

КЛОЧКО О. О., КАМЧАТНА-СТЕПАНОВА К. В., ОХРИМЕНКО О. А., МАНОХІН А. С.

ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ ШЕВРОННИХ КОЛІС

Розглянуті питання особливостей використання фрези з роздільною схемою формоутворення. Надано характеристику нерівномірності навантаження на інструмент, пов'язаного з різними схемами та конструкційними особливостями зуборізних фрез. Показано, що характер осцилограм крутного моменту фрези з роздільною схемою формоутворення свідчить про більшу плавність процесу різання та менші зусилля різання. Фрези з роздільною схемою формоутворення мають в 1,75 разів більше зубів, на довжині одного витка нарізування, ніж стандартна фреза. У діапазоні досліджуваних подач 3-6 мм/об середній крутний момент при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення в 2-2,5 рази менше, ніж при роботі з стандартною фрезою, що обробляє бічні поверхні та дно впадин зубів, і в 1,5 рази менше, коли стандартна фреза не обробляє дно впадин зубів.

Ключові слова: зубофрезерування, роздільна схема формоутворення, крутний момент, зубчате колесо, ефективність різання.

KLOCHKO O. O., KAMCHATNA-STEPANOVA K. V., OHRIMENKO O. A., MANOKHIN A. S.
DYNAMICS OF THE CUTTING PROCESS WHEN GEAR-MILLING CHEVRONIC WHEELS

Annotation. The questions of features of application of a mill with the separate scheme of forming are considered. The characteristic of non-uniformity of loading on the tool connected with various schemes and design features of gear cutters is given. It is shown that the nature of the torque waveforms of the cutter with a separate shaping scheme indicates a greater smoothness of the cutting process and less cutting effort. Cutters with a separate shaping scheme have 1.75 times more teeth at the length of one turn of cutting than a standard cutter. In the range of investigated feeds 3-6 mm/rev, the average torque when working with a cutter with a separate shaping scheme is 2-2.5 times less than when working with a standard cutter that treats the side surfaces and bottom of tooth cavities, and 1.5 times less when the standard cutter does not process the bottom of the teeth.

Key words: gear milling, separate shaping scheme, torque, gear, cutting efficiency.

Вступ. Важливе місце в сучасній техніці займають зубчасті передачі, які є деталями унікальних за розмірами і потужностями машин, що використовуються в металургійній та інших галузях промисловості. У механізмах приводу цих машин знайшли застосування великомодульні $m = 12-36$ мм шевронні колеса з діаметром вершин зубів до 2000 мм і шириною до 800 мм. Особливо актуальним є питання чистової обробки загартованих великомодульних коліс, яке здійснюється зазвичай шліфуванням, що при наявності значного припуску збільшує машинний час, необхідний на виготовлення таких деталей. Видалення основної частини чистового припуску методом зубофрезерування здатне суттєво підвищити ефективність даної операції.

При виготовленні зубчатих вінців великого діаметру основний припуск під чистову обробку (2,5-3 мм) за стандартною технологією видаляється шляхом шліфування. Альтернативне рішення полягає в розробці інструменту з роздільною схемою обробки і визначенні оптимальних умов його застосування, що дозволяє видаляти 95% даного припуску швидкісним зубофрезеруванням. Вказане дозволяє підвищити ефективність обробки в 3-4 рази за рахунок скорочення машинного часу на чистових операціях. Схема різання такої фрези з роздільною схемою формоутворення передбачає оброблення окремо лівого та правого профіля зубів колеса, не торкаючись дна западин.

Мета дослідження. Реалізувати запропоновану ідею з метою вирішення завдання підвищення ефективності чистової обробки загартованих шевронних коліс можна, використовуючи інструмент, принципова конструкція якого наведена на рисунку 1.

Процес різання черв'ячної фрези є нерівномірним. Непостійність крутного моменту обумовлена неоднаковістю та постійною зміною товщин різаних стружок, зміною кількості зубів, що одночасно беруть участь у різанні. Це призводить до безперервної зміни загального навантаження на фрезу та до коливань крутного моменту M_k .

Однак у характері осцилограм стандартної фрези та фрези з роздільною схемою формоутворення існують істотні відмінності. За один оберт стандартної фрези крутний моменту змінюється від максимуму до мінімуму стільки разів, скільки рейок або рядів зубів має фреза. Горизонтальні ділянки осцилограм, що збігаються з нульовою лінією M_k , свідчать про відсутність різання на даний момент - $M_k = 0$. Вертикальні лінії відмітника часу, відстань між якими відповідає 0,02 сек., дозволяють визначити період різання та період відсутності різання в роботі фрези. Період різання кожної рейки стандартної фрези зі швидкістю різання 16 м/хв і подачею 4 мм/об становить 0,1 - 0,12 сек, а період відсутності різання - 0,2 - 0,22 сек. Це свідчить про те, що довжина шляху різання кожної рейки є удвічі меншою за довжину дуги колового кроку зубів [12, 68, 84].

Різкі зміни величини M_k при вході рейок фрези в метал та при виході породжують вібрації заготовки та фрези. Суттєве зниження крутних моментів, в 1,4-1,6 рази, спостерігається при звільненні вершин зубів стандартної

фрези від різання.

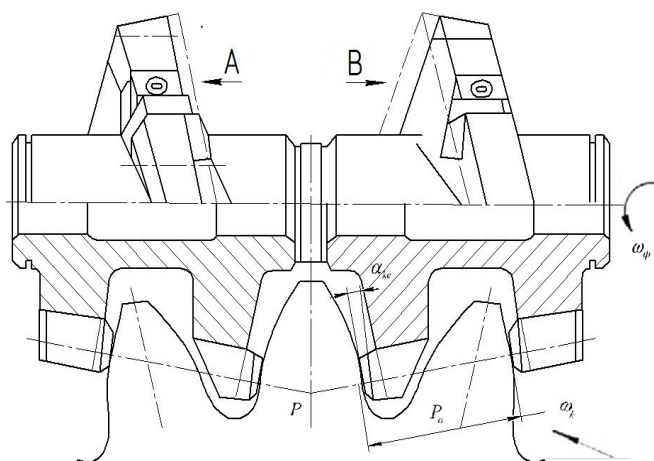


Рис. 1 - Принципова конструкція фрези з роздільною схемою формоутворення

Це підтверджує раціональність схеми чистового зубофрезерування, коли інструмент не обробляє дно западин зубів. Характер осцилограм M_k фрези з роздільною схемою формоутворення (рисунок 2, в, г. д) свідчить про більшу плавність процесу різання та менші зусилля різання. Фрези з роздільною схемою формоутворення мають в 1,75 разів більше зубів, на довжині одного витка нарізування, ніж стандартна фреза. Тому за один оберт фрези M_k змінюється частіше і періоди відсутності різання є набагато меншими.

Період різання зубів фрези з роздільною схемою формоутворення [12, 69] при швидкості різання 16 м/хв і подачі 4 мм/об становить 0,16-0,18 секунди, а період відсутності різання - 0,02-0,36 сек. Більш тривала участь у різанні зубів фрези з роздільною схемою формоутворення пояснюється характером траєкторій різальних кромek. При інших рівних умовах залежність є наступною: чим меншим є профільний кут зубів фрези різача, тим меншою є кривизна траєкторій руху точок різальних кромek і тим довше обробляється контакт краю з поверхнею. Це підтверджують попередні висновки про залежність форми траєкторії різаних зубів від конструктивних параметрів інструменту.

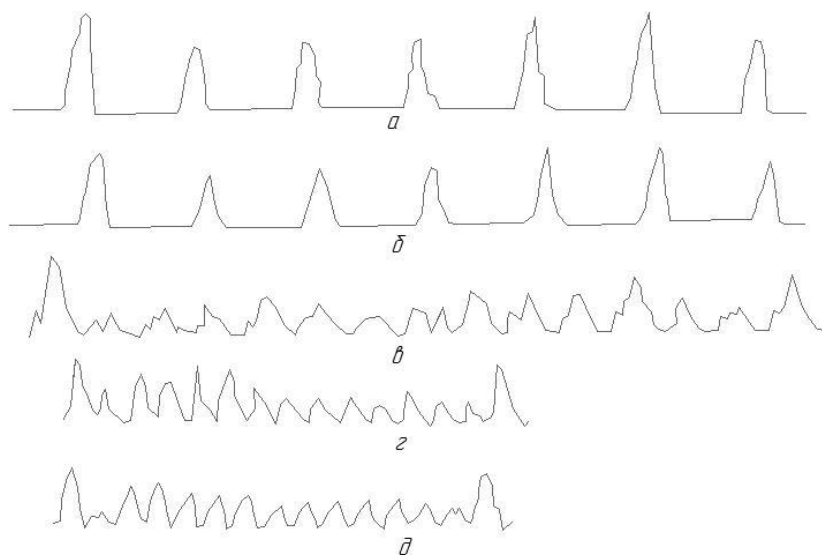


Рис. 2 – Характерні осцилограми крутних моментів при чистовому нарізуванні колеса $m = 20\text{мм}$; $z = 96$; а- стандартна фреза $S = 4\text{мм/об}$, $V = 16\text{м/хв}$ (зустрічне фрезерування з обробкою дна западин зубів); б- без обробки дна западин зубів; в - черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення $S = 4\text{мм/об}$; $V = 16\text{м/хв}$, зустрічне фрезерування; г - фреза з роздільною схемою формоутворення $S = 4\text{мм/об}$, $V = 30\text{м/хв}$, зустрічне фрезерування; д - попутне фрезерування

Більш плавна зміна M_k при вході зуба в метал заготовки і при виході з нього пояснюється наявністю кута нахилу головної різальної кромки 10° . Вид осцилограм, отриманих при попутному фрезеруванні (рисунок 2, д) вказує на більш рівномірний процес різання, хвилі приблизно однакові і за розміром трохи менші, ніж при зустрічному фрезеруванні. Крім того сумарні периметри одночасно працюючих різальних кромки зубів у черв'ячних фрез з роздільною схемою формоутворення $m = 20 - 60$ мм в 2,5 - 6 разів менше, а кількість зубів на довжині одного витка в 1,6 - 2 рази більше, ніж у стандартних фрез. Як наслідок, навантаження, що сприймаються першими, буде меншими за ті, що сприймаються другими. Це чітко підтверджується видом осцилограм, де крутні моменти для фрез із роздільною схемою формоутворення є меншими, ніж для стандартної фрези. Зменшення M_k пояснюється також вивільненням зубів фрези з роздільною схемою формоутворення від обробки dna западин зубів. Зуби знаходяться у вільному різанні, багато в чому схожому на оброблення торчовою фрезою.

На рисунку 3 показана залежність середніх крутних моментів $M_{k,ср.}$ і середньої потужності машини, що споживається верстатом $N_{ст.ср.}$, від подачі при нарізуванні зубів $m = 20$ мм черв'ячною фрезою з роздільною схемою формоутворення і фрезою стандартної конструкції. Зі збільшенням подачі середні крутні моменти збільшуються, більш інтенсивно для стандартної фрези, що, вочевидь, пов'язане з більшим зростанням товщин стружок, різаних вершинними кромками її зубів [35, 73]. При збільшенні подачі з 3 мм/об до 6 мм/об, тобто в 2 рази, крутний момент збільшується для фрези з роздільною схемою формоутворення в 1,4 рази, а для стандартної фрези - в 1,6 рази. У діапазоні досліджуваних подач 3 - 6 мм/об, при зустрічному фрезеруванні, середній крутний момент при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення в 2 - 2,5 рази менше, ніж при роботі стандартною фрезою, що обробляє бічну поверхню та дно западин зубів, і в 1,5 - 1,7 рази менше у випадку, коли стандартна фреза не обробляє дно западин зубів. При подачі 6 мм / об і швидкості різання 16 м/хв середній крутний момент для першої становить 430 Н·м, а для другої - 1100 Н·м, що, відповідно в 7,3 і 2,8 рази менше, ніж при чорновому нарізанні коліс такого ж модулю стандартними фрезами.

При попутному зубофрезеруванні фрезою з роздільною схемою формоутворення крутний момент на 10-14% менше, ніж при зустрічному фрезеруванні. Інтенсивність зниження $M_{k,ср.}$ при переході на попутне чистове зубофрезерування приблизно в 2 рази менша, ніж при чорновому попутному нарізуванні зубів стандартними фрезами, що вочевидь, пояснюється меншими перерізами різаної стружки та більш раціональною геометрією різальної частини фрези з роздільною схемою формоутворення. В діапазоні подач 3-6 мм/об, при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення середня споживана верстатом потужність у 1,8-2,4 рази менша, ніж при роботі стандартною фрезою.

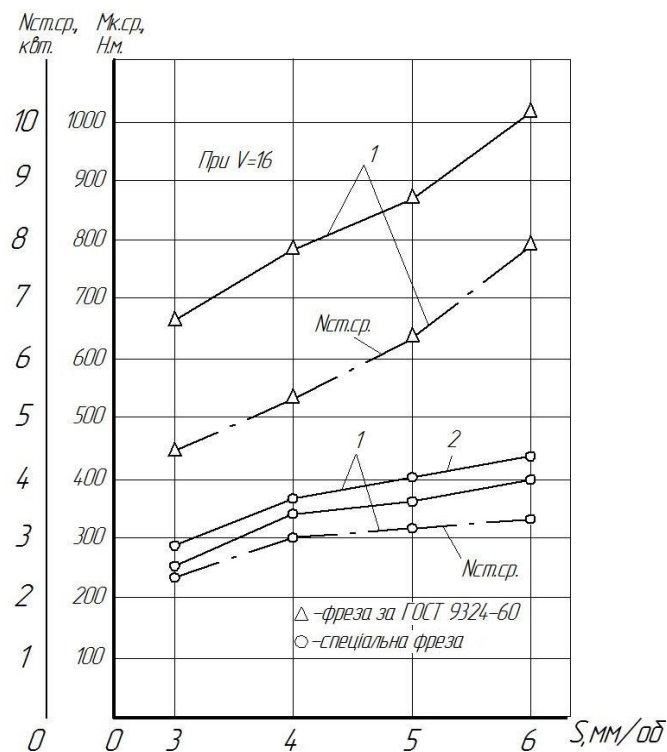


Рис. 3 – Залежність середнього крутного моменту $M_{k,ср.}$ та середньої споживаної верстатом потужності $N_{ст.ср.}$ від подачі черв'ячних фрез S при оброблюванні колеса $m = 20$ мм; $z = 95$; 1-зустрічне фрезерування; 2 - попутне фрезерування

Вивчення осцилограм показало, що коефіцієнт нерівномірності фрезерування K_n , при нарізуванні коліс як стандартними фрезами, так і фрезами з роздільною схемою формоутворення, знаходиться в межах $K_n = 2,4-2,8$, дорівнюючи в середньому 2,6. Це, приблизно, відповідає аналогічному співвідношенню, отриманому при чорновому і чистовому нарізуваннях великомодульних коліс. При попутному зубофрезеруванні процес різання протікає більш плавно, а коефіцієнт нерівномірності фрезерування знаходиться в межах $K_n = 2,2-2,4$.

Висновки. Процес чистового зубофрезерування великомодульних коліс є нерівномірним. Непостійність крутного моменту при оброблюванні черв'ячною фрезою пояснюється безперервною зміною товщин стружок, що зрізаються, та зміною кількості одночасно різальних зубів інструменту.

Характер осцилограм крутного моменту, отриманих для випадку обробки зубів фрезою з роздільною схемою формоутворення, свідчить про більшу плавність процесу різання, менші зусилля різання. Це досягається завдяки значному зменшенню розмірів зубів інструменту та збільшенню їх кількості, вивільненню зубів фрези від обробки дна впадин зубів колеса, раціональним геометричним параметрам різальної частини фрези.

У діапазоні досліджуваних подач 3-6 мм/ об середній крутний момент при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення в 2-2,5 рази менше, ніж при роботі з стандартною фрезою, що обробляє бічні поверхні та дно впадин зубів, і в 1,5 рази менше, коли стандартна фреза не обробляє дно впадин зубів.

Список літератури

1. Ключко А. А. Влияние точностных параметров зубчатых колес вертикально - фрезерных обрабатывающих центров на их динамическую устойчивость / А. А. Ключко, И. Г. Годзула // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – Вып. 35. – С. 31 – 35.
2. Ключко А. А. Технология чистовой лезвийной обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Ключко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки» – Чернігів, 2011. – № 2(49). – С. 58–68.
3. Чистове нарізання загартованих шевронних коліс обкатувальними різцями / О. О. Ключко, О. О. Анциферова, К. В. Камчатна - Степанова, Я. С. Антоненко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVIII Міжнародної науково - технічної конференції 21 - 24 грудня 2020 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2020. - С. 45

References (transliterated):

1. Klochko A. A. Vliyaniye tochnostnykh parametrov zubchatykh koles vertikal'no - frezemykh obrabatyvayushchih centrov na ih dinamicheskuyu ustojchivost' / A. A. Klochko, I. G. Godzula // Nadezhnost' instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk: DGMA, 2014. – Vyp. 35. – P. 31 – 35.
2. Klochko A. A. Tekhnologiya chistovoy lezviynoy obrabotki krupnomodul'nykh zakalennykh zubchatykh koles / A. A. Klochko // Visnik Chernigivskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya «Tekhnichni nauki» – Chernigiv, 2011. – № 2(49). – P. 58–68.
3. CHistove narizannya zagartovanih shevronnih kolis obkatuval'nimi rizyami / O. O. Klochko, O. O. Anciferova, K. V. Kamchatna - Stepanova, Ya. S. Antonenko // Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materiali XVIII Mizhnarodnoj naukovo - tekhnichnoj konferencij 21 - 24 of Desember 2020 / za zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2020. P. 45

Поступила (received) 10.02.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Ключко Олександр Олександрович (Klochko Aleksandr Oleksandrovych) – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38067-936-36-64, e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна (Kamchatnaya-Stepanova Ekaterina Valeriyevna, Kamchatna-Stepanova Kateryna Valeriivna) – кандидат технічних наук, асистент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38-067-733-4000; e-mail: katerina.ks@i.ua, ORCID: 0000-0001-7825-1238

Охрімєнко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 267-69-43; e-mail: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987

Манохін Андрій Сергійович, (Manokhin Andrii Sergiyovich) - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна; тел.: +38-095-205-58-33, e-mail: The.manokhin@gmail.com; ORCID: 0000-0003-1479-8482