

1. Абрамович Г.П. Теория турбулентных струй. М., 1960. 2. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. М., 1969. 3. Вахламов С.В. Расчет проектирования струи в сносящем потоке // Инженерно-физический журнал. 1964. Том VII, №10.

УДК 621.914.5:621.9.015

Грицай І.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра “Технологія машинобудування”

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІКИ РІЗАННЯ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ З РОЗПОДІЛЕНИМ ВИХІДНИМ КОНТУРОМ

© Грицай І., 2000

Запропоновано нові конструкції черв'ячних фрез для двоперехідного попереднього нарізання циліндричних зубчастих коліс. Наведені результати моделювання параметрів зрізів та крутного моменту на вісі фрези, теоретично досліджено особливості динаміки процесу під час використання фрез зі стандартним та модифікованим профілем. Показано можливість покращання динаміки зубонарізання, підвищення продуктивності, точності обробки та стійкості інструменту під час використання фрез нових конструкцій.

New constructions of screw type hobs for two ways cutting of cylindrical cog-wheels before their final processing; the results of the modelling of the parameters of the cutting and torque being applied to a hob by the usual screw-type hob and by the screw-type hob of the modified profile. The possibility of decreasing the parameters and the force of cutting, of leveling of forced vibrations and dynamic loads, the improving of the quality of cog-wheel production

Нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами є основним методом попереднього і напівчистового оброблення циліндричних зубчастих коліс 7-9 ступеня точності. З огляду на універсальність цього методу та його широке розповсюдження в усіх галузях машинобудування, над удосконаленням конструкцій черв'ячних фрез постійно працюють дослідники та наукові колективи. Проте, внаслідок специфіки самого об'єкта виготовлення – зубчастих коліс, та складностей аналітичного описання формування їх зубців, досі відсутня універсальна комплексна модель, що відтворює закономірності перебігу зубонарізання в умовах обкочування. Здебільшого теоретичною базою для аналітичного моделювання роботи черв'ячної фрези є введене А.К.Сидоренком уявлення про зону контакту черв'ячної фрези з заготовкою у вигляді поверхні перетину двох гладких циліндрів з перехресними вісями, один з яких має зовнішній діаметр черв'ячної фрези, а другий – зовнішній діаметр зубчастого колеса, яке підлягає обробці [1]. Проте, за такого підходу неможливо врахувати дійсну поверхню різання для кожного окремого зубця і леза черв'ячної фрези, яка є перехідною поверхнею між прорізаною частиною западини між суміжними зубцями, та ще необробленою поверхнею заготовки. У той же час, без врахування справжніх форми і розмірів цієї складної просторової поверхні будь-яка модель

процесу буде неадекватною об'єктові моделювання. Про це, зокрема, свідчить негативний досвід використання черв'ячних фрез “Прогрес” та інструментів з криволінійними твірними (“рівномірного різання”, “рівномірного зношування”), з коригуванням профілю зубців по висоті та ширині (черв'ячних фрез з прогресивних та вершинно навантаженими схемами різання) тощо. Усі ці конструкції базувалися на згаданому спрощеному уявленні про поверхню різання черв'ячної фрези, внаслідок чого ефект від їх практичного використання був значно меншим від очікуваного (як це було з прогресивними фрезами) або взагалі відсутнім.

Метод моделювання параметрів, а також побудована на його основі модель силового поля черв'ячної фрези [2,3] дозволили знайти новий підхід до теоретичного аналізу процесів різання, формоутворення і описання динамічних навантажень на елементи технологічної системи зубофрезерного верстата, розробити нові конструкції черв'ячних фрез та виконати їх теоретичне дослідження. Зокрема, для двоперехідного нарізання циліндричних зубчастих коліс модулем понад 5 мм запропоновано використати комплект із двох фрез, профілі зубців у яких відрізняються від звичайних*. У черв'ячної фрези для першого переходу зубці мають профіль, що відповідає профілю ніжки вихідного контуру, а зубці фрези для другого проходу мають профіль голівки вихідного контуру. За такої будови фрез зберігаються закономірності формоутворення та профілювання в умовах обкочування, але відбувається перерозподіл припуску між першим та другим переходами і змінюється схема усунення металу із западин між зубцями. На першому переході усувається частина припуску поза ділильним циліндром зубчастого колеса і формуються частина бокових профілів суміжних зубців. На другому переході усувається метал, що знаходиться між ділильним циліндром і циліндром западин колеса, і формуються ніжки зубців колеса. Зубці черв'ячної фрези для другого переходу виконані на спільній гвинтовій поверхні. Щоб виключити контакт цієї поверхні з зубцями зубчастого колеса, яке підлягає обробці, її ширина у нормальному перетині не повинна виходити за межі вихідного контуру. Цю поверхню не розділяють стружковими канавками, що дає змогу забезпечити міцність модифікованих зубців не нижчу, ніж у звичайної фрези. Вказані зміни мають на меті:

- збільшити відносну ширину верхових лез у периметрі різання та привести у відповідність частку верхового леза в периметрі різання до роботи, яку виконують ці леза;
- зменшити висоту зубців і скоротити довжину їх основи у торцьовому перетині, що дозволило б, при такому ж зовнішньому діаметрі черв'ячної фрези, збільшити кількість її рейок (торцьових зубців). Отже, при такому ж значенні подачі на зуб, як у звичайної черв'ячної фрези, модифіковані фрези з розподіленим вихідним контуром дозволять пропорційно зростанню кількості рейок збільшити осьову подачу і підвищити продуктивність обробки;
- збільшити кількість профілюючих різів черв'ячної фрези та підвищити якість обробки зубчастих коліс.

Необхідною умовою виготовлення комплекту таких фрез є нарізання гвинтової поверхні зубців і стружкових канавок при одному налагодженні верстатів на відповідних технологічних операціях. Крім того, фрези для другого переходу повинні мати перекриття

* Спосіб нарізання циліндричних зубчастих коліс. Заявка на винахід №99052508. Пріоритет від 05.05.1999 р.

по висоті зубців (у межах 0,2-0,6m) для усунення сліду між першим і другим проходами. Технологія виготовлення цього інструменту не відрізняється від звичайної, а оснащення потребує мінімального доопрацювання. Як свідчать розрахунки, при такій схемі прорізання западин (за умови дотримання вказаних вимог) похибки профілів зубчастих коліс будуть знаходитися в межах припуску під чистову обробку.

Інша конструкція пропонується для черв'ячних фрез, призначених для виконання лише першого переходу. Оскільки під час прорізання западин між зубцями стандартною фрезою на першому переході використовується тільки частина повного профілю її вихідного контуру, то можна зменшити висоту зубців та, як і в попередньому випадку, збільшити кількість рейок і осьову подачу. Для другого переходу можна використати звичайну черв'ячну фрезу, але такі фрези теж повинні виготовлятися в одному комплекті.

Використовуючи розроблені моделі параметрів зрізів та складових сили різання на основі силового поля черв'ячної фрези, у статті описаний порівняльний аналіз параметрів зрізів та крутного моменту на вісі фрези для першого переходу нарізання зубчастого колеса:

- стандартною черв'ячною фрезою – варіант А;
- черв'ячною фрезою, профіль зубців якої збігається з головкою профілю нормального вихідного контуру – варіант В;
- черв'ячною фрезою, профіль зубців якої відповідає ніжці профілю нормального вихідного контуру – варіант С.

Розрахунки виконані для тягових зубчастих коліс електровозів, які виготовляють на Львівському локомотиворемонтному заводі для таких вихідних даних: колесо: модуль – 10 мм, кількість зубців – 88, матеріал – сталь 50, HB 280...320 (гартування і високий відпуск); черв'ячна фреза: зовнішній діаметр – 170 мм, кількість рейок – 9, кут підйому гвинтової лінії – $3,8^{\circ}$, кількість заходів – 1, передній кут на вершинному лезі дорівнює нулю; осьова подача – 1,5 мм/об. (у діючому технологічному процесі – 0,9 мм/об), напрямок подачі – зустрічна; питома сила різання - 1050 МПа, коефіцієнт тертя на передній поверхні $\mu = 0,5$; тертя на задніх поверхнях не враховувалося.

Для варіантів “В” і “С” усі початкові умови такі ж, крім кількості рейок. Розроблено робочі креслення черв'ячних фрез з розподіленням вихідним контуром модулем 10 мм з зовнішнім діаметром 170 мм, з кількістю рейок для обох варіантів (“В”, “С”), яка дорівнює 16.

На рис.1 показані графіки зміни максимальних розрахункових значень товщини та площі поперечного перетину зрізів на вершинних лезах, на які припадає майже половина металу, що усувається із западин, у функції від кута повертання передньої поверхні черв'ячної фрези. Як це впливає з графіків, у варіантах “В” і “С” в середньому на третину зменшуються максимальні і середні значення площі поперечного перетину та товщина зрізів, при цьому зростає їх ширина. Значення максимальних кутів контакту з заготовкою становить у варіантах “А”, “В”, “С” відповідно, $31,20^{\circ}$; $40,20^{\circ}$ і 42° . Активна довжина фрези становить для варіантів “А” – 98,87 мм; “В” – 85,76 мм; “С” – 109,32 мм.

Нарізання циліндричних зубчастих коліс за методом безперервного обкочування характеризуються невірноваженістю, супроводжуються ударними навантаженнями та вібраціями, що негативно впливають на точність зубчастих коліс, стійкість фрез та продуктивність обробки.

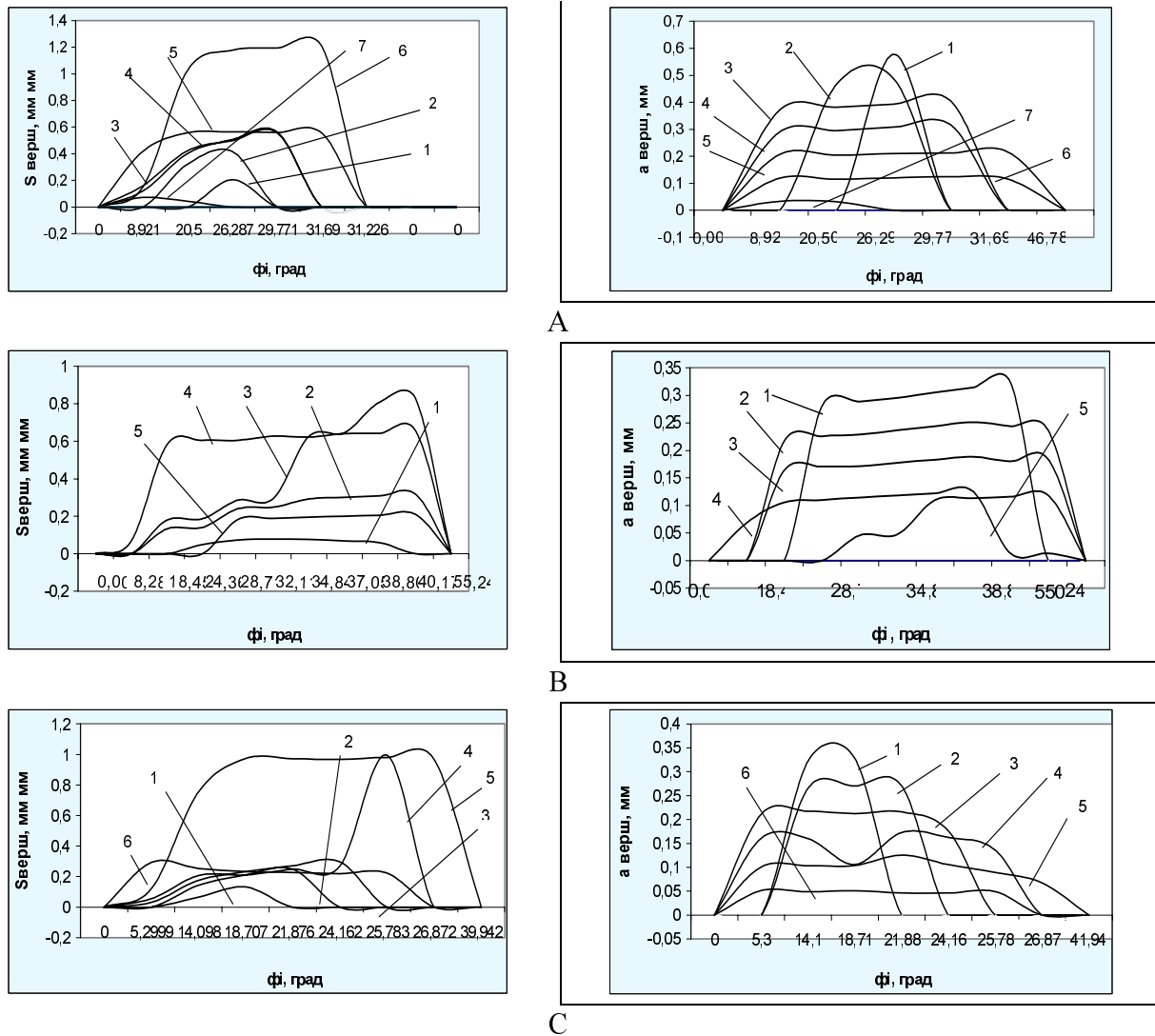


Рис.1. Площа та товщина зрізів на вершинних лезах черв'ячної фрези у варіантах, які порівнюють.

Вимушеним чинником пружних коливань і вібрацій під час зубофрезерування є сила різання та крутний момент на вісі фрези.

На рис.2 показано крутні моменти, що діють на окремі зубці черв'ячної фрези (а) та їх сумарні значення на рейках фрези (б) у функції від кута її повертання. У розрахунках враховувалося зростання моменту внаслідок збільшення торцевого перекриття у фрезах з розподіленим вихідним контуром. З порівняння рис.1 та рис.2 можна дійти висновку, що параметри зрізів черв'ячної фрези (як ті, що здійснюються вершинними лезами, так і сумарні на усіх лезах – у статті ці залежності не наводяться) та колова сила і крутний момент на її вісі не перебувають у прямо- пропорційній залежності. Відсутність прямого зв'язку між параметрами зрізів і силовими чинниками процесу можна пояснити умовами невірного різання, яке характерне для більшості зубців черв'ячної фрези, а також просторовою взаємодією різновекторних елементарних сил, що діють на кожному працюючому лезі; обидві вказані обставини враховані у моделі силового поля [3].

Закономірності зміни крутного моменту на вісі фрези (тотожного коловій складовій сили різання), у функції від кута повертання передньої поверхні характеризують одиничні імпульси сили і несуть інформацію про динаміку процесу в кожному з трьох

порівнювальних варіантах. Відомо, що вплив імпульсу сили на пружну систему верстата визначається такими характеристиками:

- формою імпульсу, яка визначає розподіл енергії у часі його дії;
- найбільшим значенням імпульсу;
- швидкістю і часом наростання імпульсу.

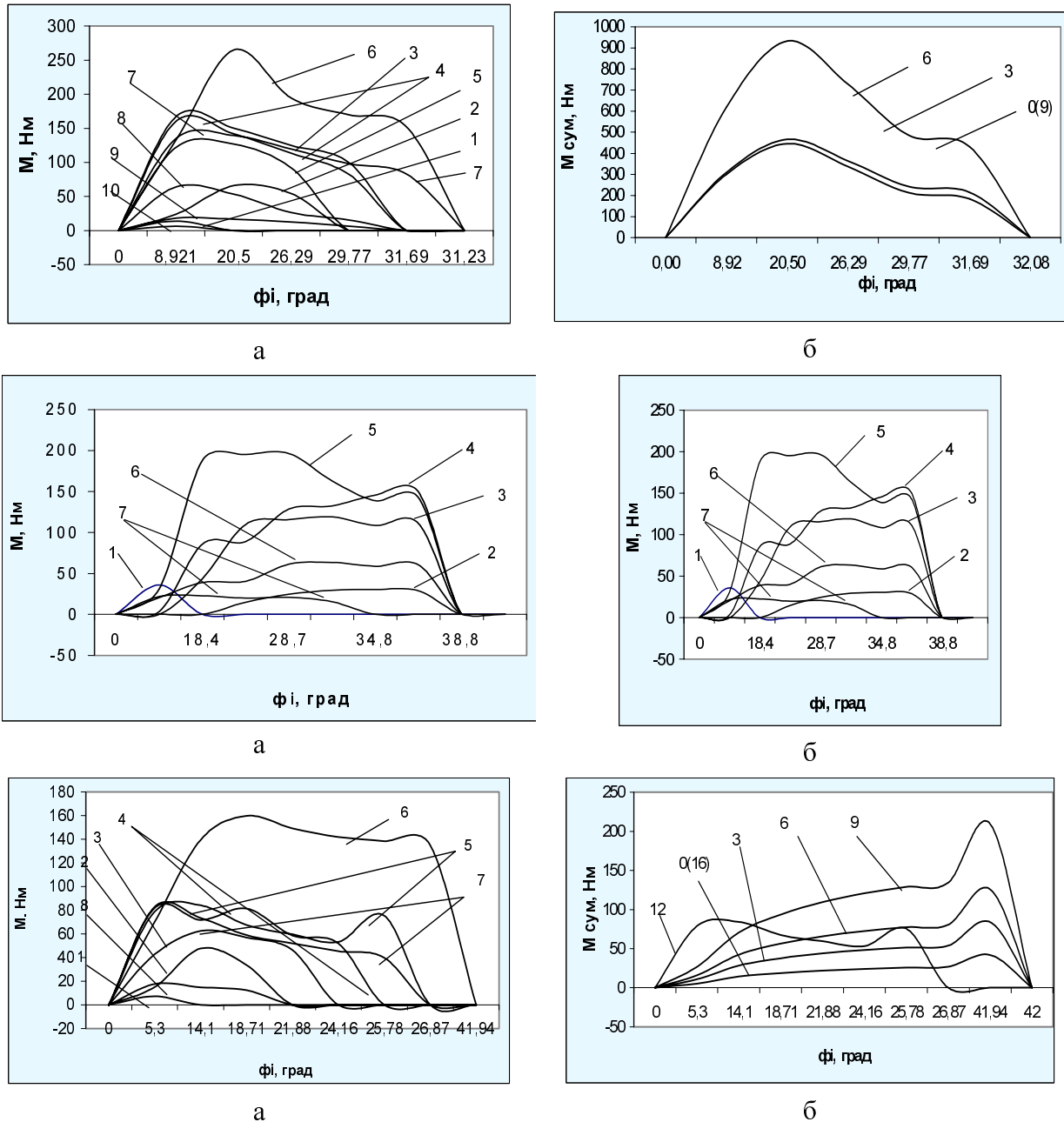


Рис.2. Крутні моменти на зубцях (а) та рейках (б) черв'ячної фрези у варіантах А,В,С

На підставі отриманих залежностей можна стверджувати, що за однакових інших початкових умов, зокрема осьовій подачі, глибині різання і швидкості різання, процеси в порівнюваних варіантах характеризуються відмінностями

1. пікове значення імпульсу крутного моменту на найбільш навантаженій рейці у варіанті "В" (155,3 Нм) у 6 разів менше, а у варіанті "С" (209,7 Нм) – у 4,4 раза менше ніж

під час використання звичайної фрези (932,8 Нм), що свідчить про значне зменшення сили різання у нових конструкціях черв'ячних фрез.

2. Графік параметра $M_{кр}$ на ділянці зростання до пікового значення у всіх трьох випадках можна описати функцією вигляду

$$M(\varphi) = M(\tau) = M_A \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_p}} \right), \quad (1)$$

де φ – кут повороту фрези за час, який дорівнює τ ; M_A – амплітуда крутного моменту; T_p – постійна часу експоненти, що характеризує швидкість наростання імпульсу у початковий момент його дії. Враховуючи час, за який функція $M(\varphi)$ досягає максимального значення у кожному з трьох варіантів і який є пропорційним до кута повороту фрези, з залежності (1) виходить, що порівняно зі стандартною фрезою параметр T_p і швидкість наростання значення моменту в варіанті “В” є меншими у 1,5-2,7 разів, а у варіанті “С” – меншими у 2,5-3,2 рази. Це вказує на те, що різання звичайною фрезою супроводиться ударом в момент врізання у заготовку, в той час, як у фрез з розподіленим вихідним контуром сила різання і крутний момент під час врізання зростають плавно. Ця обставина свідчить про можливість покращання динаміки процесу та значне зменшення впливу врізання зубців інструменту в заготовку на збудження вібрацій пружної системи зубофрезерного верстата.

3. У черв'ячній фрезі, виконаній за варіантом “С” під час виходу зубців з заготовки спостерігається локальний екстремум функції крутного моменту; подібне явище, але у менших межах, фіксується також на фрезі у варіанті “В”. Проте, беручи до уваги кількратне зменшення амплітуди імпульсу порівняно зі стандартною фрезою, це не повинно суттєво впливати на нерівномірність різання в момент виходу інструменту з заготовки.

Додаткова інформація про особливості перебігу різання та його динаміку міститься у графіках рис.3, які характеризують зміну усереднених по куту повороту фрези моментів сумарного різання в функції від номера торцевого зубця, у яких враховано одночасну роботу декількох зубців однієї і тієї ж рейки, а також торцеве перекриття фрези. Низькочастотна складова є кривою амплітудної модуляції крутного моменту за час повного оберту фрези, а високочастотні складові цих графіків характеризують одиничні імпульси окружної сили і крутного моменту на окремій рейці. Тут відмінності в порівнюваних варіантах впливають із зміни торцевого перекриття. Як наслідок зменшення висоти зубців та зростання кількості рейок у варіантах “В” і “С”, збільшується довжина дуги контакту і кількість торцевих зубців (рейок), що одночасно знаходяться у контакті з заготовкою. Коефіцієнти торцевого перекриття ε_a у варіантах “А”, “В”, “С” становлять відповідно 0,52; 1,78; 1,8.

Під час використання звичайної фрези (“А”), кутовий торцевий крок якої є більшим від кута контакту, крутний момент на фрезі, який віддзеркалює закономірність зміни сили різання при кожній різі має вигляд одиничного імпульсу, що зростає від нуля до максимального значення, і потім знову спадає до нуля. Імпульси крутного моменту на кожній рейці розділені у часі і відбуваються протягом одного оберту фрези з частотою, яка дорівнює кількості рейок черв'ячної фрези $z_0 = 9$. Усереднене значення $M_{кр}$ у максимумі досягає 390,3 Нм на фрезі та 206,7 Нм – на вісі стола верстата.

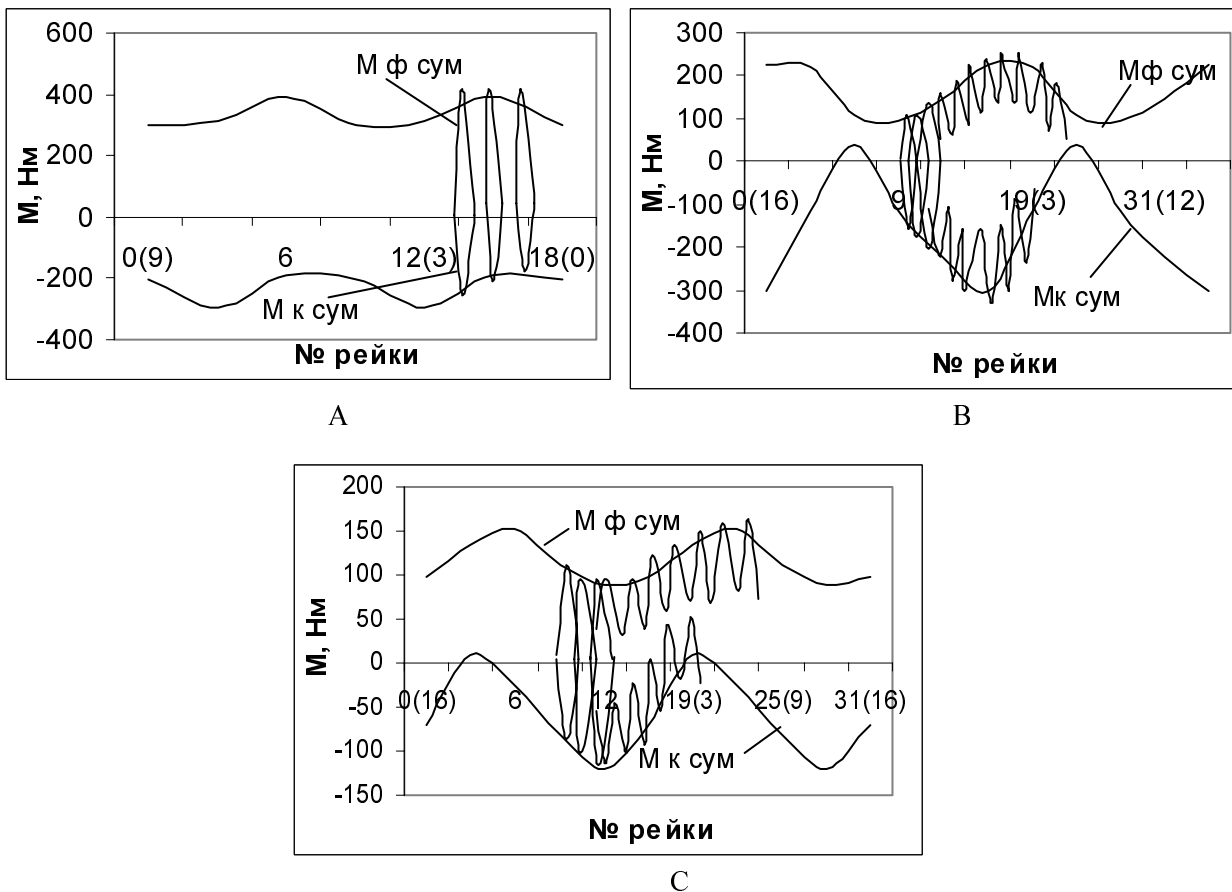


Рис.3. Крутні моменти сумарного різання (на рейках) у функції від номера рейки черв'ячної фрези.

У варіантах “В” і “С”, внаслідок зростання торцевого перекриття, коливання крутного моменту під час різання двома сусідніми рейками не досягає граничних значень, а амплітуда цих коливань зменшується, залишаючись практично однаковою за час повного оберту фрези і становить відповідно 102 Нм і 68 Нм. Як результат торцевого перекриття зростає також частота параметра $M_{кр}$, яка становить у варіанті “В” – $1,78 z_0 = 28,5$, а у варіанті “С” – $1,8 z_0 = 28,8$ за один оберт фрези. За таких значень амплітуд і частот пружна система зубофрезерного верстата не буде реагувати на високочастотні зміни параметра $M_{кр}$ і сили різання, а крутний момент, що діє на інструмент і заготовку, змінюватиметься за законом низькочастотної складової спектра з частотою, що відповідає часові одного оберту фрези. У такому разі розмах коливання крутного моменту на фрезі буде становити 127,9 Нм (варіант “В”) і 49,9 Нм (варіант “С”), а розмах крутного моменту, що діє на стіл верстата, відповідно, – 261,6 Нм і 128 Нм. Такі дані свідчать про зменшення сили різання та навантаження на елементи зубофрезерного верстата та зміну характеру цього навантаження під час використання черв'ячних фрез нових конструкцій.

Разом з цим, внаслідок збільшення кількості рейок у запропонованих черв'ячних фрез зростає кількість профілюючих різів і зменшується похибка профілів на зубцях зубчастого колеса, яка проявляється у вигляді огранювання ламаної лінії, що заміняє теоретичну евольвенту. Висоту огранювання можна розрахувати за формулою [4]

$$y = \frac{\pi^2 \cdot k^2}{2 \cdot z^2 \cdot z_0^2} \cdot \rho, \quad (2)$$

де k – кількість заходів фрези; z і z_0 – кількість відповідно зубців колеса і рейок фрези; ρ – радіус кривизни евольвенти.

Розраховане за цією залежністю значення огранювання профілю для точки кривизни поверхні зубців, що знаходиться на ділільному діаметрі, при $z_0 = 9$ і $z_0 = 16$, становить відповідно 12,3 мкм і 4 мкм, тобто, під час використання черв'ячних фрез з розподіленим вихідним контуром похибка евольвентних профілів зменшується у 3 рази порівняно зі стандартною фрезою.

Отримані результати показують, що в нових конструкціях черв'ячних фрез закладені можливості інтенсифікації технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс та покращання їх якості. Проте для отримання максимального ефекту від їх використання необхідно забезпечити оптимізацію конструктивно-технологічних параметрів процесу вибором їх оптимальних значень. Моделювання сил та моментів, проведене у широких межах зміни початкових умов, дозволило встановити, що для цього технологічного процесу оптимальними є поєднання таких значень параметрів: кількість рейок фрези $z_0 = 14$; співвідношення між глибиною різання на першому та другому переходах 1:1; осьова подача – 2,25-2,6 мм/об.

Отже, на підставі проведених теоретичних досліджень можна зробити висновки.

1. Завдяки збільшенню кількості рейок і зміни профілів зубців у черв'ячних фрез із розподіленим вихідним контуром відбувається перерозподіл припуску між більшою кількістю зубців, внаслідок чого зменшуються параметри зрізів і сила різання.

2. Зростання кількості рейок забезпечує більшу кількість профілюючих різів і зменшення похибки евольвентних профілів.

3. Внаслідок збільшення торцевого перекриття зростає частота зміни сили різання і крутного моменту, при одночасному зменшенні порівняно зі звичайною фрезою амплітуди їх значень. За таких збуджуючих чинників у спектрі коливання зубофрезерного верстата буде відсутня високочастотна складова, а на черв'ячну фрезу і стіл верстата будуть діяти крутні моменти, що змінюються за законом низькочастотної складової спектра коливань, тобто, за законом кривої амплітудної модуляції. Внаслідок таких змін ударні навантаження у вигляді імпульсів сили, що супроводять кожний різ звичайної фрези і змінюються від нуля до максимального значення із частотою z_0 , будуть замінені силою різання і крутним моментом, абсолютне значення яких суттєво зменшується, а зміна за один оберт черв'ячної фрези відбувається плавно за законом синуса. Значить покращується динамічна характеристика різання, що позитивно впливає на стійкість черв'ячних фрез нових конструкцій і дає підстави очікувати підвищення точності виготовлення зубчастих коліс. З іншого боку, якщо сформульована задача забезпечити заданий період стійкості, то під час використання запропонованих черв'ячних фрез можна працювати із вищою осьовою подачею та підвищити продуктивність процесів попередньої та півчистової обробки зубчастих коліс.

4. Розроблені графоаналітичні моделі параметрів зрізів та силового поля черв'ячної фрези дозволяють теоретично дослідити та оптимізувати конструктивно-технологічні параметри нарізання циліндричних зубчастих коліс за методом неперервного обкочування.

1. Сидоренко А.К. Прогрессивное зубофрезерование. М., 1951. 2. Грицай І.Є. Моделювання параметрів зрізів, сил та моментів під час нарізання зубчастих коліс черв'ячними

фрезами // *Машинознавство*. 1998. № 7. С.19-24. 3. Грицай І.Є., Ситнік В.В. Силове поле черв'ячної зуборізної фрези та його кількісна оцінка // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. 1999. № 371. С.3-11. 4. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес. М., 1972.

УДК 621.787

Литвиняк Я., Литвиняк Г.

ДУ "Львівська політехніка", кафедра "Технологія машинобудування"

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

© Литвиняк Я., Литвиняк Г., 2000

Дослідження кінематики взаємодії ударних елементів з установчими пальцями інструментів динамічного зміцнення деталей дозволило запропонувати шляхи забезпечення відповідної довговічності інструментів за рахунок зменшення напружень удару на ділянках контакту робочих елементів.

The research of cinematic of interaction of shock units with customizing fingers of instruments of dynamic hardening has allowed to offer paths of security of required longevity of instruments at the expense of decrease of efforts(voltages) of impact on sites of contact of working units.

Необхідні високі експлуатаційні показники деталей машин здебільшого можна забезпечити методами поверхневого пластичного деформування (ППД), а саме динамічними методами. Практична реалізація останніх достатньо ефективно здійснюється за допомогою обертових, ротаційних інструментів динамічного зміцнення (ІДЗ), в яких застосовують ударні елементи (УДЕ) змонтовані з великим зазором (3...15 мм) по чергово по колу та вздовж вісі ІДЗ на установчих пальцях (УП), вісі яких паралельні до осі обертання ІДЗ. УДЕ за зовнішнім виглядом нагадують шарошки, зовнішня циліндрична робоча поверхня радіусом r_1 може бути виконана гладкою двояко випуклою (тороподібною), зубчастою тощо [1]. Встановлені щодо поверхні оброблюваної деталі з певним зближенням (натягом h) ІДЗ під час обертання навколо своєї осі забезпечують нанесення УДЕ по чергових ударів своїми зовнішніми поверхнями радіусом r_1 по оброблюваній поверхні, пластично її деформуючи. Після цього, УДЕ відбиваються від поверхні деталі і вдаряють по УП, на яких є встановлені. Контактна взаємодія внутрішньої циліндричної поверхні отвору УДЕ радіусом r_2 з випуклою циліндричною поверхнею УП радіусом r_3 спричинює виникнення в зоні точкового контакту значних динамічних напружень, які сприяють передчасному руйнуванню УДЕ та зношуванню УП. Руйнування УДЕ відбувається внаслідок поширення тріщин, що утворюються або в місцях напливів від розклепування отвору або на ділянках контактно-втомного викрешування. Тривала робота ІДЗ на постійних режимах супроводжується утворенням лише на одній ділянці циліндричної поверхні УП сегментних заглиблень від постійного контактування з отворами відповідних УДЕ. Згадані заглиблення зменшують площу поперечного перетину УП, а також становлять основну причину їх втомного руйнування.