

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-282-2-5-16>

УДК 621.952.5

ЗМІННІ ШПИНДЕЛЬНІ ГОЛОВКИ ОБРОБНИХ ЦЕНТРІВ ІЗ МОДЕРНІЗОВАНИМИ СПОЛУЧНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Кроль О.С., Цанков П.

INTERCHANGEABLE SPINDLE HEADS OF MACHINING CENTERS WITH MODERNIZED CONNECTING ELEMENTS

Krol O.S., Tsankov P.

Розглянуто процес 3D моделювання приводу головного руху обробного центру (ОЦ) зі змінними формоутворюючими шпindelними головками та модифікованими зубчастими муфтами. Представлені тривимірні моделі формотворчих вузлів ОЦ, призначених для різних технологічних операцій методами свердління, фрезерування та розточування складних корпусних деталей. Показано ефективність використання нових функціоналів: граничного представлення геометрії B-rep та тривимірної операції «Вирізання», адаптованих для побудови 3D моделей корпусних деталей приводу та шпindelних головок. Використано модуль розрахунків механічних передач Компас Gears, в якому реалізуються геометричне моделювання та розрахунки на міцність циліндричних і конічних зубчастих передач та зубчастих муфт в процесі 3D моделювання. Зазначено, що при застосуванні тривимірної операції побудови зубчастих вінців методом імітації зубофрезерування досягається підвищення швидкості профілювання робочих поверхонь зубчастого зачеплення. Висунуто ідею вдосконалення конструкції зубчастих муфт за критерієм мінімізації навантажувальної здатності, які використовуються для з'єднання валів приводу оброблювального центру з валами вертикальної, довбальної та кутової шпindelними головками. Запропоновано заміну класичного циліндричного профілю робочої поверхні зуба внутрішнім конічним зачепленням зубів з круговим профілем. Зроблено аналітичний розрахунок основних геометричних характеристик модифікованого профілю зачеплення зубів зубчастих муфт. Введений коефіцієнт

довжини зубів стосовно стандартної та модифікованої конструкції, як критерій оцінки рівня згинальних напруг у зоні контакту. Обґрунтовано припущення, що отримані розрахункові значення коефіцієнта форми зуба для випадку евольвентного зачеплення мало відрізняються при розгляді кругового профілю модифікованої муфти в межах робочої висоти витка на ділільному діаметрі. Відзначено вплив коефіцієнта форми зубів на зниження рівня контактної напруги. Реалізовано експериментальний розрахунок комплексного коефіцієнта зниження напруги для модифікованої конструкції зубчастої муфти.

Ключові слова: шпindelна головка, 3D моделювання, обробний центр, зубчаста муфта, коловий профіль зуба.

Вступ. З кожним роком частка багатоопераційних верстатів типу ОЦ у верстатному парку збільшується. Це пов'язано з тим, що ОЦ є універсальною, швидко переналагоджуваною системою, призначеною для виконання широкого роду операцій металообробки, починаючи від установки заготовки і закінчуючи фінішною обробкою, на одному верстаті без переустанови оброблюваної заготовки [1-3].

Враховуючи специфіку машинобудівних підприємств, такі системи незамінні в серійному виробництві. Ця концепція одержала назву «DONE IN ONE» і була вперше запропонована

японською компанією Mazak [4]. Концепція "Зроблено в одному" це принцип, згідно з яким усі операції здійснюються на одному верстаті. Застосування цієї концепції несе у собі як модернізацію процесу виробництва, а й збільшення можливостей процесу управління життєвим циклом виробу.

Серед конкурентних переваг можна відзначити: скорочення часу виробничого циклу, зменшення площі, яку займає обладнання і як наслідок зменшення витрат та підвищена точність обробки.

Для таких переваг важливу роль відіграє конструктивна верстатна компонента. Зростають вимоги до надійного та безперебійного функціонування формотворчих вузлів, змінного технологічного оснащення, механічних передач та сполучних елементів верстатів.

Дослідження ефективності функціонування металорізального обладнання за критеріями надійності та точності здійснюється у різних інтегрованих САПР, у яких необхідно пов'язати системи 3D-моделювання елементів верстатних систем з розрахунковими модулями оцінки конструкцій за цими критеріями [5, 6]. Це особливо важливо для широко універсальних верстатних комплексів, оснащених змінним модульним технологічним оснащенням. Широке поширення таких верстатів у парку машинобудівних підприємств збільшується, що вказує на актуальність таких досліджень.

Така ситуація з методологічних позицій призводить до необхідності паралельного використання засобів тривимірного моделювання з параметризацією та методів досліджень у галузі підвищення надійності та працездатності як самих верстатів, так і їхнього технологічного оснащення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблемам автоматизованого проектування та пошуку нових конструкторських рішень у галузі створення формотворчих вузлів металорізального обладнання присвячено широкий спектр публікацій [7-13].

В роботі [7] проведено дослідження задачі підвищення оброблюваності виробів у рамках життєвого циклу трикоординатного фрезерного верстата, оснащеного інструментальним оснащенням типу Bridgeport DIN 69871 для шпindelного вузла та інструментальної системи.

Велику роль при оцінюванні мають опрачки за стандартом ISO 230 series, які призначені для

малогабаритних верстатів (першого та другого типорозміру). Так для інструментального оснащення у вигляді патронів CAMFIX для затиску інструменту з циліндричними хвостовиками (цангові патрони ER з наскрізним отвором і двома зонами затиску) використовується симетрична конструкція: завдяки якій навантаження, що створюється крутним моментом, рівномірно розподіляється по багатокутнику, забезпечуючи зусиллям. Як наслідок збільшується здатність навантаження і підвищується довговічність роботи даних пристроїв.

Різним аспектам застосування CAD SOLIDWORKS та CAE ANSYS software для створення 3D-моделі шпинделя токарного верстата з ЧПУ із застосуванням методів кінцевих елементів присвячено роботу [8]. Як основна модель використана 10-вузлова стрижнева модель, в якій кожен вузол характеризувався трьома ступенями свободи. Дослідження динамічних параметрів на 5 власних частотах та формах коливань шпинделя дало можливість оцінити показник жорсткості в умовах дії згинальних напруг. В якості проблеми автори відзначають необхідність спрощення вихідної 3D-моделі за рахунок видалення фасок і отворів малих розмірів, а також інших елементів конструкції при конвертації форматів 3D-файлів між SOLIDWORKS і ANSYS.

Питання вдосконалення механічної коробки за рахунок управління передачею заданого крутного моменту розглянуті в роботі [9]. Для цього розроблено метод синтезу передач із подвійним зчепленням, що забезпечує вирівнювання навантаження на фрикційні диски кожного зчеплення. Аналітично, метод заснований на встановленому функціональному зв'язку між параметрами керування приводом та тиском зусилля (навантажувальна здатність) на пари тертя зчеплення. Наслідком цього є зниження енергетичних втрат двигуна пристрою, що розглядається.

Комплексному дослідженню модифікованих зубчастих муфт сферичного профілю (Spherical gear couplings), що передають значні крутні моменти при роботі з великими перекосами напівмуфт (до 30 і вище) присвячена робота [10]. Автори пропонують новий метод виготовлення зубів втулки сферичної напівмуфти, пов'язаний з імітацією процесу фрезерування зовнішнього профілю зуба з піднутренням за допомогою поверхні

витка черв'яка (черв'ячної фрези). У цьому полягає головна відмінність від існуючих методів, що базуються на методі аналізу, що утворює зубообробний інструмент. У цьому профіль робочих поверхонь напівмуфт здійснювалося з урахуванням рекомендацій American Gear Manufacturers Association [11].

Створення поверхні зуба шестерні поверхнею витка черв'яка було запроваджено Литвином та ін [12, 13]. Для того, щоб зменшити негативні впливи (збільшення натягу та збільшення зазору між зубами втулки та гільзи) у роботі [10] запропоновано процедуру розгляду поверхні витка черв'ячної фрези як набір ріжучих кромок, що діють одночасно під час формування бічного профілю зуба. Це робить можливим утворення профілів з підрізуванням (при малій кількості напівмуфтових зубів), які можуть з'явитися при виготовленні сферичних втулок, особливо при використанні конічних зубчастих коліс, щоб компенсувати неспіввісність більше 30 мкм.

Весь спектр досліджень був проведений на базі 3D моделей, що ілюструють основні геометричні побудови робочих поверхонь зубів та особливостей контакту ріжучого інструменту в процесі обробки сферичних напівмуфт. Пропонована модель рекомендована для кола задач оптимізації геометрії зубчастих поверхонь муфт при зміні траєкторії інструменту. В результаті досягається ефект балансування зазорів у зачепленні, збільшення коефіцієнта контакту і зниження контактних і згинальних напруг сферичних зубчастих муфт.

Аналіз вищерозглянутих робіт показав, що завдання створення нових конструкцій формотворчих вузлів верстата та механічних передач на базі 3D моделювання є актуальними та затребуваними.

Постановка проблеми. У цій статті ставиться завдання створення комплектів тривимірних моделей формоутворюючих шпindelних головок, призначених для обробних центрів другого та третього типорозмірів та модифікації їх компонентів для з'єднання співвісних валів та передачі крутного моменту.

Метою дослідження є підвищення здатності навантаження муфти, як сполучного елемента шпindelних головок без зміни її габаритних і приєднувальних розмірів.

Основний матеріал. Тривимірне моделювання шпindelних головок обробного центру. На початковому етапі даного дослідження розроблено комплекс 3D моделей

формотворчих вузлів обробного центру свердлильно-фрезерно-розточувального типу [14-16].

Як об'єкт моделювання розглядається чотирикоординатний обробний центр СФ68ВФ4 [17]. Як основний програмний продукт використовується інтегрована CAD/CAM/CAE КОМПАС-3D із вбудованими модулями Artisan Rendering та АРМ FEM кінцево-елементного аналізу конструкцій.

Базовий привід головного руху ОЦ включає горизонтальну шпindelну бабку (Рис. 1, а), що монтується в чавунному литому корпусі в якому розташований шпindelний блок з механізмом автоматичного затиску інструменту гідроциліндром [18, 19].

Особливістю конструкції є розподільний вал, що передає обертання на горизонтальний або за допомогою муфт на шпindel вертикальний або довбальний. При цьому використовується автоматичний пристрій перемикання провідної шестерні. Двоступінчаста коробка швидкостей, керується гідрофікованим механізмом перемикання [20, 21].

Наявність електричних та оптикоелектричних датчиків дозволяє контролювати положення шпindelної бабки та її механізмів, а також цілого ряду інших деталей та вузлів, що забезпечують нормальне функціонування шпindelної бабки від пристрою ЧПУ.

Обертання шпинделя проводиться так (Рис. 1, а): від електродвигуна через полікліновий ремінь передається на вхідний вал. Далі, через двоступінчасту коробку швидкостей на розподільний вал, з якого обертання передається на муфту вертикальної, або кутової або довбальної головок, або на шестерню горизонтального шпинделя. Частота обертання змінюється в межах 20...4000 хв⁻¹.

При побудові 3D моделей в середовищі інтегрованої САПР КОМПАС-3D використані просунуті механізми тривимірного моделювання [22, 23]. Для розробки таких складних конструкцій головок, використовується інструментарій геометричного ядра С3D Modeler і параметричного ядра С3D Solver.

Традиційно, геометричне ядро С3D Modeler реалізує процес створення геометричної моделі об'єкта, що моделюється, і обчислення його геометричних параметрів, необхідні для побудови 2D-ескізів і 3D-моделей.

Для опису форми шпindelних головок C3D Modeler була використана функція граничного представлення геометрії, при цьому модель будується з тривимірних тіл, які створюються за допомогою поверхонь і кривих. Далі тіла групуються в складальні одиниці (вал-підшипники; муфти з двох напівмуфт та ін.) з яких будуються складальні одиниці наступного рівня (Рис. 1).

Важливою особливістю ядра C3D Modeler є відкрита архітектура, яка дозволяє розширити його за межі стандартного набору функцій. Можливість створювати свої об'єкти, специфічні для даного дослідження, успадковуючи їх від об'єктів C3D Modeler було апробовано на основних компонентах шпindelних головок (Рис. 1).

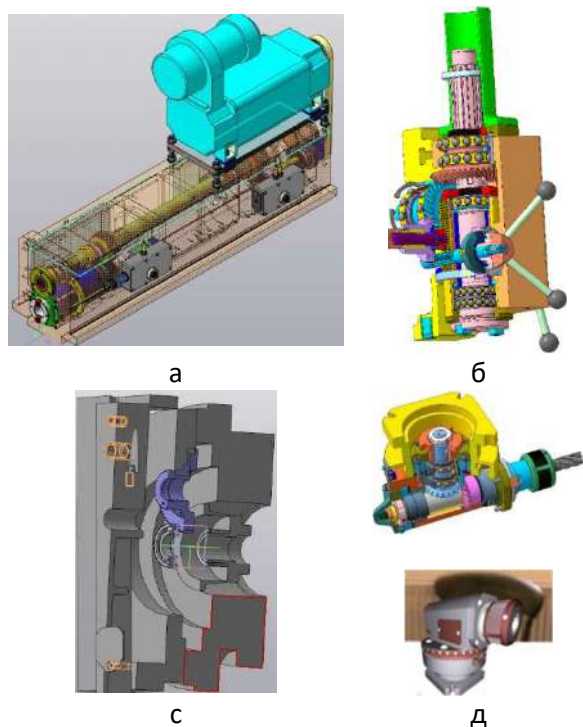


Рис. 1. Тривимірні моделі формуювальних вузлів ОЦ: а – привід головного руху; б – вертикальна шпindelна головка; с – довбальна головка; д – кутова головка

Використовуючи принцип асоціативності в САПР КОМПАС-3D отримані креслення приводу головного руху ОЦ (Рис.2) та шпindelних головок (Рис. 3), як етап конструкторської підготовки виробництва, що забезпечує зв'язок з етапом аналізу на технологічність та етапом технологічної підготовки виробництва.

У процесі створення креслення поточної моделі шпindelної головки широко

використовується логічна група об'єктів "Шар" [24, 25]. Розбиття на шари дозволяє спрощувати зміну властивостей групи об'єктів. Для всіх об'єктів, що лежать в одному шарі, можна одночасно здійснити передачу в асоціативний вид креслення, а також змінити колір, увімкнути/вимкнути показ на екрані і т.і. Так, в окремий шар були поміщені допоміжні об'єкти, розміри та кріплення. У цій системі 3D моделювання передбачено можливість поміщати в шар об'єкти з різних виконань шпindelної головки (Рис.3), що сприяє реалізації процедури багатоваріантного проектування.

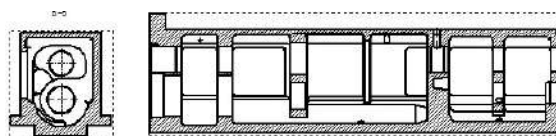


Рис. 2. Креслення приводу головного руху ОЦ

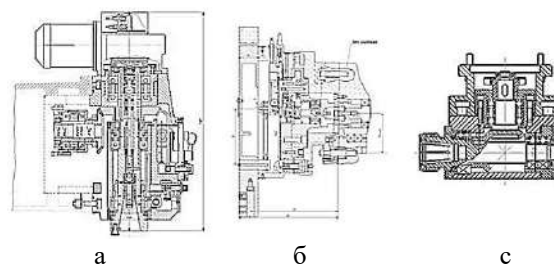


Рис. 3. Креслення шпindelних головок ОЦ: а – вертикальної головки; б – довбальної головки; с – кутової головки

При побудові тривимірних моделей корпусних деталей шпindelних головок (Рис.4, Рис.5), що виготовляються методом лиття, використовуються набір тривимірних команд системи КОМПАС-3D [26, 27]. Найефективніше, у разі, застосовується тривимірні операції «Вирізання», що дозволяє реалізувати стратегію створення 3D моделей з урахуванням формування порожнин і каналів складної форми майбутньої тривимірної моделі корпусу.

Конструкція корпусу шпindelної головки характеризується великою кількістю отворів та заокруглень. У багатоваріантному проектуванні наявність таких елементів уповільнює процес внесення змін до конструкції.

Для підвищення продуктивності процесу проектування інструментарій C3D Modeler реалізує низку нових функціоналів для видалення з моделі отворів та заокруглень. Така операція дає можливість спрощення 3D моделі,

яка готується до подальшого розрахунку в системі САЕ.

Ще один новий функціонал – це модифікація заокруглень, що забезпечує побудову заокруглень, що поглинають елементи вихідної 3D моделі. В результаті з'являється можливість будувати раніше недоступні комбінації заокруглень. Ця операція найчастіше використовується для створення складних ливарних форм шпindelних головок.

На Рис. 4 представлений корпус приводу головного руху ОЦ з двоступінчастою коробкою швидкостей яка змонтована всередині шпindelного горизонтального вузла.

Передача руху і моменту, що крутить, в приводі головного руху ОЦ і змінних шпindelних головок здійснюється за допомогою зубчастих передач і зубчастих муфт, призначених для з'єднання співвісних валів і передачі крутного моменту [28, 29].

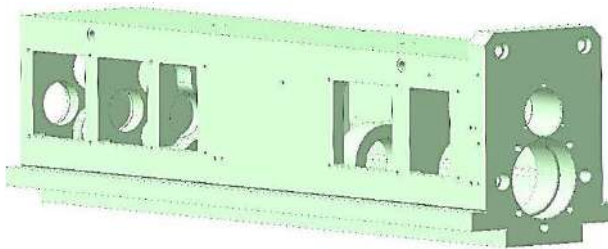


Рис. 4. Корпус приводу головного руху ОЦ

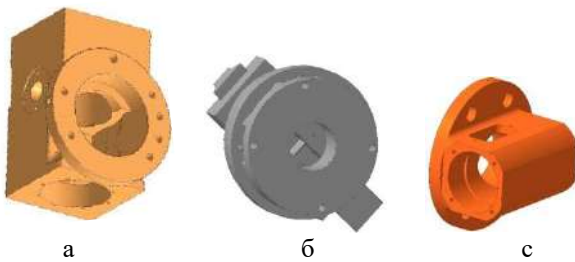


Рис. 5. Корпусні деталі головок шпindelля:
а – вертикальної головки; б – довбальної головки;
с – кутової головки

В рамках програмного забезпечення САПР КОМПАС-3D функціонує спеціальний додаток «Вали та механічні передачі 3D», що включають модуль розрахунків механічних передач КОМПАС_GEARs. У цьому модулі реалізуються геометричні та розрахунки міцності циліндричних і конічних зубчастих, ланцюгових, черв'ячних і ремінних передач.

Особливістю функціонування цього модуля є використання як графічних примітив функціональних елементів та деталей зубчастих

передач та зубчастих муфт [26]. У цьому вся плані з'являється можливість створення високоточних моделей зубчастих вінців з геометрично коректними поверхнями зубів [30].

Підвищення швидкості профілювання робочих поверхонь зачеплення здійснюється за рахунок застосування тривимірної операції побудови зубчастих вінців методом імітації зубофрезерування конічних зубчастих коліс. Підвищення швидкості побудови забезпечив також новий функціонал САПР КОМПАС-3D, орієнтований на такий тип поверхні як «Поверхня конічного перерізу», яка утворюється шляхом переміщення кривої конічного перерізу по двох напрямних.

У цій роботі за допомогою програми «Вали та механічні передачі 3D» побудовано твердотільні моделі різних типів зубчастих коліс (циліндричні, конічні, вал-шестірни), які представлені на Рис. 6.

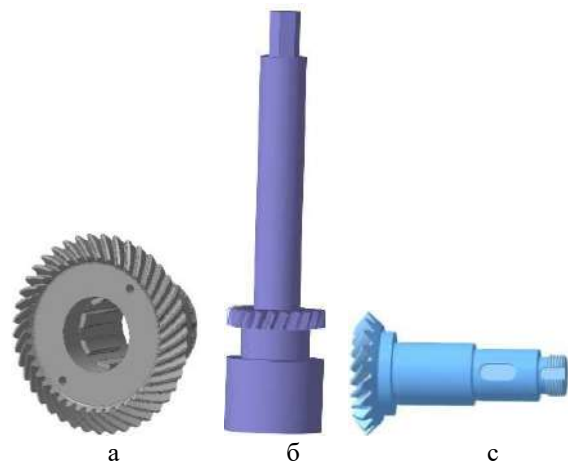


Рис. 6. Зубчасті колеса та вал-шестірни шпindelних головок: а – вертикальної; б – довбальної; с – кутової

Модернізація зубчастих муфт як сполучних елементів ОЦ. Розширення номенклатури змінної технологічної оснастки та шпindelних головок ОЦ пов'язане із збільшенням кількості сполучних елементів – різного типу муфт. При з'єднанні паралельних валів доводиться стикатися з кутовими, радіальними та осьовими зсувами, які впливають на точність та вібростійкість обробки на верстаті. Для компенсації зсувів валів доцільно використовувати зубчасті муфти, як універсальний різновид компенсуючих муфт, що є оптимальним рішенням у випадках, коли потрібно передати момент, що крутить, по одній осі або під нахилом.

У станкобудуванні широкого поширення набули (згідно з нормативами) зубчасті муфти (з

двома фланцевими напівмуфтами) 1-го типу з різномною обоймою і 1-го виконання з циліндричними отворами для коротких кінців валів. Зуби втулок і обойм, як правило, виготовляють евольвентними з класичним кутом профілю по ділільному колу в середньому торцевому перерізі, а зубці зубчастих вінців виготовляють бочкоподібної форми (barrel shape). Разом про те, пропонуються і профілі іншої форми – сферичної, як у роботі [10].

Поряд із оптимальним варіантом з'єднання паралельних валів до переваг зубчастих муфт відносяться мінімальні габарити. Разом з тим дефекти в роботі зубчастих муфт пов'язані зі зносом елементів муфти, що в результаті порушує правильну форму робочих поверхонь і призводить до проблем напружено-деформованого стану на контактних поверхнях, що пов'язані з рівнем згинальних і контактних напруг.

Недоліком відомої зубчастої муфти є недостатня здатність навантаження зубів по напрязі вигину. Це пояснюється тим, що при заданих габаритах муфти неможливо збільшити довжину зубів, початкова поверхня яких є циліндром з обмеженим осьовим розміром.

Одним з методів зниження рівня напруги в зоні контакту і недостатньої здатності навантаження відомих конструкцій муфт є модифікація конструкцій зубчастих муфт.

Головна ідея модифікації полягає в пошуку таких профілів робочої частини зубців фланцевих напівмуфт зубчастої муфти, які будуть мати збільшену довжину контакту в зачепленні при тих же габаритних і приєднувальних розмірах.

Така ідея, підтверджена патентним рішенням [31], реалізується шляхом надання початкової поверхні зубів на втулках напівмуфт у вигляді конуса з опуклою криволінійною утворюючою, а початкової поверхні зубів в обоймах напівмуфт – конуса з увігнутою криволінійною утворюючою, Рис. 7

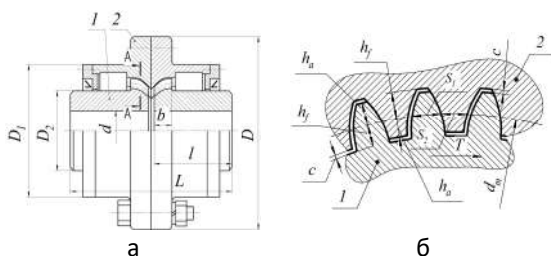


Рис. 7. Модифікована зубчаста муфта: а – конструкція; б – геометрія

Теоретична частина. Поставлене завдання реалізується в такий спосіб. Початкова поверхня зубів на втулках напівмуфт являє собою конус з опуклою криволінійною твірною, а початкова поверхня зубів в обоймах напівмуфт – конус з увігнутою криволінійною твірною (Рис. 7). Тобто, внутрішнє циліндричне зчеплення евольвентних зубів, що використовується в стандартних зубчастих муфтах [28, 29], замінено внутрішнім конічним зчепленням зубів із круговим профілем. При цьому поздовжні напрямки зубів на втулках і обоймах модифікованої муфти збігаються з криволінійними утворюючими початкових конічних поверхонь.

Випукла і увігнута криволінійні утворюючі являють собою дуги кола однакового радіусу R (Рис. 8), значення якого визначається рівністю:

$$R = \frac{b}{\sin \delta},$$

Тут b – ширина зубчастого вінця на втулках; $\delta = 60^\circ$ – максимальний кут нахилу криволінійних зубців, що утворюють, на втулках і в обоймах модифікованої зубчастої муфти.

Чисельні значення ширини дорівнюють значенням цього параметра в стандартних зубчастих муфтах [28]. Параметри зубів показані в середньому торцевому перерізі зубчастого А-А зачеплення на Рис. 7, б.

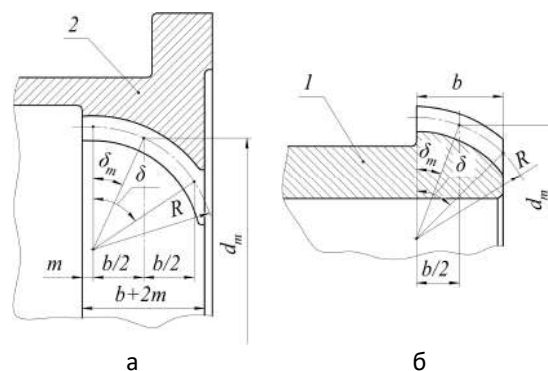


Рис. 8. Криволінійні утворюючі обойми та втулки: а – увігнута; б – випукла

Середній торцевий крок P_m між зубами на середньому ділільному колі діаметром d_m складається з трьох частин – S_1, S_2, Δ :

$$P_m = S_1 + S_2 + \Delta = \pi \cdot m_m.$$

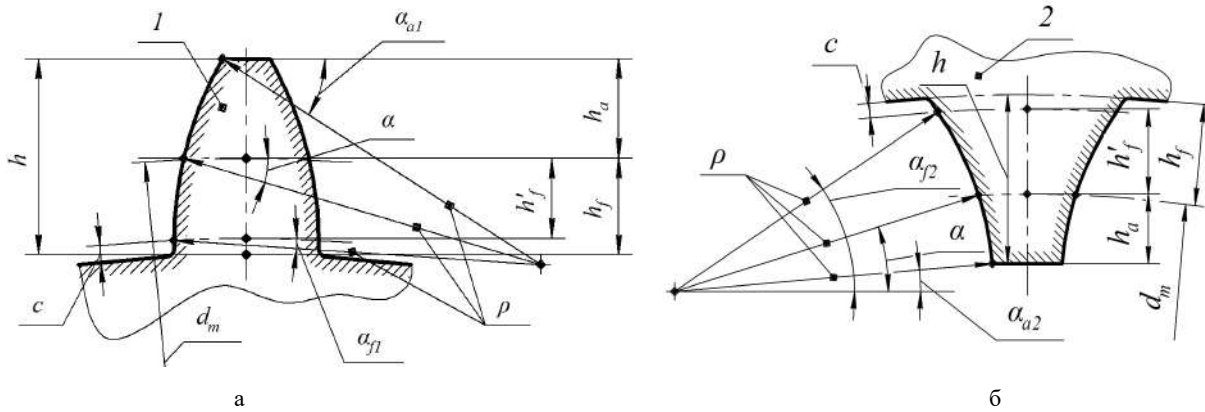


Рис. 9. Профілі зубів: а – опуклого; б – увігнутого

Тут $S_1 = 0,5 \cdot P_m = 0,5 \cdot \pi \cdot m_m = 0,5 \cdot \pi \cdot m_m$ – товщина опуклих зубів у середньому торцевому перерізі зачеплення на ділільному діаметрі; $S_{2t} + \Delta = 0,45 \cdot \pi \cdot m_m + 0,05 \cdot \pi \cdot m_m$ – відповідно товщина увігнутих зубів (S_{2t}) у середньому торцевому перерізі на ділільному діаметрі обойм d_m .

Δ – бічний зазор між зубами в середньому торцевому перерізі; (параметри P_m та Δ на перерізі (Рис. 7, б) не показані);

$m_m = m_{nm} / \cos \delta_m$ – середній торцевий модуль, виражений через середній нормальний модуль m_{nm} та кут нахилу поздовжньої лінії зуба δ_m на середині розміру b . Розмір кута δ_m визначається рівністю:

$$\delta_m = \arcsin\left(\frac{0,5 \cdot b}{R}\right) = \arcsin(0,5 \cdot \sin \delta).$$

Варто зазначити, що $\delta_m \neq 0,5 \cdot \delta$. Так, наприклад, для $\delta = 60^\circ$:

$$\delta_m = \arcsin(0,5 \cdot \sin 60^\circ) = 25,66^\circ \neq 0,5 \cdot 60^\circ = 30^\circ.$$

Параметри зубчастих вінців модифікованої зубчастої муфти – середній нормальний модуль зубів m_m , число зубів z , а також основні габаритні та приєднувальні розміри муфти – D, D_1, D_2, d, L, l , які збігаються з параметрами зубів та розмірами стандартних зубчастих муфт [1]; (при цьому модуль зубів у ГОСТ Р 50896-96 є постійною величиною у всіх торцевих перерізах зубчастого вінця і позначається m).

Профілі опуклого та увігнутого зубів окреслені дугою кола однакового радіусу ρ (Рис. 9).

Радіус дуги кола ρ визначається як

$$\rho = \frac{m}{\sin \alpha - \sin \alpha_{f1}} = \frac{m}{\sin \alpha - \sin \alpha_{a2}},$$

де $\alpha = 20^\circ$ – кут нахилу профілів опуклого і увігнутого зубів на середньому ділільному колі діаметром d_m ;

На рис. 9 зображені кути нахилу профілів опуклого зуба втулки в основі (α_{f1}) і увігнутого зуба обойми на його вершині α_{a2} , які приймають значення: $\alpha_{f1} = \alpha_{a2} = 5^\circ$.

Для $\alpha = 20^\circ$ і $\alpha_{f1} = \alpha_{a2} = 5^\circ$:

$$\rho = \frac{m}{\sin 20^\circ - \sin 5^\circ} \approx 3,9 \cdot m.$$

Максимальний кут нахилу профілів зубів $\alpha_{a1} = \alpha_{f2}$, рис. 9:

$$\alpha_{a1} = \alpha_{f2} = \arcsin(2 \cdot \sin \alpha - \sin \alpha_f).$$

Для $\alpha = 20^\circ$ і $\alpha_f = 5^\circ$:

$$\alpha_{a1} = \alpha_{f2} = \arcsin(2 \cdot \sin 20^\circ - \sin 5^\circ) \approx 36,7^\circ.$$

Заміна евольвентного профілю на круговій запропонована з метою спрощення технології виготовлення зубів.

Повна висота зубів (h), висота головки (h_a) і ніжки зубів (h_f), радіальний зазор в зачепленні (c) прийняті за аналогією зі стандартним аналогом, що має евольвентні зуби:

$$h = 2,2 \cdot m, \quad h_a = m, \quad h_f = 1,2 \cdot m, \quad c = h_f - h'_f = 0,2 \cdot m.$$

Результатом модифікації зубчастої муфти є збільшення довжини зубів без зміни габаритних параметрів стандартної муфти. При однаковій ширині b довжина зуба L_{mod} у модифікованої муфти буде більшою за довжину зуба L_{st} у стандартної муфти в K_L раз:

$$K_L = \frac{L_{mod}}{L_{st}} = \frac{\delta}{2 \cdot \arcsin(0.5 \cdot \sin \delta)}.$$

Для заданого кута $\delta = 60^\circ = 60^\circ \cdot (\pi / 180^\circ)$, рад.:

$$K_L = \frac{60^\circ \cdot (\pi / 180^\circ)}{2 \cdot \arcsin(0.5 \cdot \sin 60^\circ)} \approx 1.17.$$

Тобто, довжина зубів збільшується на 17%, а це означає, що напруга вигину σ_F в них знизиться на таку ж величину.

Крім цього, слід врахувати ще один фактор, що сприяє зменшенню величини σ_F – коефіцієнт форми зубів Y_F . Якщо в стандартній муфті [12] значення $(Y_F)_{st}$ вибирається по дійсному числу зубів z (як у циліндричних прямозубих передачах), то в модифікованій муфті величина $(Y_F)_{mod}$ приймається за еквівалентним числом зубів $z_V = z / \cos \delta_m$ (як у конічних прямозубих передачах). Так як $z_V = z / \cos \delta_m > z$, величина $(Y_F)_{mod}$ буде меншою, ніж $(Y_F)_{st}$, [12]. Відповідно, це також знизить напругу σ_F в K_Y раз:

$$K_Y = (Y_F)_{st} / (Y_F)_{mod}.$$

Строго кажучи, значення $(Y_F)_{st}$ отримані для евольвентного зачеплення. Однак, круговий профіль зубів модифікованої муфти в межах робочої висоти витка $h = 2.2 \cdot m$ мало відрізняється від евольвентного профілю зубів стандартної муфти, а їх товщина на колі діаметром d_m однакова. Тому використання графіка для оцінки величини $(Y_F)_{mod}$ в першому наближенні цілком коректно.

Таким чином, в результаті збільшення довжини зубів і зниження коефіцієнта форми зубів напруга вигину у модифікованої муфти $(\sigma_F)_{mod}$ зменшиться в порівнянні з $(\sigma_F)_{st}$ у стандартної муфти в K раз:

$$K = K_L \cdot K_Y = \frac{\delta}{2 \cdot \arcsin(0.5 \cdot \sin \delta)} \cdot \frac{(Y_F)_{st}}{(Y_F)_{mod}}.$$

Експериментальна частина. Задано параметри зубчастого зачеплення муфти: $m = 6 \text{ mm}$; $z = 46$.

Визначити коефіцієнт зниження напруги вигину зубів K модифікованої муфти з $\delta = 60^\circ$ при габаритних розмірах, що збігаються зі стандартною муфтою.

Рішення.

1. Для стандартної муфти [4]: $z = 46 \rightarrow (Y_F)_{st} = 3.68$.

2. Для модифікованої муфти:

$$\delta_m = \arcsin(0.5 \cdot \sin \delta) = \arcsin(0.5 \cdot \sin 60^\circ) = 25.66^\circ;$$

$$z_V = z / \cos \delta_m = 46 / \cos 25.66^\circ \approx 51 \rightarrow (Y_F)_{mod} \approx 3.66$$

3. В результаті:

$$K = \frac{\delta}{2 \cdot \arcsin(0.5 \cdot \sin \delta)} \cdot \frac{(Y_F)_{st}}{(Y_F)_{mod}} \approx \frac{60^\circ}{2 \cdot \arcsin(0.5 \cdot \sin 60^\circ)} \cdot \frac{3.68}{3.66} \approx 1.17.$$

Таким чином, за заданих вихідних даних напруга вигину в зубцях модифікованої муфти знизиться на 17%.

Висновки. В результаті проведених досліджень отримано такі результати:

1. Створено комплексний 3D-проект приводу оброблювального центру свердильно-фрезерно-розточувального типу з трьома змінними шпіндельними головками: вертикальною, довбальною та кутовою головками в середовищі САПР КОМПАС-3D. Цей 3D-проект став переможцем Міжнародного конкурсу “Майбутні Аси комп’ютерного 3D моделювання”.

2. Розроблено твердотільні моделі складних корпусних деталей приводу головного руху та змінних шпіндельних головок. Для формування складної просторової геометрії литих корпусів ефективно використано тривимірну операцію «Вирізання» при побудові порожнин і каналів внутрішньої поверхні литої заготовки.

3. Побудовано тривимірні моделі циліндричних та конічних зубчастих коліс та модифікованої конструкції зубчастої муфти у спеціалізованому модулі “Компас Gear”. У процесі 3D моделювання застосовано новий функціонал системи КОМПАС-3D: «Поверхня конічного перерізу», що реалізує процедуру формування зубчастих вінців за допомогою імітації фрезерування конічних зубів шестерень.

4. Розроблено конструкцію модифікованої зубчастої муфти для з’єднання валу приводу ОЦ із валами трьох різних шпіндельних головок. Запропоновано нову форму робочої поверхні зубів муфти у вигляді конуса з опуклою

криволінійною твірною на початковій поверхні зубів для втулок напівмуфт і конуса з увігнутою криволінійною твірною в обоях напівмуфт. Знайдено аналітичні залежності для визначення радіуса твірної, середній торцевий крок, кут нахилу поздовжньої лінії зуба на середині ширини зубчастого вінця та ін. Доведено, що $\delta_m \neq 0.5 \cdot \delta$ для максимального кута нахилу криволінійних зубців, що утворюють.

5. Результатом модифікації зубчастої муфти є збільшення довжини зубів без зміни габаритних параметрів стандартної муфти, що призводить до зниження рівня згинальних напруг. Введено критерій оцінки збільшення довжини контакту K_L та коефіцієнт впливу форми зубів Y_F на базі якого формується друга складова критерію оцінки K_L .

6. Проведено експериментальний розрахунок коефіцієнта зниження напруги вигину зубів модифікованої муфти, який показав зниження напруги вигину в зубцях модифікованої муфти на 17% і, як наслідок, без змін габаритів стандартної зубчастої муфти підвищити її здатність навантаження.

Л і т е р а т у р а

- Lynch M. Machine center programming, setup and operation. Trout Valley: CreateSpace Independent Publishing Platform; 2014. 362 p.
- Кіпчарський В.П. Металорізальні верстати: Навчальний посібник. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2018. – 143 с.
- Dervoort W.H. Modern Machine Shop Tools, Their Construction, Operation and Manipulation, Including Both Hand and machine Tools ... London: Creative Media Partners; 2018. 552 p.
- Smith, G.T. CNC machine technology. Design, development and CIM strategies. Heidelberg: Springer-Verlag; 1993. 140 p.
- Кроль О.С. Методы и процедуры 3D-моделирования металлорежущих станков и инструментов – Северодонецк: изд-во ВНУ им. В.Даля, 2015. 120 с.
- Кроль О.С., Бурлаков Е.И. Моделирование шпиндельного узла обрабатывающего центра // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Х: НТУ «ХПІ». №11(985), 2013. С. 33-38.
- Afsharizand B., Zhang X., Newman S.T., Nassehi A. Determination of machinability considering degradation of accuracy over machine tool life cycle. Proceeding of the 47th CIRP conference on manufacturing systems, 2014. № 17, P. 760-765. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.048>
- Kong J., Cheng X. Modal analysis of CNC lathe's spindle based on finite element. Advances in Engineering Research (AER). 2017, Vol. 148, P. 318–321.
- Sergienko N., Kalinin P., Pavlenko I., Ochowiak M., Ivanov V., Sergienko A., Pavlova N., Basova Y., Titarenko O., Nazarov A., et al. Synthesis of the Energy-Saving Dry Dual Clutch Control Mechanism. Appl. Sci. 2023, 13, 829. <https://doi.org/10.3390/app13020829>
- Iñurritegui A., Gonzalez-Perez I., Arana A., Larrañaga J., Ulaci I. Computerized generation and tooth contact analysis of spherical gear couplings for high misalignment applications. Mechanism and Machine Theory 164 (2021) 104408. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104408>
- American Gear Manufacturers Association, AGMA 945-1-b20: Splines design and application, 2020.
- Litvin F. Theory of Gearing, Tech. rep., University of Illinois at Chicago, 1989.
- Litvin F., Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory, 2nd Edition, CAMBRIDGE University Press, 2004.
- Кроль О.С., Кроль А.А., Бурлаков Е.И. Твердотельное моделирование и исследование шпиндельного узла обрабатывающего центра / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Х: НТУ «ХПІ». № 16(989), 2013. С. 14 – 18.
- Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools us-ing prediction procedures / EUREKA: Physics and engi-neering, Number 4, 2018. p. 14–20. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00667>
- Кроль О.С., Соколов В.І. Тривимірне моделювання металорізальних верстатів та інструментального оснащення. Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016. 160 с.
- Krol O., Sokolov V.: Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. Diagnostyka 21(3), 87-93 (2020). <https://doi.org/10.29354/diag/126026>
- Krol O., Sokolov V.: Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 35-44. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_4
- Krol O., Sokolov V.: Research of toothed belt transmission with arched teeth. Diagnostyka 21(4), 15-22 (2020). <https://doi.org/10.29354/diag/127193>
- Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Stepanova O. (2021). Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE

2021. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_14
21. Соколов В.І., Кроль О.С., Єпіфанова О.В. Дифузійні процеси в системах вентиляції. Сєверодонецьк: СЛУ ім. В. Даля. 2018. 148 с.
 22. Кроль О. С., Сухорутченко И. А. Трехмерное моделирование многооперационного станка модели СВМ1Ф4 в среде компас 3D. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 4. № 7 (70). С. 13–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
 23. Krol O.S., Sokolov V.I. 3D Modeling Of Machine Tools For Designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 140 p. https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018
 24. Krol O, Sokolov V (2019) 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *J Phys Conf Ser* 1278:012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
 25. Krol O, Sokolov V (2019) Parametric modeling of transverse layout for machine tool gearboxes. In: *Advances in manufacturing II. Lecture notes in mechanical engineering, vol 4, pp 122–130*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_11
 26. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
 27. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two support spindles for machining centers with lubrication system // *EUREKA: Physics and Engineering*. – N. 3. – 2018. – P. 52–58. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00648>
 28. Гайдамака А.В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків: навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 275 с.
 29. Дубинець О. Деталі машин. Розрахунок та конструювання. Київ: Талком, 2014. 684 с.
 30. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O.: Gear Transmission with conic Axoid on parallel axes. In: Radionov A.A., Kravchenko O.A., Guzeev V.I., Rozhdestvenskiy Y.V. (eds.) *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. LNME, vol. 2, pp. 1–10. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_1
 31. Tooth clutch. UKRPATENT. Shevchenko S.V., Mukhovaty A.A., Krol O.S. Application number: u 2016 11670, Declared 18.11.2016
 3. Dervoort W.H. *Modern Machine Shop Tools, Their Construction, Operation and Manipulation, Including Both Hand and machine Tools ...* London: Creative Media Partners; 2018. 552 p.
 4. Smith G.T. *CNC machine technology. Design, development and CIM strategies*. Heidelberg: Springer-Verlag; 1993. 140 p.
 5. Krol' O.S. *Metody i procedury 3D-modelirovaniya metallovezhushchih stankov i instrumentov – Severodoneck: izd-vo VNU im. V.Dalya*, 2015. 120 s.
 6. Krol' O.S., Burlakov E.I. *Modelirovanie shpindel'nogo uzla obrabatyvayushchego centra // Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «HPI». Seriya: Novi rishennya v suchasnihih tekhnologiyah*. H: NTU «HPI» №11(985), 2013. S. 33-38.
 7. Afsharizand B., Zhang X., Newman S.T., Nassehi A. Determination of machinability considering degradation of accuracy over machine tool life cycle. *Proceeding of the 47th CIRP conference on manufacturing systems*, 2014. № 17, P. 760-765. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.048>
 8. Kong J., Cheng X. Modal analysis of CNC lathe's spindle based on finite element. *Advances in Engineering Research (AER)*. 2017, Vol. 148, P. 318–321.
 9. Sergienko N., Kalinin P., Pavlenko I., Ochowiak M., Ivanov V., Sergienko A., Pavlova N., Basova Y., Titarenko O., Nazarov A., et al. Synthesis of the Energy-Saving Dry Dual Clutch Control Mechanism. *Appl. Sci.* 2023, 13, 829. <https://doi.org/10.3390/app13020829>
 10. Iñurritegui A., Gonzalez-Perez I., Arana A., Larrañaga J., Ulaci I. Computerized generation and tooth contact analysis of spherical gear couplings for high misalignment applications. *Mechanism and Machine Theory* 164 (2021) 104408. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104408>
 11. American Gear Manufacturers Association, AGMA 945-1-b20: *Splines design and application*, 2020.
 12. Litvin F. *Theory of Gearing*, Tech. rep., University of Illinois at Chicago, 1989.
 13. Litvin F., Fuentes A. *Gear Geometry and Applied Theory*, 2nd Edition, CAMBRIDGE University Press, 2004.
 14. Krol' O.S., Burlakov E.I. *Modelirovanie shpindel'nogo uzla obrabatyvayushchego centra // Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «HPI». Seriya: Novi rishennya v suchasnihih tekhnologiyah*. H: NTU «HPI». №16(989), 2013. S. 14-18.
 15. Krol O., Sokolov V. Rational choice of machining tools us-ing prediction procedures / *EUREKA: Physics and engi-neering*, Number 4, 2018. p. 14–20. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00667>
 16. Krol' O.S., Sokolov V.I. Trivimirne modelyuvannya metalorizal'nih verstativ ta instrumental'nogo

References

1. Lynch M. *Machine center programming, setup and operation*. Trout Valley: CreateSpace Independent Publishing Platform; 2014. 362 p.
2. Kipchars'kij V.P. *Metalorizal'ni verstati: Navchal'nij posibnik*. Mariupol': DVNZ «PDTU», 2018. 143 s.

- osnashchennya. Severodonec'k: SNU im. V. Dalya, 2016. 160 s.
17. Krol O., Sokolov V.: Research of modified gear drive for multioperational machine with increased load capacity. *Diagnostyka* 21(3), 87-93 (2020). <https://doi.org/10.29354/diag/126026>
 18. Krol O., Sokolov V.: Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, vol. 1, pp. 35-44. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_4
 19. Krol O., Sokolov V.: Research of toothed belt transmission with arched teeth. *Diagnostyka* 21(4), 15-22 (2020). <https://doi.org/10.29354/diag/127193>
 20. Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Stepanova O. (2021). Design Calculation of Automatic Rotary Motion Electrohydraulic Drive for Technological Equipment. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_14
 21. Krol' O.S., Sokolov V.I. Trivimirne modelyuvannya metalorizal'nih verstativ ta instrumental'nogo osnashchennya. Severodonec'k: SNU im. V. Dalya, 2016. 160 s.
 22. Krol' O. S., Suhorutchenko I. A. Trekhmernoe modeli-rovanie mnogooperacionnogo stanika modeli SVM1F4 v srede kompas 3D. *Vostochno-Evropejskij zhurnal pere-dovyh tekhnologij*. 2014. T. 4. № 7 (70). S. 13–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26250>
 23. Krol O.S., Sokolov V.I. 3D Modeling Of Machine Tools For Designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academy Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 140 p. https://doi.org/10.7546/3D_momtfd.2018
 24. Krol O, Sokolov V (2019) 3D modelling of angular spindle's head for machining centre. *J Phys Conf Ser* 1278:012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012002>
 25. Krol O, Sokolov V (2019) Parametric modeling of transverse layout for machine tool gearboxes. In: *Advances in manufacturing II. Lecture notes in mechanical engineering*, vol 4, pp 122–130. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_11
 26. Krol O., Sokolov V. Parametric modeling of machine tools for designers. Sofia: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2018. 112 p. <https://doi.org/10.7546/PMMTD.2018>
 27. Krol O., Tsankov P., Sokolov V. Rational choice of two support spindles for machining centers with lubrication system // *EUREKA: Physics and Engineering*. – N. 3. – 2018. – P. 52–58. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00648>
 28. Gajdamaka A.V. *Detali mashyn. Osnovy teorii' ta rozrahunkiv: navchal'nyj posibnyk dlja studentiv mashynobudivnyh special'nostej usih form navchannja*. Harkiv: NTU «HPI», 2020. 275 s.
 29. Dubynec' O. *Detali mashyn. Rozrahunok ta konstruivannja*. Kyi'v: Talkom, 2014. 684 s.
 30. Shevchenko S., Mukhovaty A., Krol O.: Gear Transmission with conic Axoid on parallel axes. In: Radionov A.A., Kravchenko O.A., Guzeev V.I., Rozhdestvenskiy Y.V. (eds.) *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. LNME, vol. 2, pp. 1–10. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-22041-9_1
 31. Tooth clutch. UKRPATENT. Shevchenko S.V., Mukhovaty A.A., Krol O.S. Application number: u 2016 11670, Declared 18.11.2016
- Krol O.S., Tsankov P. Interchangeable spindle heads of machining centers with modernized connecting elements**
- The process of 3D modeling of the drive of the main movement of the machining center with variable forming spindle heads and modified gear couplings is considered. Presented are three-dimensional models of OC forming units intended for various technological operations using methods of drilling, milling, and boring of complex body parts. The effectiveness of the use of new functions: the boundary representation of the B-rep geometry and the three-dimensional operation "Cutting", adapted for the construction of 3D models of the body parts of the drive and spindle heads, is shown. The Kompas Gears mechanical transmission calculation module is used, in which geometric modeling and strength calculations of cylindrical and conical gears and gear couplings are implemented in the process of 3D modeling. It is noted that when applying the three-dimensional operation of construction of tooth crowns by the method of imitation of tooth milling, an increase in the speed of profiling of the working surfaces of the toothed engagement is achieved. The idea of improving the design of gear couplings based on the criterion of minimizing the load capacity, which are used to connect the drive shafts of the machining center with the shafts of the vertical, horizontal and angular spindle heads, is put forward. It is proposed to replace the classic cylindrical profile of the working surface of the tooth with an internal conical engagement of teeth with a circular profile. An analytical calculation of the main geometric characteristics of the modified tooth profile of gear couplings was made. The tooth length ratio for standard and modified designs is introduced as a criterion for assessing the level of bending stresses in the contact zone. The assumption is substantiated that the calculated values of the tooth shape factor for the case of involute engagement differ little when considering the circular profile of the modified coupling within the working height of the turn on the dividing diameter. The impact of the tooth shape factor on the reduction of the contact voltage level was*

noted. An experimental calculation of the complex coefficient of voltage reduction for the modified design of the gear coupling was implemented.

Keywords: *spindle head, 3D modeling, machining center, gear coupling, circular tooth profile*

Кроль Олег Соломонович – к.т.н., доц., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ),

krolos.snu.edu@gmail.com

Цанков Петко – PhD, assoc. prof., Faculty of Technics and Technology, *Trakian University*, 38 Graf Ignatiev st., Yambol, Bulgaria, ptsankov@abv.bg

Стаття подана 01.03.2024.