

- зовнішньої або внутрішньої циліндричної поверхні

$$L_1 = R_1 \left[\arccos \left(\frac{R_1^2 + \Delta^2 - R^2}{2R_1\Delta} \right) - \arcsin \left(\frac{\rho}{R_1} \sin(k_{01}\pi - (\varphi_2 + \alpha_0 - \varphi)) \right) \right].$$

Коефіцієнти Δ та k_{01} визначаються за виразами (4) та (5).

Найбільше напруження згину в місці закріплення ПЕ круглого поперечного перетину діаметром d встановлюється за формулою

$$\sigma_0 = k\beta \frac{Ed}{L} \cos \psi_0.$$

Коректуючи натяг h , довжину ПЕ L або зовнішнього радіуса ЦПЕ R досягають такої величини σ_0 , при якій забезпечується необхідна втомна міцність ПЕ.

Запропонована методика вперше в комплексі поєднує точні рівняння значних прогинів пружних стрижнів [2] з кінематикою процесу взаємодії ПЕ з різними за формою оброблюваними поверхнями деталей і дозволяє за допомогою складеної програми на мові Qbasic раціонально спроектувати ЦПЕ, гарантуючи не тільки отримання певних технологічних результатів, але дає змогу забезпечити одну з найбільш вагомих, з експлуатаційної точки зору, характеристик – довговічність інструментів.

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*. М., 1980. 975 с. 2. Попов Е.П. *Теория и расчет гибких упругих стержней*. М., 1986. 296 с.

УДК 621.914.5:621.9.015

ГРИЦАЙ І.Є.

ДИНАМІКА ДВОПЕРЕХІДНОГО НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ В АВТОМАТИЧНОМУ ЦИКЛІ

©Грицай І.Є., 2000

Outcomes of mathematical simulation of parameters of sections, components of force of cutting and torque during cutting cylindrical cog-wheels by screw type hobs. The possibility of a heightening of efficiency and quality of manufacture of cog-wheels is theoretically confirmed at use of screw type hobs with the modified profile of a cog.

Циліндричні зубчасті колеса великих модулів (понад 5 мм) широко використовуються у приводах сучасних машин; їх виготовляють великими обсягами на підприємствах усіх галузей машинобудування. Першу технологічну операцію прорізання черв'ячною фрезою западин між зубцями здійснюють за два переходи, розподіляючи припуск між першим та другим переходом у певному співвідношенні. Сучасні зубофрезерні верстати мають механізм зміни напрямку подачі після першого переходу, завдяки чому повний цикл нарізання зубчастого колеса здійснюється в автоматичному режимі.

У випадках двоперехідного зубонарізання, яке здійснюють стандартними черв'ячними фрезами, глибина різання першого переходу повинна дорівнювати 0,6 від повної висоти профілю, при цьому на другий перехід, який здійснюється на повну глибину профілю фрези, припадає частина припуску, яка дорівнює 0,4 від його загального об'єму. Експериментально доведено, що таке співвідношення забезпечує приблизну рівність крутних моментів на осі фрези під час обидвох переходів і вказує на те, що різання черв'ячною фрезою у суцільному металі супроводиться меншою силою різання, ніж при роботі у попередньо прорізаній западині між зубцями.

З теорії різання відомо, що сила різання має дві складові, одна з яких пропорційна площі поперечного перетину зрізу, а інша – пропорційна периметру різання; ця друга складова – сила тертя по задній поверхні інструменту. Враховуючи це, найбільш ймовірною причиною зростання сили різання під час другого переходу є збільшення ширини зрізів боковими (вхідним та вихідним) лезами черв'ячної фрези під час другого переходу, який здійснюється на повну глибину профілю зубця фрези у частково сформованій западині, в результаті чого й виникає необхідність зменшення частки припуску для другого переходу.

Явище зменшення сили при різанні у суцільному металі використане у нових схемах різання та конструкціях модифікованих черв'ячних фрез.

У цих фрезах зубці побудовані за принципом розподілення вихідного контуру між інструментом для першого та другого переходів так, що зубці інструмента для першого переходу мають профіль, що відповідає ніжці нормального вихідного контуру, а зубці фрези для другого переходу мають профіль головки профілю нормального вихідного контуру. Щоб ніжки зубців другої фрези не брала участь у різанні, вони розміщені на гвинтовій поверхні, що має той же кут підйому. У нормальному перетині ширина цієї поверхні не повинна виходити за межі профілю вихідного контуру, а висота повинна бути дещо більшою, ніж висота голівки зубців, що нарізаються; оскільки вказана поверхня не належить до поверхні різання, то вона не розділяється стружковими канавками. Така модифікація зубців змінює схему усунення припуску із западин зубчастого колеса, яке нарізають. На першому переході усувається весь метал заготовки, котрий знаходиться поза ділильним циліндром зубчастого колеса, і формується верхня частина профілів зубців. На другому переході усувається припуск, що знаходиться між поверхнями ділильного циліндра і западин, та формуються ніжки зубців колеса. Отже, під час другого переходу різання відбувається не у попередньо сформованій западині, а у суцільному металі, при цьому під час обидвох переходів ширина різання на бокових лезах не зростає і залишається однаковою, що сприяє зменшенню сили і крутного моменту. Для усунення перехідного сліду між першим та другим переходом на профілях зубчастого колеса фреза для другого переходу повинна мати перекриття за висотою зубців у межах 0,25...0,5 м.

Крім зменшення сили різання під час другого переходу, вказана модифікація профілів створює передумови для подальших змін у конструкції черв'ячних фрез, які суттєво змінюють перебіг зубонарізання та розкривають невикористані резерви даного технологічного методу, який є основним методом попередньої та напівчистої обробки циліндричних зубчастих коліс.

Аналіз різання черв'ячною фрезою показує, що існує невідповідність між відносною шириною верхових лез у периметрі різання, та роботою, виконуваною цими лезами. Так, при тому, що верхові леза зрізають майже половину об'єму припуску, їх частка у периметрі різання для другого переходу не перевищує 12 %, а для першого переходу – 31 %. Невідпо-

відність між відносною шириною верхових лез і їх роботою призводить до значних питомих навантажень на дані леза і є одним із чинників їхнього прискореного зношування.

У запропонованих конструкціях збільшується відносна ширина верхових лез у периметрі різання, внаслідок чого відбувається перерозподіл роботи зрізу між верховими та боковими лезами. Внаслідок цього усувається вказаний недолік та створюються передумови для підвищення стійкості нового інструмента. У той же час, за рахунок зменшення висоти зубців можливо скоротити довжину їх основи, що дозволяє утворити при незмінному зовнішньому діаметрі більшу кількість зубців (рейок) черв'ячної фрези. Це означає, що у модифікованих фрезах порівняно із звичайними, при однаковому значенні гранично допустимої подачі на зуб s_z , прямо пропорційне збільшенню кількості зубців (рейок), зростає величина осьової подачі та продуктивність обробки. У технічних умовах на виготовлення даного інструмента необхідно передбачити нарізання стружкових канавок і гвинтової поверхні зубців для першої та другої фрези, які становлять один комплект, з послідовною установкою оброблюваних заготовок при незмінному налагодженні верстата. Треба забезпечити жорсткий допуск на розмір базових торців, щоб похибка базування другої фрези і помилки профілів зубчастого колеса, пов'язані з вказаною схемою усунення припуску, були мінімальними. Технологія виготовлення даного інструмента не відрізняється від прийнятої для стандартних черв'ячних фрез, виконується на серійному обладнанні, а оснащення потребує мінімального доопрацювання.

Необхідність зміни інструмента після кожного переходу зумовлює область використання черв'ячних фрез з розподіленим контуром. Їх доцільно використовувати для попереднього нарізання великогабаритних зубчастих коліс крупних модулів з великою кількістю зубців, та при нарізанні коліс пакетом. У цих випадках час прорізання западин буде значно більшим від часу заміни інструмента і буде компенсуватися скороченням тривалості обробки внаслідок збільшення осьової подачі, а також тим, що відпадає необхідність змінювати міжцентрову віддаль після кожного переходу.

Відомо, що процеси нарізання циліндричних зубчастих коліс за методом неперервного обкочування характеризуються неурівноваженістю, супроводяться високими динамічними навантаженнями та вібраціями, що негативно впливають на точність зубчастих коліс, стійкість фрез та продуктивність обробки, є чинниками, що визначають необхідність частого підналагоджування верстата і зменшують час його роботи в автоматичному циклі. Вимушуваним чинником коливань та вібрацій під час зубофрезерування є сила різання, яка змінюється у часі обробки залежно від параметрів зрізів.

Порівнюємо параметри зрізів, сил і моментів, які виникають під час двопрхідного автоматичного нарізання западин між зубцями при використанні звичайної черв'ячної фрези та комплекту фрез з розподіленим вихідним контуром. Розрахунки виконані для технологічного процесу двопрхідного нарізання тягових зубчастих коліс, які виготовляють серійно на Львівському локомотиворемонтному заводі при таких початкових умовах: колесо: модуль – 10 мм, кількість зубців – 88, матеріал – сталь 50, HB280...320 (загартовування і високий відпуск); черв'ячна фреза: зовнішній діаметр – 170 мм, кількість рейок – 9, кут підйому гвинтової лінії – $3,80^\circ$, кількість заходів – 1, головний передній кут на верховому лезі $\gamma_{\text{вер}} = 0$, матеріал – швидкорізальна сталь; осьова подача – 1,5 мм/об (у діючому технологічному процесі – 0,85 мм/об), напрямок подачі – зустрічний для обидвох переходів; питома сила різання – 850 МПа, коефіцієнт тертя на передній поверхні $\mu = 0,5$; тертя по

задніх поверхнях не враховувалося. Тривалість двоперехідного прорізання западин на одному колесі становить одну робочу зміну; час заміни фрези на верстаті – 4 хв.

Для модифікованих черв'ячних фрез вихідні дані ті ж, за винятком кількості торцевих зубців: за рахунок зменшення висоти зубців при тому ж зовнішньому діаметрі фрези (170 мм) спроектовано черв'ячні фрези з розподіленим вихідним контуром, що мають кількість рейок z_0 , яка дорівнює 16.

Теоретичні дослідження виконані за допомогою графоаналітичної моделі параметрів зрізів та моделі силового поля черв'ячної фрези [1–4].

На основі моделювання встановлено, що під час нарізання зубчастого колеса модифікованими фрезами порівняно із звичайною черв'ячною фрезою відбувається перерозподілення припуску, що зрізається, між робочими зубцями: у різання включаються крайні зубці і зростає активна довжина фрези. Наприклад, на першому переході активна довжина стандартної фрези становить 94,25 мм, а модифікованої фрези – 109,32 мм; внаслідок цього зменшується площа поперечного перетину зрізів та сила різання. На рис.1 показані графіки зміни площі поперечних перетинів зрізів на вхідному (1), вершинному (2), вихідному (3) лезах і сумарної (4) площі поперечного перетину вздовж активної довжини фрези L_a ; значення параметрів зрізів усереднені по куту контакту. На рис.2 наведені закономірності розподілу крутних моментів на фрезі M_f і на осі стола верстата з зубчастим колесом M_k ; радіальної P_y і осьової P_z складових сили різання, прикладених до заготовки, на активній довжині черв'ячної фрези. Вказані силові чинники розглядаються як функції миттєвих параметрів зрізів, їх значення теж усереднені по куту повороту передньої поверхні; у формулах для розрахунків їх миттєвих значень враховано зростання сили різання при наявності невірального різання [4]. З даних графіків можна зробити висновок про суттєве (у 1,5–2 рази) зменшення моментів та сил у пікових та середніх значеннях при використанні нових конструкцій черв'ячних фрез. Зокрема, для першого переходу максимальні (пікові) значення сил і моментів для звичайної фрези та фрези, у якої профіль відповідає ніжці вихідного контуру, відповідно, дорівнюють:

$$\begin{aligned} M_f &= 221,2 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad \text{і} \quad 129,3 \text{ Н}\cdot\text{м}; \\ M_k &= -231,1 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad \text{і} \quad 117,7 \text{ Н}\cdot\text{м}; \\ P_y &= 3136,8 \text{ Н} \quad \text{і} \quad 2077,5 \text{ Н}; \\ P_z &= 11272,6 \text{ Н} \quad \text{і} \quad 794,8 \text{ Н}; \end{aligned}$$

подібна картина спостерігається також під час другого переходу.

Повнішу інформацію про динаміку даного процесу можна отримати з аналізу сил і моментів сумарного різання, у яких враховано сумарне навантаження на зубці, що належать кожній окремій рейці черв'ячної фрези (рис.3). Амплітудні значення сил та моментів, що діють під час обробки на зубчасте колесо і черв'ячну фрезу, за один оберт фрези змінюються за законом низькочастотної (огинаючої) кривої спектра. У фрез із розподіленим контуром принципово змінюється характер високочастотних коливань сили різання. Внаслідок збільшення кількості рейок, яке відбувається без зниження міцності зубців у нових фрезах, зростає коефіцієнт їх торцевого перекриття у верстатному зачепленні з оброблюваною заготовкою.

Так, при значеннях кутового кроку τ у стандартної фрези, який дорівнює 40° , а у нових фрез – $22,5^\circ$, кути контакту на першому та другому переходах, відповідно, становлять: стандартної фрези: $31,2$ і $30,5^\circ$; нових фрез: $26,9$ та $28,3^\circ$. Отже, коефіцієнти торцевого перекриття ϵ_a на першому та другому переходах у звичайної фрези становлять $0,78$ і $0,763$, а у фрез з розподіленим контуром, відповідно, – $1,2$ та $1,26$.

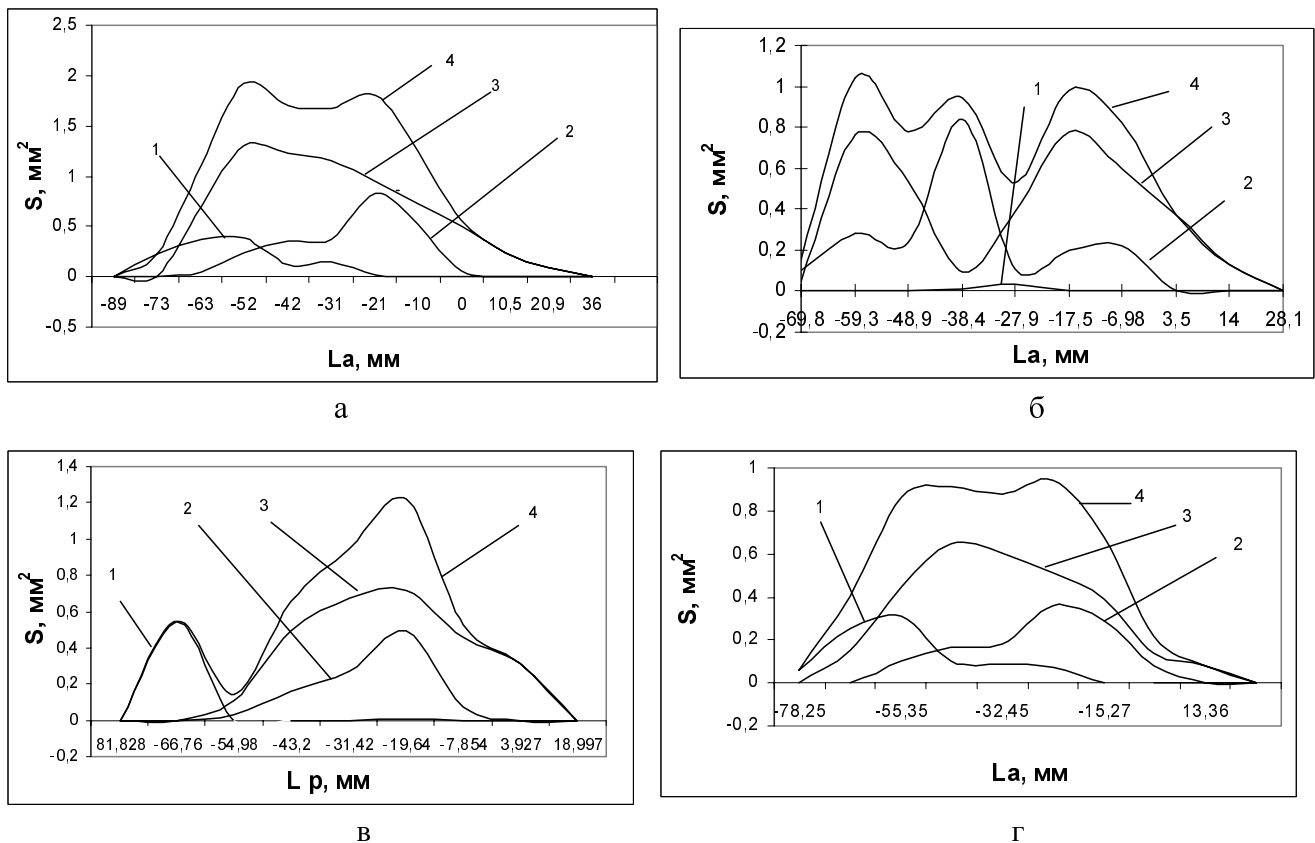


Рис.1. Площа поперечного перетину зрізів (S) вхідним (1), верхнім (2) та вихідним (3) лезами і сумарна площа зрізів (4):
а, б – перший та другий переходи стандартною черв'ячною фрезою;
в, г – перший та другий переходи фрезами з розподіленим контуром

Під час різання звичайною фрезою, кутовий торцевий крок якої є більшим від кута контакту, крутний момент на фрезі (а з ним і усі складові сили різання) при кожному різанні 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, тобто $z_0 = 9$.

Під час прорізання западин черв'ячними фрезами з модифікованим профілем внаслідок збільшення 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 на першому переході 33 Н·м, а на другому – 30,5 Н·м. У результаті торцевого перекриття зростає також частота зміни крутного моменту за повний оберт фрези, яка дорівнює для першого переходу $1,2 z_0 = 19,2$, а для другого переходу – $1,26 \cdot z_0 = 20,16$. При таких значеннях амплітуд і частот пружна система зубофрезерного верстата не буде реагувати на високочастотні зміни $M_{кр}$, а крутний момент, що діє на інструмент і оброблювану заготовку, буде змінюватися за законом низькочастотної складової спектра з частотою, що відповідає часу одного оберту фрези. Внаслідок цього коливання крутного моменту на фрезі буде становити 49,9 Н·м, а на осі стола верстата – 128 Н·м (під час першого переходу), та, відповідно, – 40,1 і 147 Н·м – під час другого переходу).

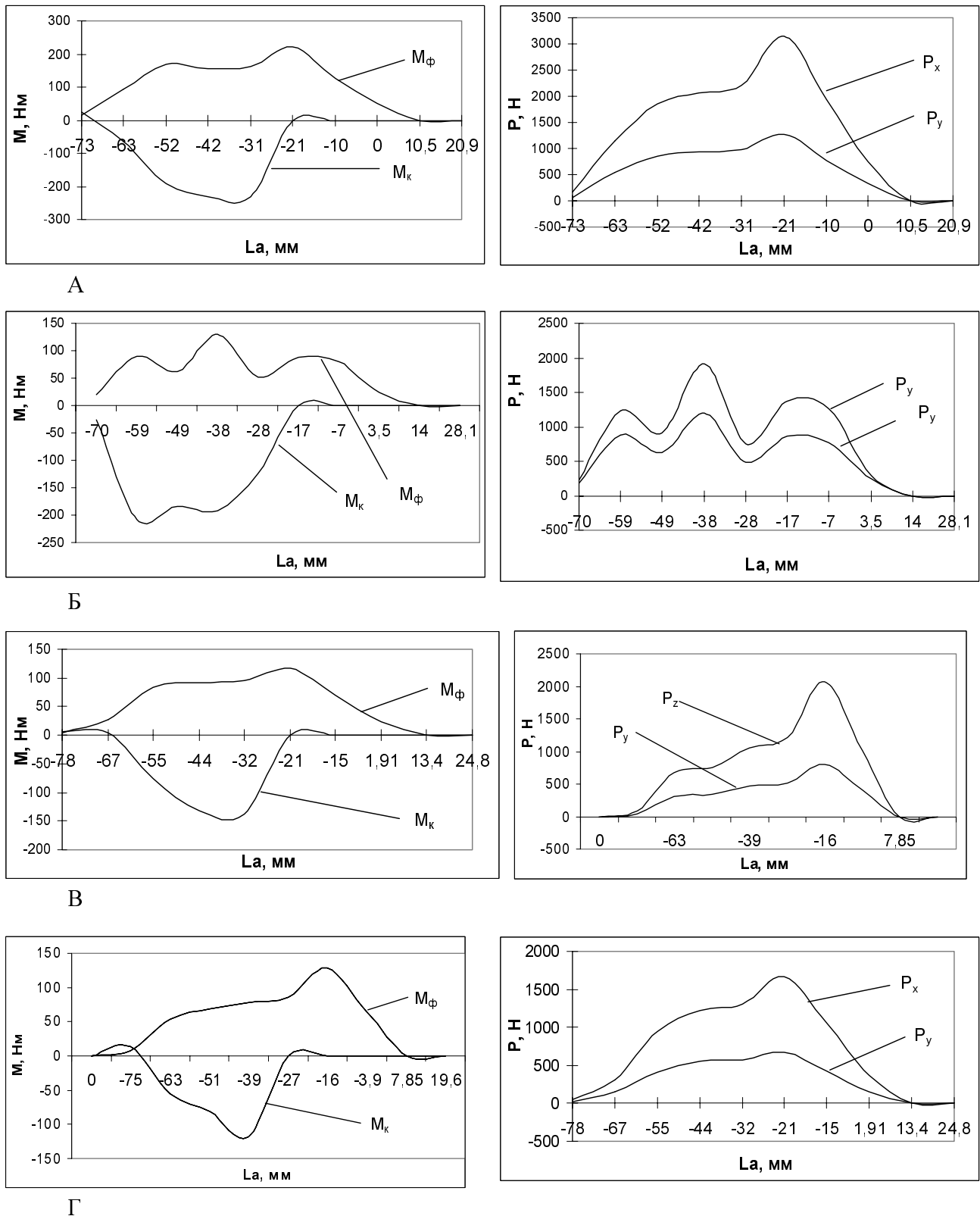
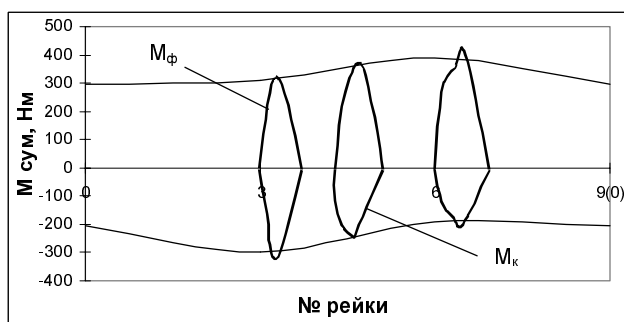
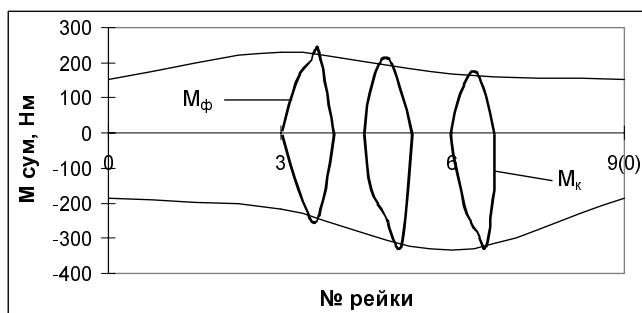
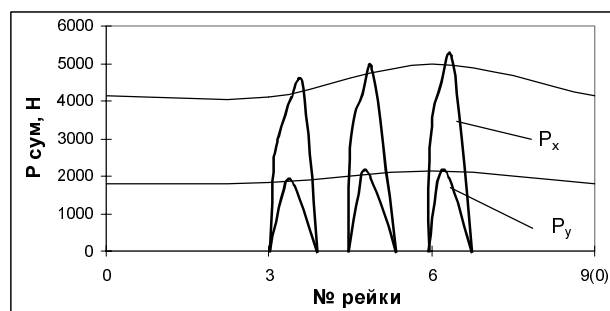


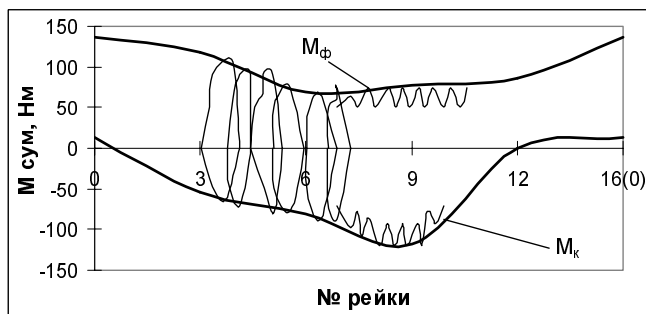
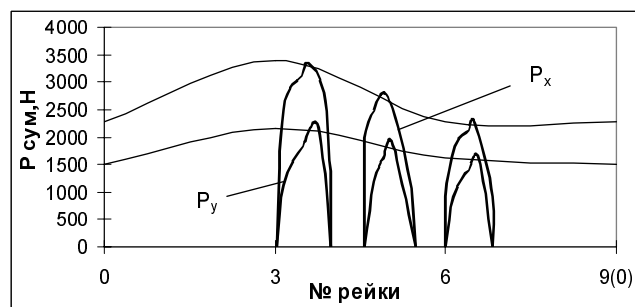
Рис.2. Крутні моменти на фрезі (M_ϕ) та осі заготовки (M_κ); осьова (P_z) і радіальна (P_y) сили, що діють на заготовку під час різання на першому (А, В) та другому переходах (Б, Г) на активній довжині:
 А, Б – стандартної черв'ячної фрези;
 В, Г – черв'ячних фрез з розподіленим контуром.



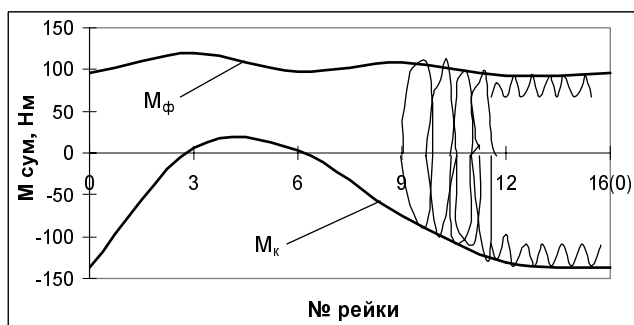
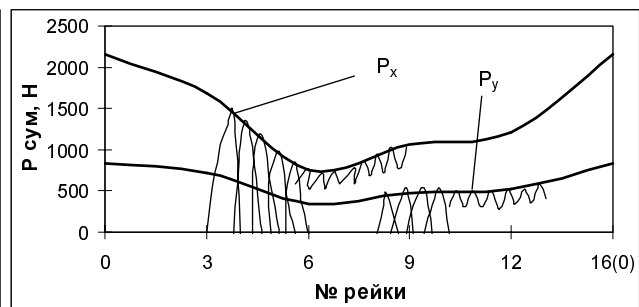
А



Б



В



Г

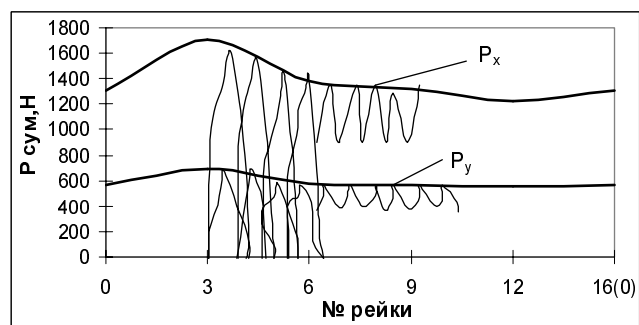


Рис.3. Моменти та сили сумарного різання під час першого (А, В) та другого (Б, Г) переходів обробки зубчастого колеса стандартною фрезою (А, Б) і фрезами з розподіленим контуром (В, Г) у функції від порядкової кількості рейки фрези.

Вказані зміни позитивно впливають на динаміку зубонарізування, оскільки зникають ударні навантаження, зменшуються сили та крутні моменти, що діють під час обробки на черв'ячну фрез та заготовку. Ця особливість модифікованих фрез, сприяючи підвищенню точності обробки, служить додатковим чинником підвищення їх стійкості порівняно із звичайними фрезами та дає підстави очікувати покращання якості виготовлення зубчастих коліс.

На підставі проведених теоретичних досліджень можна зробити такі висновки.

- Завдяки збільшенню порівняно із стандартною фрезою у 1,8 раза кількості рейок та зміни форми профілів у черв'ячних фрез із розподіленим вихідним контуром, за рахунок збільшення активної довжини фрези і включення у роботу її крайніх зубців зменшуються значення параметрів зрізів. Це призводить до зниження сили різання, питомого навантаження на зубці інструмента і сприяє підвищенню стійкості фрез з розподіленим вихідним контуром.

- Внаслідок збільшення торцевого перекриття зростає частота зміни сили різання та крутного моменту, при одночасному зменшенні на порядок (порівняно зі звичайною фрезою) їх амплітуди. При таких параметрах збуджуючих чинників у спектрі коливання зубофрезерного верстата буде відсутня високочастотна складова, а на черв'ячну фрезу і стіл з установленою на нього заготовкою будуть діяти крутні моменти, що змінюються за законом низькочастотної складової спектра коливань, тобто за законом кривої амплітудної модуляції відповідного параметра. В результаті таких змін ударні навантаження у вигляді імпульсів сили, що супроводять кожний різ звичайної фрези і змінюються від нуля до максимального значення із частою $z_0 = 9$ за один її оберт, будуть замінені силою та крутним моментом, значення яких зменшується у декілька разів, і які плавно змінюються протягом обертання черв'ячної фрези. Це покращує динамічні характеристики різання, що теж позитивно впливає на підвищення стійкості черв'ячних фрез нових конструкцій і дає підстави очікувати підвищення точності виготовлення зубчастих коліс або точності припуску, який залишають на профілях під чистову обробку. З іншого боку, якщо необхідно забезпечити задану стійкість, то при використанні запропонованих черв'ячних фрез можна працювати із значно вищою осьовою подачею та підвищити продуктивність процесів попередньої та чистової обробки зубчастих коліс.

Отримані результати показують, що у нових конструкціях черв'ячних фрез закладені значні можливості інтенсифікації технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс та покращання їх якості, забезпечуються умови для стабільної тривалої роботи зубофрезерних верстатів у автоматичному режимі без регулювання та підналагодження.

1. Грицай І.Є. *Моделювання параметрів зрізів, сил та моментів під час нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами* // *Машинознавство*. 1998. № 7. С.19–24. 2. Грицай І.Є. *Моделювання роботи черв'ячної фрези з високими осьовими подачами* // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. 1998. № 321. С.17–22. 3. Грицай І.Є. *Аналіз параметрів зрізів та розподілу навантаження під час роботи черв'ячної фрези з попутною та зустрічною подачею* // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. 1999. № 359. С.10–19. 4. 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.