УДК 621.791.92

Лавріненко В.І., докт. техн. наук, професор
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, lavrinen52@gmail.com
Солод В.Ю., канд. техн. наук, доцент
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, v_solod@ukr.net

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У ЗАСТОСУВАННІ «СКРИНЬОК РІЗНОГО КОЛЬОРУ» ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Актуальним питанням залишається напрямок підвищення точності прогнозування зносу різального інструменту та збільшення його адекватності. Нас, в даному випадку зацікавили основні напрямки досліджень, якими опікуються сучасні дослідники, які є у наукових публікаціях за 2025–2026 р.р.

Титанові сплави широко застосовуються у аерокосмічній, медичній і автомобільній промисловості завдяки своїй високій міцності і корозійній стійкості. Але обробка титана спряжена із значними труднощами, що включають високі механічні навантаження, надмірне тепловиділення і, відтак, підвищений знос інструмента [1]. Традиційні методи моніторингу для прогнозування зносу інструмента, такі як періодичні перевірки і простий аналіз порогових значень, часто неефективні і трудоємні. Штучний інтелект став потужним інструментом для виявлення складних моделей зносу, що дозволяє точно прогнозувати термін служби інструмента і оптимальний час його заміни. Але моделі штучного інтелекту часто застосовуються як моделі «чорної скриньки» і, відтак, не мають інтерпретованості. На відміну від них, моделі «білої скриньки», основані тільки на фізичних принципах, часто не здатні уловити складну динаміку зносу. Моделі «сірої скриньки» сполучають обидва підходи, інтегруючи знання предметної області з алгоритмами машинного навчання для підвищення точності і надійності прогнозування [1]. Особлива перевага даного дослідження полягає в тому, що набір даних охоплює повну криву зносу, включаючи фазу прогресуючого зносу, а не тільки до зазвичай застосованої граничної межі зносу в 0,3 мм. Це дозволяє навчати і оцінювати модель на всіх стадіях зносу інструмента. Але її не можна порівнювати із іншими сучасними підходами до прогнозування зносу інструмента, оскільки зазвичай не визначається уся крива даних [1].

В дослідженні [2] представлений інший інноваційний підхід, що сполучає чисельне моделювання з експериментальними даними для підвищення точності прогнозування зносу інструмента. Застосовується гібридна стратегія моделювання, що інтегрує фізично обґрунтований метод скінченних елементів з методами машинного навчання, основаними на даних. Були проведені експерименти по визначенню ресурсу інструмента при токарній обробці, і розроблена залежна від стану зносу інструмента модель скінчених елементів, а також модель регресії екстремального градієнтного посилення на основі акустичної емісії. Сили різання, розраховані за допомогою моделі скінченних елементів, були інтегровані в модель машинного навчання для підвищення точності прогнозування. Результати свідчать [2], що включення даних моделювання процесу значно поліпшує можливості і точність прогнозування зносу у порівнянні з моделями, основаними виключно на даних. Це демонструє потенціал гібридних підходів до моделювання, так званих «сірих скриньок», для подолання розриву між розумінням фізичного процесу і прогнозами машинного навчання, мінімізуючи необхідність збору великих об'ємів експериментальних даних.

PVD-покриття з високою зносостійкістю зазвичай застосовуються для захисту різальних інструментів від зносу при високих термомеханічних навантаженнях в процесі різання. В дослідженні [3] вивчався вплив двох вмістів кобальту у WC/Co твердосплавних підкладках і товщини міжшарового шару в системі покриття TiAlCrN на знос інструмента і термомеханічне навантаження. Встановлено, що товщина міжшарового простору PVD-покриттів спричиняє лише незначний вплив на знос інструмента в експериментах по

різанню. Більш високий вміст кобальту в твердосплавних інструментах призводить до більшого зносу інструмента. Моделювання показує, що напруження в інструменті є вищими із збільшенням вмісту кобальту. Вміст кобальту впливає на опір пластичній деформації. Результати моделювання узгоджуються з результатами експериментів по токарній обробці і будуть застосовані у подальших дослідженнях у якості моделі «білої скриньки» (моделювання методом скінченних елементів) і у рамках підходу «сірої скриньки» (модель, що сполучає моделювання методом скінченних елементів і метод машинного навчання на основі даних).

PVD-покриття розглядалося і в статті [4]. Однак точне прогнозування терміну служби інструмента залишається складною задачею, оскільки тонкі шари потребують дуже дрібної сітки, механізми зносу покриття є складними, а межа поділу покриття-підкладка створює складні теплові і механічні граничні умови. Традиційні моделі «білої скриньки» часто нехтують ефектами покриття через спрощені припущення, в той час як моделі «чорної скриньки» відображають складність, але не мають фізичної інтерпретованості. Підходи «сірої скриньки» пропонують багатообіцяючий компроміс, але потребують докладних даних, що залежать від покриття та навантаження. В цьому дослідженні розроблена скінченно-елементна модель для прогнозування термомеханічного навантаження в процесі обробки твердосплавних інструментів з PVD-покриттям. Модель «білої скриньки» підтримує великі експериментальні випробування, зазвичай необхідні для створення таблиць термомеханічних навантажень для прогнозування терміну служби інструмента за допомогою моделі «сірої скриньки». Багатошарове покриття TiAlCrSiN і двошарове покриття TiAlCrSiN/TiAlCrSiON – комерційно доступні і репрезентативні для промислового застосування у якості теплозахисного шару – були протестовані при ортогональній різці сталі C45+N. Сили різання і температура інструмента вимірювалися за допомогою динамометра і вбудованого двокольорового пірометра для перевірки моделі. Модель відтворює сили і температури з відхиленнями менше 10 % і показує, що знос інструмента сильно впливає на локальний розподіл термомеханічного навантаження, в той час як глобальні навантаження залишаються схожими для обох покриттів. Характеристика тертя виявляє трибологічну перевагу двошарового покриття, яка полягала у зниженні тертя на межі поділу і більш гладеньких поверхнях. Високоточні поля напружень і температур корелюються з властивостями покриття для поліпшення моделювання зносу і надання структурованих вхідних даних для подальшої розробки моделей типу «сіра скринька».

Тобто, основні сучасні напрацювання по підвищенню точності прогнозування зносу різального інструменту переважно полягають у гібридних підходах до моделювання у вигляді так званих «сірих скриньок».

Список посилань

1. Tool wear prediction for coated cutting inserts during milling of Ti-6Al-4V using a grey box model / Laura Zinnel, Moritz Goeldner, Daniel Piendl, Yair Shneor, Michael F. Zaeh. *Wear*. Volumes 584–585, 15 January 2026, 206352.

2. A novel grey-box approach to tool wear prediction using machine learning and finite element methods / Maximilian Berndt, Hagen Schmidt, Lars Müller, Eberhard Kerscher, Jörg Seewig, Benjamin Kirsch. Wear. Volumes 582–583, 15 November 2025, 206330.

3. Influence of the interlayer and the substrate on the wear behavior of PVD tool coatings during turning of C60+N / Benjamin Bergmann, Berend Denkena, Nico Junge, Christian Kalscheuer, Kirsten Bobzin, Xiaoyang Liu. Wear. Volumes 584–585, 15 January 2026, 206396.

4. Development of a white-box model for predicting in-process thermo-mechanical loading on PVD-coated carbide tools / T. Bergs, M. Meurer, M. Abouridouane, K. Bobzin, C. Kalscheuer, M. Tayyab. Wear. Volume 586, 1 February 2026, 206458