до конструкції інструментальних патронів для високошвидкісної обробки та наведено переваги патронів з термозатиском.
2. На основі методики розрахунку з'єднаних циліндрів виведені залежності для визначення критичних частот обертання патронів з тепловою посадкою інструмента та побудови їх динамічних силових характеристик.

Література

1. Philipp Andrae. Hochleistungszerstörung von Aluminiumknetlegierungen. Diss. TU Hannover, 2002. – 142 S.
2. Режущий инструмент для HSM обработки: www.e-consul.ru/content/page_28_0.html
3. Moser S. Werkzeughalter. Schrumpffutter auf dem Vormarsch// Produktion. – 2006. – №31/32. – S. 20.

ВІСНИК ТЕРНОПІЛЬСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ. 2007. Том 12. № 1

4. TRIBOS Polygonspanntechnik: http://www.de.schunk.com/schunk/schunk_websites/products/products.html
5. Otto Bilz Werkzeugfabrik GmbH & Co. Thermo Grip Induktionengerät ISG2000. Ostfildern, 2001 (інструкція по експлуатації)
6. Сопротивление материалов / Под. общ. ред. Писаренко Г.С. – К.: Вища школа, 1979. – 696 с.

Одержано 23.02.2007 р.