

КЛОЧКО О.О., ЗАКОВОРОТНИЙ О.Ю., НАБОКА О.В., ГЛАВЧЕВА Ю.М., ЄВСЮКОВА Ф.М.

СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ТА АДИТИВНІ АМ-ТЕХНОЛОГІЇ

У статті сформувано завдання до розробки технології виготовлення та контролю зубчастих коліс в сучасних умовах виробництва. Для чого було досліджено види зубчастих передач та їх особливості. Приведено дослідження впливу параметрів точності зубчастих коліс на технологічний процес. Для цього детально проаналізовано ступені точності та модулі зубчастих коліс. Надані рекомендації що до технологічного забезпечення при виготовленні зубчастих коліс. АМ-технології сьогодні найбільш динамічно розвиваюча галузь матеріального виробництва, яка дає можливість отримувати нові властивості виробів, економити час та матеріали при їх виготовленні. Ступінь впровадження цих технологій як надійний індикатор реальної індустріальної потужності держави. Характерною тенденцією останніх років є постійний ріст асортименту та кількості деталей, що виготовляються за адитивними технологіями. І особливо важливим є прогрес у найбільш важкому та інноваційному секторі АМ-технологій – «виросуванні» виробів із металу.

Ключові слова: точність, технологічний процес, зубчаста передача, с колесо, модуль, ступінь точності, АМ-технології

KLOCHKO O.O., ZAKOVOROTNY O.YU., NABOKA O.V., GLAVSCHEVA YU.M., YEVSYUKOVA F.M. A MODERN APPROACH TO THE TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THE MANUFACTURE OF GEAR WHEELS AND ADDITIVE AM-TECHNOLOGIES

In the article, the task of developing a technology for the manufacture and control of gear wheels in modern production conditions is formulated. What were the types of gears and their features studied for? The study of the influence of the parameters of the accuracy of gear wheels on the technological process is given. For this, the degrees of accuracy and modules of gear wheels were analyzed in detail. Recommendations for technological support in the manufacture of gear wheels are provided. Today, AM technology is the most dynamically developing branch of material production, which makes it possible to obtain new properties of products, save time and materials during their manufacture. The degree of implementation of these technologies as a reliable indicator of the real industrial capacity of the state. A characteristic trend of recent years is the constant growth of the range and number of parts manufactured using additive technologies. And especially important is the progress in the most difficult and innovative sector of AM technologies - the "growing" of metal products.

Keywords: accuracy, technological process, gear transmission, c wheel, module, degree of accuracy, AM technologies

Вступ. Зубчасті передачі є невід'ємною та надважливою складовою сучасного машинобудування, оскільки забезпечують передачу крутного моменту і руху між різними частинами машин та механізмів. ЗП використовуються у широкому спектрі застосувань, від автомобільної та аерокосмічної промисловості до важкої техніки, гірничодобувної промисловості та енергетики.

В Україні зберігається значний потенціал для розвитку виробництва зубчастих коліс завдяки наявності потужної металургійної бази та великому досвіду в машинобудуванні. Вітчизняні виробники виробляють фактично всі типи даних виробів, та є одними з небагатьох підприємств Європи та світу, хто може забезпечити виробництво крупномодульних зубчатих коліс з зовнішніми діаметрами до 12 метрів.

Аналіз літератури. Точність та якість зубчастих передач (ЗП) та їх складових елементів – зубчастих коліс (ЗК) – основні вимоги для правильного та довговічного функціонування останні. Оброблення ЗК є одним з найскладніших видів технологічних процесів механічної обробки, який вимагає використання спеціалізованого обладнання і верстатів та, відповідно, дорогого спеціального оброблювального інструменту [1, 8, 11, 12, 16, 18]. Таким чином завданням розробки технології виготовлення зубчастих коліс є: вибір оптимальних методів обробки та відповідного технологічного обладнання і інструментів, що забезпечать економію матеріалу; якість, продуктивність і стабільність процесу, знизять собівартість і трудомісткість.

Для вирішення цього завдання розглянемо види зубчастих з'єднань (рис.1) Розрізняють зубчасті передачі зовнішнього і внутрішнього зчеплення. Зубчасті циліндричні передачі зовнішнього зачеплення мають спряжені колесо і шестерню зовнішнього зачеплення, що обертаються в протилежних напрямках.

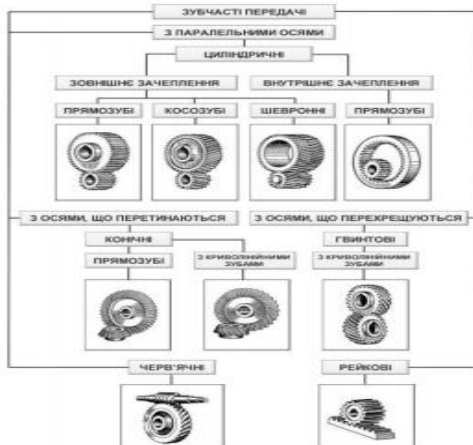


Рис. 1 – Класифікація зубчастих передач

© О.О. Ключко, О.Ю. Заковоротний, О.В. Набока, Ю.М. Главчева., Ф.М. Євсюкова, 2024

Зубчасті передачі внутрішнього зачеплення мають одне колесо внутрішнього зачеплення і одну шестерню зовнішнього зачеплення, що обертаються в одному напрямку.

Важко навантажені передачі працюють при незначній частоті обертання коліс, в той же час передають значні крутні моменти, а на зуби діють великі питомі навантаження. Для таких передач (наприклад редукторів) важливо забезпечити мінімальну деформацію зубів, виключити поломку і викришування поверхневого шару зубів. Відповідно ці передачі умовно можна класифікувати як дуже тихохідні (з коловою швидкістю до 0,5 м/с і тихохідні, колова швидкість яких коливається в межах 0,5 - 3 м/с). Швидкісні передачі в основному призначені для передачі крутного моменту. Швидкісні передачі можна умовно розділити на середньошвидкісні ($V = 3 - 15$ м/с), швидкісні ($V = 15 - 40$ м/с) і високошвидкісні ($V = 40 - 100$ м/с і більше). Вимоги до рівня шуму, а отже, і до якості виготовлення у таких коліс підвищені. Точність зубчастих коліс, розміри і модуль зубчастих коліс істотно впливають на технологічний процес оброблення, рівень шуму в передачі, плавність і довговічність її роботи [2, 3, 4, 5, 6, 8]. До основних показників точності зубчастих коліс можна віднести такі.

Методи дослідження. У відповідності до стандарту ГОСТ 1643-81 встановлено дванадцять ступенів точності зубчастих коліс і передач, які позначаються в порядку спадання точності цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 і 12. Для ступенів точності 1 і 2 допуски і граничні відхилення не наводяться, так як ці ступені передбачені для подальшого розвитку. Для кожного ступеня точності зубчастих коліс і передач встановлюються норми кінематичної точності, плавності роботи і контакту зубів зубчастих коліс в передачі. Допускається комбінування норм кінематичної точності, норм плавності.

Нормований стандартами модуль лежить у межах $m = 1...55$ мм, але в багатьох випадках він може досягати і значно менших і більших значень. Діаметр зовнішнього кола може досягати 6300 мм і більше, до 12000 мм (як наводилось раніше). Перший і другий ступінь точності є найбільш точними та перспективними і не використовуються в даний час. Одинадцятий та дванадцятий ступінь точності використовуються у невідповідних передачах відкритих вантажних механізмів. Найбільш широко у машинобудуванні використовуються колеса з 5 по 9 ступень точності залежно від галузі застосування виробу.

Термін «модуль зубчастого колеса» визначає основний розмір зуба зубчастого колеса, який дозволяє характеризувати його геометрію і взаємодію з іншими зубчастими колесами в передачі.

Класифікація зубчастих коліс за модулями є важливою характеристикою їх призначення, конструкції та застосування. Основними параметрами для класифікації є розмір модуля, які визначають розміри зубів коліс. Нижче наведено основні категорії класифікації зубчастих коліс за модулями (хоча дане розбиття носить доволі умовний характер):

- **Мілкий модуль:**

Мілкомодульні зубчасті колеса зазвичай мають модулі в межах від 0.1 до 1.0 мм (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 і 0.9). Ці колеса використовуються в техніці, де вимоги до точності і компактності надзвичайно високі. Застосовуються в механізмах, де потрібно забезпечити надмалий розмір, високу точність і легкість конструкції. Наприклад, у приладобудуванні, обладнанні оборонного призначення, побутовій техніці, годинниках, дрібних механізмах та інших точних пристроях. Процес виготовлення мілкомодульних зубчастих коліс може вимагати високоточних технологій, таких як електроерозійна обробка або обробка на верстатах з ЧПК, для досягнення необхідної точності зубів. Такі зубчасті колеса дозволяють досягати високої щільності передачі руху в обмеженому просторі, що особливо важливо в багатьох сучасних технологіях. Цікаво, що контроль точності та якості для даного типу ЗК також дуже складний і делікатний відрізняється від ЗК з середнім модулем. Основними видами контролю точності розмірів таких виробів є оптичний метод (мікроскопи, проектори, мультисенсорні координатно-вимірювальні машини (КВМ), високоточне сканування та інспекція розмірів по САД-моделі лазерними та оптичними сканерами зі структурним світлом).

- Невеликий модуль (модуль 1,0 ... 2,0 мм)
- Середній модуль (модуль 2,0 ... 5,0 мм)
- Великий (крупний) модуль (модуль 5.0 і більше):

Крупномодульні ЗК використовуються у важкій техніці, верстатобудуванні, металургії, енергетичному секторі, гірничодобувній промисловості, а також у важких машинах, таких як екскаватори, крупні крани тощо. Зубчасті колеса з великими модулями виготовляються з високоякісних сталей і чавунів, часто проходять термічну обробку, що підвищує їхню міцність і зносостійкість. По оцінці національних виробників крупномодульними ЗК є колеса з модулями від 10...16 мм та відповідними великими зовнішніми діаметрами. В Україні успішно виготовляють зубчасті колеса з модулями 16, 22, 25, 32 мм та зовнішніми діаметрами до 12 000 мм. Унікальними проектами були виготовлення ЗК з модулями 65 та навіть 72 мм, для яких застосовувались відмінні від традиційних методів обробки та відповідного контролю точності та якості (рис. 2) [7, 9, 10, 11, 15, 17]



Рис. 2 – Вимірювання крупномодульного зубчастого колеса на координатно-вимірювальній машині зі спеціальним модулем

Деякі зубчасті колеса можуть мати нестандартні або спеціальні модулі, які розробляються відповідно до конкретних вимог замовників або для специфічних застосувань.

Вплив модуля на виготовлення зубчастих коліс:

Замовники та виробники зубчастих коліс повинні враховувати модуль при проектуванні механізмів, адже він впливає на розмір, навантажувальну здатність і експлуатаційні характеристики зубчастих коліс.

4. Результати дослідження. Вибір модуля визначає методи технології обробки формоутворення зубів, які можуть бути застосовані, а також типи матеріалів, що використовуються для виготовлення зубчастих коліс.

При виборі технологічного забезпечення для виготовлення крупномодульних зубчастих коліс необхідно охоплювати всі аспекти, пов'язані з процесом їх виробництва, включаючи проектування, вибір матеріалу, технології обробки, контроль якості та оптимізацію виробничих процесів (рис. 3).



Рис. 3 – Цикл виготовлення зубчатого колеса

Сформулюємо ключові елементи, які можна віднести до **технологічного забезпечення**:

Вибір матеріалів: Використання відповідних матеріалів (вуглецеві та леговані сталі, чавуни, композити) для забезпечення необхідної зносостійкості, міцності та довговічності зубчастих коліс.

Проектування та конструювання: Розробка CAD-моделей зубчастих коліс з урахуванням навантаження, розміру, модуля та геометрії зубів, що забезпечує оптимальні параметри для виготовлення. Проектування технологічної оснастки для оптимального розташування заготовки на верстаті, її якісної та безпечної загрузки-вигрузки. Використання CAD-CAM систем для об'єктоорієнтованого програмування та написання керуючих програм для ЧПК.

Технології виготовлення заготовок: Вибір методів отримання заготовок (лиття, кування, штампування, прокатування) відповідно до вимог якості, характеристик кінцевого продукту, мінімізації машинного часу обробки, кількості відходів та енергозбереження.

Механічна обробка: Застосування відповідних методів технологій нарізання зубів та обробки коліс, вибір технологічного обладнання і інструменту.

Фінішна обробка: Проведення операцій шліфування, притирки або обкатування, щоб досягти необхідних допусків і покращити поверхневу якість зубів.

Технологічний і метрологічний контроль точності і якості: Впровадження сучасних методів контролю і відповідного обладнання для перевірки загальної точності геометрії, форм і профілів зубів, а також визначення механічних властивостей матеріалів (таких як стаціонарні і портативні координатно-вимірювальні машини, контурографи, твердоміри, профілометри-профілографи, засоби неруйнівного контролю тощо).

Автоматизація та покращення процесів обробки:

Використання засобів автоматизації для підвищення точності і зменшення витрат на виробництво, а також автоматизованих станочних систем технологічного контролю для оперативного моніторингу і коригування

параметрів обробки і ріжучого інструменту (шпиндельні датчики прив'язки заготовки на технологічну операцію та міжопераційного контролю, датчики наладки і контролю зносу інструменту, датчики контролю температури заготовки тощо).

Стала доступною велика кількість конкуруючих технологій виготовлення зубчастих коліс, що дозволяють зробити 3D-модель. Основні відмінності 3D-моделей виготовлення зубчастих коліс стосуються етапу побудови шарів при створенні деталі. Деякі технології використовують плавлення або розм'якшення матеріалу для виробництва шарів (SLS, FDM), інші — використовують рідкі матеріали, які твердіють за різними принципами.

Загальна характеристика

Аддитивні технології (АМ-технології) виготовлення зубчастих коліс можна розрізнити за:

- методом фіксації шару: фотополімеризація, сплавлення, склеювання;
- типом конструктивних матеріалів: рідкі, сипучі, ниткоподібні чи пруткові, листові або плівкові;
- ключовою технологією: лазерні, нелазерні.

За класифікацією стандарту ASTM F2792/1549323-1 адитивні технології в т.ч. виготовлення зубчастих коліс поділені на 7 категорій [8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18].

1. MaterialExtrusion – видавлювання матеріалів або пошарове нанесення розплавленого конструкційного матеріалу через екструдер.
2. MaterialJetting – розбризкування або пошарове струменеве нанесення конструкційного матеріалу.
3. BinderJetting – розбризкування або пошарове струменеве нанесення зв'язуючого матеріалу.
4. SheetLamination – з'єднання листових матеріалів або пошарове формування виробу з листових конструкційних матеріалів.
5. VatPhotopolymerization – фотополімеризація у ванні або пошарове затвердження фотополімерних смол.
6. PowderBedFusion – розплавлення матеріалу в попередньо сформованому шарі або послідовне формування шарів порошкових конструкційних матеріалів і вибіркоче (селективне) спікання частин конструкційного матеріалу.
7. Directedenergydeposition – прямий підвід енергії безпосередньо в місце конструювання або пошарове формування виробу методом внесення конструктивного матеріалу безпосередньо в місце підведення енергії.

АМ-технології сьогодні найбільш динамічно розвиваюча галузь матеріального виробництва, яка дає можливість отримувати нові властивості виробів, економити час та матеріали при їх виготовленні. Західні аналітики розглядають ступінь впровадження цих технологій як надійний індикатор реальної індустріальної потужності держави.

Характерною тенденцією останніх років є постійний ріст асортименту та кількості деталей, що виготовляються за адитивними технологіями. І особливо важливим є прогрес у найбільш важкому та інноваційному секторі АМ-технологій – «виросуванні» виробів із металу. Наприклад, компанія «Боїнг» десятками тисяч виготовляє сотні найменувань деталей для військових та комерційних літаків, а Дженерал Електрик планує протягом 5...10 років наростити обсяги виробництва АМ-технологіями та досягнути виготовлення приблизно половини деталей енергетичних турбін та авіадвигунів цими методами.

Перехід на цифровий опис виробу – CAD і використання АМ-технології здійснив кардинальні зміни в ливарному виробництві. Отримання ливарних синтез-форм та синтез-моделей шляхом пошарового нарощування радикально скоротило термін створення першого дослідного зразка деталі. Наприклад, термін створення блоку циліндрів автомобільного двигуна традиційними методами становить близько 6 місяців. Основний час витрачається на створення модельного оснащення. Використання АМ-технології для «виросування» ливарної моделі скорочує термін отримання першої відливки блоку циліндрів до двох тижнів. Тобто в 10...15 разів.

Окрім суттєвого скорочення часу, перевагами методу є раціональне використання матеріалів. При виготовленні деталей складної форми традиційними методами відношення маси використаного матеріалу до готового виробу може сягати 15...20 разів. Застосування адитивних технологій для виготовлення аналогічних деталей дозволяє звести цей показник до 1,5...2,0.

Машини, які за адитивними технологіями створюють виготовлення зубчастих коліс з металу – верх інженерного мистецтва, адже в них сконцентровано найпередовіші знання з металургії, лазерної техніки, оптики, електроніки, систем управління, вимірювальних пристроїв, механіки, вакуумної техніки та інших.

Використання адитивних технологій дозволяє втілити в життя найвибагливіші ідеї конструктора, створити якісно нові машини та досягнути суттєвого прогресу в машинобудуванні.

Області використання

Технології в конструюванні і прототипуванні

- Для швидкого прототипування, тобто швидкого виготовлення прототипів моделей і об'єктів для подальшого доведення. Вже на етапі проектування можна кардинальним чином змінити конструкцію вузла або об'єкта в цілому. У інженерії такий підхід здатний істотно знизити витрати у виробництві і освоєнні нової продукції.

Технології у промисловому виробництві

- Для швидкого виробництва — виготовлення зубчастих коліс з матеріалів, які підтримуються

3D-принтерами. Це відмінне рішення для малосерійного виробництва.

Моделювання виготовлення зубчастих коліс плавленням

Fused Deposition Modeling — FDM. Основною частиною принтера, що з'явився на ринку в 1991 р., є екструдована голівка. У ній матеріал (ливарний віск або пластик, що надходить з котушок) нагрівається до температури плавлення і подається в зону друку. Голівка переміщається по двох координатах, синтезуючи певний шар моделі. Потім платформа опускається, створюється новий шар і т. д. Переваги технології: легкість перебудови з одного нетоксичного матеріалу на інший, низькі витрати і досить висока продуктивність, малі температури переробки, а також мінімальне втручання оператора у функціонування обладнання, можливість створення кольорових моделей, відносно точний процес. Недоліки: між шарами утворюються шви; голівка екструдера повинна постійно рухатися, інакше матеріал застигне і засмітить її; можливе розшарування у разі температурних коливань протягом циклу обробки; груба вихідна поверхня. Орієнтовна вартість FDM-принтера розпочинається від 500 доларів США, в окремих випадках власники принтерів можуть виготовити їх що знизить їх вартість до 200 доларів США.

Друк FDM підходить для наступних видів пластику:

- ABS-пластик (похідна нафти, термопластична смола);
- PLA-пластик (полілактид (полімолочна кислота, PLA), виробляється із зерна);
- HIPS-пластик (удароміцний полістирол);
- PC-пластик (матеріал наповнений вуглецевим волокном, твердий полімер, здатний пропускати світло);
- Laywoo-D3 (полімер);
- Laybrick (імітує текстуру пісчанику);
- PVA: PVAc и PVAI (добре поглинають вологу, можуть розчинятися у воді, використовуються для покращення друку основним пластиком);
- нейлон (легкий та гнучкий пластик).

Етапи друку із застосуванням технології FDM:

1. Моделювання виробу, додавання необхідних текстур.
2. Друк плавним пластиком шляхом екструзії (видавлювання).
3. Постобробка: за допомогою ацетону поверхня виробу робиться гладкою також відділення зайвих елементів таких як підтримки чи кайма.

Попшарове формування об'ємних моделей виготовлення зубчастих коліс з листового матеріалу

Laminated Object Manufacturing — LOM. LOM-технологія була винайдена Михайлом Фейгеном у 1985 р., а сьогодні на її основі виробляють промислові установки такі фірми, як Helisys, Paradigm і Sparx AB. Листовий матеріал (папір, пластик, кераміка, композити або поліестер) розкрояється за заданому контуру за допомогою лазера (можна одночасно розкроявати більше одного аркуша, проте точність при цьому зменшується), а потім нагрівається валик, який здійснює склеювання шарів. При помилці в процесі синтезу об'ємного виробу частину шарів можна видалити.

Переваги технології: LOM-установки, орієнтовна вартість яких коливається в межах 90-250 тис. доларів США, дозволяють застосовувати широкий діапазон недорогих листових матеріалів і синтезувати моделі з мінімальними деформаціями завдяки відсутності фізико-хімічних перетворень. Недоліки: через те, що лазер не завжди повністю прорізає лист, ускладнюється видалення відходів і навіть не виключено пошкодження деталей, а властивості матеріалу можуть змінюватися. Жорстку поверхню виробу важко обробляти через можливість розшарування, а в робочому приміщенні необхідна вентиляція.

Струменева полімеризація

Polyjet and Ployjet Matrix. Процес друку виготовлення зубчастих коліс полягає в наступному. На площину побудови згідно з програмним алгоритмом наноситься рідкий фотополімер блоком друкуючих головок. Блок складається з 8 головок — це 768 сопел малого діаметра, що здатні продукувати близько 16 млн. крапель на хвилину. На друкуючій голівці розміщені дві ультрафіолетові (УФ) лампи, які замінюють лазер в SLA-установках. Після нанесення фотополімеру полімеризується під дію УФ світла. Цим завершується побудова одного шару. Далі площину побудови зміщують на дуже малий рівень і головки створюють наступний шар.

У наш час існують дві платформи обладнання: Іден (англ. Eden) та Коннекс (англ. Connex). Іден підтримує технологію побудови моделей PolyJet, Коннекс — технологію PolyJet Matrix.

Переваги технології: мала товщина шару в 16 мікрон задовольняє навіть ювелірів, які мають підвищені вимоги до деталізації моделей. Як наслідок малої товщини — криволінійність поверхонь. Гладкість висока, роздільна здатність друку 600 x 600 крапок на двоім. Точність виготовлення моделей до 0,1 мм. Можливість виготовляти вертикальні перегородки з товщиною до 0,4 мм. Хоча виробником заявляються 0,6 мм. Дуже висока швидкість виготовлення моделей. Недоліки: менш міцний матеріал.

Топ компанії і їхні технології

- 3D Systems - Stereolithography and Selective Laser Sintering
- HP - Multi Jet Fusion
- Objet Geometries - Polyjet & Ployjet matrix
- Stratasys - Fused Deposition Modeling

Самовідтворення [RepRap](#) Mendel 2.0 (Рис. 4):



Рис. 4 – [RepRap](#) Mendel 2.0

До недавнього часу були науковою фантастикою 3D-принтери, які можуть відтворювати деталі власної конструкції, тобто реплікувати самі себе. Сьогодні це цілком здійснено, і розробка такої машини ведеться проектом [RepRap](#), причому інформація про її конструкції поширюється за умовами ліцензії [GNU General Public License](#).

Проект першого в історії недорогого тривимірного принтера-RepRap, що реплікується (тобто здатний відтворити принаймні частину самого себе), активно реалізується в наші дні англійськими конструкторами університету Бата. «Найголовніша особливість RepRap полягає в тому, що з самого початку він був задуманий як система, що реплікується: принтер, який сам себе роздруковує» (Адріан Бовер, один із співробітників проекту RepRap).

Висновки. В роботі сформульовано та проаналізовано ключові елементи технологічного забезпечення з урахуванням сучасних вимог виробництва і за рахунок використання адитивних технологій виготовлення зубчастих коліс. Доведено, що специфіка виготовлення крупних зубчастих коліс пов'язана з правильним вибором верстатів та спеціалізованого інструменту. На сьогоднішній момент стратегія полягає у тому, щоб отримати необхідну точність та якість виготовлення уже після лезвійної обробки. Це може бути досягнуто за рахунок застосування сучасних верстатів від виробників, що спеціалізуються саме на виготовленні обладнання для зубообробки. АМ-технології сьогодні найбільш динамічно розвиваюча галузь матеріального виробництва, яка дає можливість отримувати нові властивості виробів, економити час та матеріали при їх виготовленні. Західні аналітики розглядають ступінь впровадження цих технологій як надійний індикатор реальної індустріальної потужності держави.

Характерною тенденцією останніх років є постійний ріст асортименту та кількості деталей, що виготовляються за адитивними технологіями. І особливо важливим є прогрес у найбільш важкому та інноваційному секторі АМ-технологій – «виросуванні» виробів із металу. Наприклад, компанія «Боїнг» десятками тисяч виготовляє сотні найменувань деталей для військових та комерційних літаків, а Дженерал Електрик планує протягом 5...10 років наростити обсяги виробництва АМ-технологіями та досягнути виготовлення приблизно половини деталей енергетичних турбін та авіадвигунів цими методами.

Перехід на цифровий опис виробу – CAD і використання АМ-технології здійснив кардинальні зміни в ливарному виробництві. Отримання ливарних синтез-форм та синтез-моделей шляхом пошарового нарощування радикально скоротило термін створення першого дослідного зразка деталі. Наприклад, термін створення блоку циліндрів автомобільного двигуна традиційними методами становить близько 6 місяців. Основний час витрачається на створення модельного оснащення.

Список використаних джерел

1. Гасанов М.І., Заковортний О.Ю., Клочко О.О., Рябченко С.В. Перспектива дослідження процесу швидкісного абразивного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – С. 24–25.
2. Марченко А.П., Гасанов М.І., Кривобок Р.В., Клочко О.О., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Мироненко С.В., Шаповалов М.В. Моделювання послідовності формування поверхневого шару циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс з регламентованими вихідними параметрами // Нові та нетрадиційні технології в ресурсі - та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. – С. 213–216.

3. Klochko A., Basova Y., Gasanov M., Zakovorotny A., Fedorenko V., Myronenko O., Vorontsov B., Ryazantsev A., Protasov R. // Scientific Basis for the Substantiation of Process Regulations for the Micro-Cutting of Hardened Gears / Alexander Klochko, Yevheniia Basova, Magomediemin Gasanov, Alexander Zakovorotny, Vitaly Fedorenko, Oleh Myronenko, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev, Roman Protasov // Journal of Mechanical Engineering - Strojnický casopis. - 2023. - Volume 73.- No. 2. – P. 83 – 92. ISSN: 2450-5471 DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0023>.

4. Майборода В.С., Охрименко О.О., Ключко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Федоренко В.С., Сапон С.П., Манохін А.С., Шаповалов М.В. Процес моделювання контактної взаємодії при швидкісному зубофрезуванні великомодульних зубчастих коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції 20 – 22 червня 2023 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2023. – С. 83–85. ISBN 978-617-7889-45-7.

5. Tripathi, Swikriti; Mandal, Subham Shekhar; Bauri, Sudepta; Maiti, Pralay (2023-02). 3D bioprinting and its innovative approach for biomedical applications. *MedComm* (англ.) **4** (1). ISSN 2688-2663. PMC PMC9790048. PMID 36582305. doi:10.1002/mco2.194. Прочитовано 9 червня 2023.

6. Wang, Zhenzhen; Yang, Yan (13 січня 2021). Application of 3D Printing in Implantable Medical Devices. *BioMed Research International* (англ.) **2021**. с. e6653967. ISSN 2314-6133. PMC PMC7817310. PMID 33521128. doi:10.1155/2021/6653967. Прочитовано 9 червня 2023.

7. Fidanza, Andrea; Perinetti, Tullio; Logroscino, Giandomenico; Saracco, Michela (2022-01). 3D Printing Applications in Orthopaedic Surgery: Clinical Experience and Opportunities. *Applied Sciences* (англ.) **12** (7). с. 3245. ISSN 2076-3417. doi:10.3390/app12073245. Прочитовано 9 червня 2023.

8. Rezaie, Fereshte; Farshbaf, Masoud; Dahri, Mohammad; Masjedi, Moein; Maleki, Reza; Amini, Fatemeh; Wirth, Jonathan; Moharamzadeh, Keyvan та ін. (2023-02). 3D Printing of Dental Prostheses: Current and Emerging Applications. *Journal of Composites Science* (англ.) **7** (2). с. 80. ISSN 2504-477X. doi:10.3390/jcs7020080. Прочитовано 9 червня 2023. {{cite news}}: рекомендується |displayauthors= (довідка)

9. Anadioti, Eva; Musharbash, Leen; Blatz, Markus B.; Papavasiliou, George; Kamposiora, Phophi (27 листопада 2020). 3D printed complete removable dental prostheses: a narrative review. *BMC Oral Health* **20** (1). с. 343. ISSN 1472-6831. PMC PMC7694312. PMID 33246466. doi:10.1186/s12903-020-01328-8. Прочитовано 9 червня 2023.

10. Harding, A.; Pramanik, A.; Basak, A. K.; Prakash, C.; Shankar, S. (1 травня 2023). Application of additive manufacturing in the biomedical field- A review. *Annals of 3D Printed Medicine* (англ.) **10**. с. 100110. ISSN 2666-9641. doi:10.1016/j.stlm.2023.100110. Прочитовано 9 червня 2023.

11. Persaud, Alicia; Maus, Alexander; Strait, Lia; Zhu, Donghui (1 вересня 2022). 3D Bioprinting with Live Cells. *Engineered Regeneration* (англ.) **3** (3). с. 292–309. ISSN 2666-1381. doi:10.1016/j.engreg.2022.07.002. Прочитовано 9 червня 2023.

12. Injectable Hydrogels for 3D Bioprinting (англ.). The Royal Society of Chemistry. 23 липня 2021. ISBN 978-1-78801-883-8. doi:10.1039/9781839163975.

13. Khoshnood, Negin; Zamanian, Ali (1 вересня 2020). A comprehensive review on scaffold-free bioinks for bioprinting. *Bioprinting* (англ.) **19**. с. e00088. ISSN 2405-8866. doi:10.1016/j.bprint.2020.e00088. Прочитовано 9 червня 2023.

14. Pagan, Erik; Stefanek, Evan; Seyfoori, Amir; Razzaghi, Mahmood; Chehri, Behnad; Mousavi, Ali; Arnaldi, Pietro; Ajji, Zineb та ін. (1 липня 2023). A handheld bioprinter for multi-material printing of complex constructs. *Biofabrication* **15** (3). с. 035012. ISSN 1758-5082. doi:10.1088/1758-5090/acc42c. Прочитовано 13 червня 2023. {{cite news}}: рекомендується |displayauthors= (довідка)

15. Segaran, Nicole; Saini, Gia; Mayer, Joseph L.; Naidu, Sailen; Patel, Indravadan; Alzubaidi, Sadeer; Oklu, Rahmi (2021-01). Application of 3D Printing in Preoperative Planning. *Journal of Clinical Medicine* (англ.) **10** (5). с. 917. ISSN 2077-0383. PMC PMC7956651. PMID 33652844. doi:10.3390/jcm10050917. Прочитовано 9 червня 2023.

16. Jin, Zhongboyu; Li, Yuanrong; Yu, Kang; Liu, Linxiang; Fu, Jianzhong; Yao, Xinhua; Zhang, Aiguo; He, Yong (2021-09). 3D Printing of Physical Organ Models: Recent Developments and Challenges. *Advanced Science* (англ.) **8** (17). с. 2101394. ISSN 2198-3844. PMC PMC8425903. PMID 34240580. doi:10.1002/advs.202101394. Прочитовано 9 червня 2023.

17. ISO 1328-1:2013. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification. Вилучено з: <https://www.iso.org/ru/standard/45309.html>

18. ISO 1328-2:2020. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification. Вилучено з: <https://www.iso.org/ru/standard/70386.html> 4.ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Вилучено з: https://dnaop.com/html/68684/doc-%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_1643-81

References (transliterated):

1. Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Klochko O.O., Riabchenko S.V. Perspektyva doslidzhennia protsesu shvydkisnoho abrazyvnoho zubofrezuvannia tsylindrychnykh zubchastykh kolis // Suchasni pytannia

- vyrobnystva ta remontu v promyslovosti i na transporti: Materialy Mizhnarodnoho naukovo-tekhnicnoho seminaru, 26–27 bereznia 2024 r. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2024. – S. 24–25.
2. Marchenko A.P., Hasanov M.I., Kryvobok R.V., Klochko O.O., Kovalov V.D., Vasylichenko Ya.V., Myronenko Ye.V., Shapovalov M.V. Modeliuvannia poslidovnosti formuvannia poverkhnevoho sharu tsylindrychnykh zahartovanykh krupnomodulnykh zubchastykh kolis z rehlamentovanymy vykhidnymy parametramy // Novi ta netradytsiini tekhnologii v resurso - ta enerhozberezhenni: Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnicnoi konferentsii, 6-7 hrudnia 2023 r., m. Odesa. – Odesa: 2023. – S. 213–216.
 3. Klochko A., Basova Y., Gasanov M., Zakovorotny A., Fedorenko V., Myronenko O., Vorontsov B., Ryazantsev A., Protasov R. // Scientific Basis for the Substantiation of Process Regulations for the Micro-Cutting of Hardened Gears / Alexander Klochko, Yevheniia Basova, Magomediemin Gasanov, Alexander Zakovorotny, Vitaly Fedorenko, Oleh Myronenko, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev, Roman Protasov // Journal of Mechanical Engineering - Strojnický casopis. - 2023. - Volume 73.- No. 2. – P. 83 – 92. ISSN: 2450-5471 DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0023>.
 4. Maiboroda V.S., Okhrymenko O.O., Klochko O.O., Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Fedorenko V.S., Sapon S.P., Manokhin A.S., Shapovalov M.V. Protse modeliuvannia kontaktnoi vzaiemodii pry shvydkisnomu zubofrezuvanni velykomodulnykh zubchastykh kolis // Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy XXI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnicnoi konferentsii 20 – 22 chervnia 2023 roku / za zah. red. V. D. Kovalova. – Kramatorsk-Ternopil: DDMA, 2023. – S. 83–85. ISBN 978-617-7889-45-7.
 5. Tripathi, Swikriti; Mandal, Subham Shekhar; Bauri, Sudepta; Maiti, Pralay (2023-02). 3D bioprinting and its innovative approach for biomedical applications. MedComm (anhl.) 4 (1). ISSN 2688-2663. PMC PMC9790048. PMID 36582305. doi:10.1002/mco2.194. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 6. Wang, Zhenzhen; Yang, Yan (13 sichnia 2021). Application of 3D Printing in Implantable Medical Devices. BioMed Research International (anhl.) 2021. s. e6653967. ISSN 2314-6133. PMC PMC7817310. PMID 33521128. doi:10.1155/2021/6653967. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 7. Fidanza, Andrea; Perinetti, Tullio; Logroscino, Giandomenico; Saracco, Michela (2022-01). 3D Printing Applications in Orthopaedic Surgery: Clinical Experience and Opportunities. Applied Sciences (anhl.) 12 (7). s. 3245. ISSN 2076-3417. doi:10.3390/app12073245. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 8. Rezaie, Fereshte; Farshbaf, Masoud; Dahri, Mohammad; Masjedi, Moein; Maleki, Reza; Amini, Fatemeh; Wirth, Jonathan; Moharamzadeh, Keyvan ta in. (2023-02). 3D Printing of Dental Prostheses: Current and Emerging Applications. Journal of Composites Science (anhl.) 7 (2). s. 80. ISSN 2504-477X. doi:10.3390/jcs7020080. Protsytovano 9 chervnia 2023. {{cite news}}: rekomenduietsia |displayauthors= (dovidka)
 9. Anadioti, Eva; Musharbash, Leen; Blatz, Markus B.; Papavasiliou, George; Kamposiora, Phophi (27 lystopada 2020). 3D printed complete removable dental prostheses: a narrative review. BMC Oral Health 20 (1). s. 343. ISSN 1472-6831. PMC PMC7694312. PMID 33246466. doi:10.1186/s12903-020-01328-8. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 10. Harding, A.; Pramanik, A.; Basak, A. K.; Prakash, C.; Shankar, S. (1 travnia 2023). Application of additive manufacturing in the biomedical field- A review. Annals of 3D Printed Medicine (anhl.) 10. s. 100110. ISSN 2666-9641. doi:10.1016/j.stlm.2023.100110. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 11. Persaud, Alicia; Maus, Alexander; Strait, Lia; Zhu, Donghui (1 veresnia 2022). 3D Bioprinting with Live Cells. Engineered Regeneration (anhl.) 3 (3). s. 292–309. ISSN 2666-1381. doi:10.1016/j.engreg.2022.07.002. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 12. Injectable Hydrogels for 3D Bioprinting (anhl.). The Royal Society of Chemistry. 23 lypnia 2021. ISBN 978-1-78801-883-8. doi:10.1039/9781839163975.
 13. Khoshnood, Negin; Zamanian, Ali (1 veresnia 2020). A comprehensive review on scaffold-free bioinks for bioprinting. Bioprinting (anhl.) 19. s. e00088. ISSN 2405-8866. doi:10.1016/j.bprint.2020.e00088. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 14. Pagan, Erik; Stefanek, Evan; Seyfoori, Amir; Razzaghi, Mahmood; Chehri, Behnad; Mousavi, Ali; Arnaldi, Pietro; Ajji, Zineb ta in. (1 lypnia 2023). A handheld bioprinter for multi-material printing of complex constructs. Biofabrication 15 (3). s. 035012. ISSN 1758-5082. doi:10.1088/1758-5090/acc42c. Protsytovano 13 chervnia 2023. {{cite news}}: rekomenduietsia |displayauthors= (dovidka)
 15. Segaran, Nicole; Saini, Gia; Mayer, Joseph L.; Naidu, Sailen; Patel, Indravadan; Alzubaidi, Sadeer; Oklu, Rahmi (2021-01). Application of 3D Printing in Preoperative Planning. Journal of Clinical Medicine (anhl.) 10 (5). s. 917. ISSN 2077-0383. PMC PMC7956651. PMID 33652844. doi:10.3390/jcm10050917. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 16. Jin, Zhongboyu; Li, Yuanrong; Yu, Kang; Liu, Linxiang; Fu, Jianzhong; Yao, Xinhua; Zhang, Aiguo; He, Yong (2021-09). 3D Printing of Physical Organ Models: Recent Developments and Challenges. Advanced Science (anhl.) 8 (17). s. 2101394. ISSN 2198-3844. PMC PMC8425903. PMID 34240580. doi:10.1002/advs.202101394. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 17. ISO 1328-1:2013. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification. Vylucheno z: <https://www.iso.org/ru/standard/45309.html>
 18. ISO 1328-2:2020. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification. Vylucheno z: <https://www.iso.org/ru/standard/70386.html> 4.HOST 1643-81. Основные нормы взаимоотношения.

Peredachy zubchatye tsylindrycheskye. Dopusky. Vylucheno z: https://dnaop.com/html/68684/doc-%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_1643-81

Поступила (received) 10.10.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

Заковоротний Олександр Юрійович (Zakovorotniy Alexander Yuryevich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальна техніка та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-3271; e-mail: arcade@i.ua; ORCID: 0000-0003-4415-838X

Набока Олена Володимирівна (Naboka Olena Volodimirivna) – кандидат технічних наук, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38050-98-65-027, e-mail: namirauza@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3997-5481

Главчева Юлія Миколаївна (Hlavcheva Yuliia) – PhD, директор науково-технічної бібліотеки; Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; вул. Кирпичова, 2, Україна, e-mail: yuliia.hlavcheva@khpri.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7991-5411>

Євсюкова Фатима Магометбіївна (Yevsiukova Fatyma) – доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru; ORCID: 0000-0002-9764-4106