

ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТОЧІННЯ ХРОМОМОЛІБДЕНОВИХ СТАЛЕЙ НА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

Одним із ключових напрямів сучасної механічної обробки є підвищення якості поверхні деталей, що визначає їхню довговічність, надійність та експлуатаційні характеристики. Основними чинниками, які впливають на вибір режимів різання є матеріал заготовки, характеристики інструменту та вимоги до шорсткості обробленої поверхні. Водночас важливе значення має стан залишкових напружень у приповерхневому шарі, що формується під дією механічних і теплових навантажень у процесі різання.

Сучасні дослідження впливу режимів різання на показники шорсткості та залишкових напружень, мають односторонній характер, одні дослідження спрямовані на визначення оптимальних режимів різання, тоді як інші зосереджені на аналізі параметрів шорсткості поверхні. Поєднання цих підходів дає змогу одночасно вивчити взаємозв'язок між параметрами обробки, формування шорсткості поверхні та залишкових напружень, а також визначити найбільш ефективні параметри обробки, які забезпечують високу якість поверхні та сприятливий напружений стан у приповерхневому шарі.

Обробка загартованих хромомолібденових сталей потребує підвищеної міцності ріжучого інструменту та супроводжується вищими термічними й механічними навантаженнями, що ускладнює умови в зоні зсуву. Додатковий вплив спричиняє зміни мікроструктури матеріалу, особливо у приповерхневих шарах. Обробка сталі AISI 4140 потребує використання ріжучого інструмента, здатного витримувати температурно-механічні навантаження. Для таких умов зазвичай використовують полікристалічний кубічний нітрид бору (PCBN) або керамічні різці, що відзначаються високою зносостійкістю та хімічною стабільністю. Чисельне моделювання процесів механічної обробки є ефективним засобом їх аналізу та вдосконалення, зокрема використовується для передбачення розподілу залишкових напружень.

На шорсткість обробленої поверхні впливають різні чинники. Чинники, які пов'язані з геометричними параметрами процесу різання, чинники, які зумовлені пружною та пластичною деформацією оброблювального матеріалу та чинники, які пов'язані з виникненням вібрацій ріжучого інструменту.

Автори [1] визначили залежність шорсткості поверхні від режимів різання при обточуванні сталі 38ХМ. Встановлено, що суттєво на шорсткість поверхні впливають подача та швидкість різання, глибина різання чинить незначний вплив на шорсткість поверхні. Доведена доцільність обточування деталей зі сталі 38ХМ на малих глибинах різання, на малих подачах та великих швидкостях різання.

Більш глибоке дослідження шорсткості поверхні проводиться авторами [2] за допомогою аналізу кривої площі контакту (bearing area curve analysis (BAC)). Крім того, для вирішення багатоцільових задач використовується алгоритм генетичної оптимізації з несумісним сортуванням (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm - NSGA-II) на основі прогнозних моделей штучних нейронних мереж (Artificial Neural Networks (ANN.)) Прогнозування вихідних реакцій значно покращується при застосуванні техніки штучних нейронних мереж у порівнянні з регресійним моделюванням. Фактично було встановлено, що більшість відсоткових похибок між прогнозованими значеннями штучних нейронних мереж та значеннями підтверджувального тесту становлять менше 7%.

Прогнозування шорсткості поверхні з використанням накопичених знань дає змогу одночасно скоротити час виконання технологічного процесу та покращити його якість. Основою такого підходу є детальне розуміння фізичних явищ і їх точне моделювання за допомогою аналітичних або чисельних методів.

Стан залишкових напружень у приповерхневому шарі є ключовим фактором цілісності поверхні. Він суттєво впливає на механічні властивості компонентів, зокрема на їхню втомну міцність, зносостійкість та стійкість до корозії. Формування залишкових напружень відбувається під дією механічних та теплових процесів під час різання, що є важливою задачею сучасного інженерного виробництва для підвищення надійності та експлуатаційних властивостей деталей. Залишкові напруження можуть мати як позитивний так і негативний вплив на експлуатаційні властивості деталей, залежно від характеру – стискувального чи розтягувального.

У сучасній промисловості формування стискувальних залишкових напружень набуває особливого значення, та широко застосовуються як інструмент проєктування для підвищення втомної довговічності деталей та поліпшення їх стійкості до механічних пошкоджень. Деталі, які піддаються розтягувальним статичним або динамічним навантаженням, схильні до виникнення тріщин.

Автори [3] досліджували покращення залишкових напружень і приповерхневих властивостей сталі AISI 4140, яка широко використовується в автомобільній та аерокосмічній промисловості. Зразки спочатку піддавалися точінню, після чого глибокому холодному накочуванню з різними параметрами процесу. Дослідження було спрямоване на вивчення впливу параметрів процесу на покращення поверхні та термін служби сталі AISI 4140 після точіння з глибоким холодним накочуванням (TADCR - Turn-Assisted Deep Cold Rolling) у програмному середовищі ANSYS LS-DYNA для аналізу розподілу залишкових напружень за різних режимів обробки. Підтверджувальні експерименти з оптимальними параметрами показали, що відхилення між прогнозованими та експериментальними значеннями становить близько 5%.

Чисельне моделювання є ефективним інструментом для відтворення процесу точіння в цифровому середовищі, що дозволяє прогнозувати характеристики обробленої поверхні без проведення великої кількості фізичних експериментів. Це забезпечує можливість оцінки впливу різних факторів, таких як режим різання, геометрія інструменту, властивості матеріалу на якість обробленої поверхні.

У своїй роботі автори [4] розробили багатомасштабну модель симуляції пластичності матеріалу для прогнозування деформаційної поведінки сталі AISI 4140 за різних умов високоефективного різання. Розроблена модель побудована шляхом поєднання тривимірної моделі дискретної динаміки дислокацій (3D-DDD) із методом скінченних елементів (FEM) через оптимізацію конститутивного рівняння, заснованого на густині дислокацій (DDB), реалізованого як користувацька підпрограма в ABAQUS. Результати симуляції показали, що запропонована багатомасштабна модель не лише точно прогнозує напруження, деформації, силу різання та температуру, подібно до класичних FEM-розрахунків, але й відображає мікроструктурні характеристики, такі як розмір зерен і розподіл густини дислокацій за заданих умов різання.

Особливо перспективними є використання гібридних моделей, що поєднують метод скінченних елементів із штучними нейронними мережами (ANN), оскільки такий підхід дозволяє моделювати складні нелінійні взаємозв'язки між параметрами процесу точіння, більш точно прогнозувати якість обробленої поверхні і передбачати можливі дефекти. Це значно економить час та ресурси, дозволяє проводити тестування різних режимів різання, а також оптимізувати параметри обробки для досягнення заданих характеристик поверхні з високою надійністю.

У своєму дослідженні автори [5] описали вдосконалення моделей шорсткості поверхні при обробці легованих сталей (AISI 4140) з використанням покритих ріжучих інструментів за різних сухих умов. Рівняння прогнозу другого порядку було розроблене за допомогою повнофакторного плану експерименту та порівняне з підходом штучної нейронної мережі (ANN) за показниками RMSE, R^2 та PE. Експериментальні результати показали, що якість обробки поверхні покращується зі зменшенням подачі, але погіршується зі збільшенням радіуса носика інструмента. Аналіз дисперсії показав, що як подача, так і радіус носика інструмента суттєво впливають на шорсткість поверхні, тоді як інші фактори є незначущими. Крім того, на етапі тестування випадково обрана штучна нейронна мережа показала трохи кращу здатність до прогнозування порівняно з MQR (Multiquadratic Regression), оскільки середні помилки становили 2,21% та 2,73% для штучної нейронної мережі та MQR відповідно. Значення RMSE становили приблизно 0,046 для штучної нейронної мережі і 0,063 для MQR. Обидва методи можуть ефективно використовуватися для прогнозування у будь-яких видах обробки в промисловості завдяки високій точності результатів.

Моделювання на основі штучних нейронних мереж є перспективним інструментом для прогнозування параметрів шорсткості при точінні сталі AISI 4140. Це забезпечує точні результати, адаптивність моделі до змін параметрів і її застосування в системах адаптивного керування обробкою. Поєднання методу скінченних елементів (FEM) із нейронними мережами (ANN) дозволяє точніше передбачити характеристики обробленої поверхні то оптимізувати режими різання для досягнення потрібних експлуатаційних властивостей.

Комплексний аналіз взаємозв'язку режимів різання, шорсткості та залишкових напружень дає змогу визначити оптимальні параметри обробки, що забезпечують високу якість поверхні та сприятливий напружений стан у приповерхневому шарі. Чисельне моделювання у поєднанні з сучасними методами обробки та аналізу даних відкриває перспективи для підвищення продуктивності, економічності та якості обробки хромомолібденових сталей, забезпечуючи більш надійне виробництво високоточних деталей.

Список літератури:

1. Яровий Ю., Фролов В., Сапон С., Ісаєнко І. Дослідження шорсткості поверхні при обточуванні хромомолібденової сталі. Технічні науки та технології, № 1(35), 2024, с. 90–98. DOI: [10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-90-98](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-90-98)
2. Meddour I., Yallese M.F., Bensouilah H., Khellaf A., Mohamed E. Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 97, no. 5-8, pp. 1931–1949. DOI: [10.1007/s00170-018-2026-6](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2026-6)
3. Prabhu P. R., Kulkarni S. M., Sharma S. Multi-response optimization of the turn-assisted deep cold rolling process parameters for enhanced surface characteristics and residual stress of AISI 4140 steel shafts. Journal of Materials Research and Technology. vol. 9, no. 5, 2020, pp. 11402–11423. DOI: [10.1016/j.jmrt.2020.08.025](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.025)
4. Bai J., Tong Z. A novel multiscale material plasticity simulation model for high-performance cutting AISI 4140 steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 116, no. 11-12, 2021, pp. 3891–3904. DOI: [10.1007/s00170-021-07643-w](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07643-w)
5. Şahin Y., Kocabağ A. C., Yalçınkaya S. Prediction of Surface Finish Model in Cutting AISI 4140 Steel with Different Approaches. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer, 2022, pp. 303–318. DOI: [10.1007/978-981-16-8810-2_22](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8810-2_22)