УДК 621.941.01:519.87

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ ФОРМИ ЗАГОТОВКИ НА ЯКІСТЬ ТОЧІННЯ ДЕТАЛЕЙ

Я. Колісніченко, група ГМ-24М-3
О. Лисенко, кандидат технічних наук, доцент
Центральноукраїнський національний технічний університет

Сучасне машинобудівне виробництво дедалі частіше функціонує в умовах дрібносерійного та серійного випуску продукції, що потребує високої гнучкості технологічних процесів, скорочення часу технологічної підготовки виробництва та одночасного забезпечення стабільної якості деталей. Особливої актуальності набуває завдання досягнення необхідної точності геометричної форми, розмірної стабільності та заданої шорсткості поверхні при збереженні високої продуктивності токарної обробки.

У реальних виробничих умовах якість обробленої поверхні формується під дією комплексу факторів, серед яких важливе місце займають похибки, що виникають на попередніх стадіях технологічного процесу [1, 2]. Частина цих похибок не усувається повністю під час наступних операцій, а певною мірою переноситься на готову деталь. Таке явище відоме як технологічна спадковість.

Технологічна спадковість у машинобудуванні проявляється у збереженні або трансформації властивостей заготовки, отриманих на попередніх операціях, під час подальшої механічної обробки. Її носіями можуть бути геометричні відхилення форми, залишкові напруження, неоднорідність структури матеріалу, стан поверхневого шару, хвилястість, шорсткість, твердість, а також похибки базування та закріплення заготовки. Саме ці параметри впливають на поведінку заготовки в процесі різання та можуть визначати фактичну якість готової деталі.

Особливо помітним є вплив технологічної спадковості при точінні, коли початкові відхилення форми заготовки, похибки її встановлення або нерівномірність жорсткості технологічної оброблювальної системи можуть спричиняти появу бочкуватості, конусності, овальності, ексцентриситету чи інших відхилень форми обробленої поверхні. Унаслідок цього навіть за формально правильно призначених режимів різання фактична якість деталі може не відповідати заданим технічним вимогам.

Проблема технологічної спадковості розглядалася у багатьох працях, зокрема у роботах, присвячених керуванню якістю обробки [3, 4], точності формоутворення [5] та жорсткості технологічних систем [6, 7]. Однак у сучасних умовах розвитку обробних центрів, автоматизованого проєктування технологічних операцій і цифрового моделювання виникає потреба в удосконаленні методів прогнозування впливу спадкових похибок на результат точіння. Це дозволяє ще на етапі технологічної підготовки виробництва обирати такі режими різання та схеми установлення заготовки, які мінімізують негативний вплив попередніх операцій на якість готової деталі.

Запропонований підхід до прогнозування технологічної спадковості форми деталі у поперечному перерізі залежно від поздовжньої координати заготовки, що дає змогу оцінювати характер зміни похибок уздовж оброблюваної поверхні. Урахування динамічних властивостей технологічної системи та можливість їх коригування за допомогою компенсуючих пристроїв створюють передумови для підвищення точності обробки та зниження негативного впливу спадкових похибок.

Матеріали останніх робіт у напрямку забезпечення точності обробки підтверджують актуальність використання математичного моделювання, цифрових двійників, адаптивного прогнозування та інтелектуальної оптимізації параметрів обробки для керування якістю

поверхні, прогнозування шорсткості, геометричних похибок і стабілізації процесів механічної обробки [8-10]. Це дає підстави розглядати моделювання технологічної спадковості як перспективний напрям удосконалення технологічної підготовки виробництва, оскільки воно дозволяє ще на етапі проєктування операції точіння обирати раціональні режими різання, схему установлення заготовки та умови обробки, які забезпечують необхідну точність і якість деталей машин.

Під час точіння технологічна спадковість проявляється передусім у тому, що початкові похибки форми заготовки можуть частково копіюватися на оброблену поверхню. Наприклад, овальність, ексцентриситет, конусність або хвилястість заготовки за певних умов можуть трансформуватися у відповідні або споріднені відхилення форми готової деталі. Характер такого копіювання залежить від жорсткості технологічної системи, способу встановлення заготовки, величини припуску, сил різання та режимів обробки.

Важливим чинником є те, що технологічна оброблювальна система «верстат → пристрій → інструмент → заготовка» не є абсолютно жорсткою. Під дією сил різання її елементи зазнають пружних переміщень, які змінюють фактичне положення інструменту відносно оброблюваної поверхні. У результаті цього виникають відхилення від заданої геометрії деталі. Якщо жорсткість системи змінюється вздовж довжини заготовки або залежить від її кутового положення, то похибки формоутворення набувають складного просторового характеру.

Показовим прикладом технологічної спадковості є обробка заготовок, установлених у центрах. Якщо на поверхнях центрових отворів наявна хвилястість, то під дією сталої сили різання жорсткість системи «заготовка – центри» періодично змінюється. Внаслідок цього змінюється і величина пружного переміщення заготовки. На обробленій поверхні можуть утворюватися хвилеподібні відхилення, кількість яких відповідає кількості хвиль на технологічних базах. Таким чином, похибки базових поверхонь можуть передаватися на робочу поверхню деталі.

Для прогнозування таких явищ доцільно використовувати математичні та комп’ютерні моделі, які враховують динамічні властивості технологічної оброблювальної системи. У межах дослідження пропонується застосування тримасової динамічної моделі, замкненої через процес різання. Така модель дозволяє враховувати взаємодію основних елементів технологічної системи, зміну її частотних характеристик і вплив цих змін на формування обробленої поверхні.

Особлива увага приділяється визначенню технологічної спадковості форми деталі у поперечному перерізі як функції поздовжньої координати заготовки. Це дає змогу оцінити не лише локальні відхилення форми, а й характер їх зміни вздовж усієї довжини оброблюваної поверхні. Такий підхід є важливим для прогнозування появи бочкуватості, конусності, хвилястості та інших відхилень, які можуть виникати залежно від схеми закріплення та режимів точіння.

Моделювання дозволить встановити, як спосіб установлення заготовки впливає на характер формоутворення. Наприклад, при встановленні заготовки в патроні та задньому центрі можливе формування бочкуватості, тоді як при встановленні лише в патроні більш імовірною є поява конусності. При цьому величина і характер відхилень залежать не тільки від геометричних параметрів заготовки, але й від режимів різання, зокрема швидкості різання, подачі та глибини різання.

Важливою перевагою запропонованого підходу є можливість переходу від констатації вже наявних похибок до їх попереднього прогнозування. Це особливо актуально для деталей відповідального призначення, де навіть незначні відхилення форми можуть впливати на працездатність вузла, зносостійкість поверхонь і стабільність експлуатаційних характеристик. Використання моделювання дає змогу оцінити декілька варіантів технологічного процесу без проведення значної кількості пробних обробок. У результаті створюються умови для більш обґрунтованого вибору режимів різання, схеми базування та параметрів налагодження

верстата.

Використання моделювання дозволить не лише виявляти можливі похибки обробки, а й прогнозувати їх ще до виконання реальної технологічної операції. Це створює передумови для вибору раціональних режимів різання, оптимізації схеми установлення заготовки та зниження негативного впливу технологічної спадковості на якість готової деталі.

Висновки. Технологічна спадковість є одним із важливих чинників, що впливає на якість токарної обробки деталей, оскільки похибки, сформовані на попередніх етапах виготовлення заготовки, можуть частково передаватися на оброблену поверхню. Найбільш характерними проявами такого впливу є виникнення конусності, бочкуватості, овальності, хвилястості та інших відхилень геометричної форми.

Урахування технологічної спадковості на етапі проєктування операції точіння дозволяє більш обґрунтовано призначати режими різання та схему встановлення заготовки. Застосування статичних і динамічних моделей технологічної оброблювальної системи створює можливість прогнозувати характер похибок формоутворення ще до початку реальної обробки.

Запропонований підхід до моделювання впливу технологічної спадковості може бути використаний для розроблення програмних засобів підтримки технологічної підготовки виробництва. Це сприятиме підвищенню точності та стабільності токарної обробки, зменшенню виробничих втрат і забезпеченню необхідної якості деталей машин в умовах сучасного гнучкого машинобудівного виробництва.

Список літератури

1. Петраков, Ю. В. Прогнозування технологічної спадковості при токарній обробці / Ю. В. Петраков, О. В. Лисенко // Машинобудування очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : тези доповідей Другої всеукраїн. молодіжної наук.-техн. конф., м. Суми, 30 жовт. – 2 лист. 2002 р. – Суми : СумДУ, 2002. – С. 62-64. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/16394.
2. Лисенко, О. В. Прогнозування технологічної спадковості при токарній обробці / О. В. Лисенко, Ю. В. Петраков // Вісник Сумського державного університету. Серія : Технічні науки (Машинобудування). Суми : СумДУ, 2003. - № 2(48). - С. 91-95. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/11292.
3. Петраков, Ю. В. Моделювання частотних характеристик технологічної оброблювальної системи токарного верстата / Ю. В. Петраков, О. В. Лисенко // Вестник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. - К. : НТУУ "КПИ", 2002. - № 43. - С. 79-83. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/11293.
4. Петраков, Ю. В. Моделювання динамічних характеристик процесу токарного точіння / Ю. В. Петраков, О. В. Лисенко // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград : КДТУ, 2002. - Вип. 11. - С. 257-263. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17774.
5. Петраков, Ю. В. Управління динамічними характеристиками технологічної оброблювальної системи при точінні / Ю. В. Петраков, О. В. Лисенко // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград : КДТУ, 2003. - Вип. 12. - С. 41-48. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/17773.
6. Лисенко, О. В. Розробка динамічної моделі технологічної оброблювальної системи точіння з урахуванням багатомасовості / О. В. Лисенко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук : КДПУ, 2008. - Вип. 6. Ч. 1. - С. 74-76. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/11290.
7. Лисенко, О. В. Динамічна модель технологічної оброблювальної системи точіння з урахуванням компенсуючого пристрою / О. В. Лисенко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ, 2011. - Вип. 24, ч. 2. - С. 131-136. URL: https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/1676.
8. Fu, X. Digital Twin-driven multi-scale characterization of machining quality: current status, challenges, and future perspectives / X. Fu, S. Li, H. Song, Y. Lu // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2025. – Vol. 93. – Article 102902. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102902.
9. Seid Ahmed, Y. Adaptive digital twin for product surface quality: supervisory controller for surface roughness control / Y. Seid Ahmed, W. ElMaraghy, H. ElMaraghy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 135. – P. 2117-2130. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-024-14607-3.
10. Sumesh, C. S. Digital twin-enabled surface quality prediction and optimization in dry turning of Ti6Al4V using ANFIS and genetic algorithm / C. S. Sumesh, A. Ramesh // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – 2025. – Vol. 37. – Article 17. DOI: https://doi.org/10.1007/s44444-025-00030-w.