

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАЄМОДІЇ ІНСТРУМЕНТУ З ОБРОБЛЮВАНИМ МАТЕРІАЛОМ В ПРОЦЕСІ ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ

В наш час широкого застосування у багатьох критичних галузях (авіакосмічна, медична, енергетична, харчова та ін.) отримали аустенітні сталі. Вони набули свою популярність через високу корозійну стійкість, міцність та високі експлуатаційні характеристики. З іншого боку, їм притаманна складність лезової обробки: висока в'язкість, низька теплопровідність, інтенсивне наклепування поверхневого шару, що призводить до швидкого зносу інструменту. Дуже важливим є необхідність точного прогнозування характеристик взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом для оптимізації режимів різання, зменшення браку та підвищення продуктивності [1].

Мета: Систематизація, аналіз та критична оцінка сучасних наукових публікацій, присвячених моделюванню та прогнозуванню параметрів взаємодії інструменту та матеріалу.

Завдання: Виявити найбільш ефективні методи прогнозування та ідентифікувати невирішені проблеми у дослідницькій сфері. Знос інструменту та характеристики контактної взаємодії між інструментом та оброблюваним матеріалом є однією з найпоширеніших та широко використовуваних характеристик для оцінки ефективності різання матеріалів [3, 4].

Аналіз існуючих моделей прогнозування. Прогнозування сил різання (F_x , F_y , F_z): *емпіричні, аналітичні та механістичні моделі.* Емпіричні моделі будуються на основі експериментальних даних і описують залежність сили різання від геометричних і режимних параметрів (подачі, глибини різання, швидкості різання тощо). Класичним прикладом є рівняння Кроненберга, яке встановлює зв'язок між силою різання та питомими силами для конкретного матеріалу:

$$F_c = K_c a^m f^n \quad (1)$$

де K_c – питомий коефіцієнт різання, a – глибина різання, f – подача, m , n – експериментальні показники ступеня [2]. Такі моделі прості у використанні, широко застосовувалися для вуглецевих та низьколегованих сталей, проте їх точність обмежується умовами, у яких вони були отримані і не завжди коректно описує поведінку в'язких або високолегованих матеріалів, через їхню підвищену пластичність і схильність до наклепу, зокрема *аустенітних сталей*. [5] *Аналітичні моделі*, навпаки, базуються на механіці різання та враховують геометрію інструменту, умови тертя і зсуву, а також деформаційні характеристики матеріалу. До найвідоміших відносяться моделі *Мерчанта* та *Штебера*, які описують рівновагу сил у зоні різання з використанням кутів різання, зсуву та тертя [1]. Перевагою аналітичних моделей є фізична інтерпретованість параметрів, що дозволяє здійснювати попереднє прогнозування сил різання без проведення повного комплексу експериментів. Проте для матеріалів із нелінійними конститутивними властивостями (як аустенітні сталі) необхідно враховувати додаткові чинники — наприклад, залежність напруження від швидкості деформації і температури, що часто виходить за межі класичних підходів. *Механістичні моделі*, що враховують геометрію інструменту, кути різання та зсуву, забезпечують кращу узгодженість із експериментальними даними. Такі підходи дозволяють враховувати локальні варіації кута навантаження та зміни умов тертя в зоні контакту. Вони є проміжною ланкою між аналітичними та емпіричними підходами до прогнозування сил різання та поєднують експериментальні дані з аналітичними виразами, що базуються на геометрії інструменту та кінематиці процесу, дозволяючи з достатньою точністю оцінювати сили F_x , F_y , F_z , широкому діапазоні режимів [6].

Основною ідеєю механістичного підходу є *поділ сили різання на елементарні складові*, що діють у мікронах контакту стружки з різальною кромкою. Сили визначаються інтегруванням локальних питомих навантажень по довжині різальної кромки:

$$F_i = \int_{A_c} K_i(h_c, v_c, \theta) dA, \quad (2)$$

де – K_i питомі коефіцієнти сил (для напрямів x, y, z), що залежать від товщини стружки h_c , швидкості різання v_c та кута нахилу кромки θ , A_c – контактна площа стружкоутворення. Перевагою механістичних моделей є можливість врахування геометрії інструменту, зокрема радіуса заокруглення, кута нахилу та реальної довжини контакту. Крім того, моделі цього типу дозволяють оновлювати параметри під час зносу інструменту, що забезпечує динамічне прогнозування сил різання під час тривалих операцій [6]. Однак, основним обмеженням є їх залежність від калібрувальних експериментів, без яких параметри K_i не можуть бути точно визначені. Для нових матеріалів (зокрема аустенітних сталей) часто необхідне окреме калібрування. Додатковою проблемою є те, що більшість реалізацій механістичних моделей ґрунтуються на припущенні про сталість коефіцієнтів тертя та зсуву, що не відповідає реальним умовам високошвидкісної обробки. Це призводить до систематичної похибки у прогнозуванні складової F_y (радіальної сили), особливо при малих кутах нахилу кромки.

Для підвищення точності впроваджують *гібридні механістичні моделі*, що поєднують підхід локальних питомих сил із даними чисельного моделювання (FEM). Це дозволяє скоригувати коефіцієнти K_i на основі термомеханічного стану матеріалу, забезпечуючи кращу узгодженість із експериментом (до $\pm 5\%$) навіть при моделюванні складних нержавіючих сталей типу AISI 316 [3]. Використання *Методів III (AI/ML)*: Сучасні дослідження показують ефективність використання штучних нейронних мереж (ANN) та методів опорних векторів (SVM) для прогнозування складових сили різання на основі вхідних параметрів [3, 4].

Моделювання температурного поля та теплових потоків Метод скінченних елементів (FEM) активно застосовується для аналізу температурного поля. Використання програмних комплексів ABAQUS, DEFORM .AdvantEdge дозволяє змоделювати розподіл температури в зоні контакту інструмент–деталь [4]. Однак точність результатів суттєво залежить від адекватності конститутивних рівнянь, що описують поведінку матеріалу. Модель Джонсона–Кука є стандартом, проте її параметри часто не відображають реальну поведінку аустенітних сталей при високих температурах та швидкостях деформації [5]. По-перше, модель Джонсона–Кука базується на емпіричних коефіцієнтах, визначених із випробувань на розтяг або стиснення, що не завжди адекватно відображає реальні умови різання, де швидкість деформації може перевищувати 10^4 s^{-1} , а локальний нагрів у зоні зсуву – досягати 800–1000 °C. Це призводить до недооцінки термомеханічного пом'якшення матеріалу та похибок у розрахунках сил різання F_x , F_y , F_z [3]. По-друге, модель не враховує динамічні ефекти фазових перетворень і структурні зміни, що характерні для аустенітних сталей типу 304 та 316 під час високошвидкісної обробки. Внаслідок цього виникає розбіжність між експериментальними та розрахунковими результатами. [3]. Для більш точного прогнозування поведінки аустенітних сталей доцільно застосовувати модифіковані варіанти моделі J–C (наприклад, J–C з температурно-залежним модулем або енергетичними поправками), або альтернативні підходи, такі як моделі Зерафіна–Аргонна чи Войновського–Кутона, які краще враховують дислокаційні механізми пластичності [4, 5].

Прогнозування Зносу Інструменту (Tool Wear) Більшість досліджень, проведених щодо зносу ріжучого інструменту, можна тематично розділити на експериментальні дослідження механізму зносу або його фізичного моделювання, моделювання зносу інструменту, головним чином з метою його прогнозування, та прогнозування зносу з використанням відносно нових методів, таких як застосування штучного інтелекту, машинного навчання тощо [1]. Моделі зносу поділяються на *фізичні*, що базуються на механізмах перенесення матеріалу (адгезійний, абразивний, дифузійний), та *феноменологічні*, що встановлюють емпіричну залежність між зносом і технологічними параметрами [3]. *Виявлені Прогалини (Gaps)*: Брак інтегрованих моделей, які одночасно і в *реальному часі* враховують сили, температуру, мікроструктурні зміни (наклепування) та знос інструменту. Недостатність універсальних конститутивних моделей, які точно описують поведінку аустенітних сталей при високих швидкостях зсуву та температурах. Обмежене застосування гібридних (механістичних з AI-корекцією) моделей.

Висновки: FEM-моделювання залишається найточнішим методом для оцінки температурного поля. AI/ML-моделі демонструють високу точність у прогнозуванні сил різання при коректному налаштуванні навчальних даних. Відсутність інтегрованих моделей, що одночасно враховують сили, температуру, знос та мікроструктурні зміни у реальному часі. Недостатня кількість універсальних конститутивних моделей для аустенітних сталей при високих температурах і швидкостях деформації. Обмежене використання гібридних моделей, які поєднують механістичний підхід із корекцією на основі AI/ML. *Напрямки майбутніх досліджень*: Розробка гібридних прогностичних моделей для визначення контактних характеристик процесу лезової обробки аустенітних сталей. Створення нових критеріїв оптимізації процесу різання, орієнтованих на мінімізацію наклепування та максимізацію стійкості інструменту.

Список літератури:

1. Storchak M, Melnyk O, Stepchyn Y, Shyshkova O, Golubovskiy A, Vozniy O. Effect of friction model type on tool wear prediction in machining. *Machines*. 2025;13(10):904. doi:10.3390/machines13100904
2. Abouridouane M, Bergs T, Schraknepper D, Wirtz G. Friction behavior in metal cutting: modeling and simulation. *Procedia CIRP*. 2021;102:405-410.
3. Umbrello D, Ambrosio D, Filice L, Micari F. Finite element simulation of machining of AISI 316L austenitic stainless steel. *CIRP Ann Manuf Technol*. 2007;56(1):61-64.
4. Lin ZC, Chen JH. A modified Johnson–Cook material model for high strain rate deformation of metals. *J Mater Process Technol*. 2002;122(2-3):273-283.
5. Voyiadjis GZ, Abed FH. Microstructural based models for BCC and FCC metals with temperature and strain rate dependency. *Mech Mater*. 2005;37(4):355-378.
6. Altintas Y, Lee P. A general mechanics and dynamics model for helical end mills. *Ann CIRP*. 1996;45(1):59-64.