

УДК 621.914.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208579

Розробка моделі процесу фрезерування опорних шийок та кулачків розподільного вала за один установ

В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, Н. М. Сіра, О. М. Кальченко,
В. О. Винник, Д. В. Кальченко, В. В. Морочко

Запропоновано тривимірне геометричне моделювання процесів зняття припуску та формоутворення опорних шийок та кулачків розподільних валів при фрезеруванні зі схрещеними осями інструмента та деталі. Фрезерування розподільних валів, які широко використовуються в автомобілебудуванні, тракторобудуванні, суднобудуванні та інших галузях промисловості, здійснюється за один установ фрезою зі схрещеними осями її та деталі. Величина кута повороту фрези вибирається із умови забезпечення необхідної шорсткості обробленої поверхні і регулюється подачею. При цьому висока продуктивність обробки забезпечується збільшенням частоти обертання розподільного валу. Розроблено спосіб фрезерування опорних шийок та кулачків, де обробка ведеться фрезою, висота якої менша довжин оброблюваних поверхонь. При обробці на прохід основний припуск знімається торцем чотиригранної чорнової твердосплавної пластинки, а чистова обробка здійснюється розвантаженою периферією чистової пластинки із металокераміки. Такий розподіл припуску підвищує продуктивність та точність обробки, а можливість повороту чорнової пластинки забезпечує економію матеріалу і знижує собівартість обробки. В процесі фрезерування криволінійної поверхні кулачка розподільного валу глибина різання вздовж оброблюваного профілю завжди більше величини припуску, що знімається. Це стає причиною зниження точності та продуктивності обробки. З метою виключення вказаної проблеми пропонується стабілізувати глибину різання і подачу вздовж контуру при нерівномірному обертанні деталі. Рівномірність глибини різання та подачі вздовж криволінійного контуру кулачка досягається одночасним вертикальним і поперечним переміщеннями фрези та нерівномірним обертанням розподільного валу. При фрезеруванні криволінійної поверхні кулачка, центр якої не збігається з центром розподільного валу, здійснюється нерівномірне обертання останнього та синхронні вертикальне і поперечне переміщення фрези. При обробці ділянки кулачка, центр якої збігається з центром розподільного валу, фрези надається лише обертання

Ключові слова: фрезерування розподільних валів, схрещені осі, кулачки розподільних валів, опорні шийки

1. Вступ

Сучасні автомобільне, тракторне, суднобудівне та інші машинобудівні виробництва характеризуються широкою номенклатурою виробів із криволінійними робочими поверхнями. До таких поверхонь, зокрема, відносяться кулачки розподільних валів, шийки колінчастих валів, гальмівні колодки тощо.

Конкурентоспроможність машинобудівної продукції визначається високими показниками точності поверхонь деталей та продуктивності їх обробки. У сучасних економічних умовах [1] досягнення високих значень вказаних показників неможливе без застосування тривимірного моделювання процесів обробки, які є геометричною базою автоматизованих систем проектування [2].

Одним із продуктивних способів обробки криволінійних поверхонь кулачків є фрезерування [3].

У відомих способах глибинного фрезерування криволінійних поверхонь з метою забезпечення їх високої точності обробка здійснюється зазвичай за кілька проходів. Це збільшує час обробки, зменшує продуктивність та точність внаслідок нерівномірного зносу інструментів.

Спосіб фрезерування зі схрещеними осями фрези та деталі забезпечує рівномірний розподіл припуску вздовж різальної кромки фрези, підвищує продуктивність та точність обробки за рахунок рівномірного зносу різальної кромки інструмента. Однак в існуючих способах фрезерування зі схрещеними осями інструмента та циліндричних поверхонь складного профілю відсутні дослідження особливостей процесів зняття припуску та їх формоутворення при однопрохідній обробці.

Отже, забезпечення високої конкурентоспроможності способу обробки циліндричних поверхонь складного профілю у різних галузях машинобудування вимагає підвищення точності та продуктивності їх обробки, зменшує стійкість інструментів.

Тому розробка і дослідження тривимірних моделей процесів зняття припуску та формоутворення при однопрохідному фрезеруванні опорних шийок і кулачків розподільних валів зі схрещеними осями фрези і деталі є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Харківський верстатобудівний завод «ХарВерст» (Україна) здійснює обробку кулачків розподільних валів на шліфувальних верстатах з ЧПК моделей ХШЗ-57Ф2 та ХШЗ-33 [4]. При обкатці профілю кулачка розподільний вал обертається, а круг здійснює зворотно-поступальний рух в горизонтальній площині, що проходить через вісь деталі. Обробку опорних шийок здійснюють на круглошліфувальних напівавтоматах моделей 3М152ВМ та 3К152ВФ20. Копіювання профілю опорних шийок здійснюється абразивним кругом з висотою довжини оброблюваної поверхні. Спочатку здійснюється чорнове шліфування, а потім – чистова обробка та калібрування. У вказаному способі обробки величина глибини різання залежить від положення точки контакту інструмента і деталі та є змінною вздовж профілю кулачка. Що є причиною нерівномірного розподілу припуску вздовж профілю інструмента, а отже, і нерівномірного зносу інструменту. Також до недоліків слід віднести те, що обробка кулачків та опорних шийок здійснюється на різних верстатах, що зменшує точність на продуктивність обробки.

З метою підвищення ефективності шліфування та точності формоутворення профілю кулачка розподільного валу у роботі [5] використовуються два шліфувальних круга різного діаметру. Шліфувальний круг із більшим діамет-

ром використовується для чорнової обробки, а з меншим – для чистової. Однак при цьому збільшується собівартість виробництва.

У роботі [6] з метою підвищення точності формоутворення кулачка розподільного валу розроблений алгоритм згладжування кривих швидкості. А у роботі [7] з метою підвищення точності обробки кулачків розподільних валів у роботі представлена математична модель, що описує взаємозв'язок між зміщенням центру шліфувального круга і кутовим зміщенням розподільного валу відповідно до підйому кулачка. Запропонована нова стратегія оптимізації параметрів руху деталі. Однак у роботах [6, 7] не розглядається питання забезпечення рівномірної глибини вздовж оброблюваного профілю кулачка.

Обробку опорних шийок та кулачків за один установ здійснила фірма Juncker (Німеччина) [8, 9]. Обробка опорних шийок виконується вузьким кругом, висота якого менша довжини оброблюваної поверхні. Обкатка оброблюваної поверхні кулачка здійснюється за один його оберт за рахунок зворотно-поступального руху шліфувального круга у площині, яка проходить через вісь обертання інструмента та розподільного валу. Однак в процесі обробки точка контакту круга і кулачка виходить із вказаної площини, внаслідок чого величина припуску знімається нерівномірно, а, отже, зменшуються точність та продуктивність шліфування.

Для обробки кулачків розподільних валів широко використовується фрезерування. Так, японська фірма Kataoka випускає широку лінійку кулачкових фрезерних верстатів для обробки розподільних валів. А німецька фірма Heller [10] випускає виробничі системи HELLER RFN для фрезерування кулачків розподільних валів. Обробка кулачків здійснюється методом обкатки фрезою, висота якої дорівнює висоті кулачка. Наявність на верстатах двох фрезерних блоків збільшує продуктивність обробки. З метою зменшення впливу сил різання на точність обробки заготовки затискаються та підтримуються двома гідравлічними затискними патронами. Недоліком вказаних способів є різна величина глибини різання вздовж профілю кулачка, що впливає на стійкість інструмента і відсутність можливості високоточної обробки за один установ.

У роботі [11] розроблено спосіб фрезерування орієнтованим інструментом, коли чорнове фрезерування здійснюється торцем зуба інструмента, а чистове – його периферією. Це підвищує точність та продуктивність обробки. Однак у роботі розглядаються лише циліндричні деталі.

У роботі [12] представлений спосіб фрезерування кулачків розподільних валів інструментом, висота якого менша довжини кулачка. Фрезерування кулачків розподільного валу виконується за один установ. Однак весь припуск припадає на периферійну ділянку різального зуба фрези, що викликає її знос та зменшує точність формоутворення.

Проблема високоточної обробки шийок та кулачків розподільних валів може бути вирішена шляхом розробки тривимірних моделей процесів зняття припуску та їх формоутворення при однопрохідному фрезеруванні зі схрещеними осями інструмента та деталі. Аналіз розроблених моделей сприятиме розробці високопродуктивних способів фрезерування циліндричних поверхонь складного профілю зі схрещеними осями інструмента та деталі.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є тривимірне моделювання процесу обробки опорних шийок та кулачків розподільного валу за один установ при фрезеруванні зі схрещеними осями інструмента та деталі.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити просторові моделі інструментальної поверхні та поверхонь розподільного валу при фрезеруванні зі схрещеними осями фрези та деталі;
- розробити загальну модель процесу фрезерування опорних шийок та кулачків розподільного валу зі схрещеними осями інструмента і деталі;
- дослідити процес точності формоутворення при фрезеруванні опорних шийок та кулачків розподільного валу.

4. Розробка просторових моделей інструментальної поверхні та поверхонь розподільного валу

Схема процесу фрезерування опорних шийок та криволінійних поверхонь кулачків розподільного валу 1 фрезою 2, яку повертають на кут δ , представлена на рис. 1.

Чорнова та чистова обробка усіх поверхонь розподільного валу відбувається за один установ. При цьому торець чотиригранної пластинки 3 із твердого сплаву здійснює чорнову обробку, а периферія пластинки 4 із металокераміки – чистове фрезерування та калібрування.

Фрезерування розподільного валу 1 починають із обробки циліндричної поверхні опорної шийки *A* (рис. 1). Фрезу 2 повертають навколо осі $O_m Z_{m1}$ на кут δ , який вибирають із умови забезпечення максимального зняття припуску при рівномірному завантаженні торцевої пластинки 3 фрези 2.

Наявність канавок між опорними шийками та кулачками дає можливість подачі інструмента на всю глибину різання та обробки поверхонь розподільного валу на прохід. Це підвищує точність обробки, оскільки сили різання направлені вздовж осі деталі на відміну від способів обробки, де інструмент подається в радіальному напрямку, що зменшує жорсткість деталі і, відповідно, точність її формоутворення.

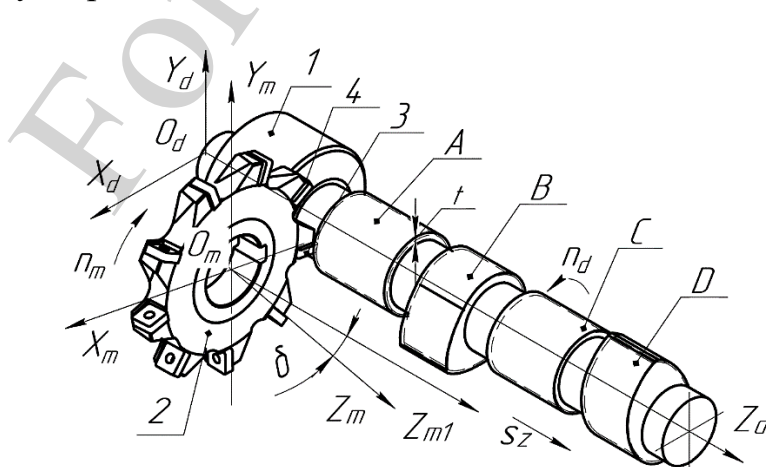


Рис. 1. Схема фрезерування розподільного валу зі схрещеними осями інструмента та деталі

Фреза подається на всю глибину різання t (рис. 1) і переміщується вздовж осі O_dZ_d з подачею s_z , при цьому частота обертання n_d розподільного валу при обробці опорних шийок обирається із умови забезпечення максимальної продуктивності обробки. Чорновий припуск знімається торцем чорнової пластини 3 фрези 2, а чистова обробка здійснюється периферією чистової пластинки 4.

Після обробки циліндричної поверхні A (рис. 1) опорної шийки фреза відводиться у вертикальному напрямку осі O_dZ_d на висоту кулачка B з урахуванням величини припуску t та починається процес обробки криволінійної поверхні кулачка.

При фрезеруванні криволінійної поверхні кулачка 6 (рис. 2, а) здійснюється нерівномірне обертання розподільного валу з частотою n_{dc} . Фреза обертається з частотою n_m та одночасно здійснює вертикальне і поперечне переміщення S_m . Таким чином точки контакту A та A_1 фрези 2 з криволінійною поверхнею кулачка 6 знаходяться у площині, яка проходить через вісь обертання інструменту та центр кривизни деталі. Що, в свою чергу, забезпечує постійну глибину різання вздовж контуру кулачка та рівномірний знос різальних пластинок фрези.

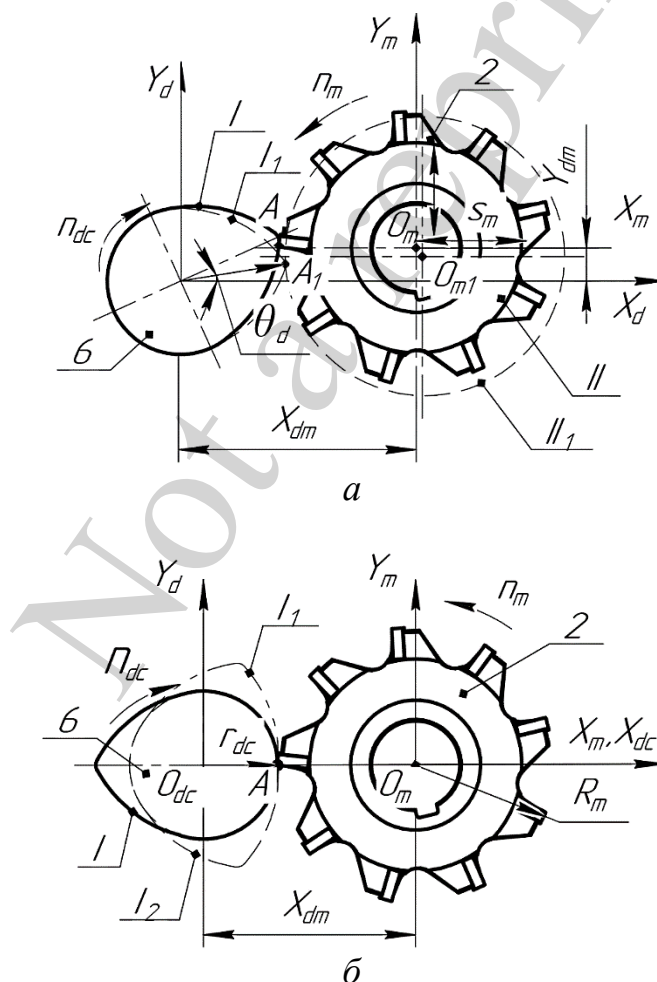


Рис. 2. Схема фрезерування ділянок кулачка: а – обробка поверхонь, центри яких не співпадають з центром розподільного валу; б – обробка поверхонь, центри яких співпадають з центром розподільного валу

При обробці ділянки кулачка, центр якої збігається з центром розподільного валу (положення I, I_1 на рис. 2, б), фрезі 2 надається обертання n_m . Необхідності у вертикальному та поперечному переміщеннях фрези не виникає. На відміну від обробки ділянок кулачка, центри яких не збігаються з центром розподільного валу (положення I, I_1 на рис. 2, а), де фреза обертається та рухається в поперечному та вертикальному напрямках (положення II, II_1 на рис. 2, а).

Після обробки кулачка B (рис. 1), оброблюються послідовно шийка C та кулачок D за вищеописаною методикою.

Нерівномірна кругова подача розподільного валу із одночасним вертикальним та поперечним переміщеннями інструмента при фрезеруванні криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК виключає вплив зносу фрези на точність формоутворення. Це підвищує точність криволінійних поверхонь кулачків, продуктивність обробки, а також спрощує програмування обробки, оскільки відсутня необхідність врахування зношеного профілю інструмента. Також в існуючих способах відсутнє вертикальне переміщення інструмента і виникає необхідність перепрограмування процесу обробки, щоб врахувати зношену геометрію різальної поверхні інструмента для виключення похибки обробки.

Просторова модель інструментальної поверхні задається добутком однокоординатних матриць переміщень M_2, M_3 вздовж осей Y_ϕ та Z_ϕ відповідно та матриці повороту M_6 навколо осі $O_\phi Z_\phi$ (рис. 1):

$$\bar{R}_m = M_3(Z_m) \cdot M_6(\alpha) \cdot M_2(R_m) \cdot \bar{e}_4, \quad (1)$$

де \bar{R}_m – радіус-вектор фрези; $Z_m = 0 \dots H$ – лінійна координата вздовж периферії різальної кромки фрези, змінюється від 0 до значення висоти H інструмента; R_m – радіус фрези; $\alpha = 0 \dots 360^\circ$ – кутова координата, якою задається профіль фрези; \bar{e}_4 – радіус-вектор початку системи координат інструменту.

Номінальна поверхня \bar{r}_d розподільного валу задається радіус-вектором інструмента \bar{R}_m , орієнтацією фрези відносно системи координат деталі та її рухом відносно валу:

$$\bar{r}_d = M_3(Z_d) \cdot M_6(\theta_d) \cdot M_1(X_{dm}) \cdot M_4(\delta) \cdot M_2(Y_{dm}) \cdot \bar{R}_m, \quad (2)$$

де δ – кут повороту фрези; X_{dm}, Y_{dm} – міжосьова відстань фрези і деталі у вертикальній та горизонтальній площинах відповідно; θ_d – кут повороту деталі; Z_d – подача, описує рух інструмента вздовж осі $O_d Z_d$ відносно деталі.

Подача Z_d визначається добутком кута повороту θ_d валу на параметр гвинтового руху p :

$$Z_d = \theta_d \cdot p, \quad (3)$$

$$p = \frac{S_z}{2 \cdot \pi}, \quad (4)$$

де Sz – подача на оберт деталі.

Міжосьова відстань X_{dm} , Y_{dm} інструмента та оброблюваної поверхні валу змінна в процесі обробки і залежить від кута повороту θ_d . Тому остаточно номінальна поверхня деталі (2) з урахуванням рівняння (1):

$$\begin{aligned} \bar{r}_d = & M3(Z_d) \cdot M6(\theta_d) \cdot M2(Y_{dm}(\theta_d)) \cdot M5(\delta_m) \times \\ & \times M1(X_{dm}(\theta_d)) \cdot M3(Z_m) \cdot M6(\alpha) \cdot M2(R_m) \cdot \bar{e}4. \end{aligned} \quad (5)$$

Рівняння (5) є загальним при обробці циліндричних та криволінійних поверхонь розподільного валу. Так, при обробці криволінійної поверхні кулачка координати X_{dm} , Y_{dm} змінюються і залежать від кута повороту θ_d кулачка. А при фрезеруванні ділянки кулачка, центр якої збігається з віссю розподільного валу, X_{dm} не змінюється, а Y_{dm} дорівнює нулю (рис. 2, а, б).

Для визначення профілю обробленої поверхні деталі використовується умова контакту профілів фрези та валу в різні моменти часу як добуток векторів нормалі \bar{n} і швидкості руху \bar{V} інструмента відносно деталі:

$$\bar{V} \cdot \bar{n} = 0. \quad (6)$$

Нормаль \bar{n} визначається добутком векторів, дотичних до поверхні фрези. Отже, необхідно диференціювати радіус-вектор деталі \bar{r}_k за двома незалежними параметрами α та j – координата вздовж профілю фрези. Вектор відносної швидкості \bar{V} знаходиться диференціюванням радіус-вектору \bar{r}_k в системі координат деталі за параметром θ_k :

$$\left(\frac{\partial \bar{r}_d}{\partial j} \times \frac{\partial \bar{r}_d}{\partial \alpha} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_d}{\partial \theta_d} = 0. \quad (7)$$

Рівняння (7) визначає розташування точок лінії контакту інструмента та деталі в різні моменти часу.

5. Розробка загальної моделі процесу фрезерування опорних шийок та кулачків розподільного валу зі схрещеними осями інструмента і деталі

Лінія контакту чорнової та чистої пластинки фрези починається на торці чорнової пластинки інструменту і закінчується на периферії його чистої пластинки.

Для визначення лінії контакту на периферійній ділянці різальної кромки фрези проведемо розрахунки у програмному пакеті Matchcad за допомогою блоку (8):

$$Lk_p := \begin{cases} \alpha \rightarrow 0, \\ \text{for } n \in 0 \dots N, \\ j \leftarrow j_{\min} + \frac{j_{\max} - j_{\min}}{N} \cdot n, \\ B \leftarrow \text{root} \left(\left(\frac{\partial \bar{r}_d}{\partial j} \times \frac{\partial \bar{r}_d}{\partial \alpha} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_d}{\partial \theta_d}, \alpha \right), \\ M^{(j+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} j \\ B \end{pmatrix}, \\ M^T, \end{cases} \quad (8)$$

де N – кількість відрізків, на які розбивається лінія контакту на периферії інструменту; j_{\min} , j_{\max} – початкова та кінцева координати лінії контакту на периферії різальної кромки фрези.

Визначення лінії контакту на перехідній радіусній кромці та торці різальної кромки фрези здійснюється за допомогою розрахункового блоку, аналогічного (8), тільки корені рівняння знаходяться не для лінійної координати j , а кутової α .

На рис. 3 зображена лінія контакту фрези та поверхні розподільного валу. Крива (рис. 3) починається з деякої точки j_{rk} на торці чорнової пластинки інструмента, проходить через радіус його заокруглення (координата від j_{rk} до j_{r0}) та закінчується на периферії чистової пластинки в точці схрещення осей фрези і деталі.

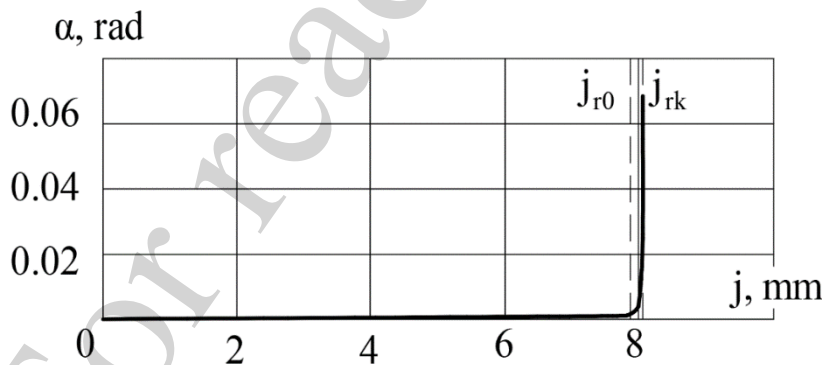


Рис. 3. Лінія контакту зуба фрези та оброблюваної поверхні вздовж профілю інструменту

В ході математичного моделювання процесу фрезерування зі схрещеними осями інструмента та деталі отримано просторову модель плями контакту 6 (рис. 4) різальної кромки фрези 2 та оброблюваної поверхні валу 1. Пляма контакту 6 утворена перетином лінією 3 контакту інструменту та деталі, лінією 4 перетину зуба фрези і торця оброблюваної поверхні та лінією 5 перетину зовнішньої поверхні заготовки й фрези.

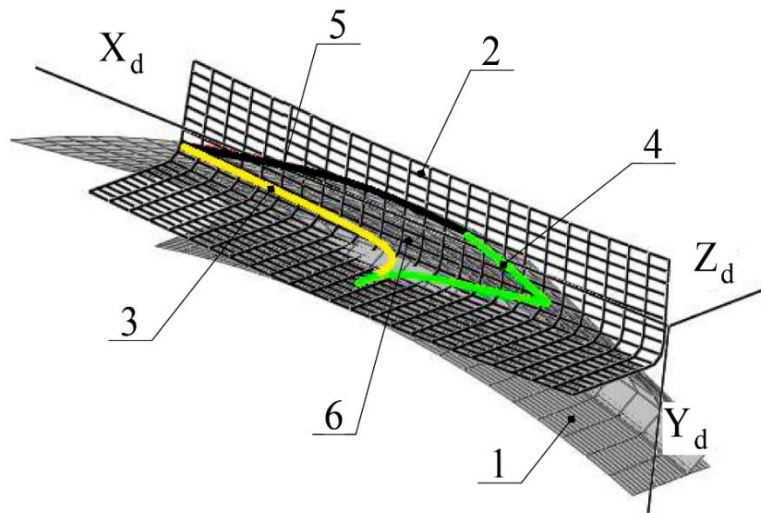


Рис. 4. Пляма контакту зуба фрези та оброблюваної поверхні розподільного валу

Як видно із рис. 3, 4, основний припуск припадає на торець різальної поверхні зуба фрези, а на периферії припуск мінімальний.

На рис. 5 представлена отримана тривимірна модель криволінійної поверхні кулачка розподільного валу.

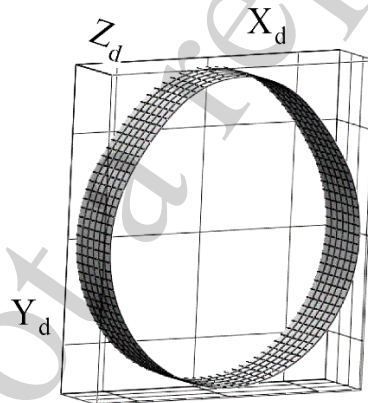


Рис. 5. Просторова модель поверхні кулачка розподільного валу

Поверхня кулачка (рис. 5) утворена рухом лінії контакту 3 (рис. 4) вздовж еквідистанти до поверхні деталі.

6. Дослідження процесу точності формоутворення при фрезеруванні опорних шийок та кулачків розподільного валу

Схрещення осей фрези та розподільного валу утворює на обробленій поверхні геометричну шорсткість Rz (рис. 6).

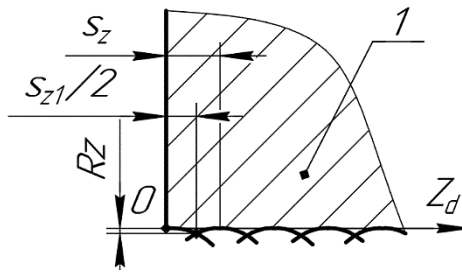


Рис. 6. Висота мікронерівностей R_z вздовж профілю Z_d деталі, викликана схрещенням осей інструмента та розподільного валу

Висота мікронерівностей R_z (рис. 5) визначається із (9):

$$R_z = Pr_d(0) - Pr_d\left(\frac{s_z}{2}\right), \quad (9)$$

де $Pr_d(0)$, $Pr_d\left(\frac{s_z}{2}\right)$ – висота профілю деталі в точці повороту фрези і точці, яка знаходиться на відстані половини подачі s_z .

З метою досягнення необхідної шорсткості обробленої поверхні здійснюється регулювання величини подачі s_d в залежності від діаметра фрези та кута схрещення осей δ . При цьому для отримання високої продуктивності обробки збільшується частота обертання валу.

В ході математичного моделювання процесу фрезерування розподільного валу зі схрещеними осями інструмента та деталі визначена питома продуктивність фрезерування Q , яка визначає об'єм металу, що зрізується ділянкою зуба в межах j -тої точки його профілю:

$$Q(j) = \int_{\alpha 1(j)}^{\alpha 2(j)} (Vn(\alpha, j) - y_v) \cdot (R_m(j) - D_m \cdot \sin \alpha_i) \cdot k \cdot d\alpha, \quad (10)$$

де $\alpha 1(i), \alpha 2(i)$ – кути входу і виходу зуба фрези із заготовки на радіусі $R_m(j) - D_m \cdot \sin \alpha_i$; D_m – величина лінійного зносу ділянки профілю зуба в j -тій точці; y_v – податливість системи; $R_m(j)$ – радіус фрези; k – коефіцієнт, який враховує переривчастість інструменту.

Отриманий графік розподілу питомої продуктивності Q обробки (рис. 7) при обробці розподільного валу з кутом схрещення осей інструмента та деталі $\delta=1^\circ$ фрезою діаметром 100 мм та висотою різальної пластинки 10 мм. Починаючи з точки j_{r0} (координата початку заокруглення різальної пластинки фрези), графік розгорнутий на вісь, яка співпадає з периферійною поверхнею зуба фрези.

Питома продуктивність фрезерування Q (рис. 7) приймає найбільші значення та торцевій поверхні зуба фрези (область після координати j_{rk}). Отже торцева поверхня є чорною ділянкою і знімає основний припуск. На ділянці від

координати j_{r0} до j_{rk} , що відповідає перехідній радіусній кромці різальної пластинки, питома продуктивність практично рівномірно розподілена. А мінімальні значення приймає на периферії різальної поверхні фрези (область до координати j_{r0}), яка є чистовою і калібрувальною ділянкою.

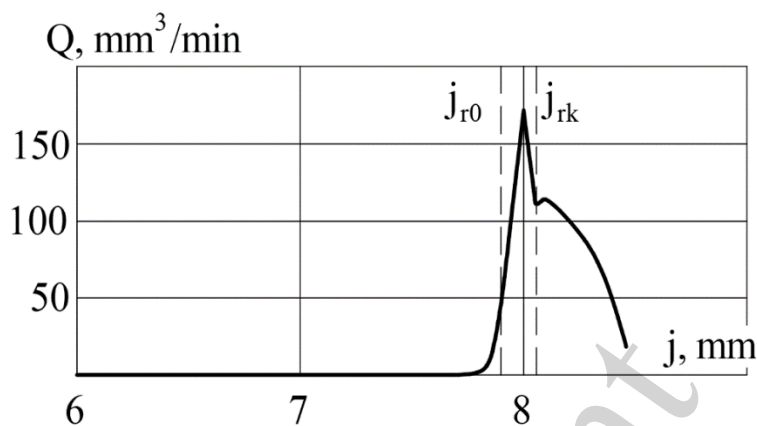


Рис. 7. Розподіл питомої продуктивності Q фрезерування вздовж профілю зуба фрези при обробці розподільного валу

Отже, торець чорнової пластинки 3 знімає основний припуск, а розвантажена периферія чистової пластинки 4 здійснює чистову обробку. Такий розподіл припуску забезпечує підвищення продуктивності фрезерування та точності формоутворення деталі.

Оскільки на торець чорнової пластинки припадає весь основний припуск, вона зношується швидше, ніж чистова.

Критерієм переходу від пластичної деформації до початку відокремлення стружки є граничне значення відношення глибини проникнення різальної вершини в матеріал заготовки до радіусу заокруглення її вершини. При спрацюванні чорнової пластинки її радіус заокруглення збільшується, починається процес пластичного деформування оброблюваного матеріалу. Виникають вібрації, збільшується температура в зоні різання, що зумовлює необхідність заміни різального леза. У такому випадку чотиригранну пластинку повертають незношеною поверхнею. Таким чином забезпечується економія матеріалу, оскільки в процесі обробки швидше зношуються чорнові пластинки, в той час як чистові залишаються придатними.

При цьому питома продуктивність фрезерування для заданих умов обробки на торцевій поверхні зуба становить 90–150 мм³/хв (рис. 7), що в 1,3–1,5 рази більше, ніж при фрезеруванні існуючими способами.

7. Обговорення результатів дослідження точності однопрохідного фрезерування розподільних валів зі схрещеними осями інструмента та деталі

У представленому способі (рис. 1) однопрохідного фрезерування опорних шийок та кулачків розподільних валів орієнтованим інструментом зняття основного припуску здійснюється торцем чорнової твердосплавної пластинки, а чистової обробки – розвантаженою периферією чистової пластинки із металокераміки.

При цьому кут повороту фрези вибирають із умови забезпечення максимального зняття припуску при рівномірному завантаженні її торцевої пластинки. Обробка поверхонь розподільного валу здійснюється на прохід, що підвищує точність обробки за рахунок розподілу сил різання вздовж осі деталі і відсутності впливу на її жорсткість у порівнянні із радіальною подачею інструмента.

На відміну від існуючих способів фрезерування розподільних валів [4–10], даний спосіб забезпечує обробку опорних шийок та кулачків за один установ із однаковою глибиною різання при нерівномірному обертанні деталі. Рівномірність глибини різання та подачі вздовж криволінійного профілю кулачка досягається шляхом синхронних вертикального і поперечного переміщень фрези та нерівномірного обертання розподільного валу (рис. 2, *a*). Це забезпечує рівномірний знос різальних пластинок фрези та підвищує їх стійкість. При фрезеруванні криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК це виключає вплив зносу фрези на точність формоутворення та спрощує програмування обробки, оскільки відсутня необхідність врахування зношеного профілю інструмента.

За допомогою отриманих просторових моделей інструментальної поверхні (1) та поверхонь деталі (5) розроблена загальна модель (8) процесу фрезерування опорних шийок та кулачків розподільного валу зі схрещеними осями інструмента і деталі. Модель (8) є загальною для випадків обробки циліндричних та криволінійних поверхонь розподільного валу, що дає можливість аналізувати процеси зняття припуску та формоутворення будь-яких профілів поверхні кулачка (рис. 5).

Аналіз отриманих графіків лінії контакту (рис. 3), просторової моделі плями контакту (рис. 4) різальної кромки фрези та оброблюваної поверхні валу та питомої продуктивності фрезерування Q (рис. 7) показав, що основний припуск припадає на торець різальної поверхні зуба фрези, а на периферії припуск мінімальний. Такий розподіл припуску забезпечує підвищення продуктивності фрезерування та точності формоутворення деталі. Чистова пластинка, на якій припадають невеликі значення припуску, забезпечує низьку геометричну шорсткість поверхні, а чорнова – високу продуктивність обробки (90–150 мм³/хв).

При даному способі фрезерування на торець чорнової пластинки припадає весь основний припуск, вона зношується швидше, ніж чистова. Тому можливість заміни тільки зношеної чорнової пластинки забезпечує економію матеріалу чистової.

Схрещення осей фрези та розподільного валу стає причиною виникнення на обробленій поверхні геометричної шорсткості Rz (рис. 6). Тому для отримання її необхідної величини здійснюється регулювання подачі s_d в залежності від діаметра фрези та кута схрещення осей. Для забезпечення високої продуктивності обробки збільшується частота обертання валу.

Оскільки подача інструмента здійснюється на всю глибину різання завдяки наявності канавок між опорними шийками та кулачками, даний спосіб накладає обмеження: висота фрези лімітується шириною канавки розподільного валу. Тривимірна модель процесу фрезерування опорних шийок та кулачків розподільного валу орієнтованим інструментом дає можливість отримати тільки гео-

метричний профіль деталі. При цьому враховується вплив профілю фрези, глибини різання та подачі без жорсткості системи та вібрацій.

В подальшому запропонований спосіб може бути застосований для процесів фрезерування різноманітних циліндричних поверхонь складного профілю зі схрещеними осями інструмента і деталі.

9. Висновки

1. Розроблені просторові геометричні моделі інструментальної поверхні та криволінійної поверхні деталі, які дають можливість задавати будь-які профілі в залежності від параметрів інструмента та деталі, а також аналізувати процеси зняття припуску та формоутворення при фрезеруванні опорних шийок та кулачків розподільних валів.

2. На базі розроблених моделей досліджено спосіб однопрохідного фрезерування циліндричних та криволінійних поверхонь розподільних валів за один установ. При цьому чорнове фрезерування здійснюється торцем чотиригранної чорнкової твердосплавної пластинки, а чистова обробка – розвантаженою периферією чистової пластинки із металокераміки. Обробка на прохід підвищує точність формоутворення, оскільки сили різання направлені вздовж осей оброблюваних поверхонь. В процесі фрезерування криволінійних поверхонь кулачків дотична до криволінійної поверхні кулачка розташована вертикально. Це викликає появу додаткових деформацій та напружень за рахунок одночасного вертикального та поперечного переміщень фрези. Також виключається вплив радіуса інструмента і його знос на точність формоутворення оброблюваних поверхонь розподільних валів, що спрощує програмування обробки.

3. Дослідження точності формоутворення поверхонь запропонованим способом показали, що різна величина припуску вздовж торця чорнкової та периферії чистової пластинок фрези підвищує продуктивність (90–150 мм³/хв) і точність обробки (ІТ 7–8). А можливість повороту тільки чорнкової пластинки при її зносі забезпечує економію матеріалу чистової і знижує собівартість обробки. Запропонований спосіб однопрохідного фрезерування опорних шийок та кулачків розподільних валів може бути використаний при обробці різноманітних поверхонь обертання складного профілю зі схрещеними осями інструмента і деталі.

Література

1. Shkarlet, S., Kholiavko, N., Dubyna, M. (2019). Information economy: management of educational, innovation, and research determinants. *Marketing and Management of Innovations*, 3, 126–141. doi: <https://doi.org/10.21272/mmi.2019.3-10>
2. Brecher, C., Wellmann, F., Epple, A. (2017). Quality-predictive CAM Simulation for NC Milling. *Procedia Manufacturing*, 11, 1519–1527. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.284>
3. Nguyen, V. (2018). Design and manufacturing camshaft using on hybrid vehicles. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 9 (6), 277–284. URL: http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_9_ISSUE_6/IJMET_09_06_032.pdf

4. Шлифовальные станки завод «Харверст». Харьковский станкостроительный завод «Харверст». URL: http://harverst.com.ua/upload/files/Buklet_stanko_ru.pdf
5. Li, J., Zhang, W., Shen, N. Y., Wang, X. L. (2013). A Novel Method for Kinematic Optimization of Camshaft Non-Circular Grinding. *Advanced Materials Research*, 690-693, 3253–3257. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.690-693.3253>
6. Deng, Z. H., Wang, J., Cao, D. F., Liu, W., Wang, L. L. (2009). Research on Dynamic Optimization and Simulation of Camshaft Grinding Process. *Advanced Materials Research*, 69-70, 44–48. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.69-70.44>
7. Chen, G., Mei, X., Zheng, T. (2009). Research on the key technologies of CNC noncircular camshaft grinding. 2009 International Conference on Mechatronics and Automation. doi: <https://doi.org/10.1109/icma.2009.5244827>
8. JUCAM - Cam grinding. Junker. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/erwin-junker-maschinenfabrik-gmbh/jucam-cam-grinding/9216-323555.html>
9. JUCRANK. Crankshaft grinding. JUNKER. URL: https://www.junker-group.com/fileadmin/user_upload/Prospekte/JUNKER_JUCRANK_en.pdf
10. Flexible manufacturing systems (2015). Heller.
11. Кальченко, В. В., Сіра, Н. М., Кальченко, Д. В., Аксьонова, О. О. (2018). Дослідження процесу фрезерування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями інструмента та вала. *Технічні науки та технології*, 4 (14), 18–27. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-4\(14\)-18-27](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-4(14)-18-27)
12. Следнікова, О. С., Винник, В. О., Скляр, В. М., Аксьонова, О. О. (2019). Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при фрезеруванні кулачків зі схрещеними осями інструмента та деталі. *Технічні науки та технології*, 1 (15), 53–62. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1\(15\)-53-62](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1(15)-53-62)