УДК 621.914.5:621.9.015

С.І. ГРОМНЮК, ген.директор ТЗоВ "СПР-Енерго", Львів;
І.Є. ГРИЦАЙ, д.т.н., проф., завідувач каф. "Технологія машинобудування" НУ "Львівська політехніка", Львів

МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДОВИХ СУМАРНОЇ ПОХИБКИ І ТОЧНОСТІ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС В РАДІАЛЬНО-КОЛОВОМУ СПОСОБІ ЗУБОНАРІЗАННЯ

Досліджено основні елементарні кінематичні та геометричні похибки технологічного процесу в радіально-коловому способі нарізання зубчастих коліс дисковою фрезою в умовах непевного обкочування. Встановлено закономірності їх перенесення на профілі та викликані ними похибки зубооброблення, які створюють теоретичні передумови керування якістю і точністю виготовлення зубчастих коліс.

Ключові слова: нарізання, зубооброблення, зубчасті колеса, точність, похибка, елементарні похибки, радіально-коловий спосіб.

Вступ. В продукції машинобудування значну його частку складають зубчасті колеса та передачі, які є невід'ємними компонентами сучасних машин і технологічних систем. Вимоги до якості виготовлення їх робочих поверхонь, які визначають експлуатаційні параметри цих деталей постійно підвищуються. Зростання цих вимог зумовлене, насамперед, неухильним збільшенням робочих швидкостей, передаванням все більших обертових моментів та енергій, зростанням питомих навантажень на контактні поверхні коліс, функціонуванням передач у різноманітних несприятливих і агресивних середовищах.

В наш час у виробництві використовують велику кількість технологічних методів та способів формоутворення зубчастих поверхонь. Одним із перспективних напрямків удосконалення зубооброблення та підвищення ефективності цих процесів є радіально-коловий спосіб (далі – РК-спосіб). Його суть полягає в нарізанні зубчастих поверхонь дисковим інструментом – тонкою відрізною фрезою при неперервному обкочуванні, як це є у черв'ячному зубофрезеруванні, на аналогічному обладнанні. Проте, на відміну від черв'ячної фрези, яка повинна мати той же модуль, що й нарізувані нею зубчасті колеса, одну дискову фрезу можна використовувати для широкого діапазону модулів шляхом зміни ексцентриситету при її установці.

Аналіз літератури. Проблемі теоретичного обґрунтування і моделювання формоутворення в РК-способі присвячено значну кількість наукових праць, зокрема [1-5]. Разом з тим, питання дослідження точності в цьому способі, які наведені у роботах [6, 7] розроблені недостатньо. Так, відсутня класифікація початкових похибок, не встановлено структуру сумарної похибки та роль первинних чинників у формуванні заданих параметрів, не досліджено, як змінюється похибка обробки по куту повороту фрези та не розроблено рекомендацій щодо керування точністю.

Актуальність проблеми. Оскільки РК-спосіб є простим у технічному виконанні, не вимагає спеціального і дорогого обладнання та оснащення, характеризується широкою універсальністю і найменшими витратами на різальні інструменти, задачі, які б забезпечили його удосконалення є актуальними для сучасного виробництва.

Мета статті – встановити основні геометричні і кінематичні похибки зубооброблення, які впливають на точність нарізання зубчастих коліс в радіально-коловому способі та їх вплив на відхилення профілів нарізуваних коліс.

© С.І. Громнюк, І.Є. Грицай, 2014

Матеріали досліджень.

1. Вихідні положення, на яких базується моделювання точності оброблення зубчастих коліс в РК-способі.

1. Модель розробляється на засадах детермінування, що передбачає визначення її складових як невипадкових величин та можливості встановлення функціональних залежностей між початковими чинниками і елементарними похибкам зубооброблення.

2. В процесі зубонарізання в технологічній системі зубофрезерного верстата діють початкові чинники, які характеризують неточності самої системи ВПІД, вплив робочих режимів, параметрів верстата, різального інструменту і спорядження на параметри точності та якості обробки.

3. Початкові технологічні і конструктивні чинники викликають похибки нарізуваного зубчастого колеса, впливають на вид та значення часткових (елементарних) похибок. Сумарна похибка зубооброблення визначається як середнє квадратичне суми елементарних похибок.

4. Усі початкові чинники та їх вплив на відхилення в процесі зубооброблення приведені до профілю колеса, оскільки лінія синусоїдального зачеплення не є прямою.

5. Відповідно до положень теорії точності нарізання зубчастих коліс [1] всі початкові чинники, які викликають похибку оброблення можна поділити за такими ознаками:

- радіальні, які викликають відхилення в радіальному для колеса напрямку;
- тангенціальні, що діють дотично до ділильного кола зубчастого колеса;
- кінематичні, які викликають відхилення у взаємних переміщеннях інструменту і заготовки (рисунок 1).

6. В структурі сумарної похибки можна виділити ті складові – технологічні та конструкторські фактори, які найбільше впливають на точність, що досягається при виготовленні зубчастого колеса, та якість робочих поверхонь його зубців.

7. Виходячи із встановленого з допомогою моделі зв'язку між найбільш суттєвими чинниками та змінними початковими параметрами процесу зубонарізання можна визначити такі значення початкових чинників, які задовольняють умову досягнення необхідної якості та точності одночасно з мінімалізацією витрат на технологічну операцію зубонарізання та керувати процесом зубонарізання як на етапі його проектування, так і в режимі реального часу на зубофрезерному верстаті.

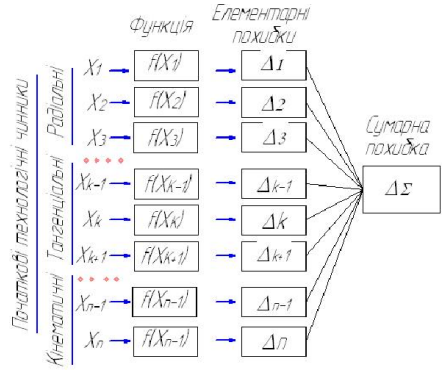


Рисунок 1 – Загальна схема виникнення та структура сумарної похибки обробки на основі детермінованої моделі

2. Елементарні похибки зубонарізання. Розглянемо складові похибки зубооброблення, викликані кінематичними і геометричними початковими відхиленнями в системі ВПІД зубофрезерного верстата.

2.1. Радіальні похибки.

1. Радіальне биття дискової фрези як сумарне зміщення її зовнішнього діаметра в радіальному напрямку виникає внаслідок биття інструментального шпинделя та його підшипників, зазору між валом та базовим отвором фрези, власним зміщенням зовнішнього діаметру фрези відносно осі її базового

отвору як похибки виготовлення інструмента.

Внаслідок радіального зміщення Δe осі фреза отримує приростання сумарного ексцентриситету e, який впливає на величину модуля та похибку основного кроку:

$$\Delta p = \pi \cdot \Delta m = 2\pi \cdot \left(\sqrt{e^2 + \Delta e_{\phi}^2} - e\right) \cdot \mathrm{tg}\alpha_{\omega}, \qquad (1)$$

де α_{ω} – кут зачеплення передачі.

Вплив цієї похибки зменшується із збільшенням модуля та основного кроку (рисунок 2).

Радіальне биття зубчастого колеса також є циклічною похибкою, з періодом, рівним часу оберту стола верстата. Її величина Δr, яка переноситься на зубець в процесі обробки залежить від кута між віссю симетрії впадини цього зубця і вектором радіального биття стола. Профілі зубців з відхиленнями в радіальному і тангенційному напрямках, які відповідають величині радіального биття колеса 0,5мм, та номінального профілю показано на рисунку 3. Величина Δf_r слабо залежить від кількості зубців колеса, яке нарізають і практично не залежить від інших чинників.

2.2. Тангенційні похибки діють в дотичному напрямку для колеса та є осьовими для системи координат фрези.

Похибка установки фрези в осьовому напрямку визначається зміщенням положення дискової фрези на осі інструментального шпинделя, тобто, зміщенням площини фрези стосовно площини міжосьового перпендикуляру.

На рисунку 4 наведено номінальний профіль (1) і профіль, на якому відображається вказана похибка (2). Її дія призводить до асиметричності форми зубців і впадин по правій і лівій системах профілів.

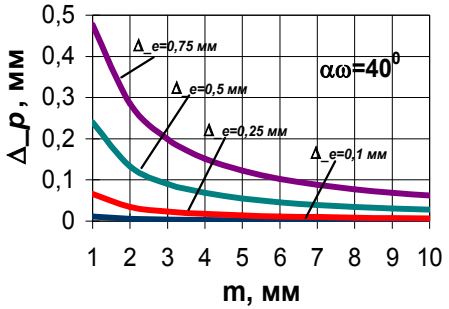


Рисунок 2 – Похибка основного кроку колеса залежно від модуля і похибки ексцентриситету

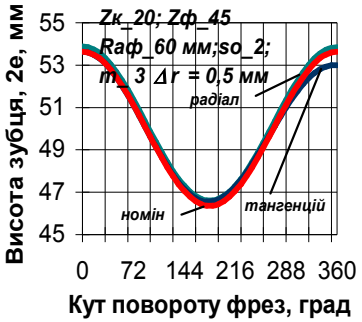


Рисунок 3 – Профілі з урахуванням відхилення колеса в радіальному і тангенціальному напрямках внаслідок радіального биття стола, та номінальний профіль зубця

Торцеве биття фрези внаслідок кутового зміщення її площини (перекошування). Дана похибка викликана кутовим відхиленням площини, в якій лежить фреза, відносно міжосьової площини, що проходить через вісь симетрії центрального зубця. Її перенесення на нарізуване колесо відбувається циклічно з частотою, кратною кількістю зубців колеса.

Якщо кутове зміщення площини фрези і площини міжосьового перпендикуляру становить λ, то при зовнішньому діаметрі фрези $D_{a_фр}$ максимальне осьове відхилення буде рівне:

$$\Delta x_{\lambda} = \frac{D_{a_фр}}{2 \cdot \mathrm{tg}\lambda}. \qquad (2)$$

На рисунку 4 наведено номінальний та фактичний профілі з урахуванням похибки кутового відхилення площини осі 5° при діаметрі фрези 120мм і модулі колеса 3мм. На рисунку 5 показано графік зміни похибки $\Delta_{x\lambda}$ профілю по куту повороту колеса для діаметрів фрези 60мм і 120мм. Як видно з цього графіка, максимальна похибка кутового положення практично не залежить від зовнішнього діаметра фрези.

Похибка, викликана відхиленням кута зачеплення. Вплив похибки $\Delta\alpha_{\omega}$ кута зачеплення на точність зубообробки можна встановити на основі залежності (1), з якої випливає, що

$$\Delta p_{\alpha\omega} = \pi \cdot \Delta m = 2\pi \cdot e \cdot \left[\mathrm{tg}\alpha_{\omega} - \mathrm{tg}(\alpha_{\omega} + \Delta\alpha_{\omega})\right]. \qquad (3)$$

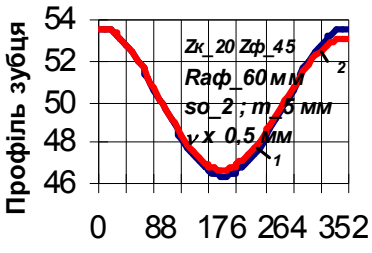


Рисунок 4 – Профілі зубця номінальний (1) та внаслідок осьового зміщення фрези (2)

Рисунок 5 – Номінальний та фактичний профілі з урахуванням кутового відхилення площини фрези: похибка кута осі 5°, діаметр фрези 120мм, модуль 3мм

2.3. Кінематичні похибки. Ця група похибок відображає результуюче модульоване коливання, яке містить відхилення різних частот. Найвища частота відповідає частоті обертання фрези, а найнижча – частоті обертання зубчастого колеса зі столом верстата.

Нерівномірність швидкості різання та порушення узгодженого руху інструменту і заготовки з частотою обертання фрези зумовлене похибками ланцюга приводу інструментального шпинделя верстата і призводить до почергового відставання та випередження обертання дискової фрези відносно номінального (рівномірного) руху різання. За своїм впливом на точність зубчастого колеса вона аналогічна до попередньої похибки – діє в тангенційному напрямку та викликає зміну миттєвого радіус-вектора синусоїди.

Графічно похибка основного кроку при значенні кута зачеплення 20° наведена на рисунку 6.

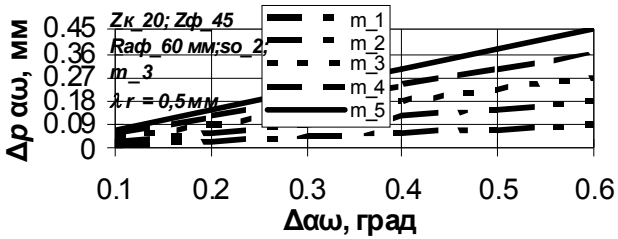
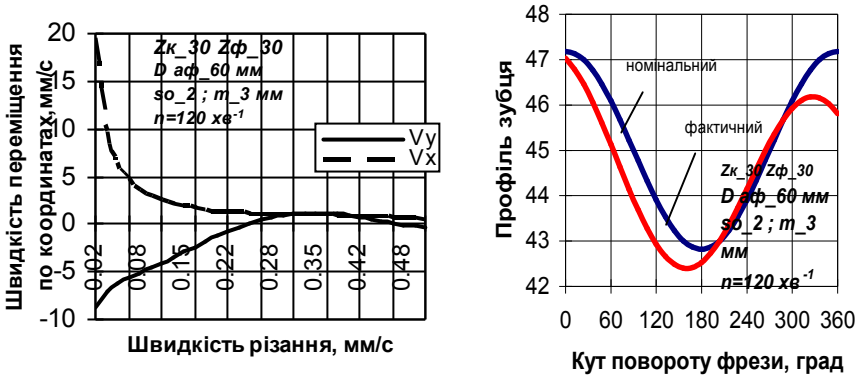


Рисунок 6 – Похибки профілів внаслідок відхилення кута зачеплення

На рисунку 7,*а* наведено графіки переміщення фрези по осях OX і OУ за один оберт фрези при частоті її обертання 120 хв$^{-1}$, що відповідає періоду 0,5с. Якщо допустити, що похибка швидкості різання становить 5% від номінальної, то фактичний профіль зубця в порівнянні з номінальним буде таким, як показано на рисунку 7,*б*.



а *б*

Рисунок 7 – Номінальний та фактичний профіль зубця внаслідок нерівномірності швидкості різання

Нерівномірність швидкості різання та порушення узгодженого руху інструменту і заготовки з частотою обертання колеса зі столом верстата. Ця похибка теж є циклічною, проте низькочастотною; її частота менша від частоти попередньої похибки в кількість разів, яка дорівнює кількості зубців колеса. Виходячи з цього її частка, яка переноситься на один зубець буде більш, на порядок меншою від похибки внаслідок нерівномірності швидкості різання. Приймаючи це до уваги, даною похибкою в розрахунках знехтуємо.

Висновки. Визначено структуру сумарної похибки нарізання зубчастих коліс в радіально-коловому способі. Встановлено аналітичні залежності між початковими елементарними відхиленнями елементів технологічної системи зубофрезерного верстата та відхиленнями зубчастих профілів. Отримані залежності дають змогу виявити найбільш істотні початкові відхилення та розробити заходи для зменшення їх впливу на точність обробки.

Список літератури: **1.** *Тайц Б.А.* Точность и контроль зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1978. – 362с. **2.** *Грицай І.Є., Литвиняк Я.М.* Синусоїдальні зубчасті передачі як альтернатива традиційним передачам та новий метод їх виготовлення // Вісник Національного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХПІ", 2009. – №19. – С.43-53. **3.** *Грицай И.Е., Благут Е.Н.* Зубчатые передачи и технологии их изготовления: новое в традиционном // Оборудование и инструмент: Международный информационно-технический журнал. – №2(61). – 2005. – С.36-40. **4.** *Грицай І.Є., Благут Е.М., Яворський В.З.* Синусоїдальні зубчасті колеса та новий ефективний метод їх виготовлення // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала с международным участием. – Славск, 21-25 февраля 2005. – С.47-50. **5.** *Грицай І.Є.* Зубчасті передачі синусоїдального зачеплення і новітня технологія їх виготовлення // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. трудов XII междунар. научн.-техн. конференции. – Севастополь, 12-17 сентября 2005. – С.230-234. **6.** *Грицай І.Є.* Підвищення технічного рівня передач приладів на основі зубчастого зачеплення синусоїдального профілю // Тези доповідей 6-ї науково-технічної конференції "Приладобудування 2007: стан і перспективи". – 24-25 квітня 2007 р., м.Київ. – С.108-109. **7.** *Грицай І.Є., Литвиняк Я.М., Кук А.М.* Застосування дискових фрез із рухомою віссю обертання для покращення техніко-економічних показників виготовлення циліндричних зубчастих коліс // Інструменти та інструментальне виробництво: Матеріали першої науково-практичної конференції. Львів, 24-25 жовтня. Зб. наук. статей. – Львів, ЛвЦНТЕІ, 2007. – С.31-32. **7.** *I. Gritsay.* Sinusoidale Zahnpadubersetzung als Alternative zur traditionellen ubersetzung und die Neue Schneidemethode von Zahnradern // "European Applied Sciences": Stuttgart, Germany. № 5-2, 2013. – S.3-5.

Надійшла (received) 10.02.2014

УДК 629.45

С.С. ГУТЫРЯ, д.т.н., профессор каф. машиноведения и деталей машин ОНПУ, Одесса;
Ю.М. ХОМЯК, к.т.н., доцент каф. нефтегазового и химического машиностроения ОНПУ;
Й. АРИЗА ДЕ МИГЕЛЬ, магистр, аспирант каф. машиноведения и деталей машин ОНПУ, Бильбао, Испания

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ТРУБЧАТЫХ ОСЯХ ПРИ ИЗГИБЕ С ВРАЩЕНИЕМ

Разработана конечно-элементная модель и алгоритм определения коэффициента концентрации напряжений для трубчатых осей колесных пар с галтельными переходами произвольной формы. Исследованы закономерности изменения формы фронта усталостной трещины, подтвержден эффект снижения кривизны линии фронта по мере приближения к внутренней поверхности трубчатой оси.
Ключевые слова: галтель, концентрация напряжений, глубина трещины.

Актуальность задачи. Высокие нормативные требования к надежности колесных осей грузовых и пассажирских поездов обеспечиваются подбором материала с однородными свойствами и высокими характеристиками усталостной прочности, точностью расчетных схем и совершенством конструкции, технологией изготовления и др. Объективная тенденция значительного повышения скорости движения современных пассажирских поездов (до 500км/ч и более) обуславливает необходимости поиска новых конструктивных решений для колесных осей, дальнейшего уточнения расчетных моделей с целью повышения их адекватности, а также повышения надежности технологий диагностики возникновения трещин различной природы [1, 2].

В частности, для всех электропоездов со скоростями движения более 210км/ч мировым лидером – фирмой *Shincansen*, обосновано применение колесных осей трубчатой конструкции из углеродистой стали, подвергаемых индукционной закалке. При этом наличие центрального отверстия d=60мм, предназначенного для периодического контроля отсутствия трещин, обеспечивает также повышение усталостной прочности оси за счет улучшения прокаливаемости детали. Расчетный коэффициент безопасности для трубчатых осей повышен по сравнению со сплошной осью от 1,5 до 2,39…2,58 [3].

Из опыта эксплуатации колесных пар скоростных электропоездов установлено, что основными причинами возникновения усталостных трещин в осях являются [4]:

- сочетание высоких изгибных напряжений с контактными, а также фреттинг-коррозия на участках прессовых соединений;
- концентрация изгибных напряжений на участках осей вблизи кольцевых канавок и галтельных переходов.

Цель исследования. Учитывая, что вероятность ускоренного развития локальных глубоких трещин в трубчатых осях гораздо выше, чем в сплошных из-за пониженного сопротивления сечения по мере приближения к внутренней поверхности, исследование особенностей развития эллиптических трещин в таких конструкциях представляется актуальным. Наличие соответствующих моделей позволяет не только уточнить прогноз зарождения трещины и оптимизировать периодичность контроля осей в эксплуатации, но также

© С.С. Гутыря, Ю.М. Хомяк, Й. Ариза Де Мигель, 2014